

การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก
เถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหิน



นางสาวเพ็ญพร ฉายะวานิชย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

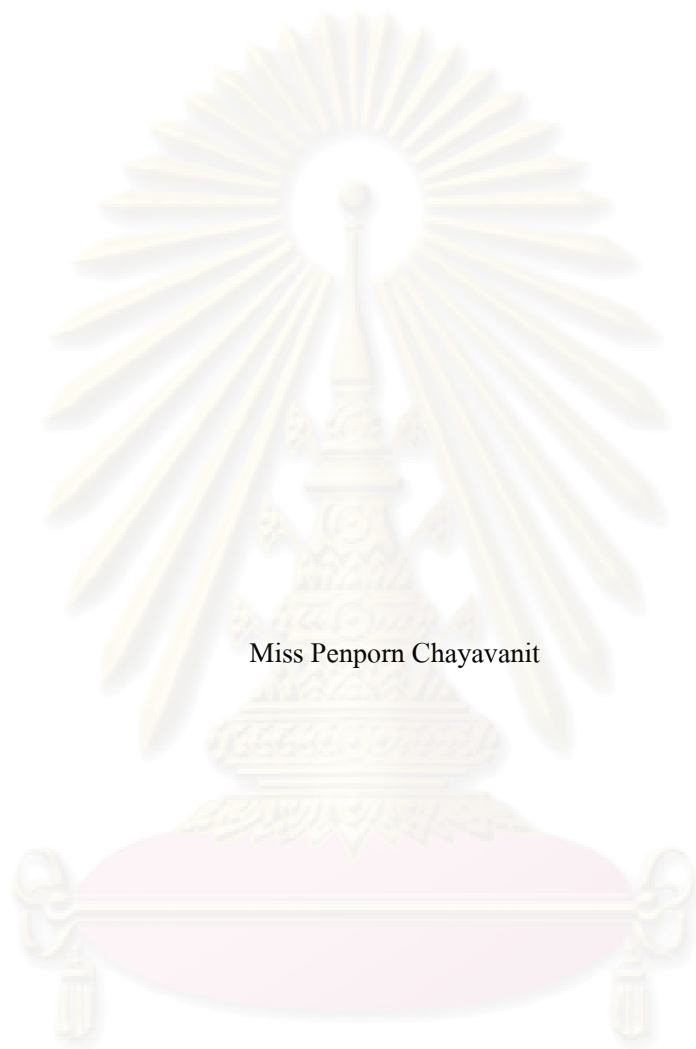
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHROMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER USING ZEOLITE SYNTHESIZED
FROM BAGASSE FLY ASH AND COAL FLY ASH



Miss Penporn Chayavanit

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก
เถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหิน

โดย

นางสาวเพ็ญพร ฉายะวณิชย์

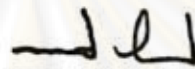
สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์

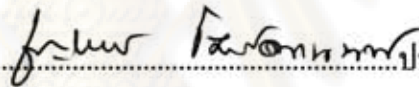
บัณฑิตตามวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

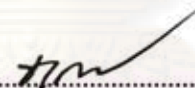
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



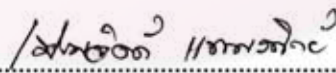
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์)



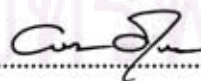
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เปรมจิตต์ แทนสถิตย์)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญฟ้า อุ่นอบ)

ศูนย์วิทยกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพ็ญพร ฉายะวานิชย์ : การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย
 ฆานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหิน. (CHROMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER
 USING ZEOLITE SYNTHESIZED FROM BAGASSE FLY ASH AND COAL FLY ASH)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์, 131 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอย
 ถ่านหินและจากเถ้าลอยฆานอ้อยด้วยสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมรมค่าโลหะ
 (Spent alkaline) โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน
 และจากเถ้าลอยฆานอ้อย ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ
 สารละลาย Spent alkaline 3.0 โมลาร์และ 2.5 โมลาร์ตามลำดับ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา
 4 วัน ซึ่งจะหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 473.74 cmol/kg และ
 286.68 cmol/kg

การศึกษานี้ใช้น้ำซีโอไลต์สังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดโครเมียมแบบ
 ไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ พีเอช ความ
 เข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์ เพื่อทดสอบไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมพบว่า ที่
 พีเอช 2 และความเข้มข้นโครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมดีที่สุด
 ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมที่สภาวะดังกล่าว เป็นสมการดูดซับแบบแลงมัวร์
 และพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยฆานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย
 Spent alkaline มีค่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมสูงสุดเท่ากับ 86.17 และ 68.99 มิลลิกรัม
 ต่อกรัม ซีโอไลต์ ตามลำดับ และจากการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ใน
 การกำจัดโครเมียม พบว่าการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่ใช้แล้ว ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก
 เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการสัมผัส 1 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมงให้ร้อยละการกำจัดโครเมียม
 ในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ 95.44 และ 93.55 ตามลำดับ

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยฆานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย
 Spent alkaline มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจริงได้เท่ากับ 97.09% และ 95.42%
 ตามลำดับ และในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test) ในซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน
 และจากเถ้าลอยฆานอ้อย เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่ากำจัด
 โครเมียมได้ 18.34 11.17 8.78 8.58BV และ 16.34 10.17 8.12 7.58BV ตามลำดับ ที่จุด breakthrough

สาขาวิชา..... วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต เพ็ญพร ฉายะวานิชย์.....
 ปีการศึกษา..... 2551..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *th*

4889113920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : ZEOLITE, COAL FLY ASH, BAGASSE FLY ASH, CHROMIUM
 PENPORN CHAYAVANIT : CHROMIUM REMOVAL FROM
 WASTEWATER USING ZEOLITE SYNTHESIZED FROM BAGASSE FLY
 ASH AND COAL FLY ASH ADVISOR: ASSOC. PROF. THARES
 SRISATIT, Ph.D., 131 pp.

The objective of this research was to study the potential applicability in zeolite syntheses using coal fly ash and bagasse fly ash activated by Spent alkaline from black oxide coating industry. This study designedly ascertained the optimum condition of zeolite syntheses comparatively from coal fly ash and bagasse fly ash. The result revealed that the optimum condition exhibiting the highest CEC for synthesized zeolite using coal fly ash and bagasse fly ash were 473.74 and 286.68 cmol/kg, characterized by reaction temperature of 80 °C, activation by spent alkaline solution concentrated of 3.0 molar and reaction time of 4 days.

Removal efficiency of chromium by using synthesized zeolites at optimum condition was evaluated with batch test. The batch experiment was utilized to study the influential factors on removal of chromium from synthetic wastewater which are namely pH favorableness, concentration of the heavy metal, contact time and adsorption isotherm. The outcomes were that the best adsorption efficiency of chromium was at pH 2 and concentration of 10 mg/l of chromium. From Langmuir adsorption isotherm of synthetic wastewater, it was found that the chromium adsorption capacities of zeolites synthesized from coal fly ash and bagasse fly ash activation by spent alkaline were 86.17 and 68.99 mg/g of zeolite respectively. For the study of spent zeolite regeneration reused for removal of chromium, the results showed that maximum chromium removal from synthetic wastewater for spent zeolites put in hydrochloric 1% and contract time at 1 and 3 hour was 95.44% and 93.55% respectively.

The removal capacities of chromium in real wastewater from chromium using zeolites synthesized from coal fly ash and bagasse fly ash activation by spent alkaline were 97.09% and 95.42% respectively. For column tests, wastewaters were collected at depth of synthesized zeolites 30 60 90 and 120 cm. The results showed that chromium removal capacities of zeolites synthesized from coal fly ash and bagasse fly ash was 18.34 11.17 8.78 8.58 BV and 16.34 10.17 8.12 7.58 BV respectively at breakthrough point.

Field of Study: Environmental Science Student's Signature Penporn

Academic Year: 2008 Advisor's Signature T. Srisatit

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณทุกๆ ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการวิจัยและตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โหมิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตรสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม รองศาสตราจารย์ เปรมจิตต์ แทนสถิตย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญฟ้า อุ่นอบ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าให้เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท ปัญจพล เปเปอร์ อินดัสทรี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกระดาษถนอมผิวเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงงานน้ำตาลสระบุรี จังหวัดสระบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำตาลทรายขาวเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ จังหวัดนครราชสีมา ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์สารละลายด่างที่ใช้งานแล้ว (Spent alkaline) เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท ไทปาร์คเกอร์ไรซิ่ง จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ที่อำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียโครเมียมเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการมูลฝอยในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณามอบทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน และเพื่อนสนิทที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้องที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษารวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ซีไอไลต์.....	4
2.2 ถั่วลยถ่านหิน.....	21
2.3 ถั่วลยขานอ้อย.....	27
2.4 สมดุลการคูดัดผิว.....	30
2.5 โครเมียม.....	34
2.6 วิธีการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย.....	37
2.7 การรรมดำโลหะ.....	40
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	48
3.2 แผนการทดลอง.....	48
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	50

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	56
4.1 ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจาก กระบวนการรดำโลหะ (Spent alkaline).....	56
4.2 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยและ การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน(CEC).....	57
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด.....	69
4.4 การศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อยแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test).....	73
4.5 ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะโครเมียม โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยกับน้ำเสียจริง.....	84
4.6 ผลจากการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย และเถ้าลอยถ่านหินที่ใช่แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียม.....	87
4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย ทั้งสองชนิด โดยทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแบ่ง (Column Test)	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก.....	110
ภาคผนวก ข.....	113
ภาคผนวก ค.....	117
ภาคผนวก ง.....	121
ภาคผนวก จ.....	126
ภาคผนวก ฉ.....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	131

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ ตามโครงสร้างทฤษฎี.....	10
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็น โครงสร้างของผลึกซีโอไลต์.....	18
ตารางที่ 2.3	การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	34
ตารางที่ 2.4	ประสิทธิภาพการรีดิวซ์โครเมียม(+6)ของสารรีดิวซ์แต่ละชนิด.....	38
ตารางที่ 2.5	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม 1 mg/l.....	39
ตารางที่ 4.1	ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของสารละลายต่างๆที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ.....	56
ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนและค่าพีเอชของสารละลาย Spent alkaline.....	57
ตารางที่ 4.3	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้น.....	64
ตารางที่ 4.4	สรุปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	66
ตารางที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	67
ตารางที่ 4.6	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน.....	69
ตารางที่ 4.7	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยชานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยชานอ้อย.....	70
ตารางที่ 4.8	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....	72
ตารางที่ 4.9	ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังผ่านการดูดซับด้วย ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....	73
ตารางที่ 4.10	การกำจัด โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....	74
ตารางที่ 4.11	การกำจัด โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....	75

