

ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูดซับ
เฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์



นายณัฐ ดิลกเกียรติ

สภามหาวิทยาลัยบูรพา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

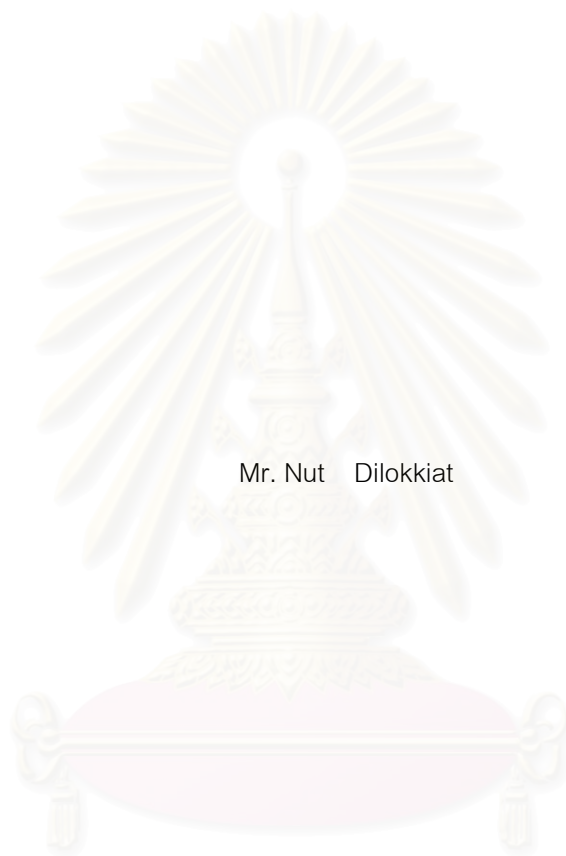
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4819-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORBENT PRODUCED BY BALL CLAY WITH COCONUT SHELL OR PALM SHELL
FOR HEXAVALENT CHROMIUM ADSORPTION
IN SYNTHETIC WASTEWATER



Mr. Nut Dilokkiat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-17-4819-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ตัวดุดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะหล่ำมะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อ
การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโคโรเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์
โดย นาย ณัฐ ดิลกเกียรติ
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

คณะกรรมการศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง ไฉ่ห้วงศ์วัฒน์)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ชาวเขียว)

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐ ดิลกเกียรติ : ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ADSORBENT PRODUCED BY BALL CLAY WITH COCONUT SHELL OR PALM SHELL FOR HEXAVALENT CHROMIUM ADSORPTION IN SYNTHETIC WASTEWATER) อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์, 136 หน้า. ISBN 974-17-4819-1

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยการผลิตตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว และดินดำผสมกะลาปาล์ม และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้โดยการแปรผันค่าพีเอช (pH) การชะโอออนด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี การหาประสิทธิภาพในคอลัมน์ดูดซับ และได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์กับตัวดูดซับที่ผลิตได้

ผลการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยการผลิตตัวดูดซับ โดยการแปรผันอุณหภูมิการเผา และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างดินดำต่อกะลามะพร้าว และดินดำต่อกะลาปาล์ม พบว่าตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดของตัวดูดซับแต่ละชนิด ในเงื่อนไขที่สามารถดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ดีที่สุดและมีความคงตัว คือตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างดินดำต่อกะลามะพร้าวที่ 20 ต่อ 80 และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์มที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างดินดำต่อกะลามะพร้าวที่ 10 ต่อ 90 ซึ่งผ่านการเผาแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยสามารถดูดซับ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ร้อยละ 99.02 และ 96.66 ตามลำดับ

ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดคือ เวลาสัมผัสน้ำ 4 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ซึ่งจากการทดลองไอโซเทอมที่สภาวะดังกล่าวโดยสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม เท่ากับ 11.08 และ 8.20 มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนทีโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ขณะที่ถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 47.40 มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนทีโครเมียม/กรัมถ่านกัมมันต์ การศึกษาการชะตัวดูดซับด้วยสารละลายกรดอ่อน และน้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมง พบว่าไม่สามารถชะโอออนโครเมียมออกมาได้ด้วยสารละลายกรดอ่อนและน้ำกลั่น

ในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว ที่พีเอช 3 ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ระดับความลึกของตัวดูดซับ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร พบว่าปริมาตรน้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวดูดซับที่จุดหมดสภาพคือ 485.5, 521.7 และ 664.3 เท่าของปริมาตรของคอลัมน์ ตามลำดับ

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

4370286021: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: ADSORPTION / HEXAVALENT CHROMIUM /

NUT DILOKKIAT: ADSORBENT PRODUCED BY BALL CLAY WITH COCONUT SHELL OR PALM SHELL FOR HEXAVALENT CHROMIUM ADSORPTION IN SYNTHETIC WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR THARES SRISATIT, Ph.D., 136 pp. ISBN 974-17-4819-1

The purpose of this research was to study factors in preparation adsorbent from ball clay mixed with coconut shell and palm shell, to study the properties of the adsorbent in adsorption of hexavalent chromium at different pH, regenerating ion by acid solution and distilled water, study physical feature and chemical feature, searching capacity of adsorbent column and comparing adsorbent behavior between activated carbon and adsorbent that was produced.

The resulting experiment was to study a process of adsorbent production by varying pyrolysis temperature and mixing ratio between ball clay and coconut shell, ball clay and palm shell. The experimental results demonstrated that the adsorbent which are proper for each kind of adsorbent under the condition that can be adsorbed hexavalent chromium and strong product are the weight ratio of ball clay to coconut shell 20:80 and ball clay to palm shell 10:90 pyrolysis temperature 800 °c for 30 minutes which adsorb hexavalent chromium at 99.02 and 96.66 respectively.

The experimental for study the efficiency of adsorbent show that the suitable adsorption condition of adsorbents are 4 hours at pH 3, isotherm by Langmiur equation, the maximum adsorption capacity of ball clay mixed with coconut shell adsorbent and ball clay mixed with palm shell at 11.08 and 8.20 mg of hexavalent chromium /g of adsorbent respectively. However the activated carbon show the maximum adsorption capacity at 47.40 mg of hexavalent chomium /g of activated carbon. The study of adsorbent regenerate with acid solution (pH 5) and distilled water at 24 hours show that chromium ion is unable to leach by the acid solution and distilled water.

In continuous experiment in column for study the efficiency of removal hexavalent chromium in synthetic wastewater of adsorbent from ball clay mixed with coconut shell at pH 3, concentration of hexavalent chromium at 10 mg/l at depth of adsorbent 30, 60 and 90 cm. The results indicated that the breakthrough volumes of each depth were 485.5, 521.7 and 664.3 bed volume respectively.

DepartmentEnvironmental Engineering Student's signature.....

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

Academic Year...2003.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือที่ดีจากหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้วยดีเสมอไป และได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งในการช่วยตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ตลอดจนความห่วงใย และกำลังใจที่ได้รับโดยสม่ำเสมอ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยง โล่ห้วงศ์วัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ชาวเขียว และ อาจารย์ ดร. มั่นสกร ราชอาณาจักร คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยให้คำชี้แนะ และตรวจสอบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่ ผู้วิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการติดต่อประสานงานด้านต่างๆ ตลอดช่วงระยะเวลาที่ได้เข้ารับการศึกษ

นักวิทยาศาสตร์จระประกาศา เนียมปาน และคุณเสรี ดอนเหนือ ซึ่งเป็นเจ้าหน้าที่ของคณะ วิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ ช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แลมปีโครเมียม และเครื่องอัดเม็ดอาหารกุ้ง

โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (ศูนย์เครือข่าย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ใน การวิจัย

บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัย

บริษัท เคลย์ แอนด์ มิเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างดินดำ

คุณวลัยพร ผอนผัน ที่ได้ช่วยให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจเสมอมาในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณชาญวิทย์ ทรัพย์สังข์ ที่ได้ช่วยในการเตรียมวัสดุ ดิบสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ และคุณรัตติกุล สงวนสุข สำหรับความเข้าใจและกำลังใจที่ดี

พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกครั้งเมื่อมีปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจใน การทำงาน ตลอดจนสนับสนุนด้านการเงินด้วยดีมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วง ไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	<u>หน้า</u>
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 เซรามิก.....	4
2.2 ดินเหนียว.....	5
2.2.1 ดินขาว.....	5
2.2.2 ดินเหนียว.....	9
2.2.3 ดินดำ.....	10
2.2.4 ดินเบนโทไนต์.....	12
2.2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของดิน.....	13
2.2.6 คุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจของเซรามิก.....	16
2.3 ถ่านกัมมันต์.....	19
2.3.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	19
2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	21
2.4 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ.....	22
2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	23
2.4.2 การดูดซับทางเคมี.....	23
2.4.3 สมดุลการดูดติดผิว.....	24
2.4.4 การวิเคราะห์ระบบดูดซับ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	<u>หน้า</u>
2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	29
2.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ.....	29
2.5.2 ความปั่นป่วน.....	29
2.5.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ....	29
2.5.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ.....	30
2.5.5 ค่าพีเอช.....	30
2.5.6 อุณหภูมิ.....	31
2.6 โลหะหนัก.....	31
2.6.1 โครเมียม.....	32
2.6.2 โครเมียมในสิ่งแวดล้อม.....	33
2.6.3 การแพร่กระจายและการเปลี่ยนแปลงรูปโครเมียมในแหล่งน้ำธรรมชาติ.....	34
2.7 กระบวนการต่างๆ ในการกำจัดโลหะหนัก.....	35
2.7.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี.....	35
2.7.2 โคแอกกูเลชัน, ฟลอคคูเลชัน.....	37
2.7.3 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	38
2.7.4 ออกซิเดชันและรีดักชัน.....	38
2.7.5 รีเวิร์สออสโมซิส.....	39
2.7.6 การระเหย.....	39
2.7.7 อิเล็กโตรไดอะไลซิส.....	39
2.7.8 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า.....	39
2.7.9 การดูดติดผิว.....	40
2.7.10 การบำบัดโดยจุลินทรีย์.....	41
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย.....	47
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	<u>หน้า</u>
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนทีโครเมียม.....	51
3.5 การดำเนินการวิจัย.....	52
3.5.1 การศึกษาองค์ประกอบของดินดำ.....	52
3.5.2 การเตรียมวัตถุดิบในการวิจัย.....	52
3.5.3 การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ.....	53
3.5.4 การศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ของตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	55
3.5.5 การศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนที โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	57
3.5.6 การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวา เลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	59
3.5.7 การศึกษาทดลองหาไอโซเทอมถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของ ตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	59
3.5.8 การศึกษาการชะไฮดรอนโครเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น.....	60
3.5.9 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ ผลิตได้ในถังดูดซับแบบคอลัมน์.....	61
3.5.10 การหาคุณลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวดูดซับที่ผลิต ได้ กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด.....	62
3.5.11 ประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	63
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	64
4.1 การศึกษาองค์ประกอบของดินดำ.....	64
4.2 การเตรียมวัตถุดิบในการวิจัย.....	65
4.3 การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ.....	69
4.3.1 การหาปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมเบื้องต้น โดยดูจากความคงตัวของ ตัวดูดซับ.....	69
4.3.2 การทดลองหาตัวอย่างที่มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนที โครเมียมสูงสุด.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	<u>หน้า</u>
4.4 การศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของ ตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	75
4.5 การศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของ ตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	76
4.6 การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนที โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	79
4.7 การศึกษาทดลองหาไอโซเทอมถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เพื่อ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ ผลิตได้.....	83
4.8 การศึกษาการชะไฮดรอนโครเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น.....	85
4.9 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิต ได้ในถังดูดซับแบบคอลัมน์.....	87
4.10 การหาคุณลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวดูดซับที่ผลิตได้ กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด.....	92
4.11 ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	103
รายการอ้างอิง	106
ภาคผนวก	110
ภาคผนวก ก. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคและมาตรฐานน้ำทิ้งจาก แหล่งกำเนิด ของหน่วยงานราชการต่างๆ	111
ภาคผนวก ข. ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	114
ภาคผนวก ค. การทดสอบหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94....	117
ภาคผนวก ง. บันทึกข้อมูลผลการทดลอง.....	122
ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer.....	130
ภาคผนวก ฉ. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zeta - Sizer.....	133
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	136

สารบัญตาราง

<u>ตาราง</u>	<u>หน้า</u>	
2.1	เปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีกับการดูดซับทางกายภาพ.....	24
2.2	การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	33
3.1	ตัวแปรกำหนดและพารามิเตอร์.....	50
3.2	ตัวแปรอิสระและพารามิเตอร์.....	51
4.1	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของดินดำที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-RAY Fluorescence spectrometer.....	64
4.2	ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม กะลามะพร้าว.....	80
4.3	ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลา ปาล์ม.....	80
4.4	ค่าความหนาแน่นของการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด.....	82
4.5	ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (F300).....	83
4.6	ค่าความหนาแน่นของการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด เปรียบเทียบกับของถ่านกัมมันต์ (F300).....	85
4.7	การชะไอออนโครเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดพีเอช 5 ของตัวดูดซับ ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว.....	86
4.8	การชะไอออนโครเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดพีเอช 5 ของตัวดูดซับ ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม.....	86
4.9	การคำนวณปริมาตรของชั้นตัวกลางที่ระดับความสูงต่าง ๆ.....	88
4.10	ผลการทดลองการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในคอลัมน์.....	91
4.11	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับทั้งสองชนิดกับถ่านกัม มันต์ (F300) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด.....	93

สารบัญรูป

<u>รูปที่</u>	<u>หน้า</u>	
2.1	ลักษณะการกระจายตัวของประจุบวกและลบบนอนุภาคดิน.....	17
2.2	รูปพหุชนิดต่างๆ ของเซรามิก.....	18
2.3	สมการ (2-2) ของ Langmuir.....	25
2.4	สมการ (2-3) ของ Langmuir.....	26
2.5	สมการ (2-4) ของ BET.....	27
2.6	สมการ (2-5) ของ BET.....	27
2.7	สมการ (2-7) ของ Freundlich.....	28
2.8	ความสามารถในการละลายน้ำของมลสารต่างๆ สำหรับพีเอชต่างๆ.....	31
2.9	กระบวนการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนรูปของโครเมียมในแหล่งน้ำธรรมชาติ	35
2.10	การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ของโลหะหนัก ชนิด ต่างๆ.....	37
3.1	ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์ โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	56
3.2	ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์ โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้.....	58
3.3	ระบบการทำงานของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง.....	62
4.1	ดินดำที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับ.....	65
4.2	กะลามะพร้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับ.....	66
4.3	กะลาปาล์มที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับ.....	66
4.4	กะลามะพร้าวที่ผ่านการเผาและล้างสารกระตุ้นออกแล้ว.....	67
4.5	กะลาปาล์มที่ผ่านการเผาและล้างสารกระตุ้นออกแล้ว.....	67
4.6	กะลามะพร้าวที่ได้จากการเตรียมก่อนนำไปผสมกับดินดำเพื่อขึ้นรูปเป็นตัวดูด ซับ.....	68
4.7	กะลาปาล์มที่ได้จากการเตรียมก่อนนำไปผสมกับดินดำเพื่อขึ้นรูปเป็นตัวดูด ซับ.....	68
4.8	ความชุ่มชื้นของน้ำกลั่นหลังเขย่ากับตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าว และอุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

<u>รูปที่</u>	<u>หน้า</u>
4.9 ความชุ่มชื้นของน้ำกลั่นหลังเขย่ากับตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์ม และอุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	70
4.10 การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าว และอุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	72
4.11 การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์ม และอุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	73
4.12 ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว 20:80 เผาที่ 800 องศาเซลเซียส.....	74
4.13 ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม 10:90 เผาที่ 800 องศาเซลเซียส	74
4.14 เวลาในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว	75
4.15 เวลาในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์ม.....	76
4.16 ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว.....	77
4.17 ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์ม.....	77
4.18 พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิด.....	78
4.19 ไอโซเทอมแบบ Langmuir ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวที่พีเอช 3.....	81
4.20 ไอโซเทอมแบบ Langmuir ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์มที่พีเอช 3.....	82
4.21 ไอโซเทอมแบบ Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด(F300) ที่พีเอช 3.....	84
4.22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองถึงดูดซับแบบคอลัมน์.....	89
4.23 ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมุดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 30.....	89

สารบัญรูป(ต่อ)

<u>รูปที่</u>		<u>หน้า</u>
4.24	ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 60.....	90
4.25	ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 90.....	90
4.26	ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 30, 60 และ 90 ซ.ม.....	91
4.27	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) กำลังขยาย 3000 เท่า ของ ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว.....	95
4.28	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) กำลังขยาย 3000 เท่า ของ ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม.....	96
4.29	%T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม กะลามะพร้าว.....	98
4.30	%T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม กะลาปาล์ม.....	98
4.31	%T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม กะลามะพร้าวที่ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม.....	99
4.32	%T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม กะลาปาล์มที่ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งที่เป็นปัญหาอย่างหนึ่งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นต้น ก็คือน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิต หรือการชะล้างผลิตภัณฑ์ โดยน้ำเสียดังกล่าวมักประกอบด้วยสารเคมีต่าง ๆ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อแหล่งน้ำ และยังเป็นโทษต่อมนุษย์อีกด้วย

โลหะหนักก็เป็นสารเคมีหนึ่งที่ตกค้างจากอุตสาหกรรม โดยเจือปนในน้ำทิ้งในรูปเกลืออนินทรีย์ซึ่งมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาท เป็นสารก่อมะเร็ง รวมทั้งก่อให้เกิดความผิดปกติในยีนอีกด้วย โดยวิธีการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้มีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งวิธีการดูดซับ มักจะมีการนำถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) มาใช้ดูดซับโลหะหนักในขั้นตอนการบำบัดขั้นสุดท้าย แม้ว่าในความเป็นจริงจะนิยมนำถ่านกัมมันต์ไปดูดซับสารอินทรีย์ มากกว่าสารอนินทรีย์ก็ตาม แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ซึ่งใช้เป็นวัสดุดูดซับที่มีราคาสูงและต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ

การวิจัยนี้เป็นการผลิตตัวดูดซับ โดยการนำกะลาปาล์มและกะลามะพร้าวที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาผสมกับดินดำ (Ball clay) ซึ่งเป็นดินที่หาได้ง่ายภายในประเทศ และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเซรามิก มาผ่านกระบวนการเผา จนได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัสดุเซรามิกที่มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ดี เช่น สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ มีความแข็งแรงทนทานสูง และสามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ โดยเมื่อหากนำตัวดูดซับที่ผลิตได้มาใช้ดูดซับไอออนของโลหะหนัก แล้วมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ หรือวัสดุดูดซับอื่น ๆ ก็จะเป็นการพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีต้นทุนการผลิตไม่สูง สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก และเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เป็นประโยชน์ เพื่อเป็นการลดปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศอีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นการพัฒนาไปสู่การผลิตตัวดูดซับ เพื่อใช้ดูดซับอนุภาคฝุ่นจากปล่องควัน (Porous ceramic adsorbent) ในอนาคต จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญ ในการผลิตตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์ม
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ผลิตได้ ในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม จากน้ำเสียสังเคราะห์
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างตัวดูดซับที่ผลิตได้ กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
4. เพื่อศึกษาการดูดซับและคุณสมบัติจำเพาะของตัวดูดซับที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ดินดำที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นดินดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก
2. น้ำเสียโลหะหนักเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ
3. ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ คือการแปรผันค่าอุณหภูมิในการเผา และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างดินดำกับกะลามะพร้าว และดินดำกับกะลาปาล์ม โดยดูจากความคงตัวและความสามารถในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม
4. ศึกษาหาเวลา และค่าพีเอชที่เหมาะสม ในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
6. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และการชะไอออนโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้
7. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่ผลิตได้ที่มีความเหมาะสมที่สุด
8. ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะของตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลามะพร้าว ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยวิเคราะห์ค่าต่างๆคือ Iodine Number, Surface Area, Functional Group และ Electrical Charge

9. ประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิต ตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าว และ ตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตร คือกะลามะพร้าวและกะลาปาล์ม มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียได้
2. เพื่อพัฒนาตัวดูดซับให้สามารถเป็นแนวทางเลือกหนึ่ง ในการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย เพื่อนำไปบำบัดต่อไป
3. สามารถนำตัวดูดซับที่ผลิตได้ไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆได้ เช่น ใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนักในอากาศเสียที่เกิดจากเตาเผาขยะ เนื่องจากสามารถทนความร้อนได้สูงจึงสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 เซรามิก(Ceramic)

เซรามิก มีรากศัพท์เดิมมาจากภาษากรีกว่า " เครามอส" (Kamos) ซึ่งมีความหมายว่าเผา แต่ในปัจจุบัน เซรามิกมีความหมาย 2 ประการ คือ ประการแรกหมายถึง ผลิตภัณฑ์ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ส่วนความหมายประการที่สองหมายถึง ผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ ผลิตจากวัตถุดิบพวกอนินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น ดิน ชนิดต่าง ๆ ททราย เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันผลิตภัณฑ์เซรามิกมีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น

- ผลิตภัณฑ์ประเภทแก้ว ซึ่งประกอบด้วยผลิตภัณฑ์พวกภาชนะเครื่องแก้วต่าง ๆ เช่น กระจก หลอดไฟ โคมไฟ เป็นต้น

- ผลิตภัณฑ์ปูนขาว ยิปซัม (Gypsum) และซีเมนต์ (Cement)

- ผลิตภัณฑ์พวกไวท์แวร์ (White ware) ซึ่งประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า หัวเทียนต่างๆ ที่ใช้ในยานพาหนะ นอกจากนี้ก็มี เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้อง ผลิตภัณฑ์เครื่องถ้วยชาม ชนิดเออเทินแวร์ (Earthen ware) และไชน่าแวร์ (China ware) ปออร์ซเลน และสโตนแวร์ (Porcelain and Stoneware)

- ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ได้แก่ ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น

- ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ และกระเบื้องต่าง ๆ

- ผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ เช่นอิฐทนไฟที่ใช้ในการก่อเตาเผา

- ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้ทางการแพทย์ และทันตแพทย์ เช่น กระดูกเทียม ฟันเทียม เป็นต้น

การศึกษาวัดสุเซรามิก จำเป็นต้องศึกษาตั้งแต่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ แหล่งวัตถุดิบ คุณภาพที่เหมาะสมของวัตถุดิบ คุณสมบัติจำเพาะของวัตถุดิบ เช่น ส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้างของผลึก การกระจายของขนาดอนุภาค และคุณสมบัติต่าง ๆ หลังการเผา ซึ่งการศึกษาหาส่วนผสมของวัตถุดิบที่เหมาะสมเมื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ,2539)

2.2 ดินเหนียว(Clays)

ดินเหนียวเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ โดยเฉพาะภาชนะรองรับอาหาร (Dinner ware or Table ware) สุขาภัณฑ์ (Sanitary ware) กระเบื้อง (Wall and Floor tile) และอื่นๆเนื่องจากดินเป็นวัตถุดิบที่มีความเหนียว เมื่อโดนน้ำจะจับตัวเป็นก้อน สามารถนำมาปั้นเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย ดินมีหลายชนิดแตกต่างกันไป อาจจะแตกต่างกันในเรื่องสีหรือ ต่างกันในเรื่องโครงสร้าง รวมทั้งต่างกันในเรื่องคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เป็นต้นว่า มีความเหนียวต่างกัน มีปริมาณ SiO_2 ต่างกัน ซึ่งแร่ดินที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดินในอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่

1. ดินขาว (Kaolinite, China clay)
2. ดินเหนียว (Plastic clay)
3. ดินดำ (Ball clay)
4. ดินเบนโทไนท์ (Bentonite)

2.2.1 ดินขาว(Kaolinite, China clay)

ดินขาวหมายถึง ดินที่มีสีขาวหรือสีซีดจาง ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งฝังของหินเดิม (Residual clay) มักพบในลักษณะพื้นที่ที่เป็นภูเขาหรือที่ราบซึ่งเดิมที่เป็นแหล่งแร่หินพื้นผ้า เมื่อหินพื้นผ้าผุพังโดยบรรยากาศ (Weathering) ผลสุดท้ายจะเหลือเป็นดินขาวอยู่ ณ ที่นั้น

ดินขาวเป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อย ประกอบด้วยแร่กาลินไนท์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่น ๆ

ดินขาวที่ขุดขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีอยู่ 3 ชนิด คือ

1) ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์และมีความทนไฟสูง สามารถนำมาใช้ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้

2) ดินขาวอีกชนิดหนึ่งเป็นเกรดของฟิลเลอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ทำสี ยาง ยาฆ่าแมลง ปูน และอื่น ๆ โดยใช้ดินขาวที่มีเนื้อสีขาวบริสุทธิ์ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี แต่ไม่ได้นำไปเผาผ่านความร้อนในกระบวนการผลิต

3) ดินขาวที่เป็นดินสอพองซึ่งไม่ใช่ดินขาว แต่เป็นปูนขาวซอล์ก (Chalk) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกิดจากผลึกของหินปูนตามธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นผลึกละเอียดสีขาว บางครั้งเป็นสีชมพูและน้ำตาลอ่อน ซึ่งใช้เป็นเนื้อดินปั้นขึ้นรูปไม่ได้ ใช้ผสมทำปูนซีเมนต์

ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์สูง เผาแล้วได้สีขาวบริสุทธิ์ นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์ปอร์ซเลนโบเนไซน่า และผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีเนื้อสีขาวทุกชนิด ดังนั้นสีดินภายหลังการเผาเป็นสิ่ง

สำคัญมาก ขณะที่โรงงานผลิตกระเบื้องปูพื้นสนใจดินที่มีราคาถูกหุดตัวน้อย และมีปริมาณคาร์บอนต่ำ สามารถตัดเป็นแผ่นได้ง่ายโดยไม่บิ่นหรือแตกร้าว สีดินจะเป็นสีเหลืองนวลหรือออกแดงเล็กน้อยไม่เป็นปัญหา ส่วนโรงงานสุขภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ น้ำ ดินจะเลือกใช้ดินคุณภาพดี เพื่อผสมน้ำดินหล่อสำหรับผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ ๆ ให้ถอดพิมพ์ได้ง่าย มีออกไซด์ของเหล็กและไทเทเนียมอยู่ในปริมาณน้อย

2.2.1.1 สมบัติต่าง ๆ ของดินขาว

สูตรดินขาว $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

ส่วนประกอบ 39.5% 46.5% 14%

1) สมบัติทางเคมี ปฏิกิริยาของดินขาว เมื่อเผาผ่านอุณหภูมิต่าง ๆ และการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกทางโครงสร้างเคมีในขั้นตอนการเผาดังนี้

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (Kaolin)



เผา 450 °C



$3/2 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (Meta-kaolin)



เผา 890-900 °C



$3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ (Spinel)



เผา 1,150-1,500 °C



$3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ (Mullite)

2) สมบัติทางกายภาพ

รูปผลึก	เป็นแผ่นหกเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-10.0 ไมครอน
ความเหนียว	ต่ำ
ความทนไฟ	1,750-1,770 °C

ความหดรัดตัว น้อย
ความแข็งแกร่ง สูง หลังเผา

มีดินขาวแหล่งต่าง ๆ หลายแหล่งในประเทศไทย เช่นที่ เชียงราย ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง ชุมพร และนราธิวาส ดินขาวมีหลายเกรดหลายคุณภาพ บางแหล่งไม่สามารถนำมาทำเซรามิกได้ แหล่งดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้แก่ ดินขาวระนอง ชุมพร และนราธิวาส เป็นดินขาวคุณภาพปานกลาง ซึ่งเป็นแร่กาอลินไนท์ (Medium ordered kaolinite) มีความบริสุทธิ์และมีความขาวมากกว่าดินขาวลำปาง ดินขาวลำปางเป็นดินขาวเซอร์ซิไซต์ (Sericite) มีแร่ไมกาเป็นส่วนประกอบหลักมีแร่กาอลินไนท์ประกอบอยู่เป็นส่วนน้อยหรือแร่กาอลินไนท์คุณภาพต่ำ (Disordered Kaolinite) แร่เซอร์ซิไซต์เกิดจากการผุพังของหินแกรนิต ซึ่งกลายเป็นเฟลด์สปาร์ ก่อนที่จะกลายเป็นแร่กาอลินไนท์ จึงเป็นแร่กาอลินไนท์ที่ไม่สมบูรณ์

แหล่งดินขาวที่พบในประเทศไทย

- 1) ดินขาวที่จังหวัดระนอง บ้านบางวัน อ.เมือง และบ้านบางพระเหนือ กิ่งอำเภอละอุ่น
- 2) ดินขาวที่จังหวัดลำปาง บ้านปางค่า อ.แจ้ห่ม และที่ อ.แม่ทะ
- 3) ดินขาวที่จังหวัดปราจีนบุรี บ้านหนองใหญ่ อ.เมือง
- 4) ดินขาวที่จังหวัดนราธิวาส บ้านโต๊ะเต็ง อ.สุไหงปาดี และ อ.ยี่งอ
- 5) ดินขาวที่จังหวัดอุตรดิตถ์ บ้านวังยาง อ.เมือง
- 6) ดินขาวที่จังหวัดเชียงราย อ.เวียงป่าเป้า
- 7) ดินขาวพะโต๊ะ อ.เมือง จ.ชุมพร

2.2.1.2 สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical properties of kaolin)

การศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพของดินขาว ทำให้เราสามารถนำดินขาวไปใช้ประโยชน์ได้ สมบัติทางกายภาพของดินขาวที่ควรศึกษาก่อนนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

- ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาคดินจะมีผลต่อความเหนียว (Plasticity) และการหดตัวของเนื้อดินบ่มเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้ง มากกว่าเม็ดหยาบ ดินที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย (Low plasticity) ดินขาวมีเม็ดหยาบและความเหนียวน้อย

- รูปร่างของอนุภาค (Particle shape)

รูปร่างของแร่เกล็ดในไนท์ทั่วไป จะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal plates) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05-10.0 ไมครอน

- คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base exchange capacity)

ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์จะไม่มีแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับอนุภาคและโมเลกุลอื่น ๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิวผลึก เกล็ดในไนท์บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึก ไม่ได้จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

- คุณสมบัติเมื่อแห้ง (Drying properties)

ดินขาวที่บริสุทธิ์จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดละเอียด (Fine grained) จะมีค่าการหดตัวมากกว่าดินขาวเม็ดหยาบ

- ความแข็งแรงของเนื้อดินเมื่อแห้ง (Green strength)

ดินขาวที่มีความแข็งแรงน้อยเพราะแตกได้ง่ายเมื่อแห้ง เพราะมีความเหนียวน้อย

- สมบัติหลังจากการเผา (Firing properties)

ดินขาวที่มีคุณภาพดี เผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือสีน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกิน 20 % หลังการเผา ไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

2.2.1.3 ประโยชน์ของดินขาว

ดินขาวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเซรามิกและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ดังนี้

- 1) ใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น ถ้วยชาม เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องประดับ
- 2) ทำผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น อิฐก่อสร้าง อิฐปูพื้น ท่อระบายน้ำ กระเบื้องหลังคา
- 3) ใช้ทำเป็นเบ้าหลอมในอุตสาหกรรมถลุงเหล็กและหล่อเหล็ก
- 4) ใช้ทำเครื่องกรองน้ำ (Water filter)
- 5) ใช้ทำฉนวนไฟฟ้า ในการทำฉนวนไฟฟ้าที่ทนแรงดันได้สูง (High-tension insulator)

6) ใช้ทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น เบ้าหลอม (Crucible) ผลิตเซรามิกกึ่งตัวนำ (Semiconducting ceramic)

7) ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยเติมลงไปเยื่อกระดาษ ทำให้กระดาษมีคุณสมบัติดูดซับน้ำหมึก ช่วยให้ผิวหน้ากระดาษเรียบและมันเป็นเงา สีของกระดาษขาวขึ้น ช่วยเพิ่มน้ำหนักของกระดาษและทำให้กระดาษทึบแสง ทำให้ไม่เห็นตัวหนังสือหรือลายพิมพ์อื่น ๆ ในหน้าตรงข้าม

8) เป็นตัวพอกสีและตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม

9) ใช้ในอุตสาหกรรมยาง โดยเติมลงไปยาง (Rubber filler) ให้มีความแข็งแรงทนทาน

10) ใช้ผสมลงในของเหลวที่ใช้ในงานเจาะ (Drilling fluid) สำหรับน้ำมันปิโตรเลียม

11) ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย

12) ใช้ในอุตสาหกรรมพรมน้ำมัน ทอผ้า และพลาสติก

13) ใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้ผลิตสีขาว (White pigment)

14) ใช้ในอุตสาหกรรมทำยารักษาโรค เครื่องสำอาง ทำฟันปลอม (Dental porcelain)

(พลยุทธ ศุขสมิติ : ดินขาวและดินเหนียวดำ สำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 3 เชียงใหม่ พ.ศ. 2539 อ้างถึงใน ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

2.2.2 ดินเหนียว (Plastic clay)

ดินเหนียว คือดินเนื้อละเอียด ที่มีแร่ธาตุเจือปนอยู่ตามธรรมชาติค่อนข้างสูง ไม่บริสุทธิ์เหมือนดินขาว เมื่อขุดพบมีสีต่างๆ สีเหลือง สีเทา สีดำ หรือสีส้มแดง หลังการเผาดินก็จะมีสีต่างๆ กันไป เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีแดง หรือสีเหลืองอมเทา ดังนั้นดินเหนียวก็คือดินที่มีความเหนียวเนื้อละเอียดที่เป็นสีต่างๆ ภายหลังจากเผา ดินดำ (Ball clay) จัดว่าเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งด้วย แต่ดินดำแตกต่างจากดินเหนียวคือ ดินดำมีแร่ธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่มีอินทรีย์สารเจือปนอยู่สูง ดินดำบางชนิดมีความเหนียวน้อย บางชนิดเหนียวมาก

ในปัจจุบันนิยมใช้ดินเหนียวและดินดำประกอบกันในเนื้อดินปั้น ที่ไม่ต้องการความขาวมาก เช่น ผลิตภัณฑ์กระเบื้อง หรือเครื่องสุขภัณฑ์ เพื่อช่วยในการขึ้นรูปได้ดี และเพื่อใช้ดินเหนียวเป็นวัตถุดิบที่ให้ความเหนียว โดยมีแหล่งสำรองเพิ่มเติมจากดินดำซึ่งมีราคาแพงกว่าดินเหนียว

แหล่งดินเหนียวที่สำคัญในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผามีอยู่หลายแหล่งที่ จ.ลำปาง และ เชียงราย เช่นดินเหนียววังเหนือ ดินเหนียวแม่ทาน ดินเหนียวแจ้คอนและดินเหนียว อ.พาน เป็นต้น

2.2.3 ดินดำ (Ball clay)

ดินดำหรือดินเหนียวขาวเกิดจากดินขาว ซึ่งย้ายถิ่น (Sedimentary clay) ไปตกตะกอนสะสมในแหล่งใหม่ ดินดำเป็นดินที่มีขนาดผลึกเม็ดละเอียดมาก อนุภาคของดินยึดเกาะกันได้ดี มีอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับที่พบในถ่านหินลิกไนท์เจือปนอยู่ จึงช่วยให้ดินชนิดนี้มีความเหนียวและทำให้มีสีเปลี่ยนไปจากสีขาวกลายเป็นสีเทาจนถึงสีดำ แต่เมื่อนำไปเผาในอุณหภูมิสูง เนื้อดินจะมีสีขาวหรือสีครีม อินทรีย์สารต่าง ๆ จะถูกเผาไหม้หมดไปจากเนื้อดิน

ดินดำที่มีเนื้อละเอียดหลังการเผาเป็นสีขาวและมีความทนไฟ $1,300^{\circ}\text{C}$ โดยไม่บิดเบี้ยว มักเป็นดินที่มีคุณภาพดี นิยมนำมาใช้ผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น ปอร์ซเลน โบนไซนา และ ไวท์เอิร์ทเทินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่คุณภาพปานกลางมีทรายเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก ใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ทำท่อน้ำดินเผา หรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ชื่อเรียกดินดำว่าบอลเคลย์(Ball clay) ได้มาจากวิธีขุดดินจากเหมืองในประเทศอังกฤษ เพื่อสะดวกในการลำเลียงและการขนส่ง ดินดำถูกตัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีน้ำหนักโดยประมาณก้อนละ 30-35 ปอนด์(13-15 กก.) เมื่อลำเลียงขึ้นรถคนงานจะใช้วิธีโยนรับส่งที่ละก้อนแบบโยนลูกบอล(ลูกแตงโม) ส่งต่อกัน ซึ่งการขนถ่ายลงจากรถก็ใช้วิธีเดียวกัน ดินเหนียวจึงถูกขนานนามว่าบอลเคลย์(Ball clay) แต่ถ้าจะแปลตามศัพท์แล้ว ควรจะเรียกดินเหนียวว่า พลาสติกเคลย์(Plastic clay) ซึ่งแปลว่า ดินที่มีความเหนียว

2.2.3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของดินดำ(Chemical properties of ball clay)

ในดินดำประกอบด้วยแร่กาลินไนท์เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกกาลินไนท์ชนิดที่ไม่สมบูรณ์(Disordered Kaolinite) ในระหว่างผลึกมีแร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกอยู่ ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณจะมีซิลิกา 40-60 % อะลูมินา 30 % น้ำผลึกและอินทรีย์สารประมาณ 10% นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่น ๆ ปะปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียม (TiO_2) เฟอริก (Fe_2O_3) แคลเซียม(CaO) แมกนีเซียม(MgO) เหล็กซัลเฟต(FeS) โพแทสเซียม (K_2O) และโซเดียม (Na_2O) เป็นต้น

สูตรเคมีของดินดำ

ดินดำทั่วไป $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \cdot 0.1 \text{K}_2\text{O}$

(มีอะลูมินา 20-25% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

ดินดำ-ดินเหนียวอุตสาหกรรม $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \cdot 0.1 \text{K}_2\text{O}$

(มีอะลูมินา 30-38% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

ดินดำปนทราย $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \cdot 0.2 \text{K}_2\text{O}$

(มีอะลูมินา 60-80% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

แหล่งดินดำในประเทศไทยได้แก่

- 1) ดินดำแม่หยวก อ.เมือง จ.เชียงใหม่
- 2) ดินดำ อ.พาน จ.เชียงราย
- 3) ดินเหนียวแม่ทาน อ.แม่ทะ จ.ลำปาง
- 4) ดินดำวังเหนือ จ.ลำปาง
- 5) ดินเหนียวแจ้คอน อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง
- 6) ดินดำปากพลี จ.ปราจีนบุรี
- 7) ดินดำบ้านนาสารและพุลพลี จ.สุราษฎร์ธานี
- 8) ดินดำลานสกา จ.นครศรีธรรมราช

แหล่งผลิตดินดำเพื่อการส่งออกในปัจจุบันอยู่ที่ลำปาง เชียงราย นครศรีธรรมราช และนครนายก จังหวัดที่ผลิตได้สูงสุดคือ ลำปางผลิตได้กว่าร้อยละ 95 ของผลผลิตทั้งหมดของประเทศไทย ส่วนแหล่งอื่น ๆ ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในประเทศ ปริมาณการส่งออกบอลเคลย์ของไทยในปี 2537 12,659 เมตริกตัน มูลค่าส่งออก 32.9 ล้านบาท ตลาดส่งออกได้แก่ อินโดนีเซีย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ สิงคโปร์ ไต้หวันและญี่ปุ่น ราคาส่งออกปี พ.ศ. 2537 โดยเฉลี่ย เมตริกตันละ 2,600 บาท

2.2.3.2 สมบัติทางกายภาพของดินดำ (Physical properties of ball clay)

- 1) ขนาดของดินดำจะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใด เปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบเมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิมมาก ขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.05-1.00 ไมโครเมตร

2) ความเหนียว (Plasticity) ดินดำเป็นดินที่อมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญคือ ปริมาณของอินทรียสารขนาดของเม็ดดิน และวัตถุดิบที่ให้ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนท์

3) การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินดำที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินดำที่มีอินทรียสารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 13-17 %

4) การหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณ 15% เนื่องจากดินดำมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

5) ความแข็งแรงของดินเมื่อแห้งก่อนเผา (Green strength) ดินดำมีความแข็งแรงสูง (strength) ประมาณ 100-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

6) สีหลังเผา เป็นสีขาวนวลถึงสีครีม

7) มีแร่ธาตุพวกต่างและไมกาในดินทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ช่วยลดอุณหภูมิในการเผา

2.2.3.3 ประโยชน์ของดินดำ (Ball clay)

ดินดำใช้กันมากในอุตสาหกรรมถ้วยชามและสุขภัณฑ์โดยนำไปผสมกับดินขาว ประโยชน์ของดินดำ ได้แก่

1) ช่วยเพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี ผสมในเนื้อดินอัตราส่วน 20-50 %

2) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงก่อนเผา (Green strength) ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผาในขณะที่เคลื่อนย้าย ผลิตภัณฑ์ไม่เปราะหรือแตกหักง่าย

3) ทำให้น้ำดินหล่อที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี

4) ทำหน้าที่เสริมปฏิกริยาระหว่างมวลสารในระหว่างการเผาทำให้ดินสุกตัวได้เร็ว ประหยัด เวลาในการเผา ช่วยในการหลอมละลาย

2.2.4 ดินเบนโทไนต์ (Bentonite)

ดินเบนโตไนท์ไม่ได้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมเนื้อดิน แต่นำมาผสมเพื่อเพิ่มความเหนียวในเนื้อดินเพียงปริมาณเล็กน้อย ดินเบนโตไนท์อยู่ในกลุ่มแร่สมิคไทท์ (Smectite) หรือมอนทมอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ดินเบนโตไนท์ไม่ได้ประกอบด้วยแร่กาโอลินไนท์ แต่เป็นผลึกดินที่เล็กละเอียดสามารถดูดน้ำไว้ได้มาก ซึ่งเป็นผลให้ดินมีลักษณะขยายตัวขึ้น 5 เท่า หรือเกิด

การพองบวมเมื่อ ใช้น้ำไว้มาก ๆ คล้ายกาบ โดยลักษณะโครงสร้างของเบตไนท์แล้วไม่ใช่แร่ดิน แต่ถูกเรียกว่า ดินเบนโตไนท์ เพราะการนำมาใช้ผสมกับดินชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความเหนียว

ดินเบนโตไนท์มีสูตร $Al_2O_3 \cdot 4 SiO_2 \cdot H_2O$ ปกติใช้ดินเบนโตไนท์ผสมในสูตรเคลือบประมาณ 2% เพื่อให้เคลือบลอยตัว ในสูตรดินหล่อของเนื้อดินที่ไม่มีความเหนียวจะใส่ 1% เพื่อช่วยในการไหลตัวของน้ำดินและเนื้อดินปอร์ซเลนสำหรับปั้นด้วยแป้นหมุน จะใช้ดินเบนโตไนท์ 4-6% ในสูตรเพื่อเพิ่มความเหนียวของเนื้อดิน เนื้อดินหล่อโบนไซนาไม่มีความเหนียวจะเติมเบนโตไนท์ 1% เพื่อเพิ่มความเหนียวและการไหลตัวของดินหล่อ ดินเบนโตไนท์มีความเหนียวมาก ไม่สามารถนำมาใช้โดยลำพังเพียงชนิดเดียวล้วน

ดินเบนโตไนท์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. ดินชนิดที่เป็นผงละเอียดเมื่อผสมกับน้ำแล้วจะบวมตัวขึ้นมา 4-5 เท่า เนื่องจากดูดน้ำได้ดีและมีความเหนียวมากเป็นพิเศษ มีคุณสมบัติคล้ายกาบ

2. ดินชนิดที่ไม่บวมตัว มีความเหนียวเหมือนดินเหนียวธรรมดา

โดยปกตินิยมใช้ดินเบนโตไนท์ชนิดแรกในปริมาณเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความเหนียวให้วัตถุดิบและเนื้อดินชนิดต่าง ๆ ง่ายต่อการขึ้นรูป ในเนื้อดินอุตสาหกรรมทั่วไปจะใช้ในปริมาณ 2% เพื่อเพิ่มความเหนียว ซึ่งสามารถช่วยได้ดีกว่าการเติมดินเหนียว 10% ในสูตรดิน

ดินเบนโตไนท์ส่วนใหญ่มีแร่เหล็กเจือปนอยู่ด้วย 3-4% จึงมีปัญหาถ้าใส่ในเนื้อดินปริมาณมากจะทำให้สีดินที่ผสมหมองคล้ำลงจากมลทินของแร่เหล็กหลังการเผา ดังนั้นถึงแม้ว่าดินเบนโตไนท์จะเป็นวัตถุดิบที่มีความเหนียวสูง แต่จะถูกจำกัดการใช้แต่เพียงปริมาณน้อยไม่เกิน 1-3% เพราะดินเบนโตไนท์มีปัญหาเรื่องแร่เหล็ก และมีปัญหาเรื่องการหดตัวสูงมากเมื่อแห้ง ฉะนั้นเพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์เสี่ยงต่อการแตกร้าวเสียหายจึงต้องระวังปริมาณการใช้ดินเบนโตไนท์ (Newcomb, R. 1947 Ceramic Whitewares, pp. 54-55 อ้างถึงใน ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

ปัจจุบันได้มีการค้นพบแหล่งดินเบนโตไนท์สีขาว (White bentonite) ซึ่งมีแร่เหล็กเจือปนในปริมาณน้อยมาก และเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื้อดินปอร์ซเลน และเนื้อดินโบนไซนาที่มีสีขาว

2.2.5 ส่วนประกอบต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของดิน(ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

1) ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาในรูปอิสระจะมีผลทำให้ ลดความเหนียวของเนื้อดิน ลดการหดตัวในระหว่างการทำให้แห้งและการเผา ถ้าขนาดของเม็ดซิลิกาที่ปนมีขนาดใหญ่ จะลดความแกร่ง และความคงทน

ของดิน นอกจากนี้พบว่าเม็ดซิลิกา ถ้ามีขนาดเล็กมากมักจะทำปฏิกิริยาเป็นตัวลดอุณหภูมิ ถ้ามีขนาดใหญ่จะเพิ่มความทนไฟของเนื้อดิน

2) อะลูมินา (Alumina)

อะลูมินานอกจากจะมีอยู่ในแร่ดินเองแล้ว ยังมีในเฟลด์สปาร์ ไมกาและอะลูมิโนซิลิเกตอื่นๆ ส่วนมากมักจะหลอมได้ ส่วนพวกอะลูมินาอิสระจะพบในแร่ดินบางชนิดที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดของแร่บอกไซต์ (Bauxite) ผลของอะลูมินาอิสระจะทำให้ลดความเหนียวของเนื้อดินและเนื้อดินมีความทนไฟมากขึ้น

3) สารประกอบอัลคาไล (Alkali bearing minerals)

สารประกอบอัลคาไลที่สำคัญคือ แร่หินฟันม้า ไมกา และพวกเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น โพแทสเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ จะมีผลทำให้ ลดความเหนียวตอนเป็ยกของดิน ลดจุดสุกตัวหรือความทนไฟ (Vitrification temperature) ของเนื้อดิน สารประกอบอัลคาไลเมื่อรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น จึงเรียกรวมกันว่าตัวลดอุณหภูมิ (Flux) สารประกอบอัลคาไลเมื่อหลอมตัวแล้วเวลาปล่อยให้เย็นจะไม่ตกผลึกแต่เกิดเป็นแก้ว

4) สารประกอบเหล็ก (Iron compounds)

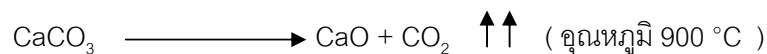
สารประกอบเหล็กที่เกิดปะปนอยู่ในเนื้อดินมีหลายตัวด้วยกัน เช่น เพอร์ริกออกไซด์ เพอร์รัสออกไซด์ เพอร์ริกซิลิเกต เพอร์ริกซัลไฟด์ ฯลฯ สารประกอบของพวกเหล็กที่ละลายน้ำได้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีฟ้าอ่อนเมื่อแห้ง ถ้านำไปเผาทำให้มีสีน้ำตาลหรือดำต่างๆเป็นจ้ำๆหรืออาจเกิดจุดแร่เหล็ก (Iron spot) จะเห็นได้จากกระถางดินเผาหรือผลิตภัณฑ์ดินเผาที่อำเภอบางกรวดจะมีสีน้ำตาลหรือส้ม

5) สารประกอบแคลเซียม (Calcium compound)

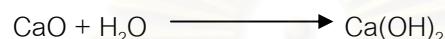
สารประกอบแคลเซียมที่ปะปนในเนื้อดินเช่น แคลไซต์ แคลเซียมซิลิเกต ยิปซัม ฯลฯ ผลของสารประกอบแคลเซียมที่มีต่อเนื้อดินคือ

(1) เป็นตัวลดอุณหภูมิการเผาเช่น เมื่อรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้จุดสุกตัวและความทนไฟของเนื้อดินลดลง

(2) สารประกอบแคลเซียมพวกแคลไซต์ เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนเป็นปูนขาว(CaO) ตามสมการ



เมื่อเย็นตัวลงCaOจะดูดความชื้นในอากาศตามสมการทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการรวมตัวเสียรูปทรง หรือสลายตัวเป็นฝุ่นผง



แต่เมื่อเผาผลิตภัณฑ์จนร้อนแดง สารประกอบแคลเซียมจะรวมตัวกับสารประกอบเหล็กมีผลทำให้สีที่เกิดจากสารประกอบเหล็กมีสีซีดลง กลายเป็นสีครีม หรือสีเนื้อแทนที่จะเป็นสีแดง

(3) แคลเซียมซัลเฟต ทนต่อการเผาในอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดรอยต่างในเนื้อดินภายหลังการเผา ถ้าบดไม่ละเอียดหรือถ้ารวมตัวกับสารประกอบเหล็กก็มีผลทำให้สีดินอ่อนลงกว่าจริงหลังการเผา

6) สารประกอบแบเรียม (Barium compounds)

สารประกอบแบเรียมจะมีผลต่อเนื้อดินคล้ายสารประกอบแคลเซียม

7) สารประกอบแมกนีเซียม (Magnesium compounds)

สารประกอบแมกนีเซียมที่พบในดินเหนียวนั้น โดยส่วนมากจะพบในรูปของแร่แมกนีไซต์ (Magnesite) แร่โดโลไมท์ (Dolomite) แมกนีเซียมซัลเฟต ฯลฯ แมกนีเซียมมีผลต่อเนื้อดินคล้ายๆ กับสารประกอบแคลเซียมคือเป็นตัวลดอุณหภูมิลดความทนไฟของเนื้อดิน แต่มีผลน้อยกว่า

8) สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ (Carbonaceous matter)

มีทั้งคาร์บอนในวัตถุดิบ CaCO_3 , MgCO_3 หรือพวกคาร์บอนเนตและคาร์บอนจากอินทรีย์สาร ถ้ามีปนอยู่ในเนื้อดินจะทำให้

(1) เนื้อดินเหนียวก่อนเผามีสีเทาไปจนสีดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารคาร์บอนว่ามีอยู่มากน้อยเพียงไร

(2) ทำให้เกิดการเผาแบบรีดิวซิง (Reducing) เป็นเขม่าและควันซึ่งมีผลต่อสีและจุดสุกตัวของผลิตภัณฑ์ ถ้าเผาไม่ถูกต้องหรือไม่ชำนาญ

- (3) เมื่อเผาแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนจากอินทรีย์สาร และก๊าซคาร์บอน
- (4) คาร์บอนจากอินทรีย์สารจะถูกเผาอย่างรวดเร็วในการเผา เกิดการลุกไหม้ ทำให้อุณหภูมิในเตาเผาสูงขึ้นเร็วเกินไป มีผลทำให้การเผาเกิดจุดสุกตัว (Over vitrification) และมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยุบตัวบิดเบี้ยวเสียรูปทรงได้
- (5) ถ้าสารประกอบคาร์บอนไม่สลายตัวเนื่องจากเผาเร็วเกินไปจะเกิดเป็นแถบสีขึ้นในชั้นของเนื้อดิน

9) สารประกอบของซัลเฟอร์ (Sulfur) หรือกำมะถัน

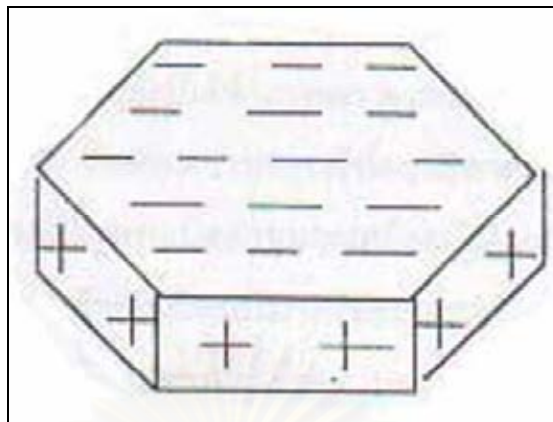
สารประกอบของซัลเฟอร์ มักเกิดอยู่ในดินดำที่ติดอยู่ใกล้กับชั้นของถ่านหิน ซึ่งมีทั้งซัลเฟอร์ ที่เป็นอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารที่เกิดจากการสลายตัวของออกไซด์ของโลหะบางชนิด เช่น เหล็กซัลเฟตหรือไพไรต์ FeS_2 (Pyrite) แคลเซียมซัลเฟต CaSO_4 เกลีสซัลเฟตเป็นต่างที่ละลายน้ำได้ถ้ามีอยู่ในปริมาณมาก จะทำให้ดินบวมและยุบตัวหลอมละลายในเตาเผา และเนื้อดินจะหลอมตัวมันวาว

2.2.6 คุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจของเซรามิก

1) ความเป็นประจุของดิน

อนุภาคดินโดยทั่วไปจะมีทั้งประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) แต่จะมีจำนวนประจุลบมากกว่า ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าดินมีคุณสมบัติที่มีความเป็นประจุลบนั่นเอง และผิวด้านนอกจะดูดซับไอออนบวกไว้อย่างหลวมๆคือพวก Na, K, Ca และ Mg ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่มีในดินโดยทั่วไป ทำให้สภาพปกติของดินเป็นแบบที่เรียกว่า Ion Double Layer กล่าวคือเป็นสภาพที่มีประจุสองชั้น ชั้นในเป็นประจุลบของดินส่วนชั้นนอกเป็นประจุบวกที่ถูกดูดซับไว้ และจากการจับกันอย่างหลวมๆนี้เองทำให้เกิดการแลกเปลี่ยน Cation ชนิดอื่นๆได้ เราเรียก Cation พวกนี้ว่า "Exchange Cation" ดังรูปที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ลักษณะการกระจายตัวของประจุบวกและลบบนอนุภาคดิน (ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

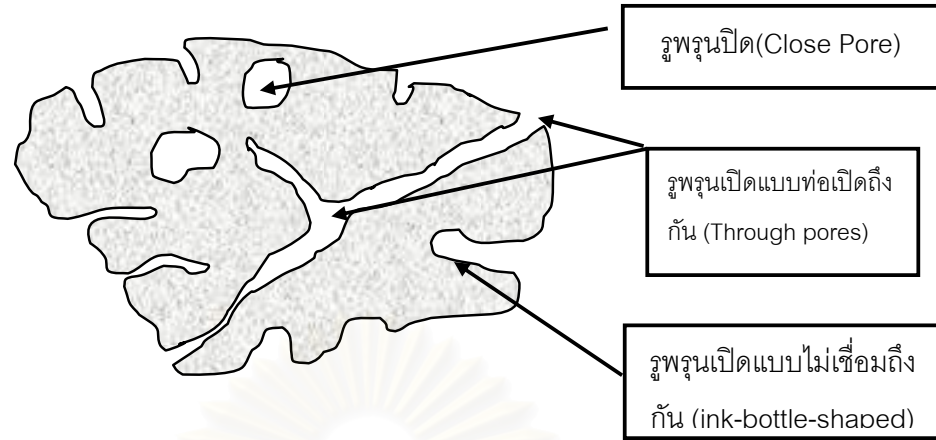
2) ความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์เซรามิก

ความพรุนตัวอาจพิจารณาถึงคุณสมบัติเฉพาะของมัน ในรูปสัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรของเนื้อสารทั้งหมด ความพรุนตัวอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 0 ถึงมากกว่า 90 % ของปริมาตรทั้งหมด ค่าความพรุนตัวนี้เป็นค่าพื้นฐานที่ต้องการทราบ คุณสมบัติหลายประการของ เซรามิกขึ้นกับรูปร่างและการกระจายตัวของรูพรุน เช่น สภาพการนำไฟฟ้าและความร้อนเปลี่ยนแปลงไปตามความพรุนตัว

วิธีการง่าย ๆ หนึ่งที่จะบอกคุณสมบัติเฉพาะของความพรุนตัวคือ การบอกค่าความพรุนตัวปรากฏหรือความพรุนตัวทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนเปิดรวมกับรูพรุนปิด

- รูพรุนเปิด (Open pore) หมายถึง รูพรุนที่สามารถติดต่อกับผิววนอกของผลิตภัณฑ์ได้
- รูพรุนปิด (Close pore) หมายถึง รูพรุนที่ไม่สามารถติดต่อกับผิววนอกของผลิตภัณฑ์ได้

จึงเห็นได้ว่ารูพรุนเปิดมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความสามารถที่จะยอมให้ของไหลไหลผ่านไปได้ ความสามารถในการยืดหยุ่นเมื่อเกิดลักษณะสุญญากาศ ปริมาณพื้นที่ผิวที่จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาและถูกกัดกร่อนโดยสารเคมี รูพรุนปิดและรูพรุนเปิดลักษณะต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูพรุนชนิดต่างๆ ของเซรามิก (Schubert and Husing, 2000)

ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จยังมีได้ทำการเผา ความพรุนตัวเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของรูพรุนเปิด ขณะทำการเผาผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความพรุนตัวโดยปริมาตรลดลง ถึงแม้ว่ารูพรุนเปิดบางส่วนจะถูกสกัดออกไปโดยตรงแต่ก็มีรูพรุนเปิดส่วนมากเหมือนกันที่แปรสภาพไปเป็นรูพรุนปิด ผลสุดท้ายในระยะแรกของการเผา สัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุนเปิดจะเพิ่มขึ้นและจะลดลงในช่วงสุดท้ายของการเผา โดยปกติรูพรุนเปิดจะหมดไปเมื่อความพรุนตัวมีค่าประมาณ 5%

ในผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ ท่อระบายน้ำ และ กระเบื้องชนิดต่างๆ หากเผา อุณหภูมิต่ำไปเนื้อผลิตภัณฑ์จะมีรูพรุนเล็กๆเป็นจำนวนมากทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงไม่ดี ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เผาอุณหภูมิสูงเกินไป เนื้อผลิตภัณฑ์จะมีเนื้อแก้วเป็นส่วนใหญ่ทำให้มีความแข็งแรงดีแต่มีความพรุนตัวน้อย ตัวที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีส่วนใหญ่ได้แก่ Fe ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีแดงหรือน้ำตาล (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

ในการผลิตเซรามิกเนื้อพรุนจะประกอบด้วยวัตถุดิบคือ ดินเหนียว เฟลสปาร์ ซีลี้อยไม้ก๊อก เมื่อเอี่ยมถึงจุดสุกตัวแล้วจะเกาะกัน บริเวณที่เป็นซีลี้อยจะไหม้และทำให้เนื้อเกิดความพรุนตัว (สุรินทร์ นาคะวิวัฒน์, 2529)

ในการผลิตอิฐฉนวนหรืออิฐไฟร์เคลย์ มีน้ำหนักเบาและรูพรุนมาก รูพรุนจะทำโดยการผสมไค้กหรือซีลี้อยในส่วนผสมของอิฐฉนวน เมื่อเผาาก็จะเกิดก๊าซขึ้นหนีออกไป จะทำให้อิฐมีรูพรุนจึงมีน้ำหนักประมาณ 1 ใน 3 ของอิฐธรรมดา ใช้ในการหุ้มผนังด้านนอกของเตาเผาเพื่อลดการสูญเสียความร้อนในเตา (เล็ก สีคง, 2540)

3. ความแข็งแรง

เนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยทั่วไปที่ไม่มีเนื้อแก้วเกิดขึ้น จะมีความแข็งแรงประมาณ 2,500 ถึง 5,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และถ้ามีเนื้อแก้วในผลิตภัณฑ์จะมีความแข็งแรงประมาณ 7,000 ถึง 10,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

จากคุณสมบัติต่างๆของเซรามิกและวัสดุดิบที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเซรามิก น่าจะนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักได้

2.3 ถ่านกัมมันต์(Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการกระตุ้น (Activation) ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเป็นจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาด้วย เอ็กซเรย์ ดิฟแฟรคชั่น (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึก (Crystallites) อยู่บ้าง แต่มีข้อบกพร่องไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหินลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวมีโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า (เพียรพรรค ทศคร, 2535)

2.3.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ คือ (เกศรา นุตาลัย, 2531)

1) แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- เคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

- ฟิสิกส์ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2) แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวคาร์บอน

- ขนาดเล็ก (Micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

- ขนาดกลาง (Transitional pores or Mesopores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15 - 100 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction)

- ขนาดใหญ่ (Macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสีและการผลิตยา

3) แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็น สารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการให้น้ำบริสุทธิ์ ฯลฯ

- ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับก๊าซพิษหรือไอระเหย

4) แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- ก๊าซ (Gas adsorbents) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ และไอสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์และมีความแข็ง (Hard artificial char) เป็น วัสดุดิบในการผลิต

- สี (Colour adsorbents) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์และไม่แข็ง (Soft artificial char)

- โลหะ (Metal adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยกโลหะต่างๆ เช่น แยก ทอง, เงิน ออกจากแร่ที่ขุดได้

5) แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder activated carbon, PAC) ทำได้โดยการเอาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวิธีการบด ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการดูดซับแตกต่างกันไป ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสีในสถานะที่เป็นของเหลว โดยทั่วไปมีขนาด 5 - 100 ไมโครเมตร

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon, GAC) ทำจาก วัสดุดิบที่เป็นเม็ด หรือแบบผงทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน(binding agent) ตัวอย่างเช่น ทาร์ (tar) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัสดุดิบที่นิยมทำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ได้แก่ วัสดุดิบที่ค่อนข้าง

แข็งและมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่น ก๊าซพิษ และไอของสารละลายอินทรีย์

2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์เซชัน และแอคติเวชัน

1) การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์ สามารถผลิตจากวัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ถ่านหิน และพีท ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

สำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันแล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่คาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป

2) การคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization)

การคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และก๊าซ อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น ทำได้ง่ายๆ โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส

3) การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น (Activation) คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ

(1) วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) นอกจากนี้ยังมีแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 – 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน

(2) วิธีกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ฯลฯ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำ อิมมิตวียังยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ (Hassler, 1967)

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี (700 – 1,200 องศาเซลเซียส)

2.4 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption)

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

1) การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่ตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของ สารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดติดผิว

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ดูดติดที่ผิวของสารดูดติดผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก (ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายตัวบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับผิวได้แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะการดูดซับแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่ไม่เกิดการใช้อิเลคตรอนร่วมกันและไม่มีการถ่ายเทอิเลคตรอน แต่การดูดซับเกิดขึ้นจากการสัมผัสกันเฉพาะตัว (Individuality of interacting species) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างเบาบางคือแรง "แวน เดอ วาลส์" (Van der waals forces) การดูดซับทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า Van der waal's adsorption (ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร, 2543) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Intermolecular cohesion) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) นั่นเอง การดึงดูดกันด้วยแรงที่อ่อนจึงทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อยอยู่ในช่วง 0.5 – 5 กิโลแคลอรีต่อโมล และเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ทั้งหมด(Clair N. Sawyer, Perry L. McCarty and Gene F. Parkin, 1994) นั่นก็คือเกิดการหลุดออก (Desorption) ของสารถูกดูดซับจากสารดูดซับ นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพนี้จะไม่มีความจำเพาะ (Specific site) กล่าวคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีความอิสระที่จะถูกดูดซับบนตำแหน่งใดๆก็ได้บนผิวสารดูดซับ