ตารางที่ 4.12 ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์ของซีโอไลด์ ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย.....	77
ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	78
ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	79
ตารางที่ 4.15 ค่าคงที่ของซีโอไลด์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยจาก สมการของ Langmuir.....	82
ตารางที่ 4.16 ผลการดูดซับ โลหะโครเมียมด้วยซีโอไลด์ของน้ำเสียดังเคราะห์.....	83
ตารางที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลด์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์โดยใช้เวลา 60 นาที	86
ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลด์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์โดยใช้เวลา 180 นาที	87
ตารางที่ 4.19 ปริมาตรและน้ำหนักซีโอไลด์ทั้งสองชนิดสังเคราะห์ผ่านการขึ้นรูปที่บรรจุใน ระดับความลึกต่างๆ	89
ตารางที่ 4.20 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร.....	90
ตารางที่ 4.21 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร.....	91
ตารางที่ 4.22 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 90 เซนติเมตร.....	92
ตารางที่ 4.23 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร.....	93
ตารางที่ 4.24 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยขานอ้อยที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร.....	94

ตารางที่ 4.25 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียจริงหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดแบบแห้งด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ จากถ้ำลอยซานอ้อยที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร.....	95
ตารางที่ 4.26 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียจริงหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดแบบแห้งด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ จากถ้ำลอยซานอ้อยที่ระดับความลึก 90 เซนติเมตร.....	97
ตารางที่ 4.27 ปริมาณ โครเมียมในน้ำเสียจริงหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดแบบแห้งด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ จากถ้ำลอยซานอ้อยที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร.....	98



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม ในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐุมภูมิของซีโอไลต์.....	6
รูปที่ 2.2 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ SiO_4/AIO_4	6
รูปที่ 2.3 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ.....	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่.....	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ analcite และ laumonite.....	12
รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ natrolite, Brewsterite และ ZSM-5.....	12
รูปที่ 2.7 ลักษณะ โครงสร้างของ offretite และ Erionite.....	12
รูปที่ 2.8 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UUDD, UDUD และ UDUU.....	13
รูปที่ 2.9 หน่วยทุติยภูมิ Heulandite Group และ Mordenite Group.....	13
รูปที่ 2.10 ลักษณะ โครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ modenite, dachiardite, ferrierite, epstilbite และ bikitaite.....	14
รูปที่ 2.11 ลักษณะ โครงสร้างของ ZEM-5 และภาพร่างพื้นที่ผิวของ ZEM-5.....	14
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของ ZK-5.....	15
รูปที่ 2.13 หน่วยพอลิฮีดรอลต่าง ๆ ในโครงสร้างของ Melanophlogite และ ZEM-39.....	15
รูปที่ 2.14 ลักษณะ โครงสร้างของ ZSM-39.....	16
รูปที่ 2.15 ลักษณะ โครงสร้างของ Melanophlogite.....	16
รูปที่ 2.16 ลักษณะ โครงสร้างของ Lovdarite.....	17
รูปที่ 2.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir.....	32
รูปที่ 2.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich.....	33
รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ.....	41
รูปที่ 3.1 เครื่อง Shaker water bath สำหรับทำปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	55
รูปที่ 3.2 คอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป และเจาะเพื่อเก็บตัวอย่าง น้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์ 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร.....	55

รูปที่ 4.1	ถ้ำลอยถ่านหินที่มีลักษณะร่วนและเป็นสีดำเทา.....	58
รูปที่ 4.2	ถ้ำลอยชันอ้อยที่มีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ.....	58
รูปที่ 4.3	ตัวอย่างถ้ำลอยถ่านหิน.....	59
รูปที่ 4.4	ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	59
รูปที่ 4.5	โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	60
รูปที่ 4.6	โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	60
รูปที่ 4.7	ตัวอย่างถ้ำลอยชันอ้อย.....	61
รูปที่ 4.8	ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชันอ้อย.....	61
รูปที่ 4.9	โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชันอ้อยเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	62
รูปที่ 4.10	โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชันอ้อยเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	63
รูปที่ 4.11	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรอนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	80
รูปที่ 4.12	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	80
รูปที่ 4.13	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรอนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชันอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	81
รูปที่ 4.14	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชันอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	82
รูปที่ 4.15	โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังผ่านการดูดติดผิว.....	84
รูปที่ 4.16	โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชันอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังผ่านการดูดติดผิว.....	85
รูปที่ 4.17	ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร.....	89
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร.....	90

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร.....	91
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 90 เซนติเมตร.....	92
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร.....	94
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร.....	95
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร.....	96
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่ระดับความลึก 90 เซนติเมตร.....	97
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สภาพเศรษฐกิจและสังคมไทยในปัจจุบันที่กำลังเติบโตและมีการแข่งขันกันอยู่ตลอดเวลาทำให้มีการพัฒนาผลิตผลและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในธุรกิจทั้งภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค นอกจากเทคโนโลยีแล้ววัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก็มีปริมาณความต้องการมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งวัตถุดิบทั้งหลายเมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วสามารถแปรสภาพไปเป็นมลสารได้ เช่น โลหะหนักบางชนิดที่เหลือหลังจากกระบวนการในการผลิต อาจปนเปื้อนไปกับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งในอากาศ น้ำ ดิน รวมทั้งในอาหาร ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิตต่างๆ และจะเกิดการสะสมโดยเฉพาะในคนหรือสัตว์ โดยเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตทางห่วงโซ่อาหาร ดังนั้น ปัญหาของการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ

โลหะหนักสามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากลักษณะสมบัติโดยทั่วไปของโลหะหนักเป็นสารที่มีความคงตัวสูงสลายตัวได้ยากในกระบวนการทางธรรมชาติ หากสิ่งมีชีวิตได้รับเข้าไปจะสะสมอยู่ในร่างกายและจะไปรบกวนการทำงานของระบบเอ็นไซม์ของเซลล์ และจับยึดกับเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การควบคุมการลำเลียงของสารต่าง ๆ ของเยื่อหุ้มเซลล์ผิดปกติไป โลหะหนักบางชนิดมีผลต่อสมบัติทางด้านโครงสร้างหรือเคมีไฟฟ้าของเซลล์ ความเป็นพิษของโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบของโลหะหนักแต่ละชนิด และเส้นทางที่ร่างกายได้รับเข้าไป เช่น ทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ผิวหนัง ผลของความเป็นพิษของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตเกิดจากกลไกระดับเซลล์ คือ ทำให้เซลล์ตาย เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ เป็นตัวการชักนำให้เกิดมะเร็ง เป็นตัวการทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรมและทำลายต่อโครโมโซม ซึ่งเป็นปัจจัยทางพันธุกรรม

จากปัญหาดังกล่าวได้มีการศึกษาสมบัติและความสามารถต่างๆ ของซีโอไลต์กันมากขึ้น ซึ่งลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของซีโอไลต์คือ โครงสร้างที่มีรูพรุนมากมายจึงมีพื้นที่ผิวมากมีความสามารถในการดูดซับได้ดี นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน จากสมบัติเหล่านี้ทำให้ซีโอไลต์มีประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นสารกรองแยกโมเลกุล ใช้ลดความกระด้างของน้ำ ใช้จับโลหะหนักหรือสารกัมมันตรังสีในน้ำทิ้ง ใช้เป็นสารดูดความชื้น และแก๊สพิษ รวมทั้งใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และไอโซเมอไรเซชัน

(Isomerization) เป็นต้น จึงได้มีการสังเคราะห์ซีโอล์ดขึ้นมามากมาย แต่เนื่องจากต้นทุนในการสังเคราะห์สูงทำให้มีความพยายามที่จะหาวัตถุดิบใหม่ๆ ที่จะช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอล์ดลง เถ้าลอยถ่านหินที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าและเถ้าลอยขานอ้อยที่เกิดจากการเผาไหม้ในโรงงานน้ำตาลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงนับเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้สังเคราะห์ซีโอล์ดที่น่าสนใจ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยพบว่าประกอบด้วย สารประกอบซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) โดยเถ้าลอยถ่านหินประกอบด้วย SiO_2 เท่ากับ 43.07% (โดยน้ำหนัก) และ Al_2O_3 เท่ากับ 26.15% (โดยน้ำหนัก) ส่วนเถ้าลอยขานอ้อยประกอบด้วย SiO_2 เท่ากับ 80.74% (โดยน้ำหนัก) และ Al_2O_3 เท่ากับ 5.01% (โดยน้ำหนัก) เมื่อนำเถ้าลอยมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะสามารถเกิดซีโอล์ดขึ้นได้ (Querol และคณะ, 1997) นอกจากนี้ยังนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้วหรือสารละลายต่างๆที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) จากโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ มาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งในอนาคตวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้อาจนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์และช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ ตลอดจนไม่มีการทิ้งของเสียออกจากโรงงานอันจะช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์ซีโอล์ดจากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ (Spent alkaline)
- 2) ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของซีโอล์ดที่สังเคราะห์ได้รวมทั้งสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอล์ดที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องและต่อเนื่อง
- 4) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ของซีโอล์ดในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) เถ้าลอยถ่านหินที่นำมาใช้ในการวิจัยนำมาจากโรงผลิตไฟฟ้าปัญจพล เปเปอร์ อินดัสทรี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
- 2) เถ้าลอยขานอ้อยที่นำมาใช้ในการวิจัยนำมาจากโรงงานน้ำตาลสระบุรี จังหวัดสระบุรี

- 3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้จากอุตสาหกรรมด้าโลหะ อุตสาหกรรมโรงงานอุตสาหกรรมด้าโลหะ จังหวัดนครราชสีมา
- 4) วิเคราะห์คุณสมบัติของถ้ำลอยทั้งสองชนิดและซีโอไลต์ทั้งสองชนิดทางกายภาพ และทางเคมี
- 5) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง คือ พีเอช ปริมาณโลหะหนัก
- 6) ทดลองกำจัดโครเมียมในน้ำเสียแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการนำประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์แล้วนำไปใช้ในการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนออกจากน้ำเสีย
- 2) เป็นการนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากกระบวนการด้าโลหะ ซึ่งเป็นสารละลายด้าที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent alkaline) มาทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งในอนาคตวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้อาจนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์และช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้
- 3) เป็นแนวทางในการใช้ถ้ำลอยขานอ้อยและถ้ำลอยถ่านหินมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ในระดับอุตสาหกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

บททวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.1.1 ประวัติซีโอไลต์

คำว่า “ซีโอไลต์” นั้นมาจากภาษากรีกสองคำคือ คำว่า $\zeta\epsilon\iota\upsilon\upsilon$ แปลว่า ต้ม (to boil) และ คำว่า $\lambda\iota\theta\omicron$ แปลว่า หิน (a stone) ซีโอไลต์ที่เกิดในธรรมชาติจะมีน้ำอยู่ในโพรงซึ่งสามารถแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกหรือโมเลกุลอื่นเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกแล้วจะเกิดฟองและไอน้ำออกมาจากก้อนผลึกเพราะน้ำที่อยู่ในโพรงจะหลุดออกมา แร่ซีโอไลต์นี้ประกอบไปด้วยอะลูมิโนซิลิเกตของอัลคาไลน์เอิร์ทที่มีน้ำอยู่ภายในโครงผลึก

มนตรี ทองคำ, 2542 อ้างถึงในวิภาฯ บุญเจริญสุข, 2537 ได้กล่าวถึงประวัติของซีโอไลต์ไว้ดังนี้

ปี พ.ศ. 2383 ได้ค้นพบว่าเมื่อผลึกซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก (Hydrated zeolites) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (Dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (Spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดออกไซด์ และปรอทได้

ปี พ.ศ. 2388 ได้ทำการทดลองพบว่าดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ จะเห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

ปี พ.ศ. 2452 ได้ทำการทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง คือ chabazite พบว่าสามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโบรมีนที่อุณหภูมิสูงได้แม้แต่ไอของปรอทที่อาจถูกดูดซับได้

ปี พ.ศ. 2468 ค้นพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กๆ และปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ๆ ออกมา ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย Mcbain ในปี พ.ศ. 2475 โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “Molecular sieving”

ปี พ.ศ. 2476 ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ chabazite

ปี พ.ศ. 2491 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลต์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแรกและได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมา

ปี พ.ศ. 2499 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ของ faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติ และซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ขึ้น

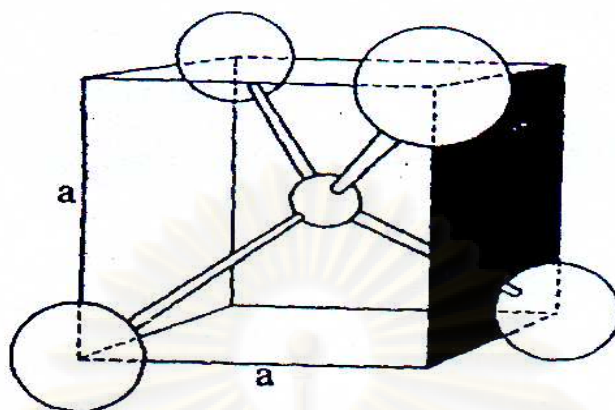
ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะทำภายใต้ภาวะที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมา บริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงทำปฏิกิริยาในภาชนะปิด หรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้พัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2491 จนถึงปี พ.ศ. 2515 นั้นพบว่ามีผลงานวิจัยเกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์เกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารสิทธิบัตรอีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ นอกจากนี้มีรายงานว่า การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2405 แต่ Breck (1974) ได้ให้ความเห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้ในขณะนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และสารบางตัวยังไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime

ปี ค.ศ. 1980 ได้มีการค้นพบซีโอไลต์ในธรรมชาติกว่า 40 ชนิด และซีโอไลต์กว่า 100 ชนิด ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาในขณะที่มีความต้องการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์อย่างมากในเชิงพาณิชย์ แต่ความต้องการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติยังคงมีอยู่อย่างจำกัด กล่าวคือ จะมีการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติก็ต่อเมื่อการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ในพื้นที่นั้นไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ทั้งในด้านการทดลองและในด้านอุตสาหกรรม

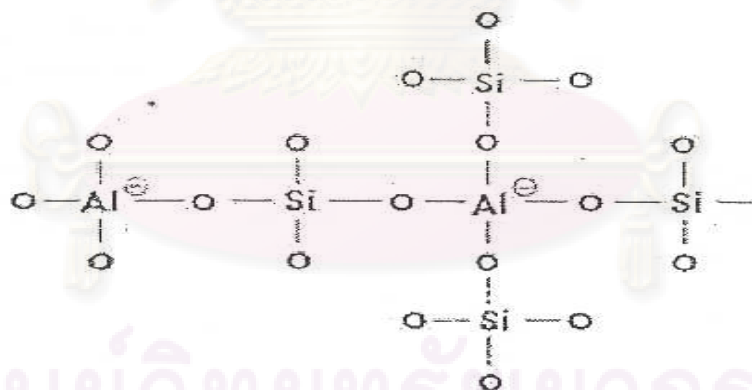
2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ทซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติของอะลูมิเนียม - ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน - ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

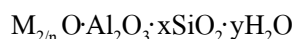
ที่มา : Breck, 1974



ศูนย์วิทยทรัพยากร

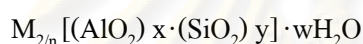
รูปที่ 2.2 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$
ที่มา : สัจชนาถ และ สมชาย, 2540

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ



- n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ท
- x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 2
- y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

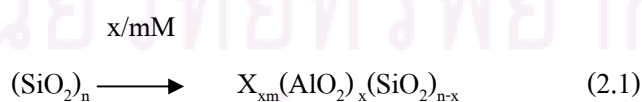
สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์



- n คือ วาเลนซ์ของไอออนบวก (M)
- w คือ จำนวน โมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์
- x+y คือ จำนวนรูปทรงเตตระฮีดรอลทั้งหมดของหน่วยเซลล์
- y/x มักจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

ซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) จะมีประจุลบสี่ และอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) มีประจุเป็นลบห้า

การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็น โครงสร้างตาข่ายนั้นทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ใน โครงสร้างซึ่ง ถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคตไอออนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ทดังสมการ (2.1)



- M คือ แคตไอออนของโลหะที่มีประจุ +m
- x คือ จำนวนอะตอมของอะลูมิเนียม (Al)
- n คือ จำนวนโมลของ SiO_2

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

1) ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Mineral Zeolite or Naturally Occuring Zeolites) ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (mono-or divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วนหรือทั้งหมดโดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์จากธรรมชาติได้แก่ faujasite erionite offretite chabazite gmelinite mordenite และ heulandite เป็นต้น

เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตาม Hydrological system ได้ดังนี้ คือ

1.1) Saline, Alkaline Lakes แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close basin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม lake chemistry

1.2) Saline, Alkaline soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ใน Saline, Alkaline soils การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไคคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดินแล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไคคาร์บอเนต ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น และทำให้เกิดอะลูมิโนซิลิเกตในพื้นที่ดินขึ้น

1.3) Marine Sediments ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้ อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง

1.4) Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

1.5) Hydrothermal Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีอัลคาไลน์กับ สารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หินและลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

1.6) Burial Diagenetic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)

1.7) Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน imerstirial และ globules

1.8) เป็นซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน ช่องว่างภายในผลึกจะเต็มไปด้วย analcime, clinoptilolite, erionite, harmotone และ phillipsite

2) ซีโอไลต์ ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetics zeolites) ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น AlO_3 , SiO_2 , Na_2O , และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล (Gelation) เป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบ และโครงสร้างตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่น วิธีการเรียกชื่อที่คล้ายระบบของ IUPAC โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

- analcime ($\text{Na}_{16}(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) เรียกว่า โซเดียม-16-อะลูมิเนียม-32-ซิลิเกต-16-น้ำ
- Jadeite ($\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}$) เรียกว่า โซเดียม-4-อะลูมิเนียม-8-ซิลิเกต
- Zeolite A ($\text{Na}_{12}(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$) เรียกว่า โซเดียม-12-อะลูมิเนียม-12-ซิลิเกต-27-น้ำ

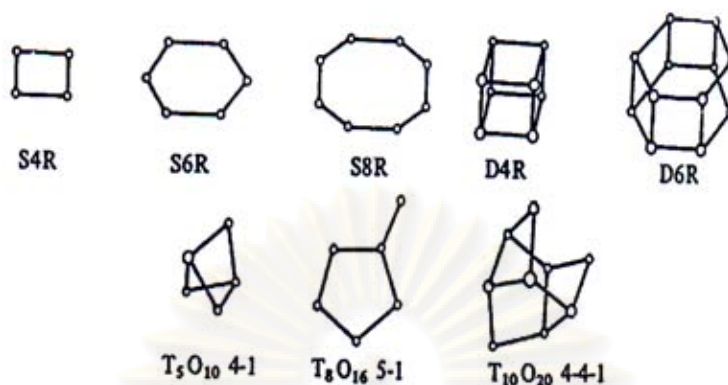
การเรียกชื่อดังกล่าวต้องมีความรู้เกี่ยวกับหน่วยเซลล์สำหรับวิธีอื่นๆ เช่นการใช้ตัวอักษรหรือ กลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นที่นิยมมากกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่า และยังมีควมบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมือนกันทุกครั้ง โดยเฉพาะสารเจือปนที่อยู่ในซีโอไลต์ธรรมชาติเช่นปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายในปฏิกิริยา Heterogeneous catalyst

2.1.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์

1) หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Units) ซึ่งเป็นหน่วยเล็กๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน คือเป็นรูปทรงเตตระฮีดรอลของ AlO_4 และ SiO_4

2) หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units) เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิ ต่อกันเป็นวงรูปเหลี่ยมต่างๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น S_4R , S_6R , หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น D_4R , D_6R ดังรูปที่ 2.3

Breck (1974) แบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units: SBU) ได้ 8 ชนิด ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ
ที่มา : Breck, 1974

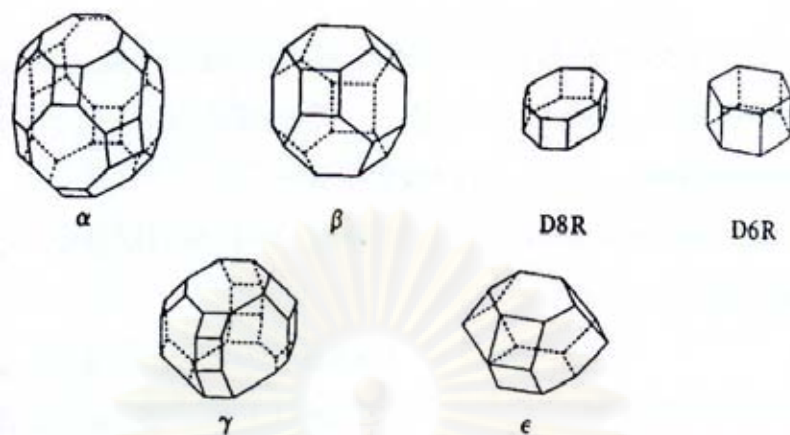
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ ตามโครงสร้างทุติยภูมิ

ชนิด	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ
1	วงเดี่ยว 4 มุม (single 4-ring, S ₄ R)
2	วงเดี่ยว 6 มุม (single 6-ring, S ₆ R)
3	วงเดี่ยว 8 มุม (single 8-ring, S ₈ R)
4	วงคู่ 4 มุม (Double 4-ring, D ₄ R)
5	วงคู่ 6 มุม (Double 6-ring, D ₆ R)
6	วงเชิงซ้อน 4-1 (complex 4-1, T ₅ O ₁₀ 4-1)
7	วงเชิงซ้อน 5-1 (complex 5-1, T ₅ O ₁₀ 5-1)
8	วงเชิงซ้อน 4-1-1 (complex 4-1-1, T ₁₀ O ₂₀ 4-1-1)