2.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการดูดซับที่มีการถ่ายเทอิเลคตรอนไปมาระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับ กับพื้นผิวของสารดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นมา โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเลือกบริเวณที่เกิดการดูดซับได้และจะเกิดในลักษณะ Monolayer เท่านั้น ทำให้เกิดการคายความร้อนในปริมาณสูงคือในช่วง 5 – 100 กิโลแคลอรีต่อโมล หมายความว่า การหลุดออก (Desorption) ของการดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นได้น้อยมากๆ จึงถือว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible Interaction)

ซึ่งโดยปกติเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้แก่วัสดุจะทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

จากการเปรียบเทียบการดูดซับทั้งสองชนิดสามารถแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีกับการดูดซับทางกายภาพ (ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
คายพลังงาน 5-100 กิโลแคลอรีต่อโมล	คายพลังงาน 0.5-5 กิโลแคลอรีต่อโมล
เกิดสารประกอบทางเคมี	ปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้า
การหลุดออกยาก	การหลุดออกง่าย
ปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้	ปฏิกิริยาผันกลับได้

การวิเคราะห์ระบบดูดซับโดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ ซึ่งช่วยให้เข้าใจถึงการทำงานของระบบได้ดียิ่งขึ้นและเป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้คำนวณออกแบบระบบดูดซับต่อไป

2.4.3 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการหลุดออกจากผิวเข้าสู่สภาวะคงที่ที่จุดสมดุล จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลาย บนพื้นผิวของสารดูดซับ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุลโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลาย ที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ

2.4.4 การวิเคราะห์ระบบดูดซับ

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

สมการของ Langmuir สมการ (3-1) ได้แสดงสมการของ Langmuir สำหรับระบบดูดซับ โดยสมการนี้มีเงื่อนไขว่า การดูดซับจะคิดเฉพาะผิวชั้นเดียวและไม่เลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว

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

เมื่อ : q = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ

q_m = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

K_A = ค่าคงที่ของการดูดซับ, ลิตรของตัวดูดซับ/มิลลิกรัมของสารถูกดูดซับ

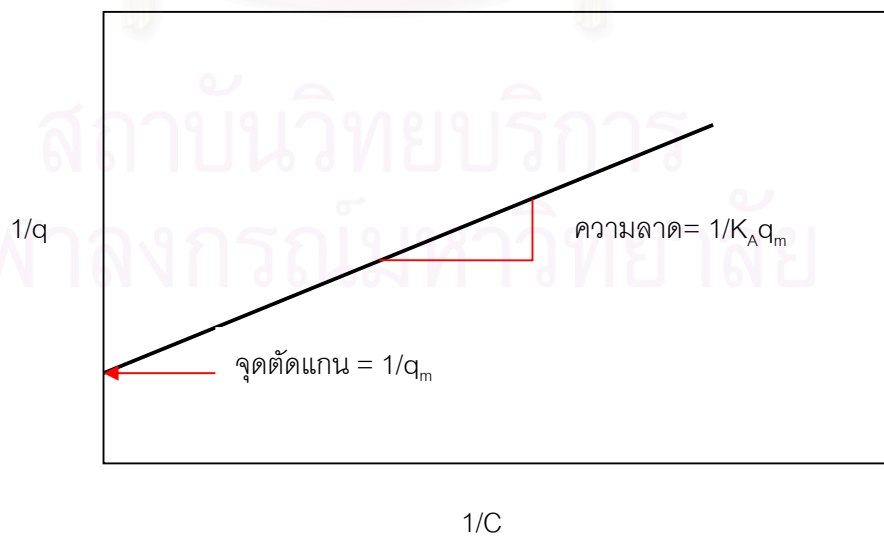
C = ความเข้มข้นของสารละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า q_m และ K_A ได้ด้วยวิธีการกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (3-2) หรือ (3-3)

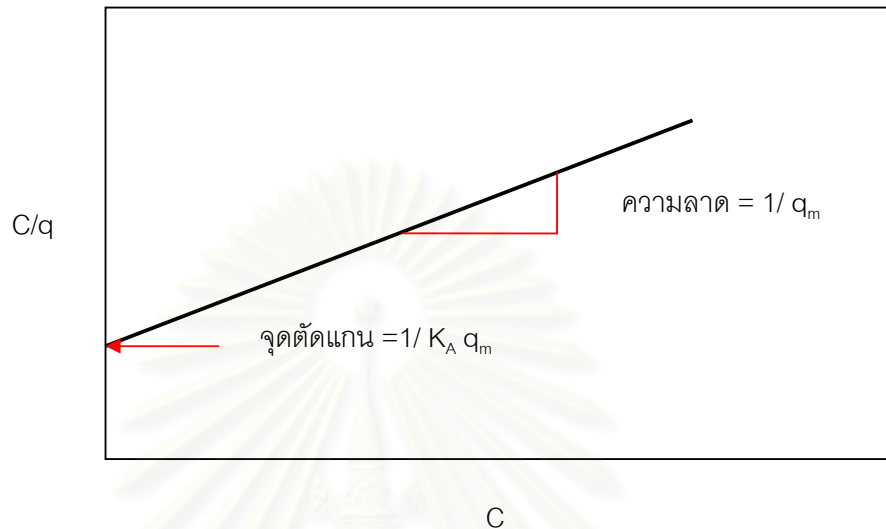
$$1/q = (1/q_m) + (1/K_A q_m)(1/C) \quad (2-2)$$

$$C/q = (C/q_m) + (1/K_A q_m) \quad (2-3)$$

จากสมการ (2-2) และ (2-3) สามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 สมการ (2-2) ของ Langmuir



รูปที่ 2.4 สมการ (2-3) ของ Langmuir

สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) จากสมการ (2-4) ได้แสดงสมการของ BET สำหรับระบบดูดซับ โดยสมการนี้มีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารดูดถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่ที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุกๆโมเลกุล

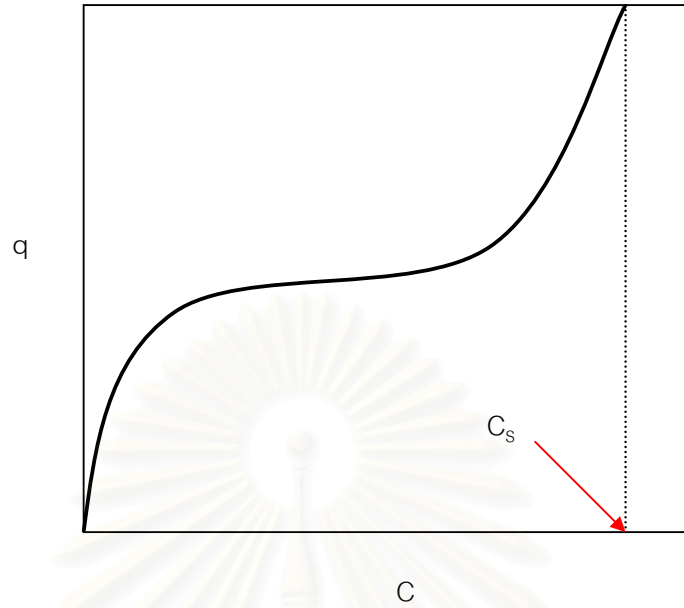
$$q = q_m K_B C / (C_s - C)[1 + (K_B - 1)(C/C_s)] \quad (2-4)$$

เมื่อ : C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ, มก./ล.

(สามารถอ่านค่าได้จากกราฟในรูปที่ 2.5)

K_B = ค่าคงที่ของการดูดซับ

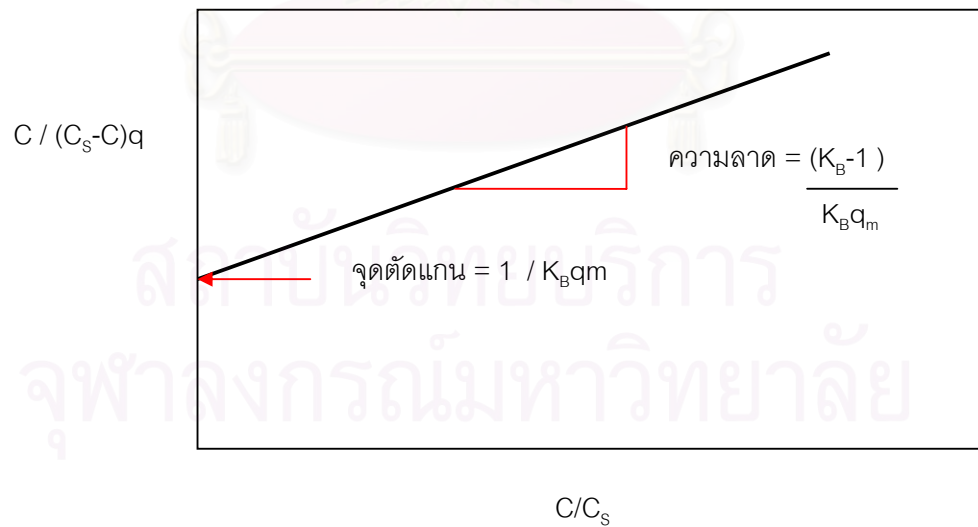
เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า K_B และ q_m ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2-5)



รูปที่ 2.5 สมการ (2-4) ของ BET

$$C / (C_s - C)q = (1 / K_B q_m) + [(K_B - 1) / K_B q_m](C / C_s) \quad (2-5)$$

จากสมการ (2-5) สามารถสามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สมการ (2-5) ของ BET

สมการของ Freundlich สมการ (2-6) ได้แสดงสมการของ Freundlich สำหรับระบบดูดซับ ซึ่งสมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ

$$q = K_F C^{1/n} \quad (2-6)$$

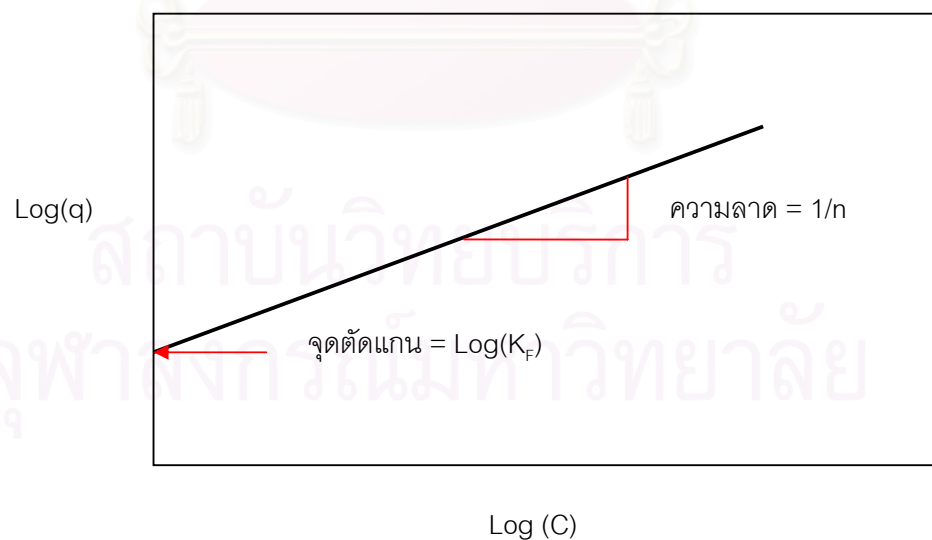
เมื่อ : K_F = ค่าคงที่

n = ค่าคงที่

เพื่อให้คำนวณหาค่าคงที่ K_F และ n ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้ Logarithm มาจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2-7)

$$\log(q) = \log(K_F) + (1/n) \log(C) \quad (2-7)$$

จากสมการ (2-7) สามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สมการ (2-7) ของ Freundlich

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (Factors influencing adsorption)

2.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface area)

อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive capacity) นั่นคือ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลสารถูกดูดซับได้มากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

2.5.2 ความปั่นป่วน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับที่เข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ทำให้กรณีนี้ Pore Diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

2.5.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลสารถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดกันผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไปทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวสารดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้ว่าเกิดมีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

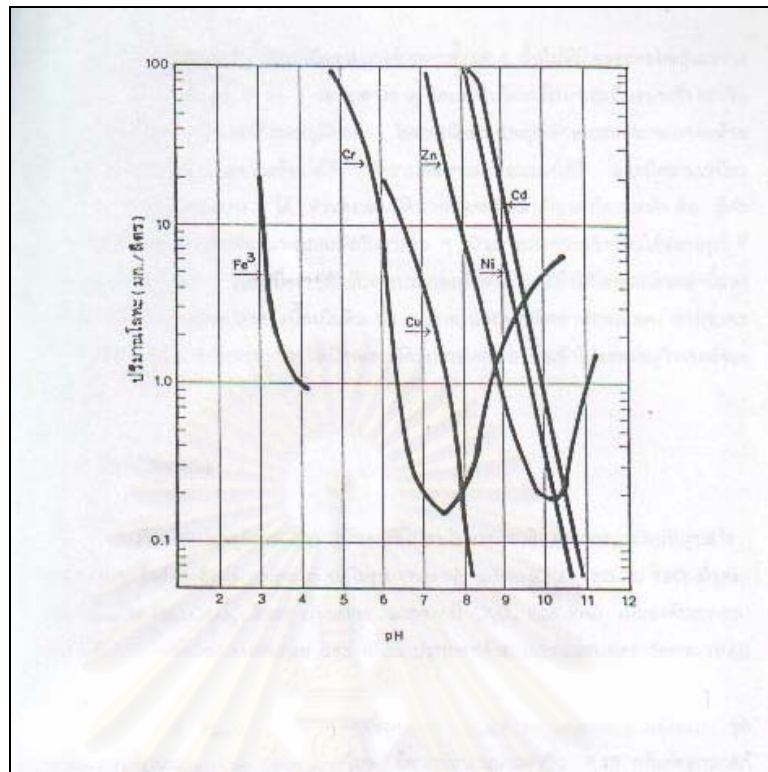
2.5.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

จากการวิจัยพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงของสารดูดซับเล็กน้อย (พอดีเข้าไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับและสารดูดซับจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งโดยปกติโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงจะถูกดูดเข้าไป (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538)

2.5.5 ค่าพีเอช(pH)

ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่า pH ต่ำๆจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่า pH สูงๆซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลสารถูกดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่เป็นสารละลายไอออนถ้าสารละลายมีค่า pH ต่ำๆจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแก่งแย่งกันที่จะดูดซับไอออนในสารละลายกับไฮโดรเนียมไอออน ซึ่งจะได้ผลในทางตรงกันข้ามกับเมื่อเป็นการดูดซับในสารละลายที่มีค่า pH สูงๆ นอกจากนี้ค่า pH ยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่าง ๆ

ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการศึกษาที่รูปที่ 2.8 แสดงความสามารถในการละลายน้ำของมลสารต่างๆ สำหรับพีเอชต่างๆ



รูปที่ 2.8 ความสามารถในการละลายน้ำของมลสารต่างๆ สำหรับพีเอชต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

2.5.6 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

2.6 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไปที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 ถึง 92 ภายในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ โดยทั่วไปโลหะมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ โลหะหนักส่วนใหญ่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกันคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาวสะท้อนแสงได้ดี และมีความเหนียวสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่า

ออกซิเดชันได้หลายค่าทำให้สามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูป ที่เสถียกว่โลหะอิสระ และเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ จะทำให้โลหะหนักเหล่านี้แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร จากนั้นจะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ซึ่งโลหะหลายชนิดมีคุณสมบัติที่เป็นอันตราย เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

2.6.1 โครเมียม (Cr)

โครเมียมในรูปธาตุอิสระ (Cr) เป็นสารที่ไม่พบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะพบในรูปสารประกอบออกไซด์ของสินแร่ chromite อยู่ในรูป chromic oxide (Cr_2O_3) ร่วมกับ FeO มีสูตรโดยทั่วไปเป็น $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ สินแร่ chromite นอกจากมี Cr_2O_3 และ FeO เป็นองค์ประกอบแล้วยังมี magnesium, aluminium และ silica ปะปนอยู่ด้วย (McGrath และ Smite, 1993 อ้างถึงใน วงศ์พงา เล็งสาย)

โครเมียมเป็นโลหะทรานซิชัน มีเลขอะตอมเท่ากับ 24 น้ำหนักอะตอม 51.9961 จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,890 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเท่ากับ 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขออกซิเดชันหลายค่าตั้งแต่ -2 ถึง 6 (WHO, 1988 อ้างถึงใน วงศ์พงา เล็งสาย) และมีลักษณะสีขาวนวลสุกใส มีความเปราะต่ำ ไม่เป็นสนิม จึงนำมาผสมหรือชุบที่ผิวของโลหะอื่น เพื่อป้องกันสนิมหรือเพิ่มความแข็งและเพื่อความสวยงาม นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นอย่างกว้างขวาง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ (Ullmann's , 1986 อ้างถึงใน พุทธิสาร ชัยพันธุ์, 2538:3)

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียม (II) ออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมเคมี	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แคตาลีซิส, ออกซิไดซ์ สารประกอบอินทรีย์
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมต	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมการชุบโลหะ	โครเมียม (VI) ออกไซด์	ความสวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมไม้	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	ป้องกันเชื้อราและแมลง
อุตสาหกรรมฟอกหนัง	โครเมียม (III) ซัลเฟต	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต, โครเมียม (III) อะซิเตต, โครเมียม (III) ฟลูออไรด์	ย้อมสีผ้า

โครเมียมตัวสำคัญที่พบในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำในธรรมชาติมีเพียง โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) ซึ่งพบมาก ส่วนโครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันค่าอื่นจะพบน้อยมาก นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมปริมาณโครเมียมในน้ำตามธรรมชาติ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างโครเมียมในน้ำตามธรรมชาติ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) เป็นสิ่งสำคัญในการคงอยู่ของโครเมียมในสิ่งแวดล้อม

2.6.2 โครเมียมในสิ่งแวดล้อม

โครเมียมถูกนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การผลิตเหล็ก วัสดุอัลลอยด์ อีรู ในเตาเผา สีย้อมและสีต่าง ๆ สารเคลือบโลหะ เพื่อป้องกันสนิม และใช้ในโรงงานฟอกหนัง การแพร่กระจายของโครเมียมเข้าสู่สิ่งแวดล้อม เกิดขึ้นได้จากการทิ้งของเสียที่มีการปนเปื้อนของโครเมียมในการผลิตทางอุตสาหกรรม การทิ้งน้ำเสียที่มีโครเมียมปะปนอยู่ โดยโครเมียมในรูปของไอออน +3 และ +6 เป็นสภาวะที่พบมากในธรรมชาติ ซึ่งโครเมียมในรูปไอออน +3 (trivalent chromium) หรือ Cr (III) สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นโครเมียมในรูปไอออน +6

(hexavalent chromium) หรือ Cr (VI) ซึ่งเป็นสารพิษไม่คงตัวในสภาพธรรมชาติ สามารถเคลื่อนที่ในดินเป็นการเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

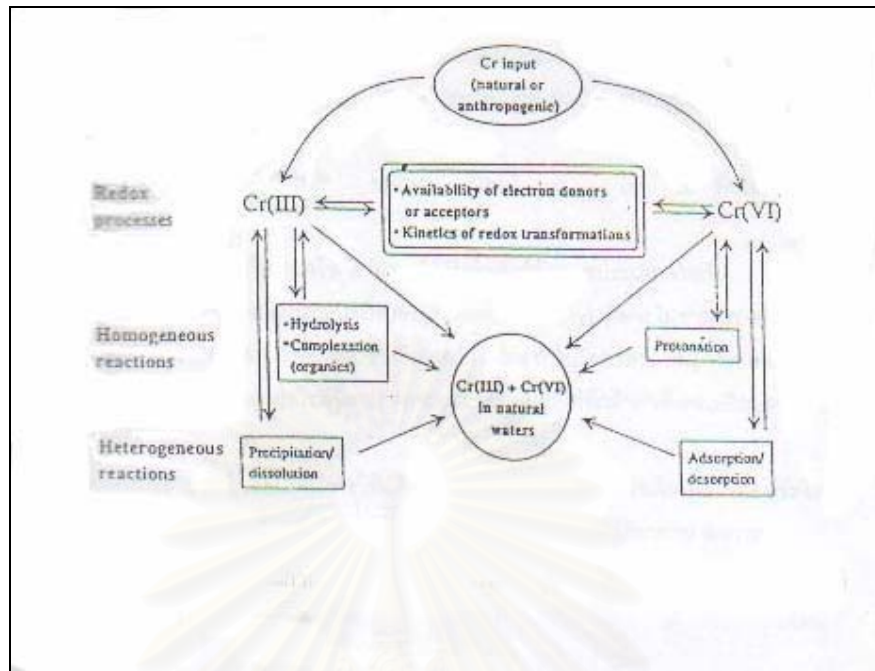
2.6.3 การแพร่กระจายและการเปลี่ยนรูปโครเมียมในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

การเปลี่ยนรูปไอออนของโครเมียมในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ขึ้นกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน

1) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการเปลี่ยนรูปจากโครเมียม (III) ไปอยู่ในรูปโครเมียม (VI) พบว่าสารประกอบที่เป็นตัวออกซิไดส์โครเมียมในน้ำคือ แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ก็สามารถออกซิไดส์โครเมียมได้ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดช้ากว่าการจับตัวกันตกตะกอนของโครเมียม เป็นผลให้โครเมียมในดินตกตะกอนไปก่อนได้ (Amacher และ Baber, 1982 อ้างถึงใน ชัชวาล จันทรุ่ง, 2537)

2) ปฏิกิริยารีดักชัน เป็นการเปลี่ยนรูปจากโครเมียม (VI) ไปอยู่ในรูปโครเมียม (III) พบว่าสารประกอบที่เป็นตัวรีดิวซ์โครเมียม คือ ซัลไฟด์, การเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์ และเหล็ก (II) โดยปฏิกิริยารีดักชันนี้เกิดขึ้นในสภาพเป็นกรด มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2-3 (Francouse, 1991 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2535)

เนื่องจากโครเมียมมีการเปลี่ยนรูปได้ในสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจในกระบวนการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนรูปของโครเมียม (III) ไปเป็นโครเมียม (VI) ซึ่งมีความเป็นพิษมาก แม้ว่าโครเมียม (VI) จะมีความเป็นพิษ แต่สำหรับโครเมียม (III) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช และสัตว์ รวมถึงมนุษย์ เช่น ช่วยในการรักษาระดับกลูโคสให้เป็นปกติ ช่วยในการสังเคราะห์กรดอะมิโน และกรดนิวคลีอิกในสัตว์บางชนิด (WHO, 1988 อ้างถึงใน วงศ์พงา เส็งสาย) อย่างไรก็ตามหากมีการสะสมในปริมาณที่สูงอาจทำให้เกิดอันตรายได้ รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนรูปของโครเมียม (III) ไปเป็นโครเมียม (VI) ในแหล่งน้ำธรรมชาติ



รูปที่ 2.9 กระบวนการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนรูปของโครเมียมในแหล่งน้ำธรรมชาติ
(Richard,1991 อ้างถึงใน วงศ์พงา เส็งสาย)

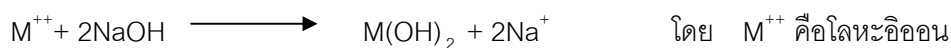
2.7 กระบวนการต่างๆในการกำจัดโลหะหนัก

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้คือ คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัด และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.7.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี(Chemical precipitation)

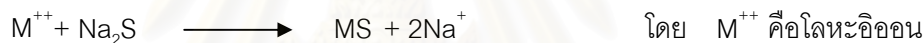
วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้งเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกันแต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธีคือการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์(Sulfide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมีคือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาตามสมการนี้



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

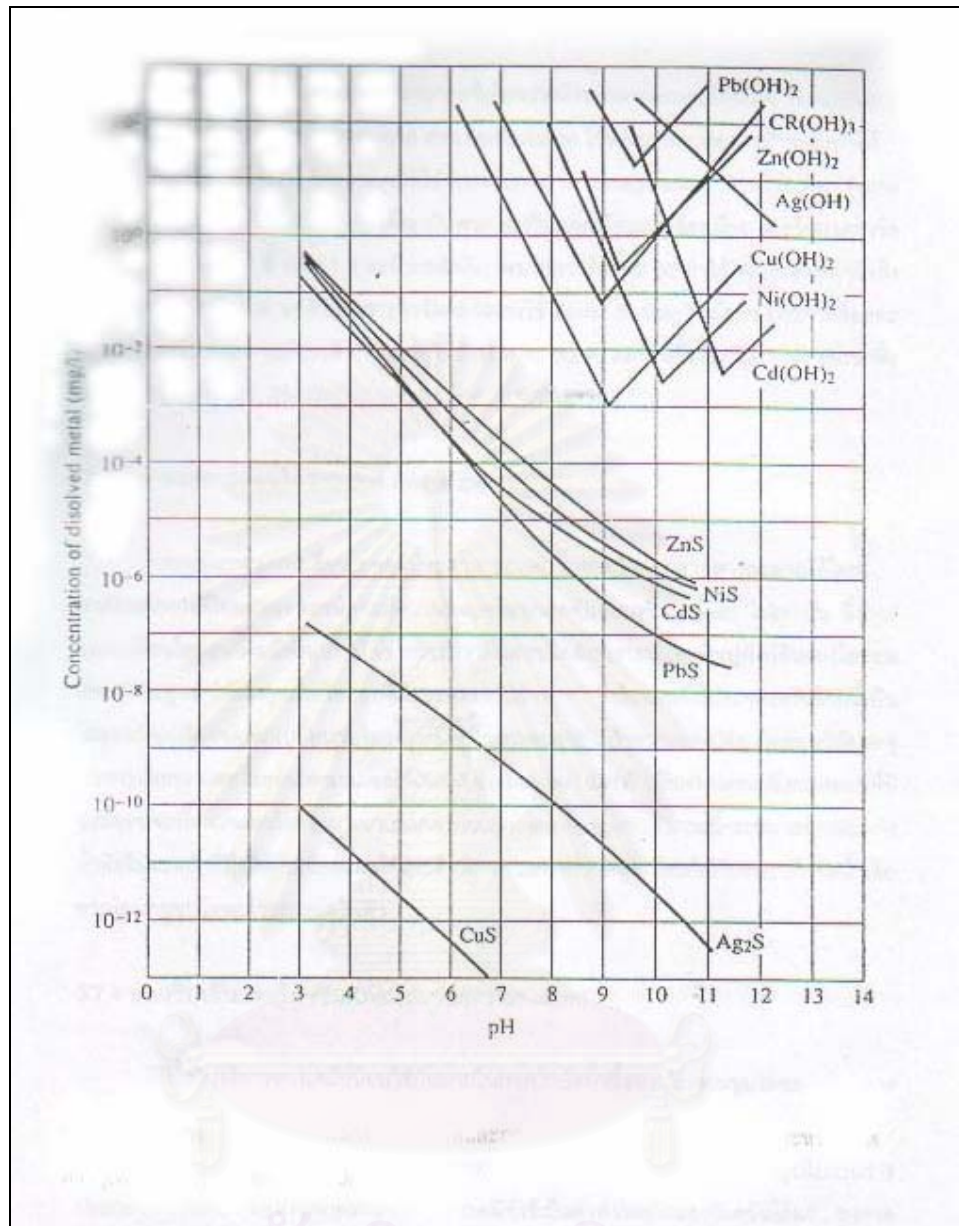
การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มักจะใช้ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ในการทำให้ตกตะกอน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาตาม สมการ



ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์นี้มีข้อจำกัด คือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไป จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง (จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์, 2539)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ของโลหะหนักชนิดต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ของโลหะหนักชนิดต่างๆ(Eckenfelder, 2000)

2.7.2 โคแอกกูเลชัน, ฟลอคคูเลชัน(Coagulation/Flocculation)

เป็นกระบวนการที่รู้จักกันดีว่าสามารถจับโลหะหนักจากสารละลายได้โดยที่ Coagulation ใช้หลักการกระตุ้นประจุไฟฟ้าบนอนุภาค ส่วน Flocculation ใช้หลักการกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้

อนุภาคจับตัวกันเป็นก้อน โดยสารเคมีที่ใช้กับกระบวนการ Coagulation ส่วนใหญ่คือ Ferric Sulfate หรือ Alum ซึ่งโลหะที่กำจัดได้จะเป็นพวก ตะกั่ว แคดเมียมและโครเมียม โดยในการกำจัด แคดเมียมใช้ช่วง 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)

2.7.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่าแคทไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่าแอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า

2.7.4 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction)

วิธีนี้เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่าง ๆ เจือปนอยู่ โดยในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีที่ค่า พีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟูริกไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนโลม์ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องมีความพอเหมาะปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์

2.7.5 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน วิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

2.7.6 การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีที่ง่ายที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดาและการระเหยภายใต้สุญญากาศ วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.7.7 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลาย ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงรวมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.7.8 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.7.9 การดูดติดผิว (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล สารดูดติดผิวที่นิยมใช้ในระบบบำบัดคือถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุด รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 \AA ถึง $20,000 \text{ \AA}$ การสังเคราะห์คาร์บอนชนิดนี้กระทำโดยได้ความชื้นออกจากวัตถุดิบเสียก่อน 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 (มันลิน ตันซูลเวคม์, 2538) กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้เช่น ถ่านคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมดและสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆเช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนเหลือถึงระดับที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม โดยอิออนโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดติดผิว สารดูดติดผิวอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมงनीเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone char) และแอคติเวตเต็ดซิลิกา ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $50 - 200$ ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือจับโมเลกุลหรือ คอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทสารอนินทรีย์ มีข้อจำกัดมาก

2) แอคติเวตเต็ดคาร์บอน อันที่จริงคาร์บอนชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็น Adsorbent ที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $600 - 1000$ ตารางเมตรต่อกรัม

แอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้แล้วสามารถนำมาทำรีเจนเนอเรชันโดย นำแอคติเวตเต็ดคาร์บอนไปสะเด็ดน้ำให้แห้งและนำไปอบให้ระเหยน้ำจนได้คาร์บอนแห้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ $800 - 950$ องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและ

ความชื้น จากนั้นนำคาร์บอนไปทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในถังน้ำเย็นและล้างเพื่อกำจัดส่วนที่เป็นฝุ่นออก นำไปใช้ได้ใหม่

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารแลกเปลี่ยนไอออน(Ion exchange resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับแอคติเวตเต็ดคาร์บอน แต่มีข้อดีคือ สามารถรีเจนเนอเรตได้ง่ายกว่ามากและสิ้นเปลืองน้อย (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกว่า Adsorbent (สารดูดซับ) จะอิ่มตัวด้วย Adsorbate (สารถูกดูดซับ) ซึ่งการนำเอาสารถูกดูดซับออกจากสารดูดซับเพื่อให้สามารถนำเอาสารดูดซับไปใช้ใหม่เรียกว่าการรีเจนเนอเรชัน (Regeneration processing) หรือ ปรากฏการณ์การย้อนกลับการดูดซับ การรีเจนเนอเรชันอาจกระทำได้โดยการใช้ความร้อน(Thermal swing regeneration) ความดัน (Pressure swing regeneration) หรือ สารเคมี (Concentration swing regeneration) (แดน อินทร์มา,2539)

2.7.10 การบำบัดโดยจุลินทรีย์ (Biological treatment)

เป็นการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักเช่น จากกระบวนการ Activated Sludge พบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักเช่น ทองแดง นิกเกิล สังกะสีและโครเมียมได้อย่างใดอย่างหนึ่ง ในเงื่อนไขที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประกฤต เลิศจรสรามดี (2539) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าว ผลการศึกษาพบว่า ขุยมะพร้าวที่มีความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณ 0.20 กรัม ความสามารถในการกำจัดไอออนของตะกั่ว และไอออนของปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ สามารถที่จะกำจัดได้ 80% และ 78% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ซีลีเนียมและฟางข้าว พบว่า ขุยมะพร้าวมีความสามารถในการกำจัดไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าซีลีเนียมและฟางข้าว สำหรับน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 0.3 – 0.7 ส่วนในล้านส่วน พบว่า ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าวสามารถกำจัดไอออนของตะกั่วได้เกือบ 100%