ที่มา : Breck, 1974

3) หน่วยโครงสร้างหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงขนาดใหญ่ที่สมมาตรได้จากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น

- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้า หรือ β (truncated octahedral type)
- รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ α (truncate cubooctahedran)
- รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ γ (18-hedron)
- รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ ϵ (11-hedron) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่
ที่มา : Breck, 1974

นอกจากนี้อาจแบ่งซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง 9 ชนิด ข้างต้นดังนี้

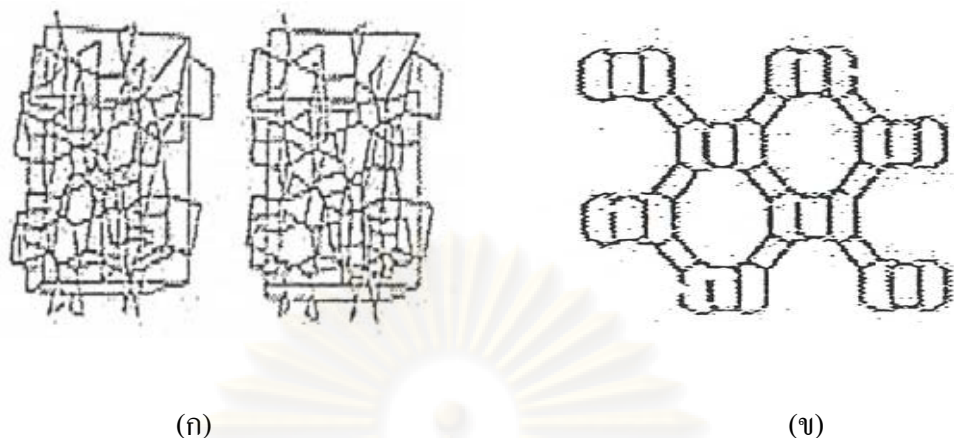
1) Analcite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring โดยจะมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumonite ดังรูปที่ 2.5

2) Natrolite Group มีลักษณะ โครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบคือ Natrolite, Edingtonite และ Thosonite ดังรูปที่ 2.6 (ก)

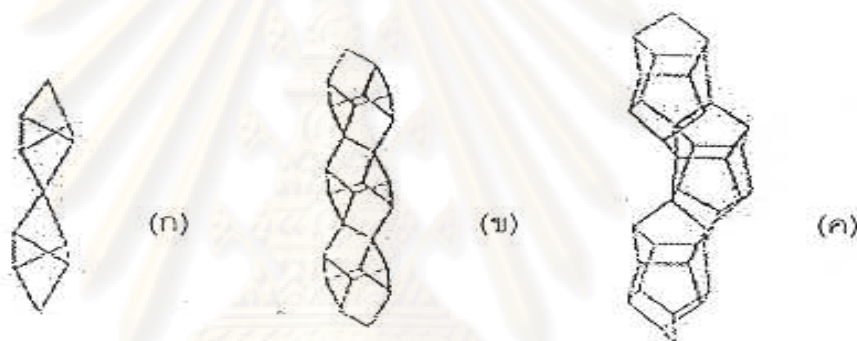
3) Chabazite Group โครงสร้างประกอบไปด้วย 6-ring ต่อขนานกันซึ่งมีการต่อเชื่อมกันมากมายหลายรูปแบบ เช่น แบบ Offretite และ Reionite ดังรูปที่ 2.7

4) Phillipsite Group โครงสร้างประกอบด้วย 4-ring ที่ต่อขนานกันแบบ U (up) และ D (down) ดังรูปที่ 2.8

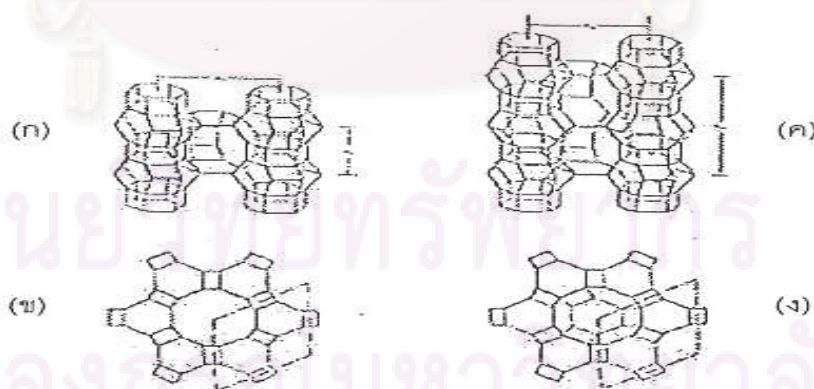
5) Heulandite Group โครงสร้างเกิดจาก 5- ring 4วงต่อเชื่อมกับ 4-ring 2 วง ซึ่งจะเป็น โครงสร้างกลางของกลุ่ม ซึ่งเมื่อเชื่อมโยงต่อกันจะทำให้เป็นแบบ Brewsterite ดังรูปที่ 2.6 (ข) การเชื่อมต่อของบล็อกโดยผ่าน โครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ heulandite และ stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมี โครงสร้างที่เป็น 5- ring ในบางส่วน ดังรูปที่ 2.9 (ก)



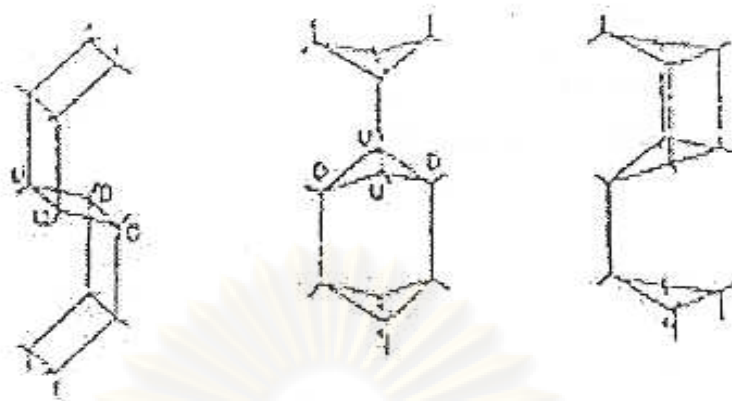
รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ (ก) analcite (ข) laumontite
ที่มา : Dyer,1988



รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ (ก) natrolite (ข) Brewsterite (ค) ZSM-5
ที่มา : Dyer,1988

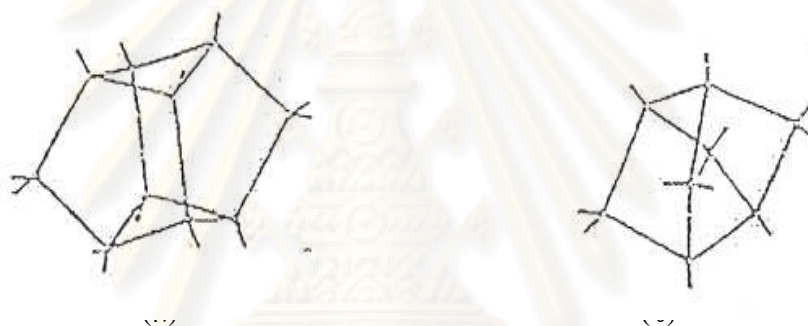


รูปที่ 2.7 ลักษณะ โครงสร้างของ offretite และ Erionite
(ก) offretite (ข) c-projection of offretite (ค) erionite (ง) c-projection of erion
ที่มา : Dyer,1988



รูปที่ 2.8 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UDD, UDUD และ UDUU

ที่มา : Dyer, 1988



รูปที่ 2.9 หน่วยทุติยภูมิ (ก) Heulandite Group (ข) Mordenite Group

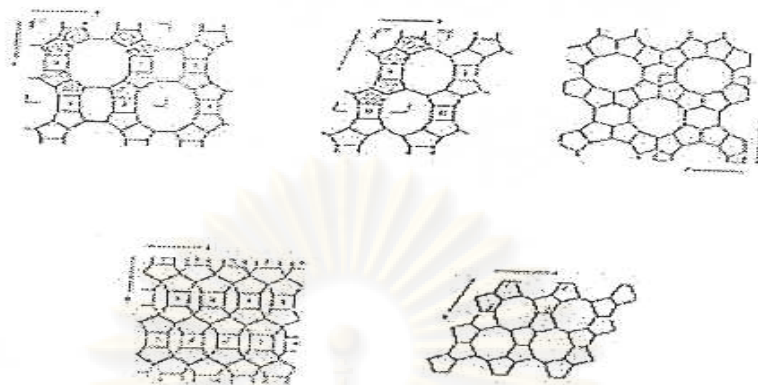
ที่มา : Dyer, 1988

6) Mordenite Group โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring 4 วง ต่อเชื่อมกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม กลุ่มนี้จะมีทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ mordenite, epstilbite, ferrierite, bikitaite, dachiardite (รูปที่ 2.10), ZEM-5 (รูปที่ 2.11) และ ZEM-11

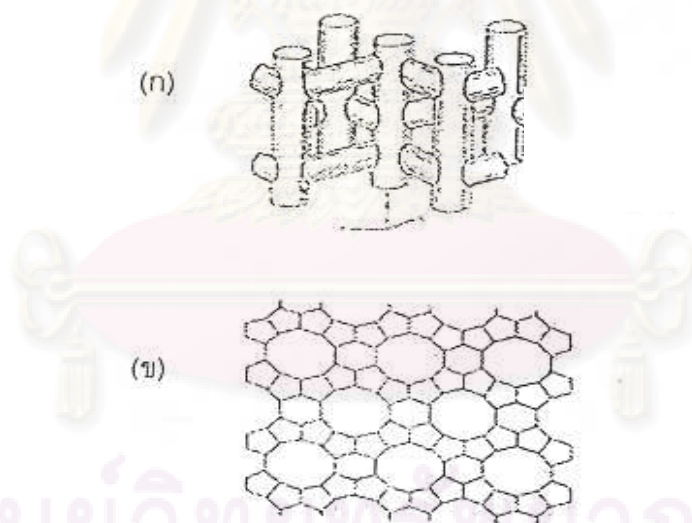
7) Faujasite Group ซีโอไลต์กลุ่มนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ Sodalite, A, ZK-5 ดังรูปที่ 2.12

8) Melanophlogite Group ในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ZEM-39 และ melanophlogite ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น Melanophlogite และ ZEM-39 จะมีหลายรูปแบบเช่น 12-hedron, 14-hedron, 15-hedron และ 16-hedron ดังรูปที่ 2.13, 2.14 และ 2.15

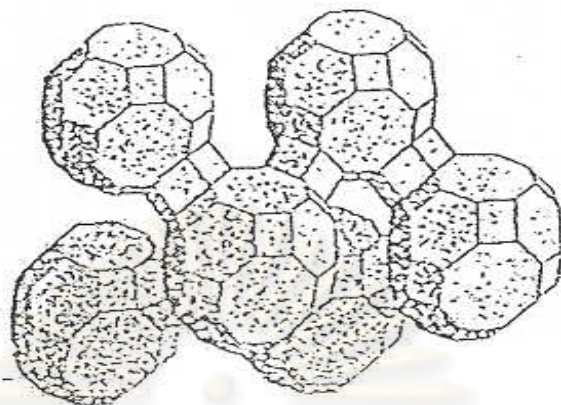
9) Lovdarite Group เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring และ 8-ring ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ modenite, dachiardite, ferrierite, epstilbite, bikitaite



รูปที่ 2.11 (ก) ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-5 (ข) ภาพร่างพื้นที่ผิวของ ZEM-5
ที่มา : Dyer, 1988

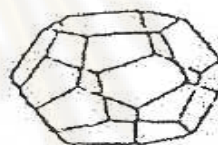


รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของ ZK-5

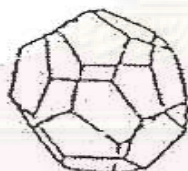
ที่มา : Dyer,1988



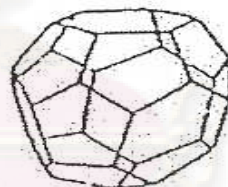
(ก)



(ค)



(ข)

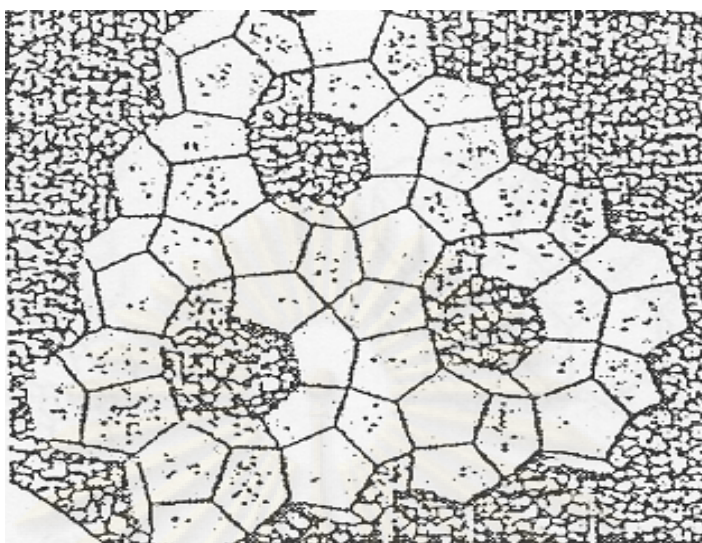


(ง)

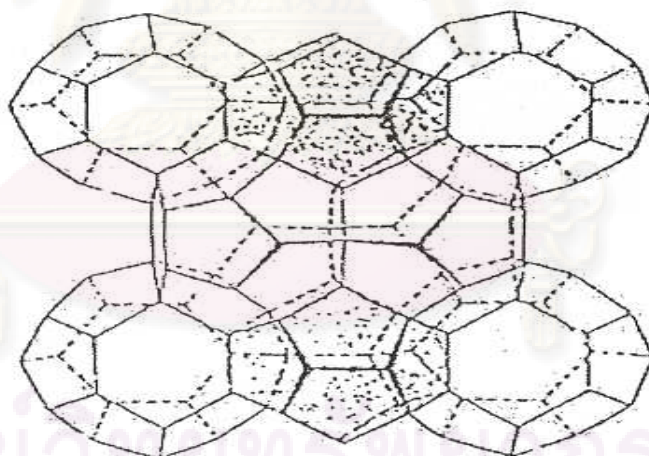
รูปที่ 2.13 หน่วยพอลิฮีดรอนต่าง ๆ ในโครงสร้างของ Melanophlogite และ ZEM-39

(ก) 12-hedron (ข) 14-hedron (ค) 15-hedron (ง) 16-hedron

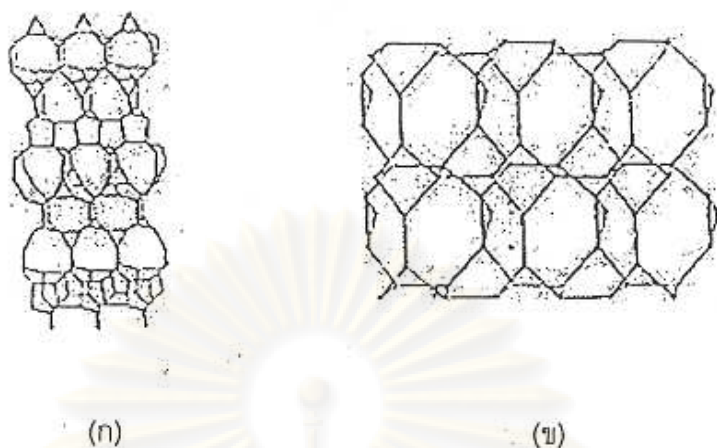
ที่มา : Dyer,1988



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39
ที่มา : Dyer,1988



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ Melanophlogite
ที่มา : Dyer,1988



รูปที่ 2.16 ลักษณะ โครงสร้างของ Lovdarite
ที่มา : Dyer,1988

2.1.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปจะใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Treatment) และวิธีสังเคราะห์ซิลิเกต (silicate) ในช่วงเวลากว่า 100 ปีที่ผ่านมา มีการค้นพบวิธีการสังเคราะห์ขึ้นได้หลายวิธี ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้นเราจะทำให้แหล่งของอลูมินา ซิลิกา และแอลคาไล รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน และจะก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิที่เกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 °C หรือสูงกว่านั้นที่ความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น ในบางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้ท้ายสุดจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์หลายอย่างซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของไอออนบวกของทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่โดยปกติการก่อตัวขึ้นของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักนั้นอยู่ที่ว่าไอออนบวกที่มีอยู่นั้นจะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ (templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบ หรือแม่พิมพ์เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะ ทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะ โครงสร้างเหมือน โครงสร้างของแม่แบบนั้นๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่

ต้องการเท่านั้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เรานำมาเป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ 4 ชนิด

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์

ZSM-5 type	Ω type	femirite type	ALPO 4-5 type
Na	TMA	Na + K	TEAOH
TPA	Pyrrolidine	Sr	TPAOH
TDA	DABCO	Li+Sr (Ba) +seed	Choline hydroxide
Propylamine		Choline	Et3N
EDA		Pyridine	Pr3N
Ethanolamine		Ethylenediamine	(CH ₂ CH ₂ OH) ₃ N
Methylquinuclidine		1,3-Diaminopropane	Cyhexylamine
NH ₃ ⁺ alcohol		1,4-Diaminobutane	N,N'-Dimethybenzylamine
Alcohol		2,4-Pentanedione	Diethylethanolamine
Glycerol		N-methylpyridinum	Amino Diethylethanolamine

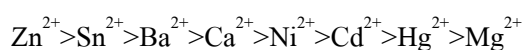
ที่มา : Breck, 1974

2.1.5 ประโยชน์ของซีโอไลต์

จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมายซึ่งพอจะรวบรวมได้ดังนี้คือ

- 1) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิลเลชัน (Alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
- 2) ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorption agent) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
- 3) สารลดความกระด้าง (Water softener) ซีโอไลต์ใช้เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้ เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออน
- 4) ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) จากสมบัติการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สามารถนำไปใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมไอออนของไดวาเลนต์ (divalent) ได้

สำหรับแคตไอออนที่เป็นไดวาเลนต์ (Divalent) มีดังนี้



การแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของแคตไอออน
- อุณหภูมิที่ใช้
- ความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย
- ชนิดของแอนไอออนที่รวมตัวกับแคตไอออนในสารละลาย
- ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน Aqueous Solution)

5) ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (Capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหามลภาวะได้ คือ ฟอสเฟตจะทำให้พืชน้ำ หรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดเมื่อมีการตาย และเมื่อทับถมกันมากเข้าจะทำให้ให้น้ำเน่าเสีย นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

ตัวอย่างการนำสารซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ

(1) การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียของชุมชน

ในการศึกษาช่วงเริ่มต้นโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อกำจัดแอมโมเนียม ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียพบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนของแอมโมเนียมได้ต่ำ ทำให้กำจัดแอมโมเนียมได้น้อย และเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำเค็มตามมาด้วย

จะเห็นว่ามีการใช้ซีโอไลต์หลายชนิดที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ และให้ผลดีกว่าแบบดั้งเดิม ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite และ Union Carbide's 400 เป็นซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดหลังจากการทดสอบโดยใช้ในโรงงานต้นแบบพบว่าแอมโมเนียมนั้นถูกกำจัดออกไปได้มากถึงร้อยละ 95

(2) การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอก

หน้าที่หลักของฟอสเฟตที่ผสมอยู่ในผงซักฟอก คือ ลดแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่มีอยู่ในน้ำกระด้างโดยใช้ซีโอไลต์ชนิดผงที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ไปทำการกำจัดแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) จากสารละลาย แล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม โดยที่ผงซักฟอกเหล่านั้นจะรับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมซึ่งลดปริมาณของฟอสเฟตที่มีอยู่ในห้อยู่ในระดับต่ำ หรือไม่มีอยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ในหลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และในสถานที่อื่นๆ

นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบนี้มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ ซีโอไลต์ในแต่ละปีพบว่ามีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้กันอย่างมากมายแล้วทั่วโลก

(3) การเปลี่ยนเมธทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซิน โดยใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากได้มีการตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคต จึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่มีชีพิโตรเลียมและมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ในอนาคต

เมธทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นกว่าถ่านหินและการสังเคราะห์แก๊สโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งโดยตรง หรือจะนำไปใช้เป็นแบบผสมกับน้ำมันเบนซินก่อนที่จะใช้กับเครื่องยนต์

กระบวนการแบบใหม่ที่ใช้ในการเปลี่ยนเมธทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซิน คือ การใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท โมบิลออยส์ซึ่งได้ตั้งชื่อกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ MTG (Method To Gasoline)

บริษัท โมบิล ออยส์ ได้สร้างโรงงานที่ใช้กระบวนการ MTG และได้ใช้ซีโอไลต์ชนิด ZMS-5 เป็นแห่งแรกที่ โมทูเนีย ประเทศนิวซีแลนด์ และเริ่มต้นทำการผลิตในปี พ.ศ. 2528 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่นิ่ง (fixed bed) และที่ประเทศเยอรมันก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้า และก็สามารถประสบความสำเร็จโดยได้มีการสร้างโรงงานต้นแบบไว้ที่เมืองเวสเซลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึง ร้อยละ 90 และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไคซ์เบดได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบอื่นๆ เช่น แก๊สธรรมชาติ มาใช้แทนเมธทานอลได้