อธิชัย นพแก้ว (2539) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและปรอท คือ pH เท่ากับ 4 เวลาสัมผัส 15 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ และสำหรับน้ำชะมูลฝอย คือ pH เดิมของน้ำชะมูลฝอยซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 7 – 8 เวลาสัมผัส 15 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์นอกจากจะกำจัดโลหะหนักแล้วยังกำจัดซีโอดีและสีจากน้ำชะมูลฝอยอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดเท่ากัน โดยมีประสิทธิภาพรวมประมาณ 90% และ 70% สำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยและน้ำเสียสังเคราะห์ตามลำดับ

ชฎิล ฉายรัศมี, เมธิ ชลไมตรีและสุนทรี เฟื่องฟู (2541) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรที่ผ่านการคาร์บอนในเซชัน คือ กากเมล็ดกาแฟ ชังข้าวโพด ชานอ้อย และแกลบ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุชีวมวลที่ผ่านการคาร์บอนในเซชันและขึ้นรูปด้วยดินเหนียว นำวัสดุที่ได้ไปดูดซับโลหะหนัก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิลและแคดเมียม พบว่ากากเมล็ดกาแฟมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลประมาณ 90 นาที ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักหลังขึ้นรูปด้วยดินเหนียวกับก่อนขึ้นรูปด้วยดินเหนียวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การขึ้นรูปด้วยดินเหนียวจะมีความแข็งแรงมากกว่า และพบว่าเม็ดดูดซับที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าขนาดใหญ่

ไชยันต์ ไชยยะ (2542) ได้ศึกษาปัจจัยการผลิตเม็ดดูดซับ โดยผลิตจากปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกากกาแฟกับดินที่ 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 และความสามารถในการดูดซับลดลงกว่าร้อยละ 10 หลังจากนำกลับมาใช้ใหม่เป็นครั้งที่ 3

ชนิตา เสมรัตน์ (2543) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยสารดูดติดผิวที่ใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ ถ่านกะลา และถ่านชานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่าถ่านกะลาไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน โดยพิจารณาจากผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพรุนดลิช ส่วนถ่านกัมมันต์และถ่านชานอ้อยมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งาน

ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร (2543) พบว่าการดูดซับสารละลายโลหะหนัก ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียมและโครเมียม ด้วยตัวดูดซับต่างๆ ได้แก่ แร่ดินเหนียว kaolinite และ bentonite และดินเหนียวจากสถานที่ต่างๆ พบว่าจะเข้าสู่สมดุลของการดูดซับประมาณ 2 ชั่วโมง และเมื่อความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้นสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับต่างๆ ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพีเอชที่สูงขึ้นจะทำให้ประจุที่ผิวของคอลลอยด์เป็นลบมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถดูยึดกับประจุบวกของโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าแร่ดินเหนียว bentonite สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด รองมาคือแร่ดินเหนียว muscovite และแร่ดินเหนียว kaolinite ตามลำดับ โดยลำดับความสามารถในการถูกดูดซับจากมากไปน้อยดังนี้คือ $\text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Zn}$ ยกเว้นแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ดูดซับตะกั่วได้สูงสุด

อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์ (2543) ทำการศึกษา 2 ขั้นตอนคือ ตอนแรกสภาวะที่เหมาะสมและความสามารถในการกำจัดโครเมียม (VI) ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (VI) ที่ความเข้มข้น 50 มก./ล. , 100 มก./ล. และ 200 มก./ล. พีเอช 4, 6 และ 8 พบว่า ทราเยเคลือบแมงनीไทต์มี ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่ ความเข้มข้น 100 มก./ล. พีเอช 4 สามารถกำจัดได้ 1.74 มก. ต่อทราเยเคลือบแมงनीไทต์ 1 กรัม และตอนที่สองศึกษาความเป็นไปได้ในกรณีพื้นอำนาจตัวกลางด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก พีเอช 4 พบว่า สามารถนำกลับโลหะหนักได้ โดยสามารถนำกลับมาใช้งานต่อได้ โดยประสิทธิภาพจะลดลงประมาณ 30% ในครั้งแรก และ 50% ในครั้งต่อไป

พิชิต จริยธรรมานุกูล (2544) ทำการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ค่าพีเอช ต่อประสิทธิภาพของผงตะไบเหล็กในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำได้ดินสังเคราะห์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น อัตราการกำจัด

เริ่มต้นและเวลาในการกำจัดจะเพิ่มขึ้น ถ้าลดค่าพีเอชแล้ว อัตราการกำจัดเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เวลาในการกำจัดลดลง สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันสูงในขอบเขตของการวิจัยนี้คือ ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม ค่าพีเอช 6 และปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

สุจินีย์ ค่อยเสียม (2544) ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ ระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าวโดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น กับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวและที่ผลิตจากกะลาปาล์ม มีค่าไอโอดีน 532.29 และ 486.45 มิลลิกรัม/กรัม พื้นที่ผิว 492.42 และ 385.91 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ

การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟลูนดลิช โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวสามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 8.37 และ 5.52 มิลลิกรัม/กรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม สามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 2.53 และ 1.63 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งแสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟลูนดลิชพบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิกรัมต่อกรัม การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ 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

ส่วนการทดสอบโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่งโดยผ่านน้ำทิ้งโรงงานสิ่งทอ 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

สุธิดา ไชค์ญญาววัฒน์ (2544) ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียม(VI) ของถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด คือถ่านกัมมันต์ชนิด A(coconut shell) และถ่านกัมมันต์ชนิด B (rubber wood) ในน้ำเสียซีไอดีแบบปิดในห้วงปฏิบัติการ พบว่าที่พีเอช 2 สามารถกำจัดโครเมียมได้ประมาณ 100% และ 99% ตามลำดับ เวลาสัมผัสจนถึงจุดสมดุล 2 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิด B มีขีดความสามารถในการกำจัดโครเมียม (VI) ได้ดีที่สุด น้ำเสียซีไอดีมีค่าพีเอชต่ำกว่าศูนย์ การดูดติดผิวเกิดขึ้นภายใน 15 นาที จำนวนโครเมียม (VI)

ที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 4.09 มิลลิกรัมของโครเมียม (VI) ต่อกรัมของคาร์บอน ทดลองต่อเนื่อง พบว่าอัตราการกรอง 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง เป็นอัตราการกรองที่สามารถรองรับการทดลองซีไอดี และต้นทุนการกำจัด พบว่าน้ำเสียซีไอดีปริมาตร 1 ลิตรจะต้องเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 24.88 บาท

Pradas และคณะ (1994) การดูดซับแคดเมียมและสังกะสีบนดินเบนโทไนท์ (natural bentonite) ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยให้ความร้อนที่ 110 หรือ 200 องศาเซลเซียส และการดูดซับบนดินเบนโทไนท์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และ 2.5 โมลต่อลิตร ที่ 30 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองเหมาะสมกับสมการของ Langmuir และได้คำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (X_m) แคดเมียม สำหรับ acid-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

Rengaraj และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาถึงการดูดซับ O-cresol โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกะลาปาล์ม พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มสามารถลด O-cresol จากสารละลายได้ถึง 95% ในสภาวะที่เหมาะสมและมีความสามารถในการดูดติดผิว เมื่อคำนวณโดยใช้ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช เท่ากับ 19.58 mg/g ของ O-cresol

Lua และ Guo (2000) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยใช้วิธีแอคติเวทด้วย CO_2 แบบขั้นตอนเดียว พบว่าขนาดของอนุภาคของกะลาปาล์มเริ่มต้นและอัตราการให้ความร้อนไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราการไหลของ CO_2 มีผล

Seng , Lee และ Liew KY(2001) ได้ศึกษาการใช้ดินฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำมัน มาดูดซับโครเมียม[Cr(VI)] และนิกเกิล[Ni(II)] ดินฟอกสีที่ถูกปรับสภาพโดยการให้กรดตามด้วยการให้ความร้อน และปรับสภาพโดยความร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิระหว่าง 200 และ 800 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวของดินที่ปรับสภาพโดยความร้อนมีค่ามากที่สุด 120 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิการเผาระหว่าง 400 และ 500 องศาเซลเซียส ขณะที่การปรับสภาพด้วยกรดและความร้อนทำให้ดินมีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ 140 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับโครเมียม [Cr(VI)] ของ

ทั้งสองวิธีมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 300 องศาเซลเซียส และจะมีค่าการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่านี้ ที่ค่าพีเอชต่างๆ มากกว่า 95 % ของโครเมียมถูกดูดซับโดยดินที่เผาที่ 300 องศาเซลเซียสโดยใส่ตัวดูดซับ 1 กรัม กับสารละลายโครเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับนี้สอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรอนด์ริก (Freundlich) การดูดซับนี้เกิดขึ้นโดยใช้ดินที่ปรับสภาพโดยการเผาที่ 200 และ 700 องศาเซลเซียส และโดยการใช้กรดร่วมกับการเผาที่ 200 และ 500 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 42 และ 44%ตามลำดับที่พีเอชเท่ากับ 6

Stefanova (2001) ได้ศึกษาการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว ทองแดงและสังกะสี ในสารละลาย โดยดินมามาร์ลที่ผ่านการกระตุ้นด้วยการเผาที่ 750 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโลหะหนักแรกเริ่ม เวลาสัมผัส พีเอชและอุณหภูมิ สารละลาย โดยทำการทดลองแบบเบบ พบว่าจลศาสตร์การกำจัดไอออนโลหะขึ้นอยู่กัอัตราส่วนสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับ ที่ความเข้มข้นไอออนต่างๆ ไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการของ Langmuir ขณะที่อัตราส่วนอัตราส่วนสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับมีค่าสูง ไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการของ Freundlich ค่า พีเอช มีผลต่อบริเวณขอบของการดูดซับสามารถกำจัดไอออนโลหะได้จากการตกตะกอนและการเกิดสารประกอบที่ผิว จากการสังเกตพบว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 40 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าดินมามาร์ลที่ถูกปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนสามารถกำจัดไอออนโลหะในสารละลายในช่วงความเข้มข้นกว้างได้

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการขยะมูลฝอย(Solid waste laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

- 1) เตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 2) การศึกษาองค์ประกอบของดินดำ
- 3) การหาปัจจัยการผลิตตัวดูดซับที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์ม และอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมที่สุด
- 4) การศึกษาเวลาการเข้าสู่สมดุลและประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์
- 5) การศึกษาการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ค่าพีเอชในช่วง 1 - 8
- 6) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลามะพร้าว ตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด
- 7) การศึกษาการชะละลายไอออนโครเมียมจากตัวดูดซับที่ผลิตได้ด้วยน้ำกลั่น และสารละลายกรดอ่อน
- 8) การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่ผลิตได้ที่มีความเหมาะสมที่สุด
- 9) เปรียบเทียบคุณสมบัติจำเพาะ ของตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลามะพร้าว ตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด
- 10) ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับทั้งที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลามะพร้าวและตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลาปาล์ม
- 11) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวดูดซับ

- 1) ตู้อบความร้อน : WTB Binder. Germany
- 2) เตาเผา : Valcan box furnace รุ่น 3-1750. USA (รูปในภาคผนวก ข.)
- 3) ภาชนะเซรามิกพร้อมฝาปิด (รูปในภาคผนวก ข.)
- 4) โถป้องกันความชื้น(Desiccator)
- 5) ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 8, 10, 30, 100, 140 และ 325

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.
- 4) กระดาษกรอง Whatman No. 5
- 5) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 6) เครื่องกวนสาร

3.2.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ตัวดูดซับที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์

- 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 4 บริษัท Malvern
- 5) เครื่องX-Ray Diffractometer บริษัท Bruker รุ่น D8 Advance
- 6) เครื่องX-Ray Fluorescence บริษัท Philips รุ่น PW 2400

3.2.4 อุปกรณ์ในการอัดเม็ดและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

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

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

3.2.5 อุปกรณ์ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

- 1) ท่ออะโคริกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.40 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร
- 2) สายยางใส วาล์ว และ ข้อต่อสายยาง
- 3) ถังเก็บน้ำขนาด 75, 15 และ 5 ลิตร
- 4) ปั้มน้ำชนิด Submersible Pump ของ บริษัท JUN รุ่น HX-4500 ขนาด 70 W.
- 5) เครื่องเหล็กเพื่อยึดแนวท่อ
- 6) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

3.2.6 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ดินดำ
- 2) กะลามะพร้าว
- 3) กะลาปาล์ม
- 4) น้ำกลั่น
- 5) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- 6) สารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนต์โครเมียม
- 7) สารละลายกรดไนตริก (HNO_3)
- 8) สารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- 9) สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- 10) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 11) สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 12) สารละลายสต็อกความเข้มข้นมาตรฐาน
- 13) สารละลายน้ำแป้ง (Soluble Starch)
- 14) สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- 15) สารละลายไอโอดีน
- 16) สารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (KIO_3)

- 17) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
- 18) โปแตสเซียมไอโอไดน์ (KI)
- 19) โปแตสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

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	200 รอบ/นาที
2. ระยะเวลาในการเขย่า	120 นาที
3. อุณหภูมิในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง(25 องศาเซลเซียส)
4. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา	20 องศาเซลเซียส/นาที
5. ระยะเวลาในการเผาที่อุณหภูมิคงที่	30 นาที
6. ความเข้มข้นสารละลายโครเมียม	10 มิลลิกรัม/ลิตร
7. ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	100 มิลลิลิตร
8. อุณหภูมิในการอบ	105 องศาเซลเซียส
9. ขนาดตัวดูดซับ	8-30 mesh
10. เบอร์ตะแกรงคัดขนาดดินดำ	140
11. เบอร์ตะแกรงคัดขนาดกะลา	100
12. อัตราการไหลเข้าคอลัมน์	18 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. ชนิดของวัสดุดิบ	ดินดำ กะลามะพร้าว และกะลาปาล์ม
2. อุณหภูมิในการเผา	400, 500, 600, 700, 800, 900 องศาเซลเซียส
3. อัตราส่วนผสมดินดำ ต่อ กะลามะพร้าว หรือ กะลาปาล์ม	100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90
4. ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8
5. ปริมาณตัวดูดซับที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์ในการทดลองหาไอโซเทอม	0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075 และ 0.1 กรัม
6. ความลึกชั้นตัวกลางในคอลัมน์	30, 60 และ 90 เซนติเมตร

3.3.3 ตัวแปรตาม เป็นตัวแปรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระ ซึ่งตัวแปรตามในการทดลองนี้ได้แก่

- 1) ความคงตัวของตัวดูดซับ
- 2) ประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม
- 3) ประสิทธิภาพในการถูกชะของไอออนโครเมียม
- 4) ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลออกจากคอลัมน์จนถึงจุดหมดสภาพ
- 5) น้ำหนักตัวกลางในคอลัมน์
- 6) ค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับ

3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียม

น้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเตรียมจากโปรแตสเซียมไดโครเมต($K_2Cr_2O_7$) โดยโปรแตสเซียมไดโครเมตมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 294 กรัม และโครเมียมมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 52 กรัม ทำการเตรียมเป็นสารละลายเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้โปรแตสเซียมไดโครเมต 2.828 กรัม ละลายในน้ำ 200 มิลลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (ASTM D1687-92) ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ทำได้โดย

การเจือจางสารละลายเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร แล้วจึงเติมกรดฟอสฟอริก(H_3PO_4) 1 มิลลิลิตร เพื่อควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลอง

เมื่อได้ความเข้มข้นและปริมาตรที่ต้องการแล้ว ทำการปรับค่าพีเอชตามการทดลอง โดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.5 การดำเนินการวิจัย

3.5.1 การศึกษาองค์ประกอบของดินดำ

ศึกษาปริมาณสารประกอบต่าง ๆ ของดินดำด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

3.5.2 การเตรียมวัสดุดิบในการวิจัย

3.5.2.1 การเตรียมถ่านจากกะลามะพร้าว และกะลาปาล์ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) นำกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มมาบดให้มีขนาดเล็กพอสมควร
- 2) นำกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่บดได้ มาแช่ในสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ ประมาณ 1 คืน
- 3) นำกะลามะพร้าวและกะลาปาล์ม มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
- 4) นำกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่ผ่านการอบแล้ว มาเผาที่อุณหภูมิคงที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อนคงที่ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที
- 5) นำถ่านกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่ได้ มาล้างด้วยน้ำร้อน และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5% หลาย ๆ ครั้งเพื่อล้างสารกระตุ้นที่เหลือจากการเผา
- 6) นำถ่านกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่ผ่านการล้างสารกระตุ้นแล้ว มาบดด้วยเครื่องบดเพื่อคัดขนาด โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 Mesh

3.5.2.2 การเตรียมดินดำเพื่อใช้ผลิตตัวดูดซับ

1) นำดินดำที่จะใช้เป็นส่วนประกอบมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) หลังจากผ่านการอบแห้งแล้ว นำมาคัดขนาด โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 Mesh เพื่อให้ได้ดินดำที่มีความบริสุทธิ์สูง ปราศจากสิ่งเจือปน

3.5.2.3 การผลิตตัวดูดซับ

1) นำดินดำและถ่านกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์ม ที่ผ่านการเตรียมจากข้อ 3.5.2.1 และข้อ 3.5.2.2 มาผสมกันตามอัตราส่วนต่างๆ ตามที่ไว้ในการทดลอง

2) เติมน้ำกลั่นให้ทั่วส่วนผสม พร้อมกับคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากัน โดยการกวนเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที

3) จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ มาขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกด้วยเครื่องอัดเม็ด(Pellet mill บริษัท CPM รุ่น NH- 396165) จะได้ชิ้นงานทรงกระบอกยาวประมาณ 0.3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 เซนติเมตร

4) แล้วนำเข้าสู่ตู้อบเพื่ออบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

5) ส่วนผสมที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว นำไปเผาในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ในการทดลอง โดยเผาที่อุณหภูมิตั้งที่เป็นเวลา 30 นาที

3.5.3 การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ

3.5.3.1 การหาปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมเบื้องต้นโดยดูจากความคงตัวของตัวดูดซับ

1) นำดินดำและกะลามะพร้าวที่เตรียมได้จากข้อ 3.5.2.1 และข้อ 3.5.2.2 มาผสมกันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างดินดำและกะลามะพร้าวในช่วง 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 จากนั้นนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับตามข้อ 3.5.2.3

2) นำชิ้นงานที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ที่ได้ มาให้ความร้อนโดยการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3) นำตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าว และอนุกรมิกการเผาต่างๆ ทั้ง 60 ตัวอย่าง ที่เผาแล้วมาคัดขนาดโดยผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 30

4) นำตัวดูดซับทั้ง 60 ตัวอย่าง ที่เตรียมได้มาตัวอย่างละ 1 กรัม และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ผ่านการล้างเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนักแล้ว เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที

5) นำของผสมจากข้อ 4 ไปผ่านตะแกรงขนาด 30 mesh แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรงไปวัดความขุ่นด้วยวิธีเนฟฟีโรเมตริก(มันซิน ตันซูลเวคม์ , 2543)

6) ทำซ้ำจากข้อ 1) ถึง 5) แต่เปลี่ยนจากกะลามะพร้าวเป็นกะลาปาล์ม

3.5.3.2 การทดลองหาตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมสูงสุด

1) นำตัวอย่างตัวดูดซับทั้ง 120 ตัวอย่างจากการทดลอง 3.5.3.1 มาดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และตัวดูดซับ 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ผ่านการล้างเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนักแล้ว

2) นำทั้งหมดไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที พร้อมเก็บตัวอย่างที่เวลา 120 นาที

3) นำตัวอย่างที่เหลือไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น(HNO_3) แล้วนำไปวัดปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมทั้งหมดที่เหลือ โดยเครื่อง AAS.

4) ทำการเลือกอัตราส่วนผสมและอนุกรมิกการเผา ของตัวดูดซับที่ดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ได้ดีที่สุดของทั้งดินดำผสมกะลามะพร้าวและดินดำผสมกะลาปาล์มชนิดละ 1 ตัวอย่าง มาศึกษาต่อไป

3.5.4 การศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

เป็นการศึกษาทดลองหาเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา (equilibrium) เพื่อนำไปใช้ในการหาความสามารถในการดูดซับและไอโซเทอมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

1) เตรียมตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวที่ดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ได้ดีที่สุด จากข้อ 3.5.3

2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

3) ชั่งตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวขนาด 325 mesh ปริมาณ 0.05 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 9 ใบ

4) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากข้อ 2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ

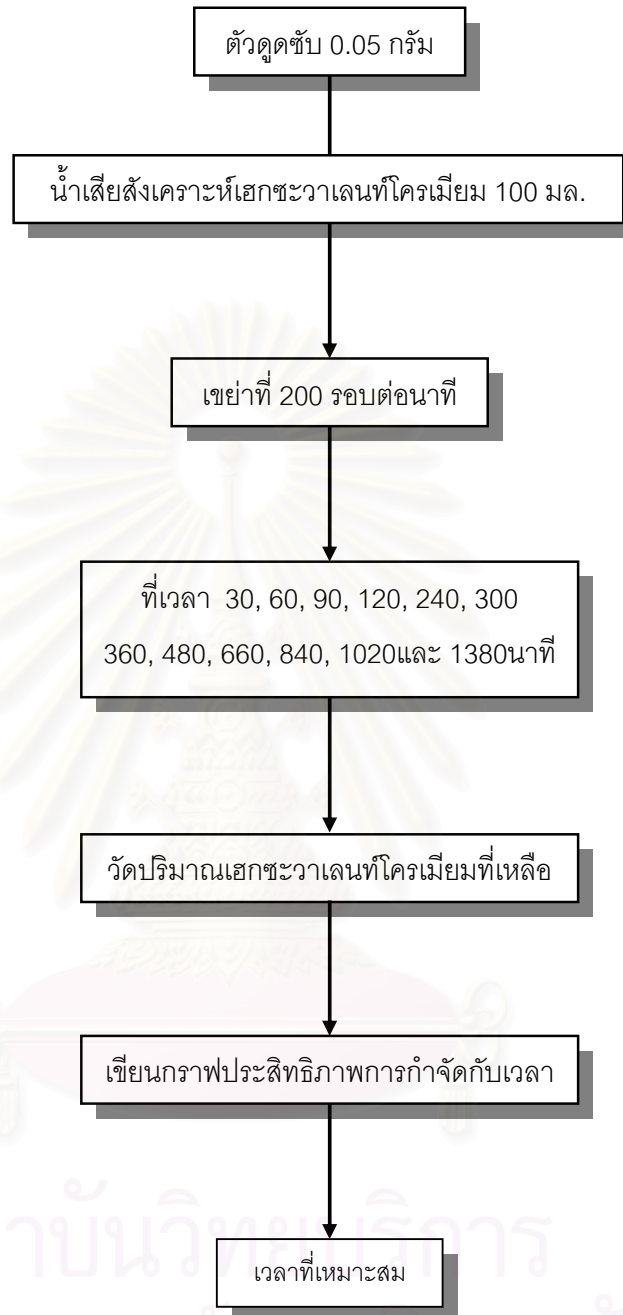
6) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที

7) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และ 1, 1.5, 2, 3, 4, 8, 12, 24 ชั่วโมง

8) นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณเฮกซะวาเลนทีโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ โดยเครื่อง AAS.

9) นำค่าที่ได้ไปทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม

10) ทำซ้ำจากข้อ 1) ถึง 9) แต่เปลี่ยนจากตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลาปาล์ม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

3.5.5 การศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

เป็นการศึกษาทดลองค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม เพื่อนำไปใช้ในการหาความสามารถในการดูดซับและไอโซเทอมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนทีโครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 1

2) ชั่งตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวขนาด 325 mesh ปริมาณ 0.05 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 3 ใบ

3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ

4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่รอบการทำงาน 200 รอบต่อนาที

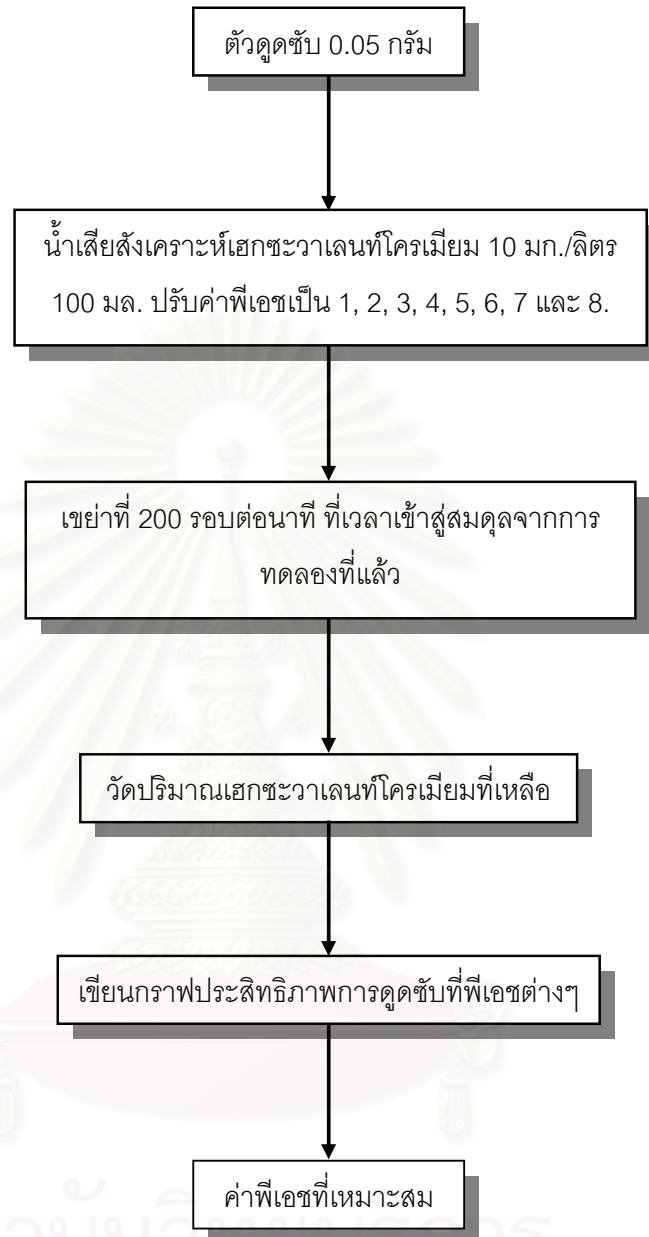
5) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมดุล (การหาค่าเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.4)

6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณเฮกซะวาเลนทีโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ โดยเครื่อง AAS.

7) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 แต่ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนทีโครเมียม เป็น 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8

8) นำค่าที่ได้ไปทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพีเอชกับประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม

9) ทำซ้ำจากข้อ 1) ถึง 8) แต่เปลี่ยนจากตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลาปาล์ม



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

3.5.6 การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) ชั่งตัวดูดซับจากดินค้ำผสมกะลามะพร้าวขนาด 325 mesh ปริมาณ 0, 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075 และ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่รอบการทำงาน 200 รอบต่อนาที
- 5) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมดุล (ผลจากการหาค่าเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.4)
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมทั้งหมด โดยเครื่อง AAS.
- 7) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับตามรูปแบบของฟรุนดลิช และแลงเมียร์ โดยเลือกสมการที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด
- 8) ทำซ้ำจากข้อ 1) ถึง 7) แต่เปลี่ยนจากตัวดูดซับจากดินค้ำผสมกะลามะพร้าว เป็นตัวดูดซับจากดินค้ำผสมกะลาปาล์ม

3.5.7 การศึกษาทดลองหาไอโซเทอมถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

- 1) เตรียมถ่านดูดซับชนิด Calgon Filtrasorb 300 แบบผงที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh
- 2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3) ชั่งถ่านดูดซับจำนวน 0, 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075 และ 0.1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 4) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 5) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่รอบการทำงาน 200 รอบต่อนาที
- 6) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมดุล (ผลจากการหาค่าเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.4)
- 7) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมทั้งหมด โดยเครื่อง AAS.

- 8) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ
- 9) เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากข้อ 3.5.6 (ผลจากตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลา มะพร้าว และตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลาปาล์ม)

3.5.8 การศึกษาการชะไอออนโครเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น

- 1) ชั่งตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าว ขนาด 8-30 mesh ปริมาณ 1 กรัม เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที กับสารละลายเฮกซะวาเลนทีโครเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทำการปรับค่า พีเอชที่เหมาะสม (ผลจากการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.5) ปริมาตร 100 มิลลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร เป็นเวลาเท่ากับเวลาในการเข้าสู่สมดุล (ผลจากการหาค่าเวลาที่ เหมาะสมจากข้อ 3.5.4) ทำทั้งหมด 18 ตัวอย่าง
- 2) นำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ใช้น้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิตร นำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ โดยเครื่อง AAS. เพื่อหาปริมาณเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ
- 3) นำกระดาษกรองที่มีตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวที่ผ่านการดูดซับแล้วไปอบที่ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จนแห้ง
- 4) นำตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวที่แห้ง ปริมาณ 1 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร จำนวน 9 ใบ
- 5) เติมด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 ซึ่งเตรียมจาก น้ำกลั่น 1 ลิตร กรด H_2SO_4 เข้มข้น 0.3 มิลลิตร กรด H_3PO_4 1 มิลลิตร ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 5 ด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาตร 100 มิลลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 6) เขย่าบนเครื่องเขย่าที่อัตราเขย่า 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง
- 7) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 ใช้น้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง ประมาณ 50 มิลลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที และจากขวดแต่ละใบที่เหลือเมื่อเวลาผ่านไป 15, 30 นาที และ 1, 2, 4, 8, 12, 24 ชั่วโมง
- 8) นำตัวอย่างทั้ง 9 ไปตรวจปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่ถูกชะออก โดยเครื่อง AAS.
- 9) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) แต่เปลี่ยนจากสารละลายกรดเป็นน้ำกลั่น
- 10) ทำซ้ำจากข้อ 1) ถึง 6) แต่เปลี่ยนจากตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

3.5.9 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนที่โครเมียม ของตัวดูดซับที่ผลิตได้ ในถังดูดซับแบบคอลัมน์

1) เตรียมถังดูดซับแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการวิจัย โดยใช้ท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.42 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร

2) เตรียมตัวกลาง คือ ตัวดูดซับเพียงชนิดเดียว ที่เลือกโดยพิจารณาปัจจัยในการดูดซับ และผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

3) บรรจุตัวกลางให้มีความสูงของชั้นตัวกลาง 90 เซนติเมตร

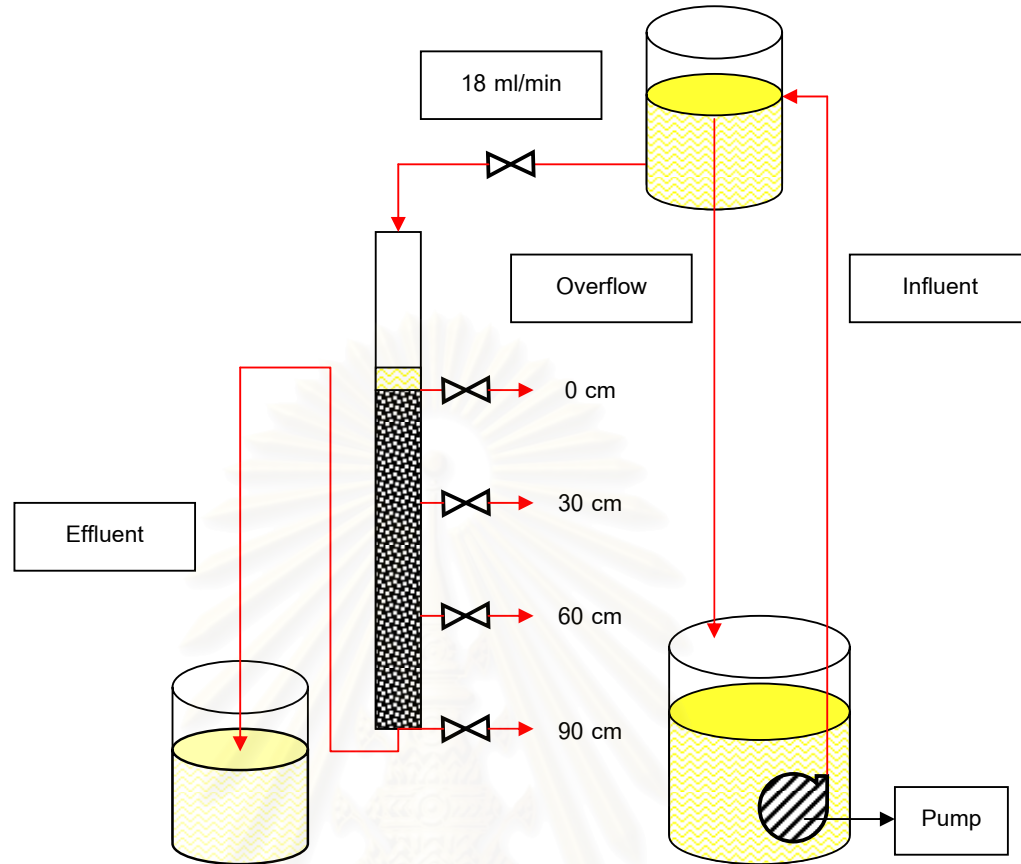
4) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นเฮกซะวาเลนที่โครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

5) เติมน้ำเสียแบบต่อเนื่องโดยควบคุมอัตราไหลที่ 18 มิลลิลิตรต่ออนาที ให้ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลลง(down flow) โดยใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังพักน้ำเสีย ซึ่งมีทางน้ำล้นสำหรับควบคุมระดับน้ำให้คงที่

6) เก็บตัวอย่างน้ำทุก 1 - 5 ลิตรของปริมาตรน้ำทิ้งที่บำบัดผ่านระบบแล้วจากทางน้ำออกที่ตำแหน่ง 0, 30, 60, และ 90 เซนติเมตรของความสูงชั้นตัวกลาง โดยในแต่ละครั้งจะเก็บตัวอย่างน้ำ 15 มิลลิลิตร โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำจนประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับศูนย์

7) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณเฮกซะวาเลนที่โครเมียมทั้งหมดที่เหลือ โดยเครื่อง AAS.

8) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ Breakthrough curve ของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย



รูปที่ 3.3 ระบบการทำงานของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

3.5.10 การหาคุณลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวดูดซับที่ผลิตได้ กับ ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

นำตัวดูดซับที่ผลิตได้จากดินดำผสมกะลามะพร้าว ตัวดูดซับจากดินดำผสมกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. วิเคราะห์หา Iodine Number ตามวิธี ASTM D4607-86
2. วิเคราะห์หา Surface Area และ Pore Diameter โดยเครื่อง BET. Surface Area
3. วิเคราะห์หา Functional Group โดยเครื่อง FT-IR
4. วิเคราะห์หา Electrical Charge โดยเครื่อง Zeta Potential
5. วิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างด้วยภาพขยาย 3000 เท่า โดยเครื่อง

Scanning Electron Microscope (SEM)

3.5.11 ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับที่ผลิตได้

ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับ 1 กิโลกรัม และต้นทุนในการใช้ตัวดูดซับบำบัดน้ำเสียโครเมียมให้ได้ตามมาตรฐาน โดยคิดจาก

1. ค่าวัตถุดิบทางตรง ได้แก่ ดินดำ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม
2. ค่าวัตถุดิบทางอ้อม ได้แก่ สารเคมีและวัสดุสิ้นเปลืองต่างๆ
3. ค่าดำเนินการผลิต ได้แก่ ค่าไฟฟ้า ค่าแรงงานในการผลิต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การดำเนินการทดลองในการวิจัยนี้ ได้ทำตามแผนการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งมีผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองดังนี้

4.1 การศึกษาองค์ประกอบของดินดำ

ดินดำที่ใช้เป็นส่วนผสมหลักในการผลิตตัวดูดซับที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคลย์ แอนด์ มินอรัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งดินดำที่ใช้เป็นดินดำที่มีความบริสุทธิ์และความละเอียดสูง เนื่องจากเป็นดินดำที่ได้ผ่านการล้างและทำการคัดขนาดสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมเซรามิก จากการวิเคราะห์เพื่อหาสารประกอบของดินดำด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 4.1 พบว่าดินดำประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ ดังนี้ Si Al Fe K Mg Ti Ca และ Na โดยมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของดินโดยทั่วไป

ตารางที่ 4.1 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของดินดำ ที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer

Compound	Mass (%)	Compound	Mass (%)
SiO_2	60.24	MgO	0.63
Al_2O_3	25.05	TiO_2	0.57
Fe_2O_3	1.55	Na_2O	0.28
K_2O	2.06	CaO	0.24

4.2 การเตรียมวัสดุดิบในการวิจัย

ในการวิจัยนี้มีการเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการทดลองทั้งสิ้นสองชนิดหลักๆ ได้แก่ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว และอีกชนิดคือตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม โดยในขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบในการวิจัยนี้ มีวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิต ตัวดูดซับคือ ดินดำ กะลามะพร้าว และกะลาปาล์ม โดยในส่วนของดินดำเตรียมโดยการนำมาอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 mesh ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในส่วนของ กะลามะพร้าวและกะลาปาล์มมีขั้นตอนการเตรียมเหมือนกันคือ นำกะลาทั้งสองชนิดมาอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำมาบดให้มีขนาดเล็กพอสมควรดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แล้วนำมาแช่ในสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ ประมาณ 1 คีน หลังจากนั้นนำมาอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงอีกครั้ง แล้วจึงนำไปเผาเพื่อกระตุ้นโดยเผาที่อุณหภูมิคงที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีอัตราการให้ความร้อนคงที่ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำร้อน และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5% หลาย ๆ ครั้งเพื่อล้างสารกระตุ้นที่เหลือจากการเผาดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แล้วจึงนำ กะลามะพร้าวและกะลาปาล์มที่ได้ไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh เพื่อร่อนนำไปผสมกับดินดำตามอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.1 ดินดำที่ใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตตัวดูดซับ



รูปที่ 4.2 กะลามะพร้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับ



รูปที่ 4.3 กะลาปาล์มที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับ



รูปที่ 4.4 กะลามะพร้าวที่ผ่านการเผาและล้างสารกระตุ้นออกแล้ว



รูปที่ 4.5 กะลาปาล์มที่ผ่านการเผาและล้างสารกระตุ้นออกแล้ว



รูปที่ 4.6 กะลามะพร้าวที่ได้จากการเตรียมก่อนนำไปผสมกับดินดำเพื่อขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับ



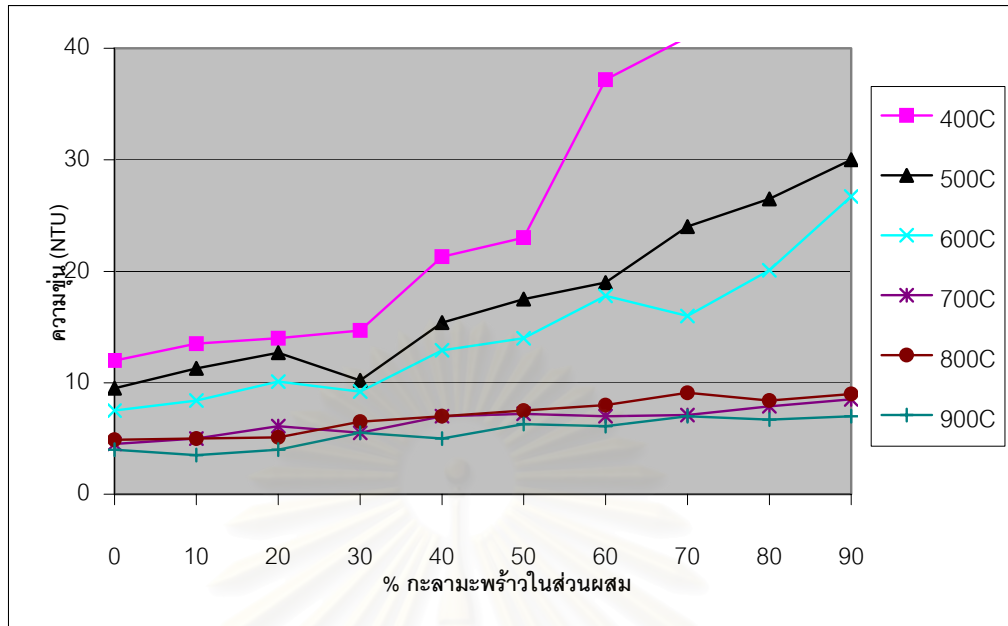
รูปที่ 4.7 กะลาปาล์มที่ได้จากการเตรียมก่อนนำไปผสมกับดินดำเพื่อขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับ

4.3 การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ

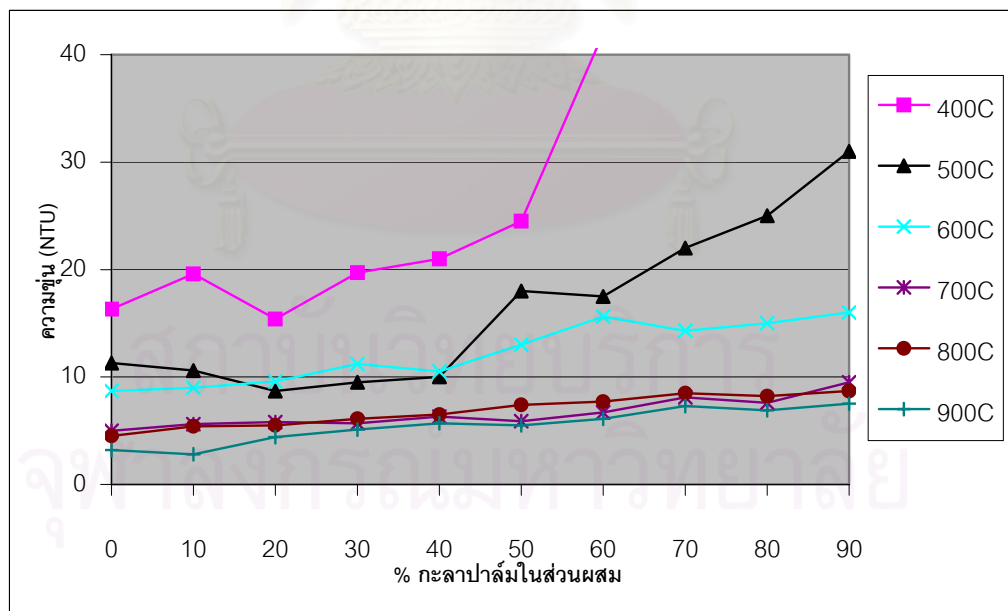
ในการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ มีขั้นตอนการดำเนินการโดยนำดินดำผสมกับกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์มที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์มดังนี้ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 นำส่วนผสมแต่ละอัตราส่วนที่ได้ คลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยผสมน้ำประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที แล้วจึงนำส่วนผสมแต่ละอัตราส่วนที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ด จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเล็ก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำส่วนผสมแต่ละอัตราส่วนที่ได้มาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีโดยทำการเผาในภาชนะเซรามิกที่มีฝาปิดเพื่อให้ได้สภาวะอับอากาศ ซึ่งจากปัจจัยการผลิตต่างๆ จะได้ตัวดูดซับที่มีคุณลักษณะเป็นวัสดุเซรามิก จำนวนทั้งหมด 120 ตัวอย่าง ที่มีคุณสมบัติต่างกัน นำตัวอย่างทั้งหมดไปทำการทดลองหาค่าความซึบ และค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เพื่อหาตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าวจำนวน 1 ตัวอย่าง และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์มจำนวน 1 ตัวอย่าง

4.3.1 การหาปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมเบื้องต้นโดยดูจากความคงตัวของตัวดูดซับ

ในเบื้องต้นจะทำการทดลองเพื่อดูความคงตัวของตัวดูดซับทั้งสองชนิด เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกอัตราส่วน และอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ โดยนำตัวอย่างทั้ง 120 ตัวอย่าง มาบดและคัดขนาดให้ได้ขนาด 8-30 mesh ตัวอย่างละ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่า ที่ 100 รอบต่อนาที นาน 120 นาที จากนั้นกรองด้วยตะแกรงขนาด 30 mesh นำน้ำที่ได้ไปวัดค่าความซึบด้วยวิธีเนฟฟีโรเมตริกได้โดยเหตุผลที่ใช้ความซึบในการดูความคงตัวของตัวดูดซับ เนื่องจากหากความซึบที่วัดได้มีค่าสูง แสดงว่าตัวดูดซับดังกล่าวเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆปะปนกับน้ำ หรือคือมีความคงรูปต่ำไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ส่วนรายละเอียดข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.8 ความขุ่นของน้ำกลั่นหลังเขย่ากับตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าว และอุณหภูมิการเผาต่างๆ



รูปที่ 4.9 ความขุ่นของน้ำกลั่นหลังเขย่ากับตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์ม และอุณหภูมิการเผาต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิด มีลักษณะแนวโน้มของเส้นกราฟ ความขุ่นมีแนวโน้มใกล้เคียงกันหรือไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากวัตถุที่เป็นกะลามะพร้าว และกะลาปาล์มแม้จะเป็นวัตถุดิบคนละชนิดกัน แต่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกัน และเป็นสารประกอบเซลลูโลสเหมือนกัน เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับซึ่งมีขนาดเล็กมาก ทำให้โครงสร้าง และความแข็งแรงของตัวดูดซับทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันมากเท่ากับชิ้นงานขนาดใหญ่

ดังนั้นจากผลการทดลองจากรูปที่ 4.8 และ 4.9 โดยค่าในแกนแนวนอน หมายถึง เปรอร์เซ็นต์ของกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์มที่มีอยู่ในส่วนผสม พบว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อค่า ความคงตัวของตัวดูดซับทั้งสองชนิด โดยในช่วงอุณหภูมิการเผา 400-500 องศาเซลเซียส ค่า ความขุ่นส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิการเผา 600-900 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุณหภูมิ การเผาต่ำจะมีแนวโน้มของค่าความขุ่นสูงกว่าที่อุณหภูมิการเผาสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเผา 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะมีค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU ในทุกอัตราส่วนการผสมของ ดินดำต่อกะลาทั้งสองชนิด ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่อุณหภูมิการเผาสูงดินมีความสุกตัวมากกว่าที่ อุณหภูมิการเผาต่ำ โดยเมื่อดินสุกตัวมากขึ้นอนุภาคดินจะเกาะกันมากขึ้นและแข็งแรงขึ้นทำให้ตัว ดูดซับที่ได้มีความคงตัวสูง เมื่อนำมาเขย่ากับน้ำกลั่น ทำให้อนุภาคหลุดออกมาน้อย ค่าความขุ่นที่ วัดได้จึงน้อย และสังเกตได้ว่าค่าความขุ่นที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าที่ อุณหภูมิการเผาอื่นมากอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปสำหรับการเผาเป็นวัสดุ เซรามิก โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าดินยังไม่เกิดการสุกตัว มีการเกาะกันของอนุภาคดินอย่างหลวมๆ เมื่อนำไปเขย่ากับน้ำกลั่นอนุภาคจึงจะละลายออกมามาก ทำให้ค่าความขุ่นที่วัดได้มีค่าสูงมาก และ ตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์ดินในส่วนผสมยิ่งมาก จะมีแนวโน้มค่าความขุ่นค่อนข้างต่ำ และพบว่าช่วง อุณหภูมิ 600-900 ที่อัตราส่วนผสมของกะลานั้น ค่าความขุ่นที่วัดได้มีค่าต่ำกว่า 10 NTU เป็นเพราะมีอนุภาคดินอยู่ในส่วนผสมค่อนข้างมาก ทำให้ดินสามารถจับตัวกันได้ได้ง่าย ประกอบกับ ปริมาณกะลาทั้งสองชนิดที่มีน้อยในส่วนผสมนั้น ทำหน้าที่เป็นตัวแทรกให้เกิดช่องว่างในดิน ความ ร้อนจึงกระจายเข้าสู่เนื้อดินได้สะดวก จึงมีความคงรูปมากกว่าเมื่อกะลาทั้งสองชนิดอัดตัวกันแน่น ที่อุณหภูมิการเผาเดียวกัน

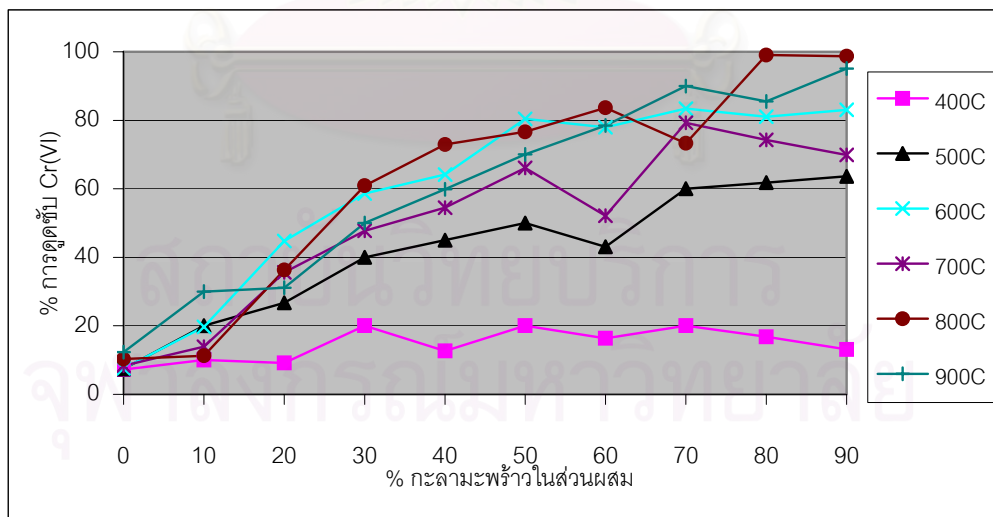
จากผลการทดลองเพื่อศึกษาความคงตัวของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ตัวอย่างส่วนใหญ่ที่ เผาที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส ค่อนข้างมีความคงตัวไม่ต่างกันมาก จากการวัดด้วยค่า ความขุ่นของน้ำ และจากการสังเกตด้วยตาเปล่าลักษณะตัวดูดซับยังคงรูปอยู่ถือว่ามีความคงรูปที่ สามารถนำไปใช้งานได้ ดังนั้นควรเลือกอุณหภูมิการเผาในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส แต่เนื่อง จากไม่มีเกณฑ์ในการกำหนดจึงจะใช้ค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU เป็นเกณฑ์ทำให้จำนวนตัวอย่าง

ลดลง เพื่อให้การตัดสินใจเลือกตัวอย่างเหมาะสมมากขึ้น โดยหากปล่อยน้ำที่มีค่าความขุ่นสูงลงในแหล่งน้ำก็จะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา โดยอาจอ้างอิงจากคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งกำหนดค่าความขุ่นสูงสุดไม่เกิน 10 NTU (มันสิน ต้นทุลเวศม์, 2538) เนื่องจากไม่มีมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมระบุค่าความขุ่นกำหนดไว้

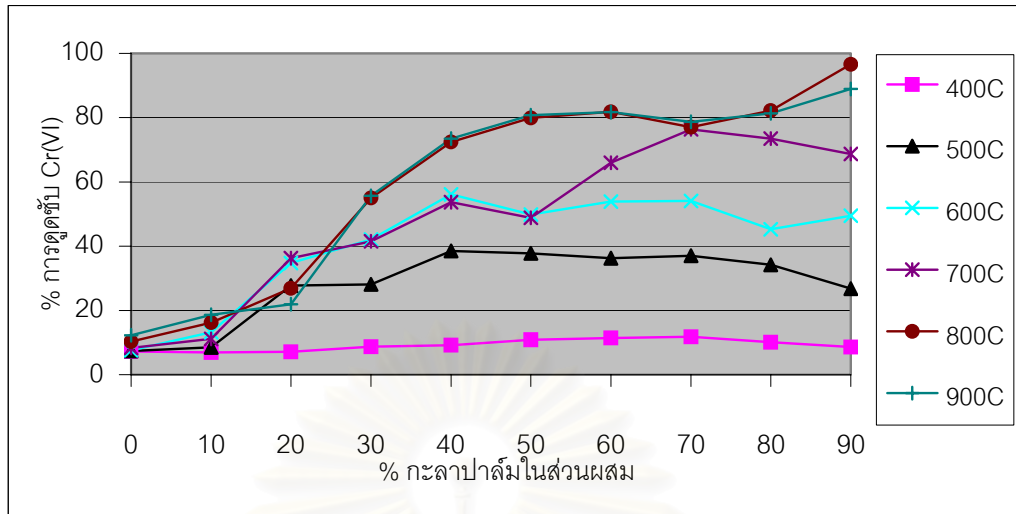
ต่อไปจะนำตัวอย่างทั้งหมดของตัวดูดซับทั้งสองชนิดไปทำการทดลอง หาตัวอย่างที่มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมสูงสุด เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกตัวดูดซับที่มีความเหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิด โดยตัวอย่างทั้ง 120 ตัวอย่างจะนำมาทดลองในการทดลองต่อไป

4.3.2 การทดลองหาตัวอย่างที่มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมสูงสุด

นำตัวอย่างตัวอย่างทั้งหมด 120 ตัวอย่าง มาทดลองหาค่าการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยนำตัวดูดซับขนาด 8-30 mesh มาตัวอย่างละ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 120 นาทีกับน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ส่วนรายละเอียดข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.10 การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะละมะพร้าว และอุณหภูมิการเผาต่างๆ



รูปที่ 4.11 การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมของตัวดูดซับที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์ม และ อุณหภูมิการเผาต่างๆ

จากการทดลองดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ในการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับ เพื่อเลือกตัวดูดซับเพียงตัวอย่างเดียวที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดนำไปศึกษาในขั้นตอนการทดลองต่อไป พบว่าประสิทธิภาพของการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเหมือนกัน โดยประสิทธิภาพของการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนดินดำต่อกะลาทั้งสองลดลง คือที่อัตราส่วนที่มีส่วนผสมของกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์มมาก จะมีค่าประสิทธิภาพของการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมสูงกว่า อัตราส่วนที่มีส่วนผสมของกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์มน้อย เนื่องจากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มในส่วนผสมนั้น มีสภาพเป็นถ่านซึ่งมีรูพรุนสูงกว่าดินดำมาก ดังนั้นยังมีปริมาณถ่านมากก็มีรูพรุนมาก ซึ่งก็คือมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากนั่นเอง และจะพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 400-800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะสูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีแนวโน้มคงที่จนถึงต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ดินมีความสุกตัวมาก โครงสร้างดินเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่อุณหภูมินี้สารประกอบซิลิกา (SiO_2) ในเนื้อดินจะเกิดการหลอมตัวเป็นเนื้อแก้ว ซึ่งจะทำให้เนื้อดินมีความแข็งแกร่งมาก แต่ความพรุนจะน้อยทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย ทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมลดลงด้วย

จากผลการทดลอง สามารถเลือกตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมสูงที่สุด ซึ่งในกรณีของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวก็คือตัวอย่างที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าวเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 80 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 99.02 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรณีของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม คือตัวอย่างที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์มเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 96.66 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



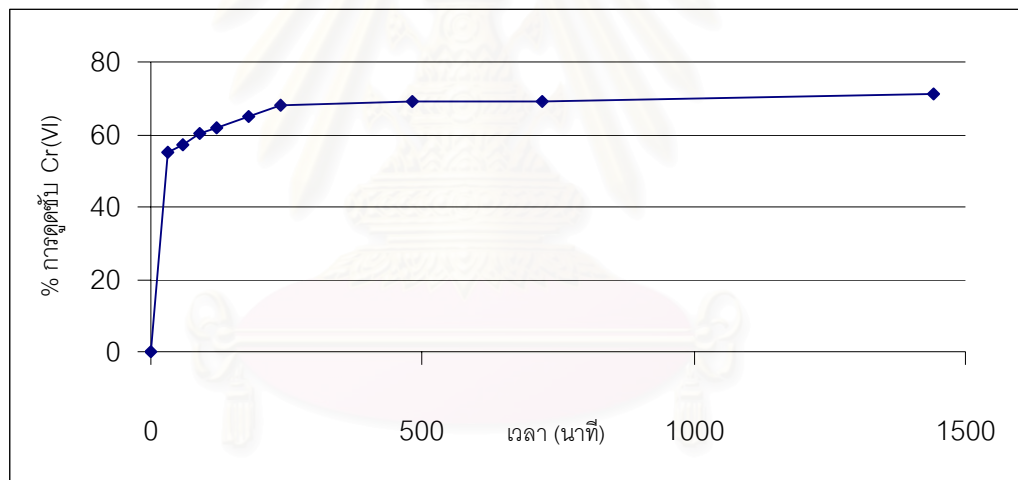
รูปที่ 4.12 ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว 20:80 เเผาที่ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม 10:90 เเผาที่ 800 องศาเซลเซียส

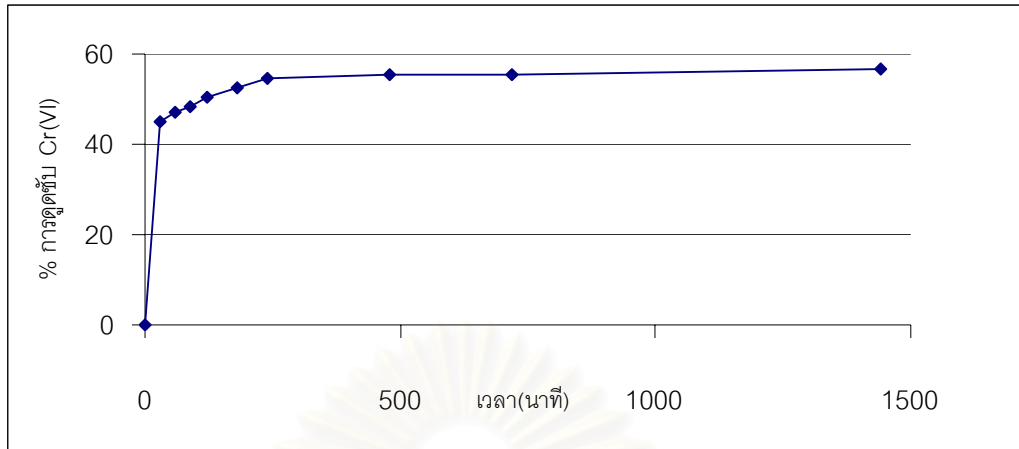
4.4 การศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

การทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับทั้งสองชนิด คือตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะปาล์ม โดยนำตัวอย่างตัวดูดซับทั้งสองตัวอย่างที่ได้จากการทดลองหาค่าที่เหมาะสม คือตัวอย่างที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าวเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 80 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส และตัวอย่างที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์มเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส มาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh ปริมาณ ตัวอย่างละ 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ที่เวลาในการเขย่าต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ส่วนรายละเอียดข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.14 เวลาในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว จะมีอัตราการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ในช่วง 30 นาทีแรก โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีความชันมาก โดยที่เวลาสัมผัสนี้จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเท่ากับ 55.06 หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลงและค่อนข้างคงที่ที่เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเท่ากับ 67.95



รูปที่ 4.15 เวลาในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์ม

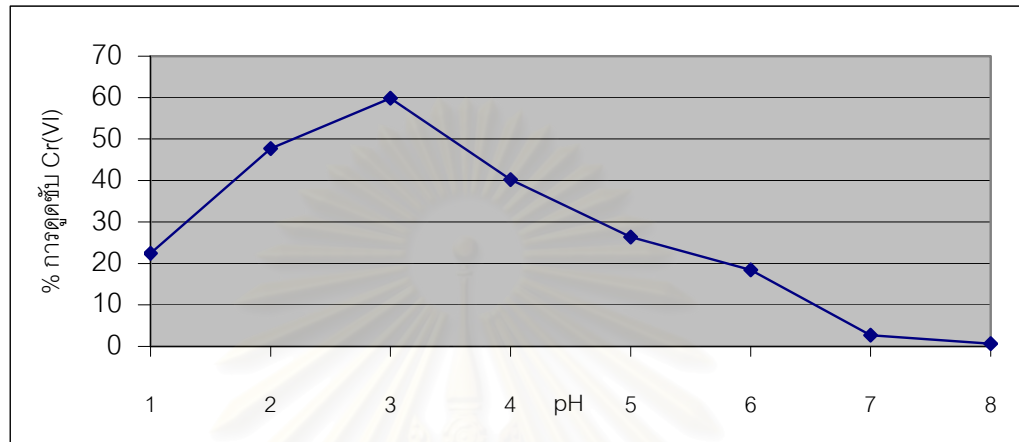
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์ม จะมีอัตราการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ในช่วง 30 นาทีแรก โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีความชันมาก โดยที่เวลาสัมผัสนี้จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเท่ากับ 45.06 หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลงและค่อนข้างคงที่ที่เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเท่ากับ 54.59

จากผลการทดลองของเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุล ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด พบว่าเมื่อระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มมากขึ้น อัตราการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะลดลง สังเกตได้จากความชันของกราฟทั้งสองจะลดลง เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเกือบคงที่ ดังนั้นเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ควรมีค่าประมาณ 4 ชั่วโมง และจากการทดลองจะพบว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าวจะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมสูงกว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์มในทุกๆ ช่วงเวลาสัมผัส

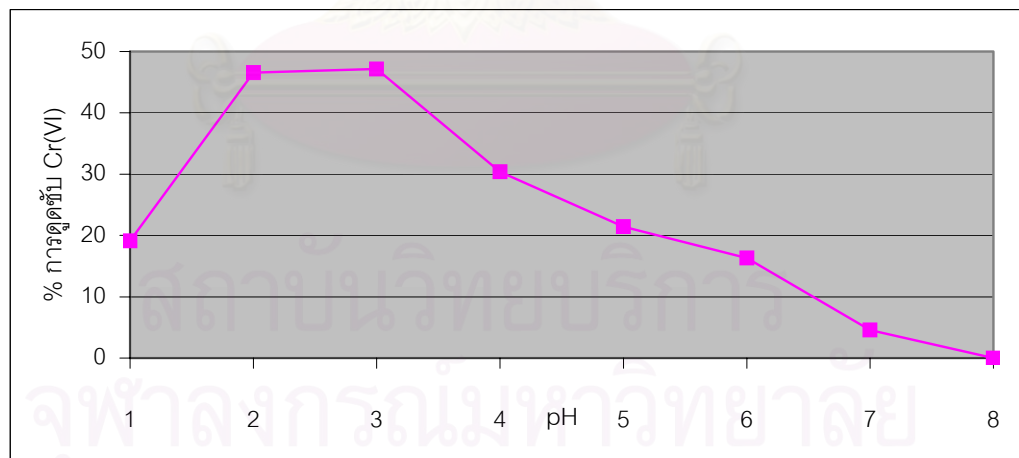
4.5 การศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

การทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิด คือตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์ม โดยนำตัวอย่างตัวดูดซับทั้งสองตัวอย่างมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325

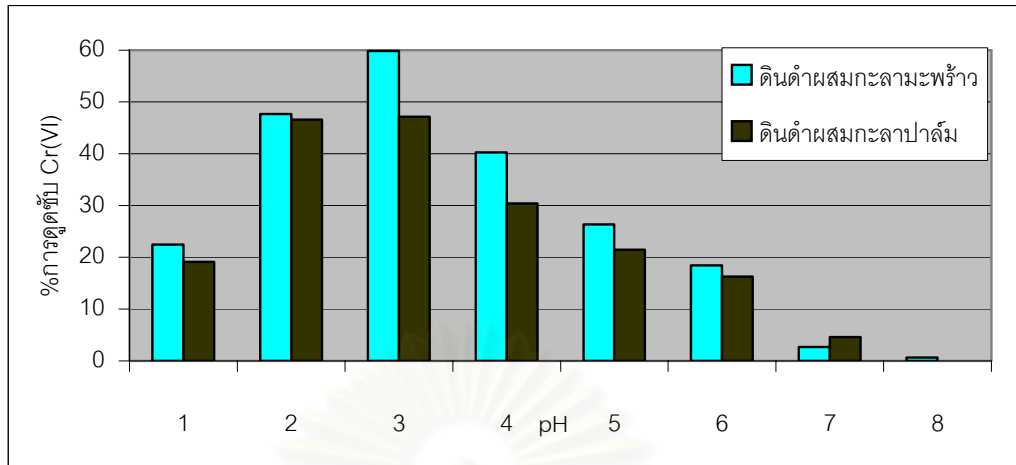
mesh ปริมาณตัวอย่างละ 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ที่ค่าพีเอชต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ส่วนรายละเอียดข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.16 ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว



รูปที่ 4.17 ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์ม



รูปที่ 4.18 พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิด

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 ผลการทดลองเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ เฮกซะวาเลนต์โครเมียม พบว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดสามารถดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้ดีเมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำระหว่าง 2 – 4 โดยดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมสูงที่สุดเหมือนกัน โดยตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้เท่ากับ 59.82% และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์มมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้เท่ากับ 47.14% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก./ล. และเมื่อค่าพีเอชของสารละลายสูงขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะมียาลดลง

ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาในการทดลองการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม พบว่าในสภาวะความเป็นกรดที่ช่วงพีเอชระหว่าง 2-4 ซึ่งเป็นช่วงที่เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr(VI)) ถูกออกซิไดซ์เป็นไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr(III)) ได้ดี และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6 จะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียมได้ จึงมีความเป็นไปได้มากกว่าการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้ จะเกิดจากสองกลไกใหญ่ๆ คือ การเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โดยมีการเปลี่ยนรูปจากเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นไตรวาเลนต์โครเมียม พร้อมกับเกิดการดูดซับโครเมียม โดยเกิดพันธะเคมียึดจับกันระหว่าง ไตรวาเลนต์โครเมียมกับตัวออกซิไดซ์ที่อยู่บนบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจได้แก่หมู่ ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) ซึ่งเป็นหมู่ Functional พื้นฐานของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบของดิน (Rai, Eary and Zachara, 1989)

จากรูปที่ 4.18 จะพบว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมสูงกว่า ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์มในทุกๆ ค่าพีเอช ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองหาเวลาที่เหมาะสม

4.6 การศึกษาทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

ในการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่ผลิตได้ทั้งสองชนิด โดยนำตัวอย่างที่ได้มาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh ปริมาณ 0.0010, 0.0025, 0.0050, 0.0075, 0.0100, 0.0250, 0.0500, 0.0750 และ 0.1000 กรัม (ASTM : D 3860-89a) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่มีน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช ให้เท่ากับ 3 และใช้กรดฟอสฟอริก(H_3PO_4) เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่าพีเอช ให้เท่ากับ 3 ตลอดการทดลอง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที นานเท่ากับเวลาที่ได้จากการทดลองที่ 4.4 คือ 4 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างที่ได้จากการทดลองที่ 4.3 โดยตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว มีอัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อเปอร์เซ็นต์ 80 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส และตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม คือตัวอย่างที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์มเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

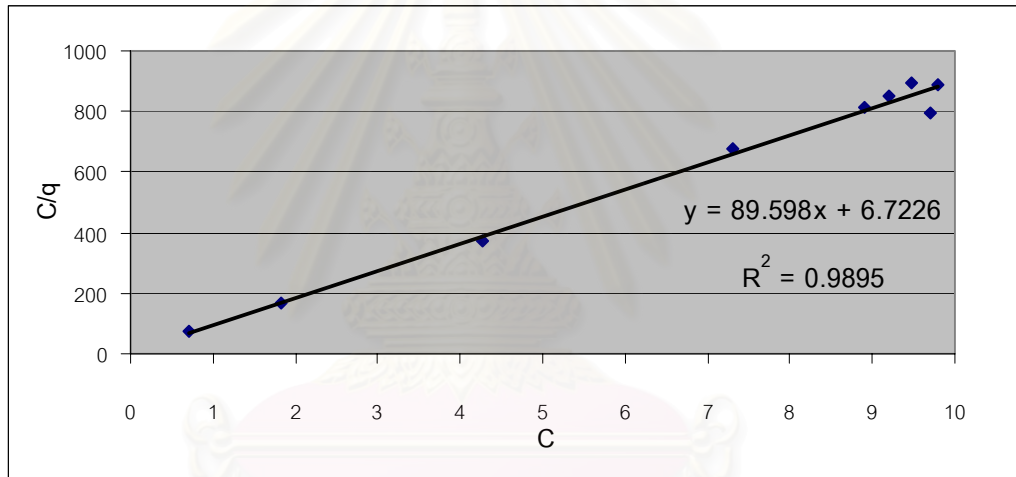
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว

น้ำหนัก (กรัม)	พีเอช	ความเข้มข้นโครเมียม เริ่มต้น(มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0.001	3.0	10.0	9.790
0.0025	3.0	10.0	9.696
0.0050	3.0	10.0	9.470
0.0075	3.0	10.0	9.192
0.010	3.0	10.0	8.908
0.025	3.0	10.0	7.296
0.050	3.0	10.0	4.258
0.075	3.0	10.0	1.826
0.10	3.0	10.0	0.710

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

น้ำหนัก (กรัม)	พีเอช	ความเข้มข้นโครเมียม เริ่มต้น(มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0.001	3.0	10.0	9.912
0.0025	3.0	10.0	9.800
0.0050	3.0	10.0	9.612
0.0075	3.0	10.0	9.410
0.010	3.0	10.0	9.158
0.025	3.0	10.0	7.940
0.050	3.0	10.0	5.886
0.075	3.0	10.0	4.020
0.10	3.0	10.0	2.630

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 และ 4.3 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ซึ่งสมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีอยู่หลายสมการ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 3 สมการ คือ Langmuir, BET และ Freundlich แต่สำหรับการดูดซับไอออนในสารละลาย นิยมใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich มาอธิบายการดูดซับ โดยในการทดลองนี้จะเลือกใช้สมการของ Langmuir มาอธิบาย เนื่องจากผลการทดลองที่ค่าพีเอช 3 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของตัวดูดซับทั้งสอง เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหาค่า R^2 ของแต่ละสมการทั้ง Langmuir และ Freundlich แล้วพบว่าค่า R^2 ของสมการ Langmuir มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่า จึงเลือกสมการของ Langmuir มาอธิบาย ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก ง.)



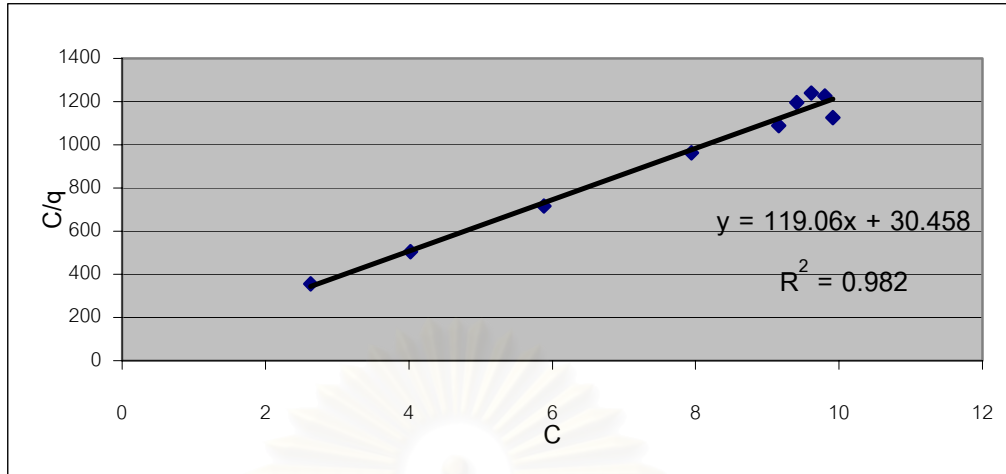
รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมแบบ Langmuir ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวที่พีเอช 3

จากสมการของ Langmuir $q = q_m K_A C / (1 + K_A C)$

จากรูปที่ 4.16 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ $1/q_m = 89.598$

จุดตัดแกน C/q เท่ากับ $1/q_m K_A = 6.723$

$$q = 0.1488C / (1 + 13.3279C)$$



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมแบบ Langmuir ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์มที่พีเอช 3

จากสมการของ Langmuir $q = q_m K_A C / (1 + K_A C)$

จากรูปที่ 4.17 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ $1/q_m = 119.06$

จุดตัดแกน C/q เท่ากับ $1/q_m K_A = 30.458$

$$q = 0.0328C / (1 + 3.9090C)$$

จากสมการไอโซเทอมของตัวดูดซับทั้งสองชนิด เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความหนาแน่นของการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นของการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด

ชนิดวัสดุดูดซับ	q_m	K_A	q_{max} (mg/g)
ตัวดูดซับ ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว	0.011	13.328	11.078
ตัวดูดซับ ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม	0.008	3.909	8.190

จากตารางที่ 4.4 ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว 1 กรัมสามารถดูดซับ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้เท่ากับ 11.078 มิลลิกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ สุธิดา โชคธัญญาวัฒน์ (2544) ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวปริมาณ 1 กรัมจะสามารถดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้เท่ากับ 11.078 มิลลิกรัม

กษะวาลินท์โครเมียมได้เท่ากับ 31.700 มิลลิกรัม ส่วนตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม 1 กรัมสามารถดูดซับเฮกซะวาลินท์โครเมียมได้เท่ากับ 8.190 มิลลิกรัม แสดงว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว มีประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาลินท์โครเมียมได้ดีกว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมา จึงทำการเลือกตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว เพื่อนำไปทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ เฮกซะวาลินท์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้ ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ต่อไป

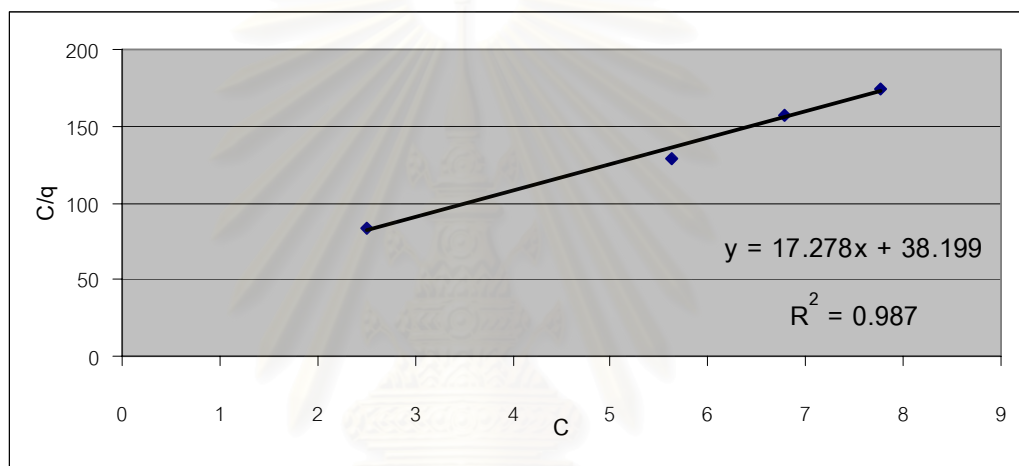
4.7 การศึกษาทดลองหาไอโซเทอมถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาลินท์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้

การทดลองนี้ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเฮกซะวาลินท์โครเมียมของถ่านกัมมันต์ (F300) ที่มีขายตามท้องตลาด โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh ปริมาณ 0.0010, 0.0025, 0.0050, 0.0075, 0.0100, 0.0250, 0.0500, 0.0750 และ 0.1000 กรัม (ASTM : D 3860-89a) เติมน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาลินท์โครเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช ให้เท่ากับ 3 และใช้กรดฟอสฟอริก(H_3PO_4) เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่าพีเอชให้เท่ากับ 3 ตลอดการทดลอง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที นานเท่ากับเวลาที่ได้จากการทดลองของตัวดูดซับคือ 4 ชั่วโมง จากผลการศึกษาได้ผลดัง ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (F300)

น้ำหนัก (กรัม)	พีเอช	ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น(มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0.0010	3.0	10.0	9.242
0.0025	3.0	10.0	8.432
0.0050	3.0	10.0	7.774
0.0075	3.0	10.0	6.776
0.0100	3.0	10.0	5.629
0.0250	3.0	10.0	2.514
0.0500	3.0	10.0	2.394
0.0750	3.0	10.0	2.753
0.1000	3.0	10.0	2.912

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (F300) โดยสำหรับการดูดซับไอออนในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์มักจะนิยมใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งในการทดลองนี้จะเลือกใช้สมการของ Langmuir มาอธิบาย เนื่องจากผลการทดลองที่ค่าพีเอช 3 ของถ่านกัมมันต์ (F300) เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหาค่า R^2 ของแต่ละสมการทั้ง Langmuir และ Freundlich แล้วพบว่าค่า R^2 ของสมการ Langmuir มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า จึงเลือกสมการของ Langmuir มาอธิบาย ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก ง.)



รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมแบบ Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด(F300) ที่พีเอช 3

$$\text{จากสมการของ Langmuir} \quad q = q_m K_A C / (1 + K_A C)$$

$$\text{จากรูปที่ 4.16 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ} \quad 1/q_m = 17.278$$

$$\text{จุดตัดแกน C/q เท่ากับ} \quad 1/q_m K_A = 38.199$$

$$q = 0.0262C / (1 + 0.4523C)$$

ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของการดูดซับสูงสุด (q_{\max}) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับของถ่านกัมมันต์ (F300)

ชนิดวัสดุดูดซับ	q_m	K_A	q_{\max} (mg/g)
ตัวดูดซับ ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว	0.011	13.328	11.078
ตัวดูดซับ ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม	0.008	3.909	8.190
ถ่านกัมมันต์ (F300)	0.058	0.452	47.398

จากตารางที่ 4.6 พบว่าถ่านกัมมันต์ (F300) 1 กรัมสามารถดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้เท่ากับ 47.398 มิลลิกรัม ซึ่งมากกว่าตัวดูดซับที่ผลิตได้มาก โดยตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว 1 กรัมสามารถดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้เท่ากับ 11.078 มิลลิกรัม ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม 1 กรัมสามารถดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้เท่ากับ 8.190 มิลลิกรัม เท่านั้น

4.8 การศึกษาการชะไฮออนโครเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น

การศึกษาการชะไฮออนโครเมียมเป็นการทดลอง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการคืนสภาพ(Regeneration) นำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ ทำโดยนำตัวดูดซับทั้งสองชนิด ชนิดละ 1 กรัม มาร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาด 8 - 30 mesh แล้วจึงนำไปดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 3 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 200 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าตัวดูดซับ 1 กรัม ดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมไป 10 มิลลิกรัม คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ 100 เปอร์เซ็นต์

นำตัวดูดซับทั้งสองชนิดดังกล่าวข้างต้นที่ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมแล้ว มาศึกษาการชะไฮออนโครเมียม โดยจะทำการชะด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 ทั้งนี้เนื่องจากการการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำ จึงทำการชะที่พีเอชที่สูงขึ้น และที่พีเอชดังกล่าวโครเมียมที่ถูกชะออกมาได้จะไม่เกิดการตกตะกอน โดยสารละลายกรดดังกล่าวมีส่วนผสมของ H_2SO_4 0.02 โมลต่อลิตร H_3PO_4 0.01 โมลต่อลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ด้วย NaOH ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 การชะไฮดรอนโครเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดฟอสฟอริก 5 ของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว

ชะด้วยน้ำกลั่น				ชะด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก 5			
เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	พีเอช	Cr ที่ถูกชะ (มก./ล.)	Cr ที่ถูกชะ (%)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	พีเอช	Cr ที่ถูกชะ (มก./ล.)	Cr ที่ถูกชะ (%)
0.25	5.57	0.000	0	0.25	5.04	0.000	0
0.5	5.41	0.000	0	0.5	5.05	0.000	0
1	5.58	0.000	0	1	5.13	0.000	0
2	5.42	0.000	0	2	5.13	0.000	0
4	5.58	0.000	0	4	5.17	0.000	0
8	5.40	0.000	0	8	5.16	0.000	0
12	5.38	0.000	0	12	5.24	0.000	0
24	5.42	0.000	0	24	5.33	0.000	0

ตารางที่ 4.8 การชะไฮดรอนโครเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดฟอสฟอริก 5 ของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

ชะด้วยน้ำกลั่น				ชะด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก 5			
เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	พีเอช	Cr ที่ถูกชะ (มก./ล.)	Cr ที่ถูกชะ (%)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	พีเอช	Cr ที่ถูกชะ (มก./ล.)	Cr ที่ถูกชะ (%)
0.25	5.53	0.000	0	0.25	5.00	0.000	0
0.5	5.51	0.000	0	0.5	5.00	0.000	0
1	5.53	0.000	0	1	5.00	0.000	0
2	5.44	0.000	0	2	5.00	0.000	0
4	5.54	0.000	0	4	5.00	0.000	0
8	5.52	0.000	0	8	5.04	0.000	0
12	5.49	0.000	0	12	5.07	0.000	0
24	5.45	0.000	0	24	5.20	0.000	0

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าการทดสอบการชะของตัวดูดซับทั้งสองชนิดด้วยน้ำกลั่น และสารละลายกรดพีเอช 5 วัดความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดในสารละลายหลังผ่านการชะได้เท่ากับ 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอด 24 ชั่วโมง แสดงว่าไม่มีการชะละลายของไอออนโครเมียมออกมาจากตัวดูดซับทั้งสองชนิดเลยไม่ว่าด้วยตัวชะละลายใด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกลไกการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดน่าจะเป็นการดูดซับทางเคมี โดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวของตัวดูดซับกับเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และมีการสร้างพันธะเคมีเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับที่ยึดโมเลกุลของโครเมียมในรูปของพันธะเคมีไว้ ทำให้โครเมียมที่โดนดูดซับไว้จะไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ในสารละลายของเหลว จึงทำให้ไม่สามารถชะด้วยน้ำกลั่นหรือสารละลายกรดอ่อนได้ (U.S.EPA, 2000)

เพื่อศึกษาสารประกอบของโครเมียมที่โดนดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับ โดยทำการนำตัวอย่างที่ผ่านการชะด้วยกรดและน้ำกลั่นของตัวดูดซับทั้งสองชนิด มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ได้ผลการวิเคราะห์ดังผลในภาคผนวก จ. แต่เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของไอออนโครเมียมในตัวดูดซับมีปริมาณน้อย ผลวิเคราะห์ที่ได้จึงไม่สามารถเทียบกับข้อมูลอ้างอิงได้ชัดเจน ทำให้ไม่สามารถเทียบสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียมที่เกิดได้ จึงทราบได้แค่ว่าน่าจะมีสารประกอบของโครเมียมในรูปประจุใด โดยจากการวิเคราะห์พบว่าสารประกอบโครเมียมที่พบคือ Cr_2O_3 ซึ่งเป็นสารประกอบของไตรวาเลนท์โครเมียม (Cr(III)) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 4.5 ในการทดลองเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม คือกลไกการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของตัวดูดซับ และเกิดการดูดซับโดยเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างไอออนโครเมียมกับตัวออกซิไดซ์บนพื้นผิวของตัวดูดซับ

ด้วยเหตุนี้หากนำตัวดูดซับทั้งสองชนิดไปใช้งานจริง เมื่อใช้งานตัวดูดซับจนหมดสภาพแล้ว จะไม่สามารถทำการคืนสภาพ (Regeneration) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงควรนำไปกำจัดโดยการฝังกลบอย่างถูกวิธีต่อไป

4.9 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้ ในถังดูดซับแบบคอลัมน์

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตได้ ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ ซึ่งมีการป้อนน้ำเสียแบบไหลลง (Down flow) โดยวัสดุดูดซับที่ใช้คือ ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์

โครเมียมได้ดีกว่าตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม โดยทำการเลือกศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลองที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งได้จากการทดลองแบบแบตช์

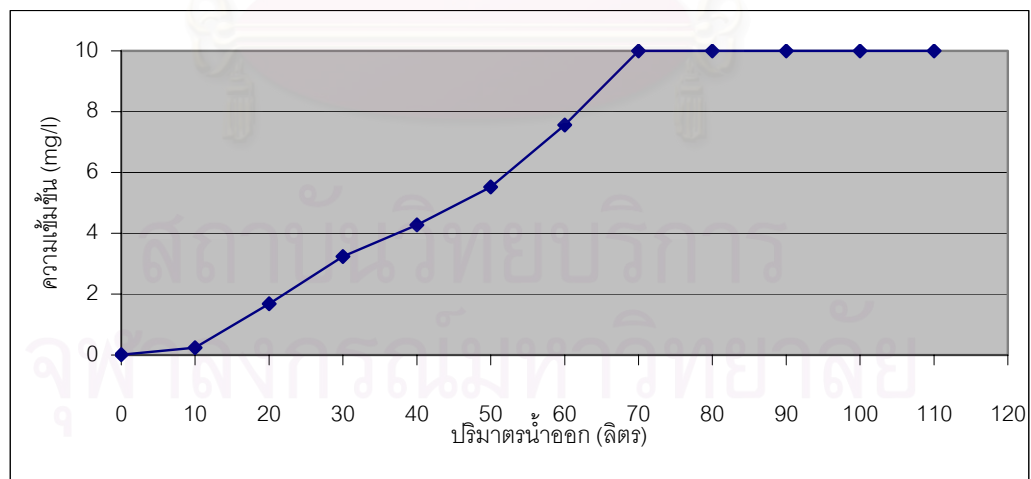
การออกแบบระบบคอลัมน์จำลองนี้ ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์เท่ากับ 2.42 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร มีปริมาตรกระบอก 407 มิลลิลิตร ใส่ตัวดูดซับปริมาณ 238 กรัม เต็มพอดีที่ 90 เซนติเมตรดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยมีจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ความลึกของชั้น ตัวดูดซับที่ 0, 30, 60 และ 90 เซนติเมตร น้ำเสียสังเคราะห์ไหลจากบนลงล่างความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลเท่ากับ 18 มิลลิลิตรต่อ นาที ค่าภาระถึง(Column Loading Rate) 2.35 ลบ.ม./(ตร.ม.-ชั่วโมง) ทำให้มีเวลาการสัมผัสในคอลัมน์เท่ากับ 30 นาที โดยให้ของเหลวท่วมชั้นของตัวดูดซับตลอดเวลาและเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ปริมาณน้ำทั้งต่างๆที่ตำแหน่ง 0, 30, 60 และ 90 เซนติเมตร จนถึงจุดหมดสภาพ (Breakthrough) ซึ่งคือความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่เข้าเท่ากับความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ออก การเก็บตัวอย่างทุกครั้งจะกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 ของ Whatman ก่อนนำไปปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 และนำไปวัดความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่เหลือต่อไป อุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.22 และได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.23, 4.24, 4.25 และ 4.26 ส่วนข้อมูลละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.

ตารางที่ 4.9 การคำนวณปริมาตรของชั้นตัวกลางที่ระดับความสูงต่าง ๆ

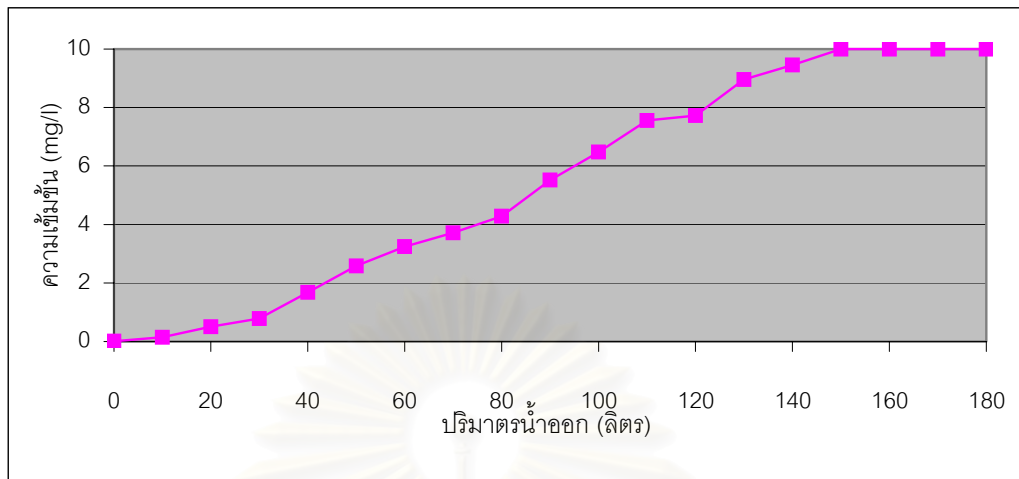
ความสูงชั้นตัวกลาง (ซม.)	ปริมาตรของชั้นถ่าน (ลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)
30	0.1380	78.9905
60	0.2760	157.0161
90	0.4140	237.1224



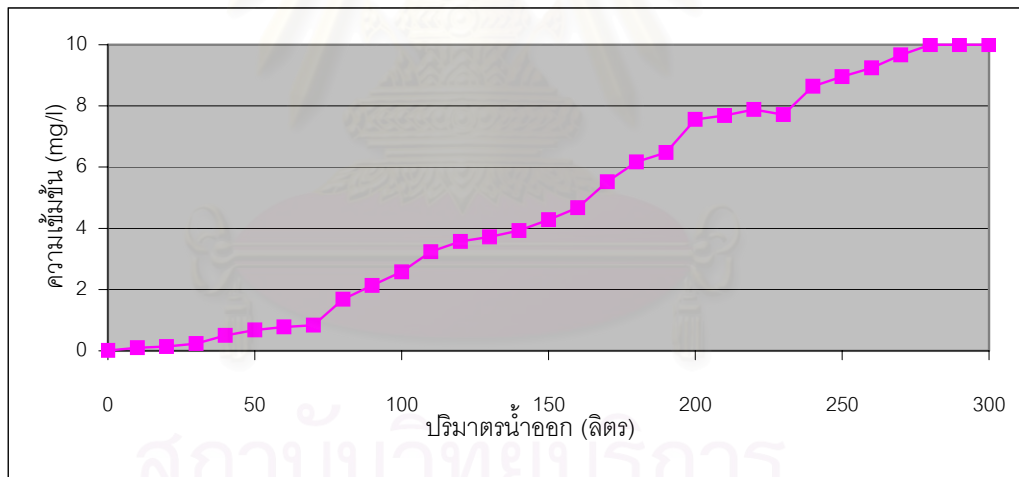
รูปที่ 4.22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองถังดูดซับแบบคอลัมน์



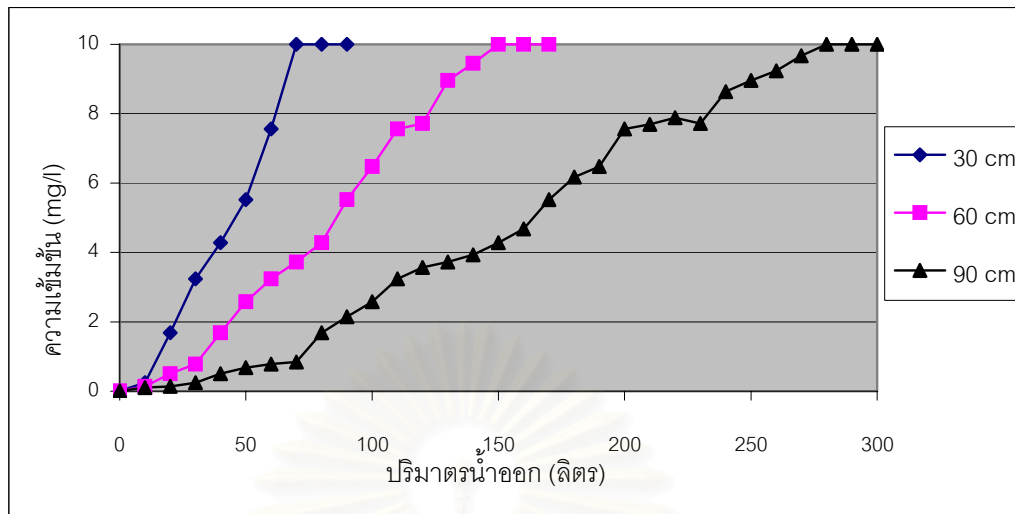
รูปที่ 4.23 ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 30



รูปที่ 4.24 ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 60



รูปที่ 4.25 ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 90



รูปที่ 4.26 ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของตัวดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 30, 60 และ 90 ซม.