(4) การแยก กำจัด และนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

ซีโอไลต์หลายตัวมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ทำให้สามารถนำโลหะที่มีค่าเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ หรือเอาไว้ใช้กำจัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียเพราะว่าเกิดความกุ่มทวนในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilite และ Mordenite ถูกศึกษาเพื่อใช้กำจัดโลหะหนัก (โดยเฉพาะ Cd, Cu, Pb และ Zn) ที่มีอยู่ในน้ำเสียซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะได้จะทำการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะเงิน เพื่อดึงเอาโลหะเงินออกจากน้ำเสีย

2.2 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash)

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการนำถ่านหินมาบดละเอียด และส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอยถ่านหินเป็นเถ้าลอยที่มีอนุภาคขนาดเล็ก จะลอยตัวปะปนมาพร้อมกับไอร้อนไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า คือบริเวณปล่องควันและจะถูกดักจับไม่ให้ลอยขึ้นไปในบรรยากาศ โดยเครื่องดักตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) ต่อจากนั้นก็จะถูกรวบรวมไว้ใน Ash Hopper อนุภาคที่มีขนาดเล็กเหล่านี้เรียกว่า เถ้าลอย (Fly ash, Pulverized Fuel Ash, Dry Ash) (อนิรุทธ์ ธงไชย, 2528)

2.2.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจะประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งจากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3-30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วน จะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ระหว่างการเผาไหม้เช่น ดินเหนียวและดินดาน จะสูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนเตตจากการสลายตัวซึ่งจะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับรูปใหม่เกิดเป็นคาร์บอนเตต (CO_2) ในถ่านหินจะมีสารแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ส่วนในเถ้าลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เถ้าลอยเหล่านี้ประกอบไปด้วยซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบแอลคาไล นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอเนตและซัลเฟต

ระดับปริมาณเถ้าลอยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ต่างๆ กันในโลกหรืออาจต่างกันเนื่องจากระดับชั้นของพื้นผิวในพื้นที่เดียวกัน หรือมีความต่างกันในเมืองที่ต่างกัน

2.2.2 การจับรูปของเถ้าลอยขณะทำการเผาไหม้

ขณะทำการเผาไหม้เถ้าลอยจะเกิดการจับรูปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) เถ้าหนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของเถ้าหลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาเผา ซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็น

เหล็กที่มีหลายมุมเนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค ถ้าหนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อให้เกิด สแลก (Slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุม

2) ไอ เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของไอนี้จะถูก ปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของถ่านลอยซึ่งจะถูกดักจับที่ เครื่องดักจับถ่านลอย ปริมาณของไอที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ความเข้มข้น และสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3) ถ่านลอย เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งลอยอยู่ในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้และลอย ออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับแก๊สอื่นๆ ถ่านลอยส่วนใหญ่จะถูกเก็บ โดยเครื่องดักทางกล (Mechanical collectors) หรือ เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของถ่านลอยจะผ่าน เครื่องดักจับและถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศไป ถ่านลอยจะมีปริมาณร้อยละ 10-85 ของปริมาณ ถ่านทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา พบว่าถ่านลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วน ใหญ่โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของถ่านลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบ ของซิลิกอนสูงกว่าถ่านลอยที่มีผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ นั้น ได้แก่ แมกเนไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มูลไลต์ และควอต

สิ่งที่น่าสนใจของถ่านลอย คือความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณกว่าร้อยละ 20 ของถ่านลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลมมี ส่วนประกอบของซิลิกेट ในโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระหว่าง 20-200 ไมครอน ถ่านเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการขจัด สำหรับ ส่วนประกอบทางเคมีของเซโนสเฟียร์จะคล้ายกับถ่านลอยดังที่จะกล่าวต่อไป

2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บถ่านลอยถ่านหิน

1) เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatics Precipitators) วิธีควบคุมนี้ใช้ใน โรงผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วระหว่างแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ผ่านอนุภาคของถ่านลอยจะได้รับประจุไฟฟ้าลบ และจะถูกดึงดูดให้เกาะบนขั้วบวก ในทางปฏิบัติ เครื่องนี้จะต้องทำความสะอาดอย่างต่อเนื่องโดยการเคาะเพื่อไล่อนุภาคที่ดักเก็บได้

สำหรับการเก็บถ่านลอยนั้น เครื่องมือที่ใช้ดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่า ร้อยละ 99 เนื่องจากคุณภาพของถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าจะมีคุณภาพแย่งเพราะมีปริมาณถ่านมาก ขึ้น และถ่านนี้ส่วนประกอบจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะฉะนั้นความสามารถในการทำงานของ

เครื่องตกตะกอนจะต้องเหมาะสมกับเถ้าลอยที่ถูกดักเก็บ เช่น มีความต้านทานไฟฟ้า แต่สมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อด่านหินที่ใช่ หรือการทำงานของหม้อไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

2) ถุงกรอง (Bag Filter House) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคเถ้าลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงใน โครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องตกตะกอน

3) ไซโคลน (Cyclone collector) เครื่องไซโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของแก๊สจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะก่อให้เกิดการแยกของอนุภาคเถ้าลอยที่หนักออกจากแก๊ส เครื่องไซโคลนควรมีประสิทธิภาพร้อยละ 70-85 เมื่อใช้กับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง เครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์ (Cyclone-Fired Boiler) จะทำให้เกิดเถ้าที่มีขนาดเล็กจำนวนมากกว่าหน่วยที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องไซโคลนจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าอุปกรณ์ดักเก็บจากที่กล่าวมาข้างต้น

2.2.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ

เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ เถ้าลอยบิทูมินัส และเถ้าลอยลิกไนต์ ความแตกต่างของเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะหยาบกว่า คือ มีช่วงกว้างกว่า ค่าดัชนีหักเหของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า และพวกเถ้าลอยลิกไนต์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มากกว่าเฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ในทางตรงกันข้ามสำหรับเถ้าลอยบิทูมินัสนั้นจะมีปริมาณเฟอริกออกไซด์มากกว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทบิทูมินัสจะเป็นถ่านหินยุคเก่าซึ่งอยู่ในช่วงอายุไตรแอสสิก ส่วนถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทลิกไนต์จะเป็นถ่านหินยุคใหม่จะอยู่ในช่วงอายุจูราสสิก

2.2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

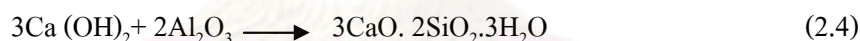
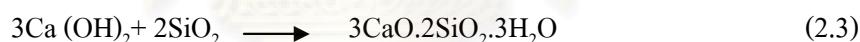
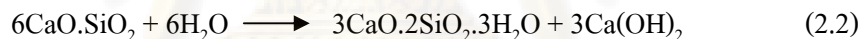
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านธรณีวิทยา และด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลักแต่อาจขึ้นอยู่กับภาวะการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเถ้าลอยจะเป็นไปตามชนิดของหินและดิน คือ มีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) คิดเป็นร้อยละ 95-99 ของส่วนประกอบทั้งหมด และมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) คิดเป็นร้อยละ 0.5-3.5 ของส่วนประกอบทั้งหมด นอกจากนี้เถ้าลอยจะมีส่วนประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีปริมาณน้อยๆ (trace element) ประมาณ 20-50 ธาตุ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในประเทศต่างๆ ตามที่รวบรวมและสรุปไว้พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่าง ถ่านหินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง โดยเฉพาะแล้วเถ้าลอยจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังต่อไปนี้

- Silica (SiO₂) ร้อยละ 41-58 โดยน้ำหนัก
- Alumina (Al₂O₃) ร้อยละ 21-27 โดยน้ำหนัก
- Iron Oxide (Fe₂O₃) ร้อยละ 4-17 โดยน้ำหนัก
- Lime (CaO) ร้อยละ 4-6 โดยน้ำหนัก

ที่เหลือเป็นออกไซด์ของแร่ชนิดต่างๆ ที่ผสมอยู่ในถ่านหิน เช่น MgO, SO₃, Na₂O และ K₂O เป็นต้น จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้นจะคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ทั้งนี้เพราะว่าทั้งเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ ซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) เถ้าลอยจึงสามารถรวมตัวกับปูนขาว (Lime) จึงถือได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolan) ชนิดหนึ่ง ปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสารเชื่อมประสาน ดังสมการที่ (2.2)-(2.4) คือ



2.2.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยถ่านหิน

จากรายงานของธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ (2526) กล่าวว่าเถ้าลอยถ่านหินมีลักษณะพิเศษเฉพาะ คือ มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ มีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีความชื้นเหนียว (Plasticity) ต่ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะแล้วเถ้าลอยในประเทศญี่ปุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.14 ในประเทศอเมริกามีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 และในประเทศอังกฤษประมาณ 2.10 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยนั้นต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินโดยทั่วไปที่ปกติอยู่ในช่วง 2.60 - 2.80 จากการสังเกตโดยใช้กล้องขยายพบว่าเม็ดเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีหลักฐานที่ทำให้เชื่อว่าเม็ดกลมเหล่านี้ดำนในจะกลวง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดดินโดยทั่วไป

เนื่องด้วยถ้ำลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกกด ขนาดของเม็ดถ้ำลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่านหิน และอุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้ ในสภาพปกติถ้ำลอยจะเป็นฝุ่นฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะแฉะเป็นเลนเมื่ออิมตัวด้วยไอน้ำ แต่ถ้าผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม และได้รับการบดอัดที่เพียงพอแล้วถ้ำลอยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (Unconfined compressive strength) สูง

การจัดรูปของถ้ำถ่านหินระหว่างส่วนของถ้ำลอยกับถ้ำหนักจะขึ้นอยู่กับชนิดของเตาเผาชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิของการหลอมถ้ำ และชนิดของหม้อต้ม เตาเผาเป็นปัจจัยแรกที่สำคัญในการเกิดการแยกส่วนของถ้ำลอย และถ้ำหนัก เช่น เตาเผาชนิดสโตเกอร์ (Stoker) จะมีการปล่อย ถ้ำลอยออกมาน้อยที่สุด

สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป

Specific Gravity	1.90 - 2.69
Specific Surface Area (cm ² /g)	1220 – 8100
Optimum Water Content (% , standard compaction test)	18 – 45
Maximum Dry Unit Weight (kN/m ³)	9 – 10

ในหน่วยไซโคลนอุณหภูมิของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ้ำประมาณร้อยละ 80 - 85 ของถ้ำที่จะหลอม และรวมตัวกันเกิดเป็นสแลก ส่วนหนึ่งของถ้ำลอยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในหน่วยพุลเวไรซ์ (Pulverized coal) มีถ้ำลอยเกิดขึ้นร้อยละ 65 - 80 และเกิดเป็นถ้ำหนักร้อยละ 20 - 35 สำหรับอุณหภูมิการหลอมของถ้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ถ้ำที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปของถ้ำหนักนั้นคือ หม้อต้มไอน้ำที่กั้นเปียก จะก่อให้เกิดถ้ำหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่กั้นแห้ง