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในคอลัมน์

ความสูงชั้น ตัวกลาง(ซม.)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ปริมาณน้ำไหล ผ่าน(ลิตร)	ปริมาณน้ำไหล ผ่าน / ปริมาตร ของชั้นถ่าน (BV)	ความหนาแน่น ของการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
30	78.9905	67	485.5	8.54
60	157.0161	144	521.7	9.14
90	237.1224	275	664.3	11.59

จากรูปที่ 4.26 ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์เพิ่มขึ้น โดยน้ำเสียไหลจากบนลงล่างแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับจะหมดสภาพจากส่วนบนก่อน จากนั้นค่อยๆหมดจนถึงส่วนกลางและถึงส่วนล่างของคอลัมน์ในที่สุด จุดสูงสุดของเส้นกราฟคือจุดที่ความเข้มข้นน้ำเสียเข้าเท่ากับความเข้มข้นน้ำเสียออกคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคือจุดหมดสภาพของตัวดูดซับ

จากตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับ ที่ระดับความสูงของชั้นตัวกลาง 30, 60 และ 90 เซนติเมตรพบว่า จุดหมดสภาพที่ 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 67 ลิตร หรือคิดเป็น 485.5 Bed Volume (BV) โดย Bed Volume (BV) มีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ผ่านการบำบัดต่อปริมาตรของชั้นตัวดูดซับในคอลัมน์ (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก ง.) ความ

หนาแน่นของการดูดซับ 9.14 มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนทีโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ จุดหมดสภาพที่ 60 เซนติเมตร อยู่ที่ 144 ลิตร หรือคิดเป็น 521.7 Bed Volume (BV) ความหนาแน่นของการดูดซับ 8.54 มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนทีโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ จุดหมดสภาพที่ 90 เซนติเมตร อยู่ที่ 275 ลิตร หรือคิดเป็น 664.3 Bed Volume (BV) ความหนาแน่นของการดูดซับ 11.59 มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนทีโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับจากการทดลองที่ผ่านมา ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว (การทดลอง 4.6) มีค่าความหนาแน่นของการดูดซับเท่ากับ 11.078 มิลลิกรัมเฮกซะวาเลนทีโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ

4.10 การหาคุณลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตัวดูดซับที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ผลการทดลองหาค่า Iodine Number ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ รวมถึงผลการวิเคราะห์หาค่า Surface Area, Total Pore Volume และ Average Pore Diameter ด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer บริษัท Micro Meritics รุ่น ASAP 2000 และผลการวิเคราะห์หาค่า Zeta Potential ด้วยเครื่อง Zeta-Sizer 4 บริษัท Malvern ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวและรูพรุนของตัวดูดซับก่อนเผา ตัวดูดซับที่ทำการเผาแล้ว และตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมแล้ว ทำการถ่ายภาพกำลังขยาย 3000 เท่า โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM.) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28

ผลการวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันโดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) บริษัท Perkin-Elmer รุ่น 1760X ดังแสดงในรูปที่ 4.29, 4.30, 4.31 และ 4.32

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับทั้งสองชนิดกับถ่านกัมมันต์ (F300) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

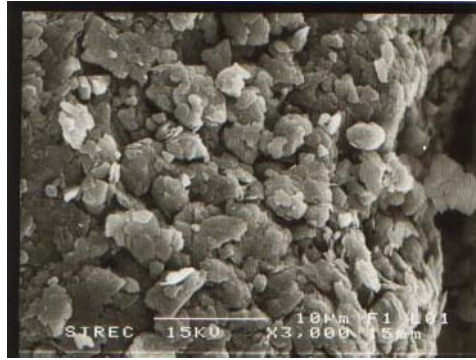
พารามิเตอร์	ตัวดูดซับ		ถ่านกัมมันต์ (F300)
	ดินดำผสม กะลามะพร้าว	ดินดำผสมกะลา ปาล์ม	
Iodine Number (mg./l/g)	546.23	504.53	891.25
Surface Area (m ² /g)	392.55	388.45	955.70
Total Pore Volume (cm ³ /g)	0.23	0.23	0.49
Average Pore Diameter (A)	45.0	46.4	20.73
Zeta Potential (mV)	-29.4	-23.2	-20.20

จากตารางที่ 4.11 จะพบว่าค่า Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยค่าที่วัดได้จากตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว จะมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จากตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์มเล็กน้อย แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ (F300) พบว่าค่า Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ (F300) อยู่มาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากใช้วัตถุดิบในการผลิตไม่เหมือนกัน โดยถ่านกัมมันต์ (F300) ผลิตจากถ่านหินแต่ตัวดูดซับผลิตจากดินกับกะลา นอกจากนี้อาจเป็นผลจากขั้นตอนการผลิตที่ต่างกัน โดยในการผลิตตัวดูดซับใช้การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) อย่างง่าย โดยการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ส่วนถ่านกัมมันต์ (F300) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นในทางการค้า จึงน่าจะมีกระบวนการกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ซึ่งกระบวนการกระตุ้นเป็นกระบวนการที่ทำให้สิ่งต่างๆที่อยู่ในรูพรุน เช่น น้ำมันดิน ชี้น้ำ เป็นดิน หลุดออกมา เมื่อไม่มีสิ่งใดอุดตันอยู่ในรูจึงทำให้มีรูมีความพรุนมากขึ้นส่งผลให้ Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume มีค่ามากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ถ่านกัมมันต์ (F300) มีประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมได้ดีกว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดมาก เนื่องจากเมื่อมีพื้นที่ผิวมากกว่า ทำให้เฮกซะวาเลนท์โครเมียมมีโอกาสสัมผัสกับหมู่ไฮดรอกซิลแล้วเกิดการดูดซับได้มากกว่า

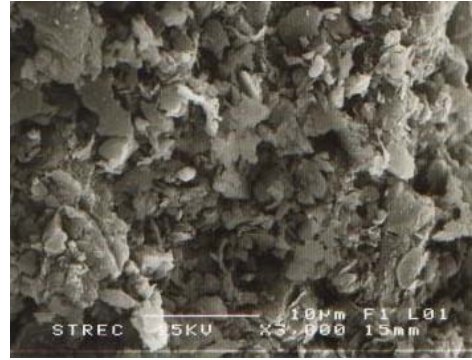
จากตารางที่ 4.11 จะพบว่าค่า Zeta Potential ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม และถ่านกัมมันต์ (F300) มีค่าเท่ากับ -29.4 -23.2 และ -20.2 ตามลำดับ (รายละเอียดในภาคผนวก จ.) ซึ่งค่า Zeta Potential ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ หรือมีประจุไฟฟ้าเป็นลบมากกว่าถ่านกัมมันต์ ซึ่งค่า Zeta Potential หมายถึงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคของวัสดุดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีดินดำซึ่งมีความเป็นประจุเป็นลบเป็นส่วนผสม จึงทำให้ตัวดูดซับแสดงความเป็นประจุลบออกมามากกว่าถ่านกัมมันต์ (F300) ดังนั้นหากนำตัวดูดซับไปทำการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก มีความเป็นไปได้ว่าตัวดูดซับอาจมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักอื่นที่มีประจุบวกในน้ำเสียได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ (F300) เนื่องจากตัวดูดซับสามารถดึงดูดไอออนบวกให้เข้ามาหาได้มากกว่าทำให้มีโอกาสในการดูดซับไว้ได้มากกว่า

จากการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว และดินดำผสมกะลาปาล์ม โดยใช้กำลังขยาย 3000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ

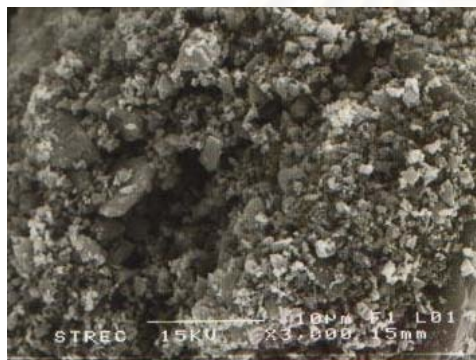
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



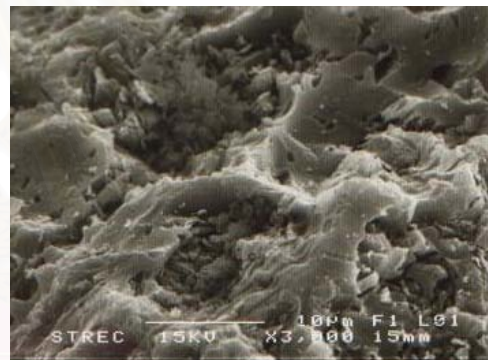
กะลามะพร้าวเผาที่ 800 °C
 เผานาน 30 นาที
 (a)



ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว
 ก่อนเผาที่ 800 °C
 (b)

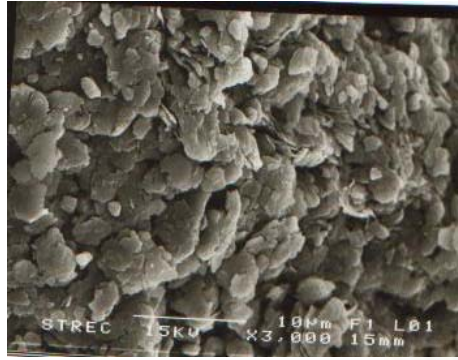


ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว
 เผาที่ 800 °C นาน 30 นาที
 (c)

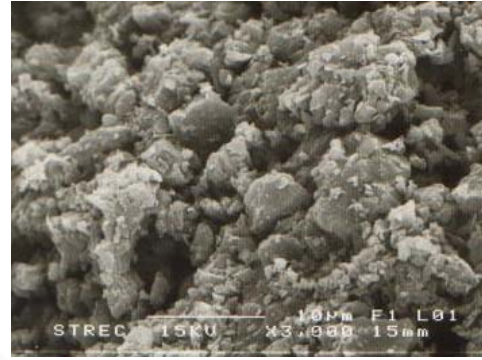


ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว
 ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมแล้ว
 (d)

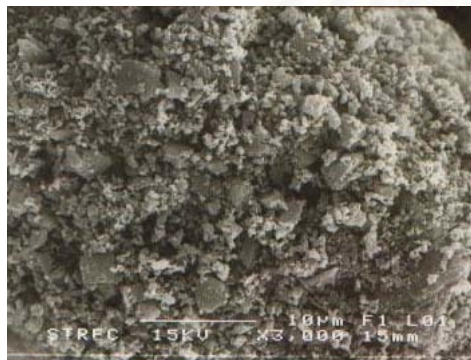
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) กำลังขยาย 3000 เท่า ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว



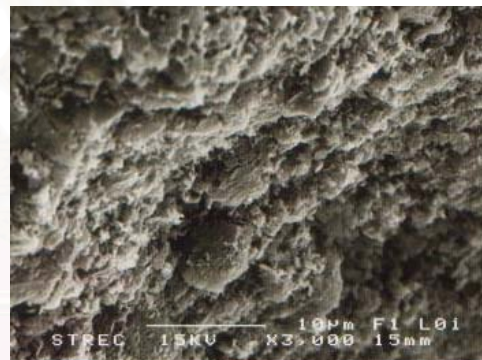
กะลาปาล์มเผาที่ 800 °C
 เหนานาน 30 นาที
 (a)



ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม
 ก่อนเผาที่ 800 °C
 (b)



ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม
 เเผาที่ 800 °C นาน 30 นาที
 (c)



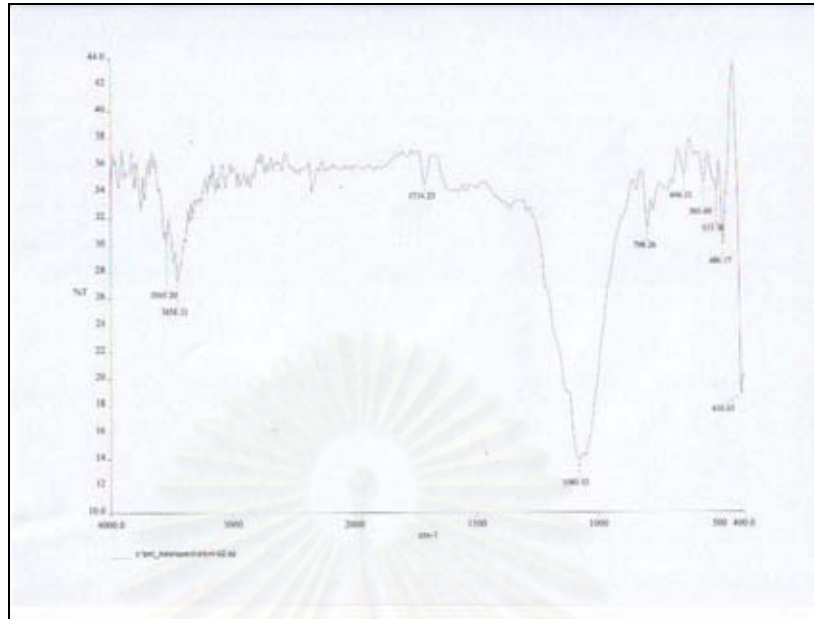
ตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม
 ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมแล้ว
 (d)

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) กำลังขยาย 3000 เท่า ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

จากรูปที่ 4.27 เป็นการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว จะสังเกตได้ว่าลักษณะโครงสร้างของวัตุดิบที่ใช้ในการผลิตคือกะลามะพร้าวเผาที่ 800°C จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่น ๆ มีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้น แต่ไม่เป็นโพรงลึก เมื่อนำไปผสมกับดินดำเป็นตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวก่อนเผาที่ 800°C พบว่าลักษณะโครงสร้างและรูพรุนไม่มีการเปลี่ยนแปลงนัก เมื่อนำไปเผาที่ 800°C พบว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และเป็นโพรงลึกกว่ารูพรุนของตัวดูดซับก่อนเผา ต่อมาเมื่อนำตัวดูดซับไปทำการดูดซับโครเมียม ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าพื้นผิวเรียกว่าตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการทดลอง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นผิวมีการปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ ซึ่งจะประกอบไปด้วยโครเมียม หรือสารละลายกรดและเบสนั่นเอง

จากรูปที่ 4.28 เป็นการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม ซึ่งผลที่ได้ก็มีลักษณะคล้ายกับของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว โดยจะสังเกตได้ว่าลักษณะโครงสร้างของวัตุดิบที่ใช้ในการผลิตคือกะลาปาล์มเผาที่ 800°C จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่น ๆ มีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้น แต่ไม่เป็นโพรงลึก เมื่อนำไปผสมกับดินดำเป็นตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์มก่อนเผาที่ 800°C พบว่าลักษณะโครงสร้างและรูพรุนไม่มีการเปลี่ยนแปลงนัก เมื่อนำไปเผาที่ 800°C พบว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และเป็นโพรงลึกกว่า รูพรุนของตัวดูดซับก่อนเผา ต่อมาเมื่อนำตัวดูดซับไปทำการดูดซับโครเมียม ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าพื้นผิวเรียกว่าตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการทดลอง แต่จะเรียบน้อยกว่าตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวที่ผ่านการดูดซับแล้ว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นผิวมีการปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ ซึ่งจะประกอบไปด้วยโครเมียม หรือสารละลายกรดและเบสแต่มีปริมาณสารที่ถูกดูดซับน้อยกว่า อาจเป็นเพราะประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา ๆ มา

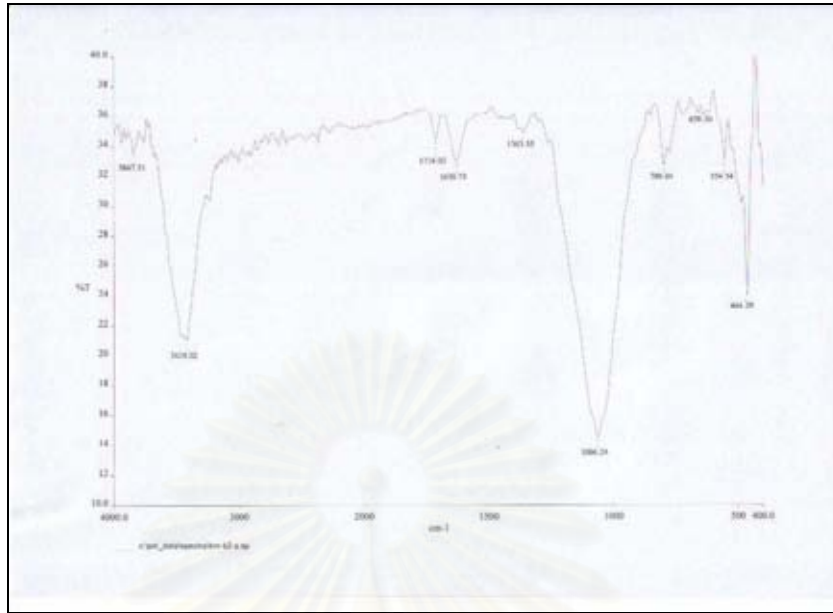
เพื่อให้ทราบถึงหมู่ฟังก์ชันหลัก (Functional Group) ของตัวดูดซับและตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมแล้ว โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ได้ผลดังรูปที่ 4.29, 4.30, 4.31 และ 4.32



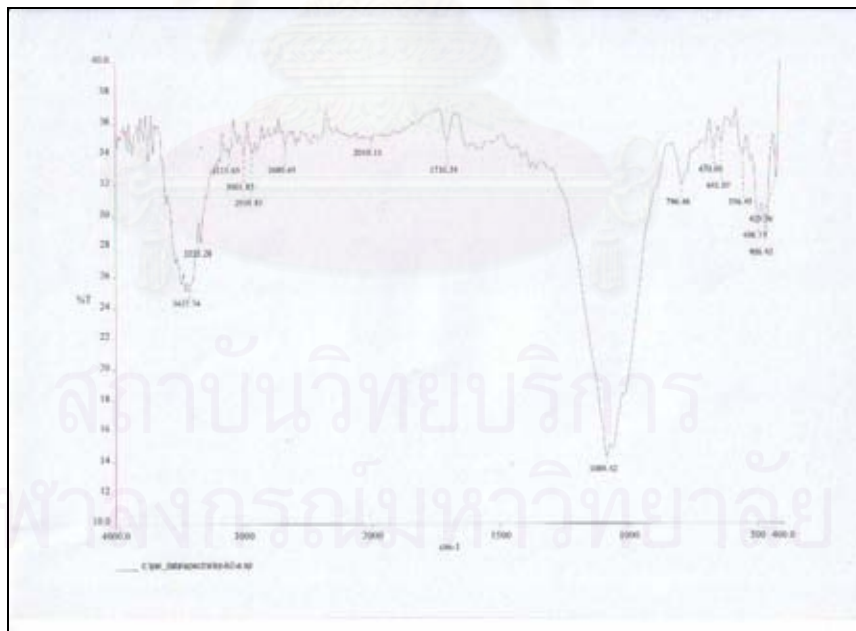
รูปที่ 4.29 %T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม
กะลามะพร้าว



รูปที่ 4.30 %T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม
กะลาปาล์ม



รูปที่ 4.31 %T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม
กะลามะพร้าวที่ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม



รูปที่ 4.32 %T(Transmittance) และช่วงความถี่(cm^{-1}) ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม
กะลาปาล์มที่ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียม

จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 ผลการวิเคราะห์ Functional Group ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดคือ

หมู่	O-H	ที่ช่วงความถี่	3570-3200 cm^{-1}
หมู่	C=O	ที่ช่วงความถี่	1800-1720 cm^{-1}
หมู่	Si-O-C	ที่ช่วงความถี่	1110-1000 cm^{-1}
หมู่	Si-O	ที่ช่วงความถี่	465 cm^{-1}

เห็นได้ว่ามีหมู่ Si-O-C และ Si-O ซึ่งได้มาจากดินดำ เพราะจากการหาค่าประกอบของดินดำพบว่า มี Si เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ส่วนหมู่ O-H และ C=O ได้มาจากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์มเป็นส่วนใหญ่ เพราะองค์ประกอบหลักของกะลามะพร้าวและกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นสารอินทรีย์หลังการเผาคือสารประกอบของคาร์บอน

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 ผลการวิเคราะห์ Functional Group ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดที่ผ่านการทดลองการหาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมแล้วคือ

หมู่	O-H	ที่ช่วงความถี่	3570-3200 cm^{-1}
หมู่	C=O	ที่ช่วงความถี่	1800-1720 cm^{-1}
หมู่	Si-O-C	ที่ช่วงความถี่	1110-1000 cm^{-1}
หมู่	Si-O	ที่ช่วงความถี่	465 cm^{-1}

เห็นได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันนัลกรุปที่วิเคราะห์ได้ ไม่มีความแตกต่างกับตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการดูดซับ และจากผลการวิเคราะห์สังเกตเส้นกราฟของตัวดูดซับที่ผ่านการทดลองการหาประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมแล้ว พบว่าทั้งสองมีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกันมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ที่ไม่สามารถตรวจหาพันธะของสารประกอบโลหะ ซึ่งมีรูปผลึกแบบสมมาตรได้

4.11 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับ

ค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า และ ค่าแรงงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.11.1 ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับ

ในการผลิตตัวดูดซับปริมาณ 1000 กรัม เป็นปริมาณคร่าวๆ ที่ผลิตได้ต่อการเผา 1 ครั้งในเตาเผาไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ วัตถุดิบหลักที่ใช้เป็นส่วนผสมคือดินดำผสมกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์ม ซึ่งมีรายละเอียดค่าใช้จ่ายต่อหน่วยคือ

1) ดินดำราคาจำหน่าย 6 บาท/กิโลกรัม 1000 กรัม ใช้เพียง 200 กรัม ดังนั้นค่าดินดำที่พร้อมนำไปใช้งานคิดเป็นจำนวนเงินประมาณ 1.20 บาท

2) กะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh ไม่เสียค่าใช้จ่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

3) เกลือโซเดียมคลอไรด์ราคาจำหน่าย 10 บาท/กิโลกรัม

4.11.2 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต

สำหรับผลิตตัวดูดซับประมาณ 1000 กรัม มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำเป็นในการผลิตคือ เต้าอบไฟฟ้า เต้าเผาไฟฟ้า และเครื่องอัดเม็ด ซึ่งมีรายละเอียดในการใช้งานคือ

1) ค่าไฟในการอบ การหาค่าไฟในการอบ ได้ใช้เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าหรือ Single – Phase Kilowatt – Hour Meter ขนาด 15(45) Amp (รูปในภาคผนวก ข.) ทำการวัดกับเต้าอบในขณะที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบดินดำ 3 ชั่วโมง อบกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์ม 3 ชั่วโมง (โดยอบพร้อมกัน) อบตัวดูดซับที่ขึ้นรูปเสร็จแล้ว 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) คำนวณค่าใช้จ่ายได้คือ

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

2) ค่าไฟในการเผา การหาค่าไฟในการเผา ได้ใช้ Single – Phase Kilowatt – Hour Meter ขนาด 15(45) Amp ทำการวัดกับเต้าเผาในขณะที่อุณหภูมิเริ่มต้น 28 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เมาอุณหภูมิคงที่ที่ 800 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง นาที ได้ค่าเท่ากับ 4.6 KW-H คำนวณค่าใช้จ่ายเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= KW-H * (1.8047 + Ft) \\ &= 4.6 * (1.8047+0.2612) \\ &= 9.50 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ซึ่งในขั้นตอนการผลิตตัวดูดซับนั้น มีการเผาทั้งหมดสองครั้งคือ ขั้นตอนการเตรียมกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์ม อีกขั้นตอนคือการเผาเพื่อให้เป็นตัวดูดซับ ดังนั้นค่าไฟที่ได้จากการเผาทั้งหมดเท่ากับ 19 บาท

3) ค่าไฟในการอัดเป็นเม็ด เครื่องอัดเม็ดไม่สามารถใช้ Single – Phase Kilowatt – Hour Meter ทำการวัดได้เพราะไม่มีจุดต่อเชื่อม จึงใช้วิธีคำนวณจากมอเตอร์ไฟฟ้าแทน โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.170 และ 1.5 KW ใช้เวลาการอัดเม็ดวัดดูดิบดินดำผสมกะลามะพร้าว ปริมาณ 1000 กรัม เท่ากับ 15 นาที คำนวณค่าใช้จ่ายเท่ากับ

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

4.11.3 ค่าแรงที่ใช้ในการผลิต

จะเป็นค่าแรงในการเตรียมวัตถุดิบเช่น ร่อนดิน ร่อนถ่านกะลามะพร้าวและกะลาปาล์ม ผสมดินดำและกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเป็นต้น ซึ่งการผลิตตัวดูดซับ 1000 กรัม ใช้เวลาในการทำงานประมาณ 2 ชั่วโมง คิดค่าแรงที่ 20.40 บาท/ชั่วโมง รวมเป็นเงิน 40.8 บาท

จากรายละเอียดค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับปริมาณ 1000 กรัม ทำการรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 76.28 บาท หากทำในเชิงการค้าต้องมีการเสียภาษี 7 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นได้ราคาต้นทุนในการผลิตทั้งสิ้นเท่ากับ 81.62 บาท/กิโลกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ (Filtrisorb 300) ราคา 190 บาท/กิโลกรัม แต่ราคาดังกล่าวเป็นราคาที่รวมค่าการตลาดแล้วบวกกำไรด้วย จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับราคาของถ่านกัมมันต์ (Filtrisorb 300) ได้ แต่หากต้องการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ (Filtrisorb 300) โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมแล้ว อาจต้องเพิ่มราคาค่าการตลาดแล้วบวกกำไรตัวดูดซับเพิ่มเป็น 2 เท่า (ราคาประมาณ 163 บาท/กิโลกรัม) ก็ยังมีราคาต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ (Filtrisorb 300) ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองดังซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 4 ในการศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ และศึกษา ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับที่ผลิตขึ้นได้ ซึ่งทำการทดลองทั้งแบบเทและแบบ คอลัมน์ และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ กับถ่านกัมมันต์ที่มีขายทั่วไป สามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

1) ปัจจัยต่างๆที่มีผลสำหรับการผลิตตัวดูดซับ เพื่อให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุดและมีความคงรูป เมื่อนำไปใช้งานคืออัตราส่วนผสมระหว่างดินดำกับกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์ม และอุณหภูมิการเผา ซึ่งสรุปได้ว่าตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวก็คือตัวอย่างที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลามะพร้าวเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรณีของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม คือ ตัวอย่างที่อัตราส่วนดินดำต่อกะลาปาล์มเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียสทั้งสองชนิดตัวอย่าง โดยที่ตัวดูดซับทั้งสองชนิดตัวอย่างดังกล่าวขนาด 8-30 mesh ปริมาณ 1 กรัม สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม 99.02 เปอร์เซ็นต์ และ 96.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2) ในการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับทั้งสองชนิด พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมมีอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 30 นาทีแรก หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลงและค่อนข้างคงที่ที่เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง โดยตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเท่ากับ 67.95 ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลาปาล์ม มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเท่ากับ 54.59 ดังนั้นจึงเลือกเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง เป็นเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิด

3) ในการทดลองศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเหมือนกัน โดยจะพบว่าการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมมีประสิทธิภาพสูงในช่วงของค่าพีเอชระหว่าง 2 - 4 และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 โดยตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าว มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเท่ากับ 59.82 เปอร์เซ็นต์ และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะปาล์ม มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเท่ากับ 47.14 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่าพีเอช 3 จึงน่าจะเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด

4) จากการทดสอบหาไอโซเทอมการดูดซับไอโซเทอมการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือเวลาสัมพัทธ์ 4 ชั่วโมง ค่าพีเอชน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3 พบว่าสอดคล้องกับสมการของ Langmuir เป็นอย่างดี โดยตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะพร้าวมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 11.078 มิลลิกรัมโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ และตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกับกะลามะปาล์มมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 8.190 มิลลิกรัมโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ ซึ่งค่าที่ได้ในการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (F300) มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 47.398 มิลลิกรัมโครเมียม/กรัมตัวดูดซับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะเห็นว่ามีความต่ำกว่าของถ่านกัมมันต์ (F300) มาก

5) ในการทดลองเพื่อศึกษาการชะของตัวดูดซับ พบว่าเมื่อตัวดูดซับทั้งสองชนิดได้ผ่านการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมไปแล้ว ไอออนโครเมียมจะไม่สามารถถูกชะออกมาได้ ไม่ว่าจะเป็นการชะด้วยน้ำกลั่น หรือการชะด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 เนื่องจากการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งการดูดซับดังกล่าวมีการสร้างพันธะระหว่างตัวดูดซับกับโครเมียม จึงทำให้โครเมียมไม่สามารถถูกชะออกมาได้

6) ในการศึกษาประสิทธิภาพคอลัมน์จำลอง ของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวที่พีเอช 3 พบว่าจุดหมดสภาพที่ความลึก 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 485.5 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 60 เซนติเมตร อยู่ที่ 521.7 BV และจุดหมดสภาพที่ความลึก 90 เซนติเมตร อยู่ที่ 664.3 BV ในระบบคอลัมน์มีถ่าน 237.12 กรัม หรือคิดเป็นตัวดูดซับ 1 กรัม ดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมได้ 11.59 มิลลิกรัม จนหมดสภาพ

7) ตัวดูดซับมีค่าใช้จ่ายในการผลิต (ค่าวัตถุดิบ ไฟฟ้าและแรงงาน) ประมาณ 81.62 บาท ต่อกิโลกรัม ถูกกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีราคา 190 บาท/กิโลกรัม จึงน่าสนใจที่จะพัฒนาในเชิงการค้า เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก รวมทั้งยังสามารถใช้ได้ทั้งระบบบำบัดน้ำเสียแบบเทหรือแบบคอลัมน์ก็ได้

ข้อเสนอแนะ

- 1) ทดลองศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่นของตัวดูดซับที่ผลิตได้ ที่อยู่ในรูปของไอออนประจุบวก เช่น Pb^{2+} Cd^{2+} เป็นต้น เนื่องจากตัวดูดซับที่ผลิตได้มีค่าความเป็นประจุลบสูง น่าจะมีความสามารถในการดึงดูดอนุภาคที่มีประจุบวกได้ดี
- 2) ศึกษาวิธีการกำจัดตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับจนหมดสภาพแล้ว เนื่องจากการดูดซับเป็นการย้ายโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมาเกาะจับที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งหากไม่มีการกำจัดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมได้
- 3) ศึกษาการนำไปใช้งานของตัวดูดซับในสภาวะการดูดซับก๊าซที่มีอุณหภูมิสูง เช่น การดูดซับอากาศเสียจากเตาเผาขยะ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกศรา นุตาลัย และคณะ. 2531. รายงานการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ. รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ภ30 - 14 โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: หจก. สยามสเตชันนารีซัพพลาย
- จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์. 2539. การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ซีเมนต์ลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชฎิล ฉายรัศมี, เมธี ชลไมตรี และ สุนทรี เฟื่องฟู. 2541. การดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุชีวมวลผสม. รายงานโครงการ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชนิตา เสมรัตน์. 2543. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสีที่บำบัดด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัชวาล จันทร์ดู่. 2537. การนำกลับโครเมียมจากน้ำเสียฟอกหนังด้วยโรงทดลองนำร่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไชยยันต์ ไชยยะ. 2542. การพัฒนาออกแบบเม็ดดูดซับเซรามิกส์ผลิตจากกากกาแฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- แดน อินทร์มา. 2539. พลศาสตร์การดูดซับความชื้นจากอซิโตนโดยสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิดสามเอในหลอดดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ธงชัย พรภณสวัสดิ์. 2527. รายงานวิจัยขั้นสมบูรณ การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า เล่มที่2 ข้อมูลพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร:ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประภคต เลิศจรัสอ่วมดี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2539. เซรามิกส์ พิมพ์ครั้งที่4, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
- พิชิต จริยธรรมานุกุล. 2544.การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็ก สภาวะออกซิเดชันศูนย์.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พุทธิสาร ชัยพันธุ์. 2543.การบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยน ประจุไอออน.วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญพรพรค ทศคร. 2535. หน่วยปฏิบัติการทั่วไป. กรุงเทพมหานคร. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. 2541. เนื้อดินเซรามิก.กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์
- มันลิน ต้นทุลเวศม์.2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันทุลเวศม์. 2543. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. 2000เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: บริษัท แซน.อี 68 แลป
- เล็ก สีคง. 2540. วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม.สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- วงศ์พงา เส็งสาย. 2544. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกหอม Vetiveria zizanioides (Linn.) Nash และหญ้าแฝกดอน Vetiveria nemoralis A. Camus ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำ ที่สร้างขึ้น เพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริวัฒน์ ศรีเกษเพชร.2543. การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- สุจันย์ ค่อยเสงี่ยม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุธิดา ไชศรีญญาวัฒน์. 2544. การกำจัดโครเมียม(VI) ที่ค้างเหลือในน้ำเสียหลังจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีโดยกระบวนการดูดซับ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรินทร์ นาคะวิวัฒน์. 2529. การศึกษาตัวไดอิเล็กตริกชนิดเซรามิกส์ที่ใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์. 2543. การกำจัดโครเมียม(ประจุ 6) ในน้ำเสียโดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อริชัย นพแก้ว. 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Eckenfelder, W.W., Jr. 2000. Industrial water pollution control (3rd ed.). Singapore: McGraw-hill
- Hassler, J.W. 1967. Activated carbon. London : Leonard Hill.
- Lua, A.C. ; Guo, J. 2000. "Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step CO₂ activation for gaseous pollutant removal" CARBON. 38: (7) 1089-1097.
- Pradas, E.G. ; Sánchez, M.V. ; Cruz, F.C. ; Viciano, M.S., and Pérez, M.F. 1994. Adsorption of Cadmium and Zinc from Aqueous Solution on Natural and Activated Bentonite . J. Chem. Tech. Biotechnol. 59 : 289-295.
- Rai, D. ; Eary, L.E., and Zachara, J.M. 1989. "Environmental chemistry of chromium" The Science of the Total Environment .86: 15-23

- Rengaraj, S. ; Sivabalan, R. ; Arabindoo, B., and Murugesan, V. 2000. "Adsorption kinetics of o-cresol on activated carbon from palm seed coat" INDIAN JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY. 7:(3) 127-131.
- Sawyer, C.N. ; McCarty, P.L.,and Parkin, G.F. 1994. Chemistry for Environmental Engineering. Singapore: McGraw-hill
- Schubert, U., and Husing, N. 2000. Synthesis of Inorganic Materials. Germany: WILEY-VCH
- Seng, C.E. ; Lee, C.G. ; Liew, K.Y. 2001. Adsorption of Chromium(VI) and Nickel(II) Ion On Acid-Activated Deoiled Spent Bleaching Clay.Journal of the American Oil Chemists Society. 78 (August): 831- 835
- Stefanova, R.Y. 2001. Metal Removal by Thermally Activated Clay Marl. Jurnal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/HazardousSubstances and Environmental Engineering 36 (March): 293-306
- U.S. Environmental Protection Agency.2000.In Situ Treatment of Soil and Groundwater Contaminated with Chromium.EPA 625/R-00/004.October 2000.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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
	ทองแดง(Cu)	"	5.0	15.0
	สังกะสี(Zn)	"	75**	200
	แคลเซียม(Ca)	"	50	150
	แมกนีเซียม(Mg)	"	200	250***
	ซัลเฟต(SO ₄)	"	250	600
	คลอไรด์(Cl)	"	0.7	1.0
	คลอไรด์(Cl)	"	45	45
	ฟลูออไรด์(F)	"	0.5	1.0
	ไนเตรต(NO ₃)	"	0.001	0.002
Alkybenzyl Sulfonate Phenolic substances as phenol				

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	แอสตนดาร์ดเพลตเคานต์(Stardard plate Count)	Colonies/cm ³	500
เอ็มพีเอ็น(MPN)		Coliform Organism/100 cm ³	น้อยกว่า2.2	-
อี.โคไล(E.coli)			ไม่มี	-

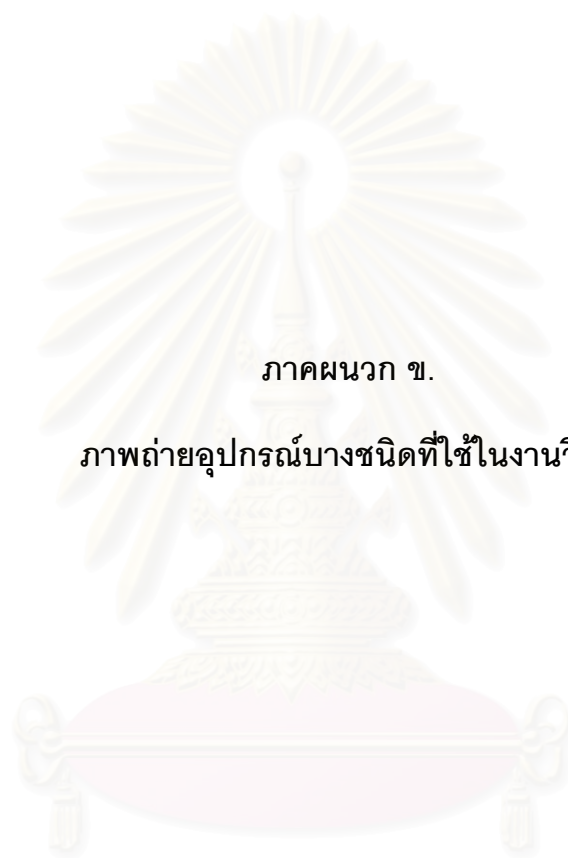
หมายเหตุ * เกณฑ์ที่อนุโลมให้สูงสุดตามสดมภ์ที่ 3 นั้น เป็นเกณฑ์ที่อนุญาตให้สำหรับน้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่มีความจำเป็นต้องใช้บริโภคเป็นการชั่วคราวและน้ำที่มีคุณลักษณะอยู่ในระหว่างเกณฑ์ของสดมภ์ที่ 2 กับสดมภ์ที่ 3 นั้นไม่ใช่ทำให้เครื่องหมายมาตรฐานได้

** หากคัลเซียมมีปริมาณสูงกว่าที่กำหนดและมักเนเซียมมีปริมาณต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐาน ให้พิจารณาคัลเซียมและมักเนเซียมในเทอมของความกระด้างทั้งหมด (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 กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 68 ลงวันที่ 4 กรกฎาคม 2521

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เครื่อง Pellet Mill สำหรับอัดเม็ดตัวดูดซับ



เตาเผาและอุปกรณ์วัดหน่วยไฟฟ้าที่ประกอบขึ้น



เครื่องเขย่าที่ใช้ในการทดลอง



ภาชนะสำหรับใส่ตัวดูดซับเพื่อนำไปเผา

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 และสารละลายไฮโอซัลเฟต
- กรวยกรอง
- กระดาษกรอง เบอร์ 2V หรือ เบอร์ที่เทียบเท่ากัน
- ปิเปต 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 ± 5 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น จำนวน 3.5667 ± 0.1 mg ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 ml ถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 L ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 L

2.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต (ความเข้มข้น 0.100 N)

- ละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) จำนวน 24.820 g ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 ± 25 ml เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.10 ± 0.01 g ถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 L ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้

ปริมาตร 1 L เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชาอย่างน้อย 4 วัน ก่อนนำมาทำการตรวจหาความเข้มข้นโดยการไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานปอตัสเซียมไอโอเดต

2.4 สารละลายมาตรฐานไอโอดีน (ความเข้มข้น 0.100 N)

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

2.5 สารละลายแป้ง

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

3. การตรวจหาความเข้มข้นของสารละลาย

3.1 การตรวจหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

- ใช้ปิเปตดูดสารละลายมาตรฐานปฏิกิริยาปอตัสเซียมไอโอเดต 25 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่นปอตัสเซียมไอโอไดน์ (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 = ปริมาตรสารละลายปอตัสเซียมไอโอเดต (ml)

R = ความเข้มข้นของสารละลายไปตัสเซียมไฮโอเดต (N)

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (ml)

3.2 การตรวจหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีน

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

$$N_2 = (S \cdot N_1) / I$$

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 ± 2

วินาที เพื่อไลซ์เฟอร์ในตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออก ปล่อยให้ไว้ให้เย็นที่ อุณหภูมิห้อง

4.5 ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.100 N จำนวน 100 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดจุก ขวดทันที แล้วเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที เปิดจุก แล้วกรองสารละลาย ผ่านกระดาษกรองพับจีบเบอร์ 2V หรือ เบอร์ที่เทียบเท่ากัน

4.6 ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 ml ใส่ลงในขวดเปล้ารูปชมพู่ ทำการไตเตรตด้วย 0.100 N สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต จนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน หยด น้ำแบ่ง 2 ml ทำการไตเตรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตร ของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้

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 =	C =	C =	E	C =	C =	C =
	0.01	0.02	0.03		0.01	0.02	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.