2.2.7 ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน

1) การใช้ถ้ำลอยเป็นวัสดุถม (Fill Material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับถ้ำลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสมและทำการบดอัดอย่างดีแล้ว ถ้ำลอยเป็นวัสดุถมที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูง และเกิดการยุบตัวน้อยค่าสัดส่วนของน้ำหนักสูงสุดที่ถ้ำลอยสามารถรับได้ในการบดอัดถ้ำลอยในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีบดอัดมาตรฐาน (standard compaction) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 18 - 45 และค่าความหนาแน่นสูงสุด (maximum dry unit weight) จะอยู่ในช่วง 9 - 16 (kN/m³) แต่ในสนามเป็นการยากที่จะบดอัดถ้ำลอยให้ได้ความ

หนาแน่นสูงสุด โดยปกติมักจะกำหนดให้บดอัดได้ที่ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของความหนาแน่นสูงสุด

กำลังอัด (unconfined compressive strength) ของเถ้าลอยนอกจากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นจากการบดอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีด้วย เถ้าลอยที่ได้จากการบดอัดแล้วจะมีน้ำหนักเบา และมีกำลังอัดสูงเมื่อเทียบกับดินซึ่งมักจะใช้เป็นวัสดุถม โดยทั่วไป ดังนั้นความนิยมในการนำเอาเถ้าลอยไปใช้เป็นวัสดุถมในพื้นที่ที่เป็นชั้นดินอ่อน เนื่องจากข้อได้เปรียบสองประการคือ น้ำหนักที่เบาจะช่วยลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อน และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นเถ้าลอยเองจะน้อยมากเพราะมีกำลังอัดสูง

2) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุในโครงสร้างของถนน

ส่วนของถนนที่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ คือ ชั้นรองพื้นทาง (sub-base) และชั้นพื้นทาง (base) แม้ว่าเถ้าลอยที่บดอัดแล้วจะมีกำลังค่อนข้างสูงแต่ยังคงมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานโครงสร้างของถนน โดยลำพังแต่ละสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาว บางครั้งอาจใช้เป็นสารสำหรับปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมือนกับปูนซีเมนต์หรือปูนขาวก็ได้

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เหมือนกับขอยแอกกรีเกต (soil aggregate) โดยมีซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious material) กำลังอัดของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสมบัติของเถ้าลอย ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มความหนาแน่นจากการบดอัด และประสิทธิภาพในการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับเถ้าลอย ในการออกแบบส่วนผสมมักใช้กำลังอัด (unconfined compressive strength) เป็นเกณฑ์กำหนด ในประเทศอังกฤษใช้กำลังอัด 2.8 MN/m^2 ที่อายุ 7 วัน เป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการปรับปรุงสมบัติขอยแอกกรีเกตต่างๆ ด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าสำหรับเถ้าลอยต้องใช้ปูนซีเมนต์ผสมประมาณร้อยละ 5-15

- การปรับปรุงสมบัติเถ้าลอยด้วยปูนขาว การผสมปูนขาว (lime) ในเถ้าลอยจะช่วยให้กำลังอัดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการเพิ่มกำลังอัดนั้นต่างจากการผสมปูนซีเมนต์ คือในกรณีของปูนซีเมนต์นั้นจะมีสารเชื่อมประสานจะเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) ระหว่างปูนขาวกับซิลิกาในเถ้าลอยในเกณฑ์กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมักจะใช้ปูนขาวผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์

- การใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงสมบัติของดิน ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้กำลังอัดของขอยแอกกรีเกตเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่พบว่าจะต้องใช้ปูนขาวผสมกับเถ้าลอยในการใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติ ทั้งนี้เพื่อให้มีปฏิกิริยาปอซโซลานิกสร้างสารเชื่อมประสานได้มากขึ้น ขอยแอกกรีเกตที่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ดีโดยใช้เถ้าลอยผสมปูนขาวได้แก่พวกทรายที่มีมวลละเอียดน้อย

- การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีต (Asphaltic Concrete) แอสฟัลติกคอนกรีต คือ ส่วนผสมระหว่างหินย่อย และยางแอสฟัลต์ ซึ่งมักใช้ปูผิวถนน ในการออกแบบส่วนผสมจะต้องใช้หินย่อยที่มีขนาดละเอียดดี และมีมวลละเอียดที่เรียกว่า “ฟิลเลอร์ (filler)” ผสมอยู่ด้วยเพื่อแทรกภายในช่องว่างระหว่างเม็ดหินเพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณยางแอสฟัลต์ที่จะต้องใส่ และทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นสูงเมื่อได้รับการบดอัด ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ ฝุ่นที่เกิดจากการโม่หินปูน (lime stone dust) ผลงานวิจัยในหลายประเทศได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็นฟิลเลอร์แทนหินปูนได้

3) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เป็นสารเพิ่ม (Admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้งานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้ คือ

- ข้อดี
- สภาพการใช้งาน (Workability) ดี
 - มีความต้านทานต่อการแยกกลุ่ม (Segregation) ดี
 - มีค่าความซึมได้ของน้ำ (Permeability) ดี
 - มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต (Sulphate resistance) ดี
 - เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ช้าทำให้ปริมาณความร้อนที่ระบาย

ออกในขณะที่คอนกรีตแข็งตัวมีค่าน้อย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในกรณีการเทคอนกรีต

- ข้อเสีย
- อัตราการเพิ่มของกำลังอัดช้า
 - สมบัติของเถ้าลอยแปรปรวนไม่แน่นอน ทำให้ควบคุมคุณภาพได้ยาก

2.3 เถ้าลอยขานอ้อย (Bagasse fly ash)

ขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จาก โรงงานน้ำตาล ในปีหนึ่งๆ มีขานอ้อยที่ผลิตได้ในประเทศไทยไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน ซึ่งร้อยละ 30 ของขานอ้อยเหล่านี้เป็นพลังงานความร้อนใน โรงงานน้ำตาล ขานอ้อยที่เหลืออีกจำนวนมากเป็นแหล่งใหญ่ของไฟเบอร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เพื่อทดแทนไม้ใบกว้าง ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุได้หลายประเภท เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถนำขานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าใช้ใน โรงงานน้ำตาลอีกด้วย (เกษตรฯ พูลค่า, 2537) ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่นิยมกันมาก โดยขานอ้อยได้กลายเป็นวัสดุมีค่าไม่ได้ทิ้งเป็นของเสียอีกต่อไป

2.3.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล

มีขั้นตอนดังนี้

1) การเตรียมชิ้นอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่านไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อยออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกย่อยอ้อย (Shredders) ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีกอ้อยออกเป็นฝอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

2) การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

อ้อยที่ละเอียดแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อย คือ ชุดลูกหีบที่มีน้ำหนักมากที่ติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4 - 6 ชุด และเพื่อให้มีการสกัดน้ำอ้อยออกมามากที่สุด จึงมีการพรมน้ำอ้อยและน้ำลงไปในกากอ้อยที่ออกมาจากลูกหีบแต่ละชุด ซึ่งการพรมน้ำนี้จะช่วยให้สามารถสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อย ได้มากกว่าร้อยละ 95

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดชุดสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้นประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไปแปรรูปเป็น เชื้อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆ ได้

3) การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดจะมีลักษณะสีเขียวเข้มถึงดำ ขุ่นข้น และมีสภาพเป็นกรดอย่างอ่อน ดังนั้นจึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำให้น้ำอ้อยให้เป็นกลางรวมทั้งกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก โดยผ่านกระบวนการทำให้ใส ซึ่งจะใช้ความร้อนและปูนขาวปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลาง และปูนขาวจะจับกับสารละลายต่างๆ ปล่อยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลึกน้ำตาลต่อไป ส่วนตะกอนนั้นจะนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ (Rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อยซึ่งยังมีความหวาน กลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง ส่วนกากตะกอน (Filter cake) ที่แยกออกจะส่งไปใช้ทำปุ๋ยต่อไป

4) การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งจะต้องทำการต้มระเหยน้ำออกไปประมาณ 2 ใน 3 ส่วน โดยหม้อต้ม (Evaporator) ที่มีการวางต่อกัน โดยปกติจะวางเรียงกัน 4 ใบ น้ำเชื่อม (Syrup) ในหม้อสุดท้ายมีความเข้มข้นประมาณ 60 บริกซ์ น้ำเชื่อมหลังจากผ่านตะแกรงกรองแล้ว จะถูกส่งไปยังหม้อเคี่ยว (Vacuum pan) เพื่อต้มเคี่ยวจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเกินกว่าสภาวะอิ่มตัว น้ำตาลซูโครสจะแยกเป็นผลึกออกมาจากน้ำเชื่อม ในสภาพที่มีผลึกน้ำตาลซูโครสปนอยู่ในน้ำเชื่อมอิ่มตัว เรียกสารละลายผสมนี้ว่า แมสคิวท (Massecurite) เมื่อทำให้แมสคิวทนี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็ง พร้อมทั้งจะนำไปแยกผลึกต่อไป

5) การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสคิวทิตที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยกที่เรียกว่า Centrifugal ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆ ขนาด 400 - 600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1,000 - 1,800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (Molasses) ออกไป ส่วนเมล็ดน้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดังเพื่อการจำหน่ายต่อไป

2.3.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอน และเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1) กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวสีน้ำตาลที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของโรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และสุรา
- ใช้ผลิตเป็นผงชูรส
- ใช้เป็นวัสดุปรับคุณภาพดิน เนื่องจากมีส่วนประกอบของโพแทสเซียม อินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารรองอื่นๆ อีกมาก
- ใช้ผสมกับขานอ้อยสำหรับทำถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ในครัวเรือน

2) กากอ้อยหรือขานอ้อย (Bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี้ยวน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- ใช้ทำเยื่อกระดาษ
- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ในประเทศไทยจะใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้น โดยปริมาณขานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณขานอ้อย

ทั้งหมดที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การใช้ชานอ้อยมาทำเชื้อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือชานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก

3) กากตะกอนอ้อย (Filter cake)

เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลหลังจากที่กรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและแคลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

4) เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse fly ash)

เถ้าลอยนี้เกิดจากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจายจึงมีการฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับเถ้าลอยให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้งซึ่งยังไม่มีนำไปใช้ประโยชน์มากนัก

2.3.3 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยชานอ้อยที่เกิดขึ้น

ชานอ้อยที่เกิดจากการบีบสกัดเอาน้ำอ้อยจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาลประมาณร้อยละ 30 โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเผาจะเกิดเถ้าลอยขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 เถ้าลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องสัมผัสแบบเปียก (Wet collectors) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ก้อนเถ้าที่เปียกนี้จะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งขึ้นรถบรรทุกเพื่อนำไปทิ้งในบ่อเก็บที่เตรียมไว้

2.4 สมดุลของการดูดติด (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดของสารละลายบนผิวของสารดูดติดในขณะที่เกิดการดูดติดไปเรื่อยๆ นี้สารที่ถูกดูดติดก็มีแนวโน้มที่จะถูกคายกลับเข้าสู่สารละลายเหมือนเดิมความเข้มข้นของสารละลายจะเปลี่ยนแปลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่จำนวนสารละลายที่ถูกดูดติด และถูกคายกลับออกมาจากการดูดติดก็จะมีปริมาณเท่าๆ กันผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดติดและอัตราการคายสารออกก็จะถึงจุดสถานะสมดุลซึ่งจะเรียกว่าสมดุลของการดูดติด โดยที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสารละลายบนผิวของสารดูดติด หรือความเข้มข้นของตัวสารละลายเองการเพิ่มปริมาณสารที่ถูกดูดติดจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย การแสดงจำนวนของสารละลายที่ถูกดูดติดต่อจำนวนของสารดูดติดที่อุณหภูมิคงที่จะเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติด (Adsorption Equilibrium) (ปิยะ ภูเก็ต, 2545)

ระบบการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับไว้หลายประการ แต่ที่นิยมนำไปใช้ได้แก่ Freundlich Adsorption Isotherm และ Langmuir Adsorption Isotherm

2.4.1 Langmuir Adsorption Isotherm บางครั้งเรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model มีสมมุติฐานที่สำคัญ ดังนี้

- มีพื้นที่สำหรับการดูดซับจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับจะอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน
- แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับผิวจะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่าการดูดซับเพียงชั้นเดียว
- ตรงบริเวณดูดซับผิวจะเกิดอัตราการดูดซับ และการคายสารออก ซึ่งอัตราการดูดซับมีมากกว่าอัตราการคายสารออกจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล (อัตราการดูดซับเท่ากับการคายสารออก) พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุก ๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้อย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้

สำหรับสมการ Langmuir เขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (2.5)

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.5)$$

โดยที่

X = X/m , ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลาง มก./ก.

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว ; มก./ก.

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล ; มก./ล.

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ ; ล./มก.

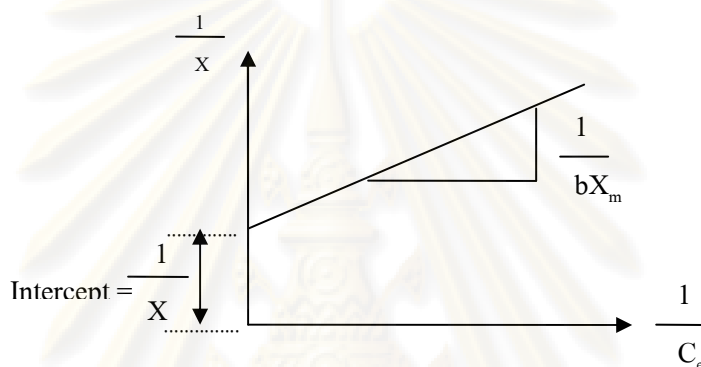
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ α จากสมการเขียนได้เป็น

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{b X_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_m C_e} \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ มาเขียนกราฟจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/X$ และ $1/C_e$ ได้ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir

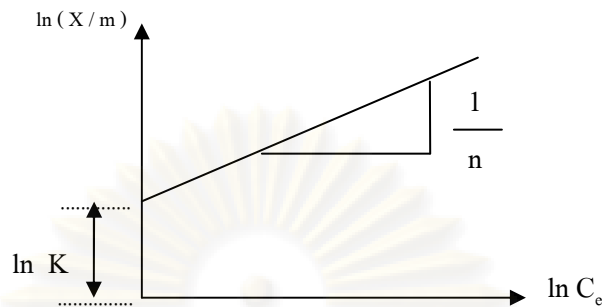
2.4.2 Freundlich Adsorption Isotherm จัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมาก สมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว สมการของ Freundlich เขียนได้ ดังสมการ (2.8)

$$\frac{X}{m} = KC_e^{1/n} \quad (2.8)$$

โดยที่

- X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก ; มก./ก.
- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล ; มก./ล.
- K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ ; ล./ก.
- $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการ (2.8) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (X / m)$ และ $\ln C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich

จากรูปที่ 2.18 มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$ และที่จุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $1/n$ และที่จุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\ln K$ สำหรับการดูดติดของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดติดส่วนใหญ่จะมีค่า $1/n$ ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่าความชันสูงคือมีค่า $1/n$ เข้าใกล้ 1 นี้จะพบว่า ความสามารถในการดูดติดที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีค่ามากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนี้มีค่าต่ำลง และในกรณีที่ความชันมีความชันน้อยๆ ค่า $1/n$ จะน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะพบว่าความสามารถในการดูดติดนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลงจากสมการของ Freundlich นี้ได้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดติดของสารดูดติด หรือค่า (X/m) จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว ดังนั้น ค่าความสามารถในการดูดติดจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้นด้วย

สมการของ Freundlich นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารดูดติดที่ต้องการใช้ในการลดค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลว จากค่า X ในสมการ (2.8) ด้วยค่า $(C_0 - C_e)$ โดยที่ค่า C_0 คือค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในของเหลว สมการที่ได้ ดังสมการ (2.9)

$$\frac{\ln (C_0 - C_e)}{m} = \ln K + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.9)$$

สมการ (2.9) นี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดติดทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

2.5 โครเมียม (Chromium : Cr)

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของโครเมียม

โครเมียมจัดเป็นธาตุทรานซิชัน อยู่ในหมู่ VIB เป็นโลหะสีขาวยเงิน บางครั้งอยู่ในรูปผลึก มีน้ำหนักอะตอม 51.996 เวเลนซ์ 0, 2, 3 และ 6 มีจุดหลอมเหลว 1,890 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,480 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นเท่ากับ 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีลักษณะเป็นมันวาวและแข็งมากสามารถต้านทานการผุกร่อนได้ดี คงความเป็นมันเงาได้นานในอากาศจึงใช้ทำโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม นอกจากนี้โครเมียมยังรวมกับออกซิเจนได้อุณหภูมิสูงและสามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันและเฮโลเจนได้อีกด้วย โครเมียมสามารถเกิดไอออน Cr^{+2} , Cr^{+3} และ CrO_4^{2-} ได้ในสารละลาย ออกซิเดชันสเตต (Oxidation state) ของโครเมียมที่เสถียรที่สุด คือสารประกอบของโครเมียมประจุ +2 และสารประกอบของโครเมียมประจุ +6 มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง สมบัติความเป็นกรดและเบสสังเกตได้จากออกซิเดชันสเตต คือ ความเป็นกรดเพิ่มเมื่อออกซิเดชันสเตตของโครเมียมสูงขึ้น เช่น ในออกไซด์ CrO และไฮดรอกไซด์ Cr(OH)_2 โครเมียมมีออกซิเดชันสเตต +2 มีสมบัติเป็นเบส Cr_2O_3 โครเมียมมีออกซิเดชันสเตต +3 มีสมบัติเป็นแอมฟิเทอริกออกไซด์ และ CrO_3 โครเมียมมีออกซิเดชันสเตต +6 มีสมบัติเป็นแอมซิดิกออกไซด์ (Acidic oxide)

ตารางที่ 2.3 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียม (II) ออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมเคมี	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แคตาลีสต์, 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

ที่มา : อดิศักดิ์, 2543

โครเมียมตัวสำคัญที่พบในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) ของน้ำในธรรมชาติมีเพียงโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) ซึ่งพบมาก ส่วนโครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันค่าอื่นจะพบน้อยมาก นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมปริมาณโครเมียมในน้ำตามธรรมชาติ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างโครเมียม(III) และโครเมียม (VI) เป็นสิ่งสำคัญในการคงอยู่ของโครเมียมในสิ่งแวดล้อม

2.5.3 โครเมียมในสิ่งแวดล้อม

โครเมียมถูกนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตเหล็ก วัสดุอัลลอย อลูมิเนียม ในเตาเผา สี ย้อมและสีต่างๆ สารเคลือบโลหะเพื่อป้องกันสนิม และใช้ในโรงงานฟอกหนัง การแพร่กระจายของโครเมียมเข้าสู่สิ่งแวดล้อม เกิดจากการทิ้งของเสียที่มีการปนเปื้อนของโครเมียมในการผลิตทางอุตสาหกรรม การทิ้งน้ำเสียที่มีโครเมียมปะปนอยู่ โดยโครเมียมที่อยู่ในประจุ +3 และ + 6 เป็นสถานะที่พบมากในธรรมชาติ ซึ่งโครเมียมในรูปประจุ + 3 (Trivalent chromium) หรือ Cr (III) สามารถเปลี่ยนรูปเป็นโครเมียมประจุ + 6 (Hexavalent chromium) หรือ Cr (VI) ซึ่งเป็นสารพิษที่ไม่คงตัวในสภาพธรรมชาติ สามารถเคลื่อนที่ในดินเป็นการเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.5.4 การแพร่กระจายและการเปลี่ยนรูปโครเมียมในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

การเปลี่ยนรูปไอออนของโครเมียมในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ขึ้นกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน

1) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการเปลี่ยนรูปจากโครเมียม (III) ไปอยู่ในรูปโครเมียม (VI) พบว่าสารประกอบที่เป็นตัวออกซิไดซ์โครเมียมในน้ำคือ แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ก็สามารถออกซิไดซ์โครเมียมได้

2) ปฏิกิริยารีดักชัน เป็นการเปลี่ยนรูปของโครเมียม (VI) ไปอยู่ในรูปโครเมียม (III) พบว่าสารประกอบที่เป็นตัวรีดิวซ์โครเมียม คือ ซัลไฟต์, การเนาเปื้อนของสารอินทรีย์ และเหล็ก (II) โดยปฏิกิริยารีดักชันนี้เกิดขึ้นในสภาพเป็นกรด มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2-3

เนื่องจากโครเมียมมีการเปลี่ยนรูปได้ในสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจในกระบวนการเคลื่อนที่ย้ายและการเปลี่ยนรูปของโครเมียม (III) ไปเป็นโครเมียม (VI) ในแหล่งน้ำธรรมชาติ

2.5.5 ประโยชน์ของโครเมียม

โครเมียมใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เช่น ชุบชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสมระหว่างโครเมียม เหล็ก และนิกเกิลได้ เป็นโลหะปราศจากสนิม และผสมกับโลหะอื่นๆ แต่ละตัว เช่น นิกเกิล โคบอลต์ ไทเทเนียม เป็นโลหะผสมธรรมดา นอกจากนี้สารประกอบโครเมียมชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ในทางพาณิชย