บันทึกข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ง.1 ค่าความชุ่มของน้ำกลั่นหลังเขย่ากับตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว

%กะลามะพร้าว	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
0	12	9.5	7.5	4.5	4.9	4
10	13.5	11.3	8.4	5	5	3.5
20	14	12.7	10.1	6.1	5.1	4
30	14.7	10.2	9.2	5.5	6.5	5.5
40	21.3	15.4	12.9	7	7	5
50	23	17.5	14	7.2	7.5	6.3
60	37.2	19	17.8	7	8	6.1
70	41	24	16	7.1	9.1	7
80	58.5	26.5	20.1	7.9	8.4	6.7
90	101.4	30	26.7	8.5	9	7

ตารางที่ ง.2 ค่าความชุ่มของน้ำกลั่นหลังเขย่ากับตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

%กะลาปาล์ม	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
0	16.3	11.3	8.7	5	4.5	3.2
10	19.6	10.6	9	5.6	5.4	2.8
20	15.4	8.7	9.6	5.8	5.5	4.4
30	19.7	9.5	11.2	5.7	6.1	5.1
40	21	10	10.5	6.3	6.5	5.7
50	24.5	18	13	5.9	7.4	5.5
60	42	17.5	15.6	6.7	7.7	6.1
70	42.5	22	14.3	8.1	8.5	7.3
80	61	25	15	7.6	8.2	6.9
90	130	31	16	9.5	8.7	7.5

ตารางที่ ง.3 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว

%กะลามะพร้าว	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
0	7.21	7.42	7.6	8.37	10.28	12.29
10	10	20	19.67	13.87	11.25	30
20	9.18	26.73	44.74	35.6	36.29	31.12
30	20	40	58.59	47.69	60.94	50
40	12.65	44.98	64.11	54.47	72.97	59.8
50	20	50	80.38	66.05	76.64	70
60	16.31	43.03	77.92	52.08	83.67	78.47
70	20	60	83.35	79.3	73.33	90
80	16.76	61.78	81.02	74.24	99.02	85.51
90	13.11	63.62	83.03	69.82	98.67	95.05

ตารางที่ ง.4 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

%กะลาปาล์ม	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
0	7.21	7.42	7.6	8.37	10.28	12.29
10	6.96	8.52	13.17	11.13	16.24	18.61
20	7.09	27.72	34.75	36.26	26.87	21.94
30	8.69	28.07	42.08	41.52	54.97	55.71
40	9.23	38.49	56.1	53.71	72.47	73.48
50	10.89	37.81	49.85	48.85	79.96	80.82
60	11.45	36.27	53.89	65.98	81.78	81.71
70	11.81	37.02	54.1	76.36	77.03	78.71
80	10.14	34.18	45.25	73.47	82.16	81.37
90	8.66	26.76	49.44	68.7	96.66	88.97

ตารางที่ ง.5 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว

เวลา (นาที)	น.น. ที่ใช้ (g)	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	Cr(VI) เริ่มต้น (mg/l)	Cr(VI) ที่เหลือ (mg/l)	ดูดซับ Cr(VI) (%)
30	0.05	2.3	2.26	10	4.494	55.06
60	0.05	2.3	2.26	10	4.261	57.39
90	0.05	2.3	2.26	10	3.958	60.42
120	0.05	2.3	2.26	10	3.811	61.89
180	0.05	2.3	2.26	10	3.49	65.1
240	0.05	2.3	2.26	10	3.205	67.95
480	0.05	2.3	2.26	10	3.101	68.99
720	0.05	2.3	2.26	10	3.09	69.1
1440	0.05	2.3	2.26	10	2.863	71.37

ตารางที่ ง.6 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

เวลา (นาที)	น.น. ที่ใช้ (g)	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	Cr(VI) เริ่มต้น (mg/l)	Cr(VI) ที่เหลือ (mg/l)	ดูดซับ Cr(VI) (%)
30	0.05	2.3	2.24	10	5.494	45.06
60	0.05	2.3	2.24	10	5.299	47.01
90	0.05	2.3	2.24	10	5.182	48.18
120	0.05	2.3	2.24	10	4.963	50.37
180	0.05	2.3	2.24	10	4.75	52.5
240	0.05	2.3	2.24	10	4.541	54.59
480	0.05	2.3	2.24	10	4.462	55.38
720	0.05	2.3	2.24	10	4.464	55.36
1440	0.05	2.3	2.24	10	4.333	56.67

ตารางที่ ง.7 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าว

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	Cr(VI) เริ่มต้น (mg/l)	Cr(VI) เหลือ (mg/l)	การดูดซับ Cr(VI) (%)
1	1.00	10.0	7.75	22.47
2	2.03	10.0	5.23	47.69
3	3.06	10.0	4.01	59.82
4	4.03	10.0	5.97	40.23
5	5.28	10.0	7.36	26.35
6	6.04	10.0	8.15	18.43
7	7.05	10.0	9.73	2.69
8	7.93	10.0	9.93	0.65

ตารางที่ ง.8 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์ม

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	Cr(VI) เริ่มต้น (mg/l)	Cr(VI) เหลือ (mg/l)	การดูดซับ Cr(VI) (%)
1	1.01	10.0	8.08	19.11
2	2.03	10.0	5.34	46.56
3	3.12	10.0	5.28	47.14
4	4.62	10.0	6.96	30.39
5	5.29	10.0	7.85	21.46
6	6.04	10.0	8.37	16.30
7	7.06	10.0	9.54	4.59
8	7.93	10.0	10.03	0.00

ตารางที่ ง.9 ผลการทดลองไอโซเทอมโดยใช้สมการ Langmiur ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม
กะลามะพร้าว

น้ำหนักที่ใช้ (g)	pH เริ่มต้น	Cr(VI) เริ่มต้น (mg/l)	Cr (VI) ที่เหลือ (mg/l)	C (mg/l)	C/q (mg/l)
0.001	3	9.9	9.79	9.79	890
0.0025	3	10	9.696	9.696	797.3684
0.005	3	10	9.47	9.47	893.3962
0.0075	3	10	9.192	9.192	853.2178
0.01	3	10	8.908	8.908	815.7509
0.025	3	10	7.296	7.296	674.5562
0.05	3	10	4.258	4.258	370.7767
0.075	3	10	1.826	1.826	167.5434
0.1	3	10	0.71	0.71	76.42626

ตารางที่ ง.10 ผลการทดลองไอโซเทอมโดยใช้สมการ Langmiur ของตัวดูดซับผลิตจากดินดำผสม
กะลามปาล์ม

น้ำหนักที่ใช้ (g)	pH เริ่มต้น	Cr(VI) เริ่มต้น (mg/l)	Cr (VI) ที่เหลือ (mg/l)	C (mg/l)	C/q (mg/l)
0.001	3	10	9.912	9.912	1126.364
0.0025	3	10	9.8	9.8	1225
0.005	3	10	9.612	9.612	1238.66
0.0075	3	10	9.41	9.41	1196.186
0.01	3	10	9.158	9.158	1087.648
0.025	3	10	7.94	7.94	963.5922
0.05	3	10	5.886	5.886	715.3622
0.075	3	10	4.02	4.02	504.1806
0.1	3	10	2.63	2.63	356.8521

ตารางที่ ง.11 ผลการทดลองไอโซเทอมโดยใช้สมการ Langmiur ของถ่านกัมมันต์(F300)

น้ำหนักที่ใช้ (g)	pH เริ่มต้น	Cr(VI) เริ่มต้น (mg/l)	Cr (VI) ที่เหลือ (mg/l)	C (mg/l)	C/q (mg/l)
0.001	3	10	9.242	9.242	121.9261
0.0025	3	10	8.432	8.432	134.4388
0.005	3	10	7.774	7.774	174.6181
0.0075	3	10	6.776	6.776	157.6303
0.01	3	10	5.626	5.626	128.6237
0.025	3	10	2.514	2.514	83.95672
0.05	3	10	2.394	2.394	157.3758
0.075	3	10	2.753	2.753	284.911
0.1	3	10	2.912	2.912	410.8352


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.12 ผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับ

ปริมาณน้ำเสียไหลออก (ลิตร)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ ระดับ 30 ซม.(มก./ล.)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ ระดับ 60 ซม.(มก./ล.)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ ระดับ 90 ซม.(มก./ล.)
1	0.0	0.0	0.0
5	0.12	0.04	0.0
10	0.24	0.14	0.1
15	1.16	0.35	0.09
20	1.68	0.50	0.14
25	2.39	0.64	0.17
30	3.24	0.78	0.24
35	3.97	1.31	0.31
40	4.28	1.68	0.5
45	4.81	2.29	0.46
50	5.52	2.58	0.68
55	6.93	2.94	0.71
60	7.56	3.24	0.78
65	9.24	3.51	0.74
70	9.89	3.72	0.84
75	10	4.11	1.54
80	10	4.28	1.68
85	-	4.86	1.88
90	-	5.52	2.14
95	-	5.94	2.35
100	-	6.48	2.58
105	-	7.13	2.96
110	-	7.56	3.24
115	-	7.69	3.31
120	-	7.72	3.57
125	-	8.57	3.68
130	-	8.96	3.72
135	-	9.32	3.93
140	-	9.45	3.93
145	-	9.92	4.19
150	-	10	4.28

ตารางที่ ง.12 ผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับ(ต่อ)

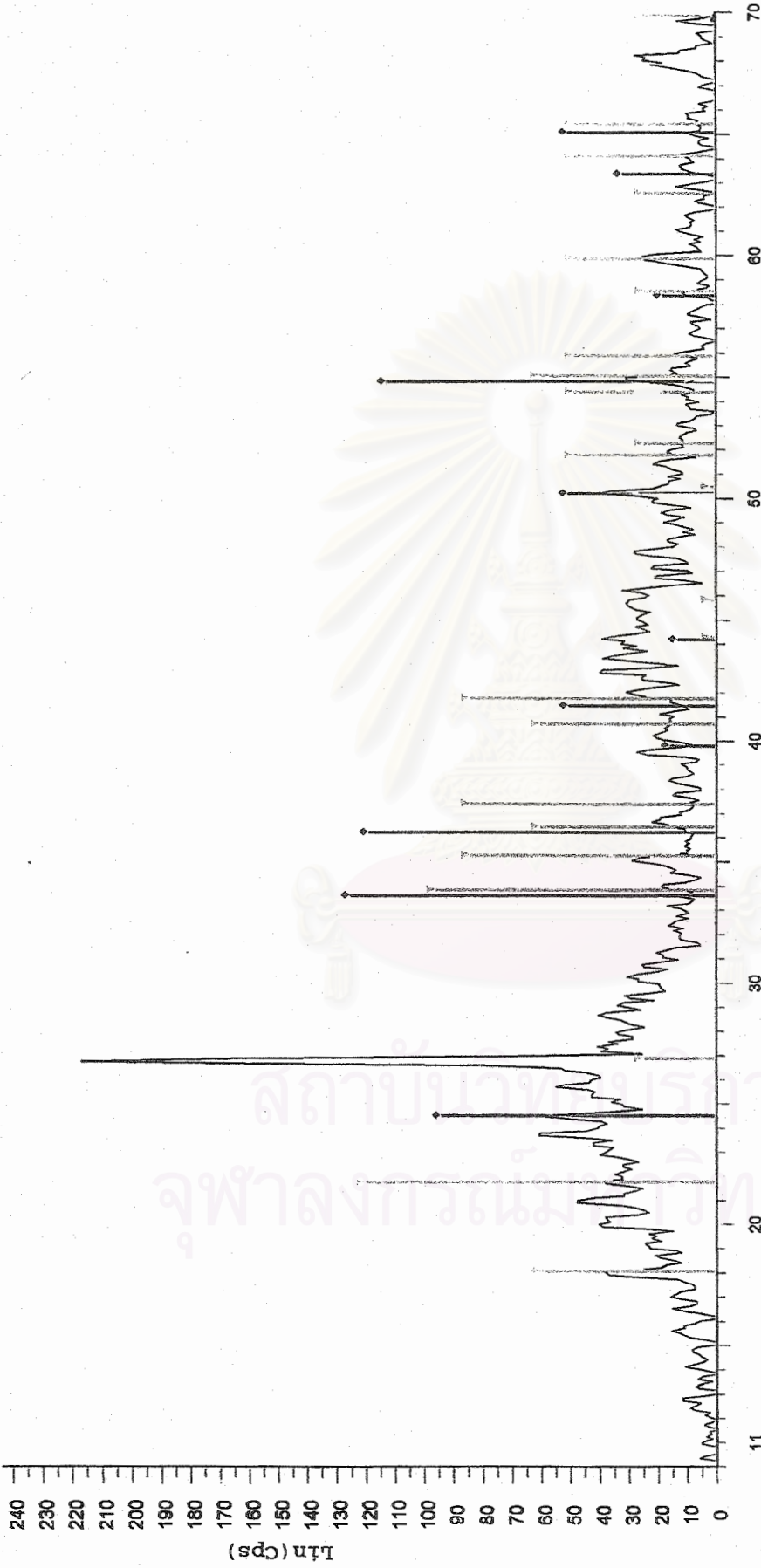
ปริมาณน้ำเสียไหลออก (ลิตร)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ ระดับ 30 ซม.(มก./ล.)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ ระดับ 60 ซม.(มก./ล.)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ ระดับ 90 ซม.(มก./ล.)
155	-	10	4.76
160	-	-	4.88
165	-	-	5.31
170	-	-	5.52
175	-	-	5.87
180	-	-	6.17
185	-	-	6.34
190	-	-	6.48
195	-	-	7.23
200	-	-	7.56
205	-	-	7.31
210	-	-	7.69
215	-	-	7.43
220	-	-	7.88
225	-	-	7.92
230	-	-	7.72
235	-	-	8.37
240	-	-	8.64
245	-	-	8.81
250	-	-	8.96
255	-	-	9.27
260	-	-	9.24
265	-	-	9.52
270	-	-	9.67
275	-	-	10.06
280	-	-	10
285	-	-	10
290	-	-	10
295	-	-	10
300	-	-	10



ภาคผนวก จ.

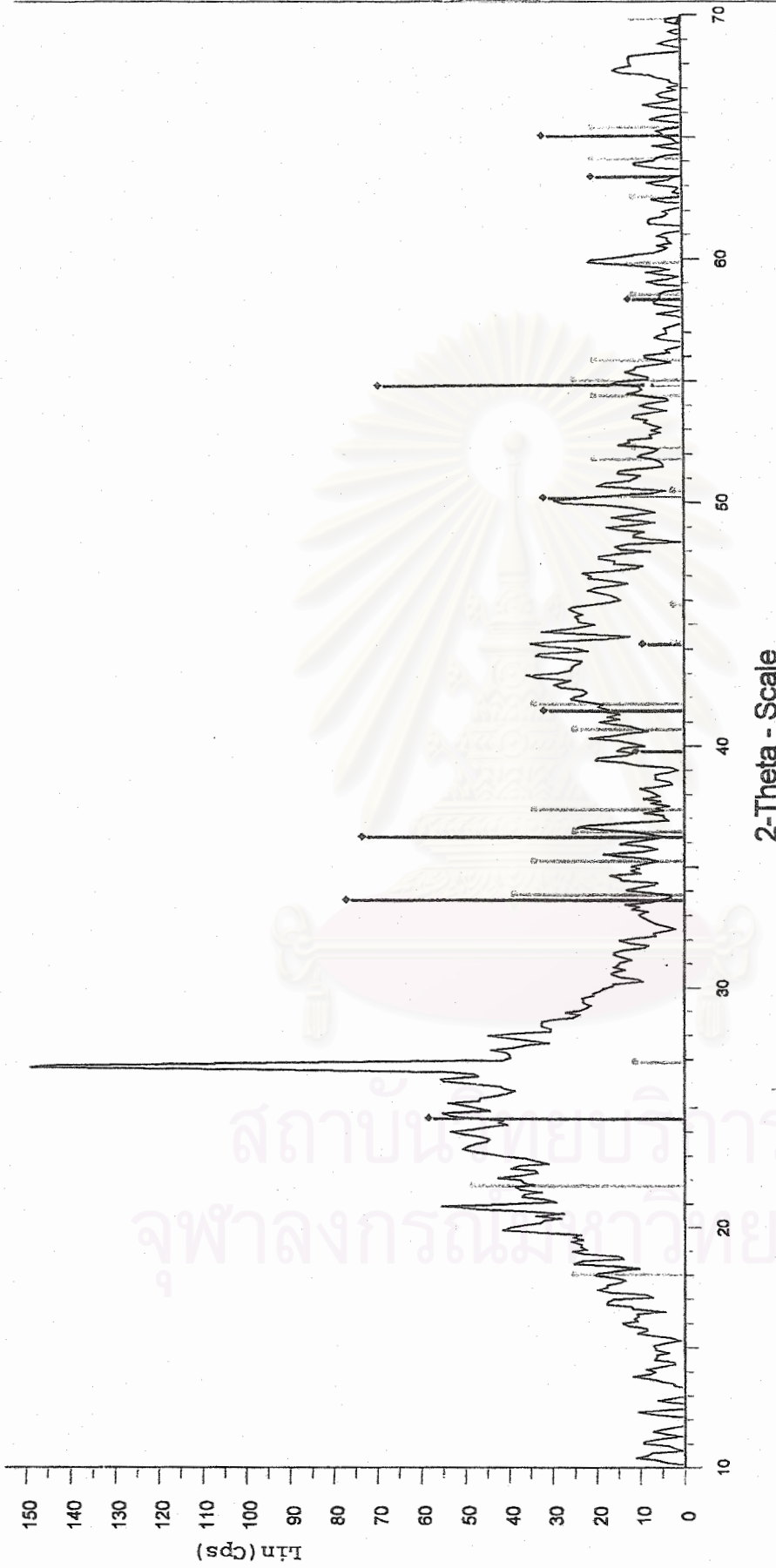
ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



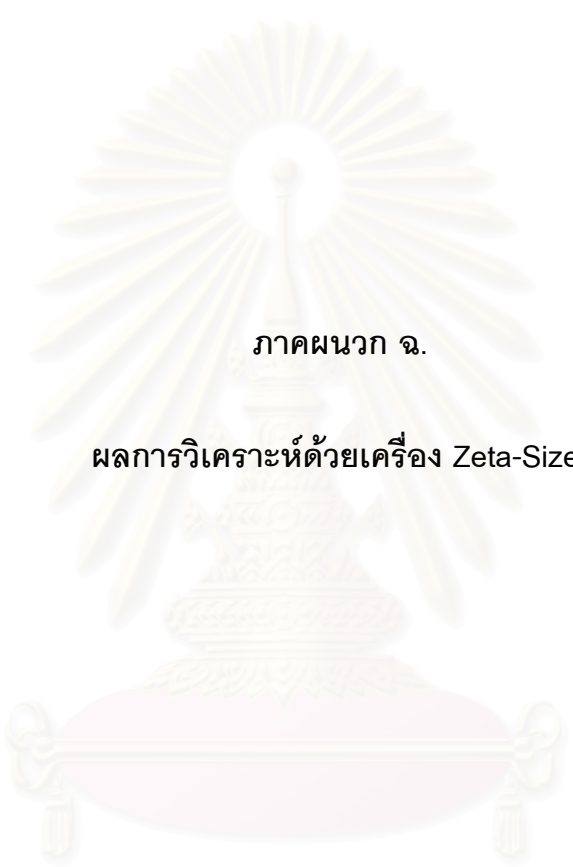
File: sample A.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.131 ° - End: 70.108 ° - Step: 0.100 ° - Step time: 0.6 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 10.131 ° - Thet
 08-0504 (D) - Eskolaite, syn - Cr2O3 - Y: 45.75 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - 0 - /lc PDF 1.8 -
 85-0504 (C) - Quartz - SiO2 - Y: 81.25 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - 0 - /lc PDF 3. -
 25-1497 (I) - Bracewellite - CrO(OH) - Y: 43.75 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - 0 -

ผลวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผลิตจากดินด้านผสมกะลาปาล์มด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer



File: sample B.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.100 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 10.000 ° - Thet
 06-0504 (D) - Eskolaite, syn - Cr2O3 - Y: 41.32 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - 0 - I/c PDF 1.8 -
 85-0504 (C) - Quartz - SiO2 - Y: 108.86 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - 0 - I/c PDF 3. -
 25-1497 (I) - Bracwellite - CrO(OH) - Y: 25.38 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - 0 -

ผลวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผลิตจากดินค้าผสมสถานะสภาพด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer



ภาคผนวก จ.

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zeta-Sizer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sample

Record Number: 15
Filename: Live zeta
File Path: .
Dielectric Constant: 79.0
pH: N/A
Viscosity (cP): 0.790
Date (DMY): 10/02/04
Time: 11:57:15

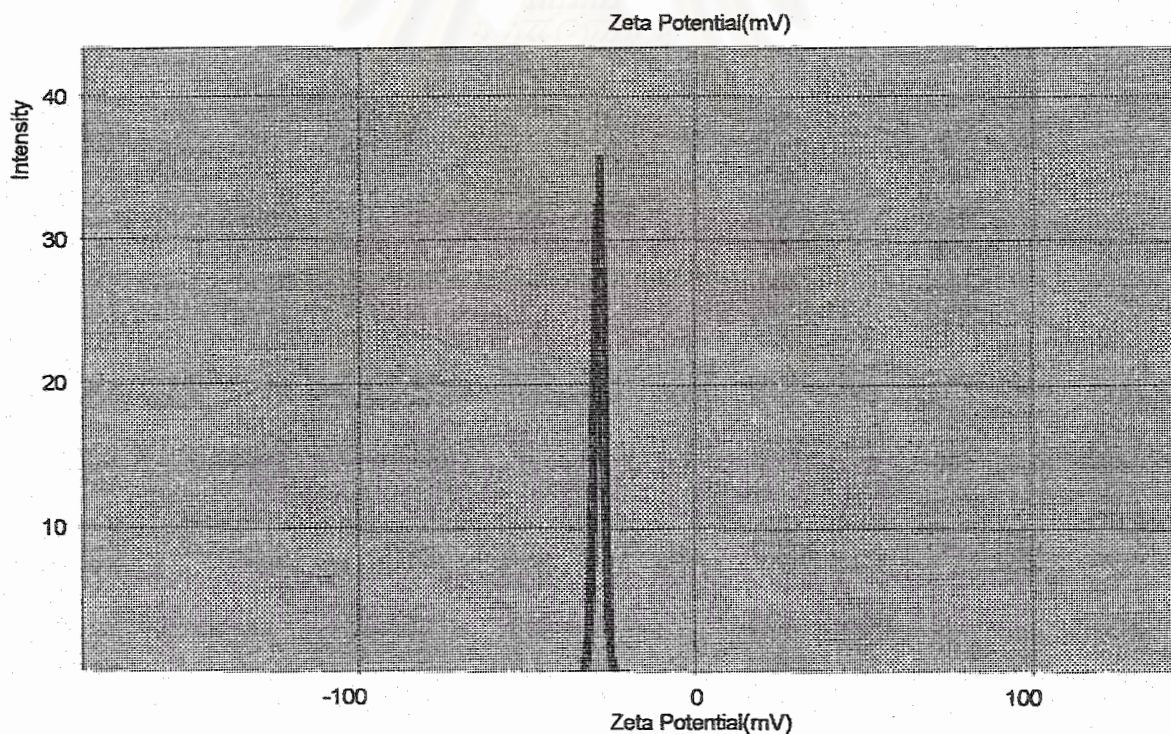
System

Instrument Type: ZetaSizer
Temperature (°C): 24.8
Count rate (kCps): 211.2
Cell Type: ZET5104
Cell Position (%): 14.60
Cell field (V/cm): 26.7
Current (mA): 0.1

Result

Zeta Potential (mV): -29.4
StDev (mV): 1.3
Conductivity (mS/cm): 0.02

Mobility (umcm/V.s): -2.604
StDev (umcm/V.s): 0.116
F(ka): 1.50



ผลวิเคราะห์ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวด้วยเครื่อง Zeta-Sizer

Sample

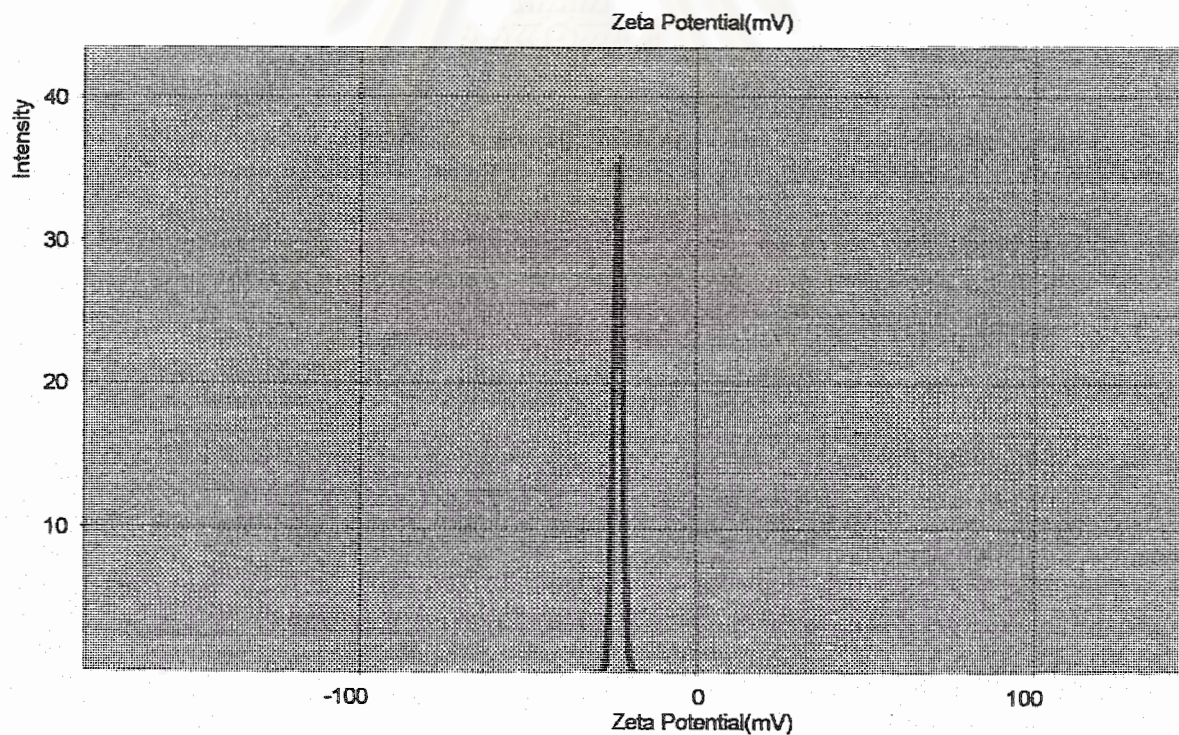
Record Number: 14
 Filename: HT058_47.zet
 File Path: D:\DATA\TECH_S~1
 Dielectric Constant: 79.0
 pH: N/A
 Viscosity (cP): 0.790
 Date (DMY): 10/02/04
 Time: 11:07:10

System

Instrument Type: ZetaSizer
 Temperature (°C): 24.8
 Count rate (kCps): 134.5
 Cell Type: ZET5104
 Cell Position (%): 14.60
 Cell field (V/cm): 26.9
 Current (mA): 0.1

Result

Zeta Potential (mV): -23.2
 StDev (mV): 1.3
 Conductivity (mS/cm): 0.02
 Mobility (umcm/V.s): -2.059
 StDev (umcm/V.s): 0.115
 F(ka): 1.50



ผลวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผลิตจากดินดำผสมกะลาปาล์มด้วยเครื่อง Zeta-Sizer

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐ ดิลกเกียรติ เกิดเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2521 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนีย์) และระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี ในปีการศึกษา 2541

ในปีการศึกษา 2543 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย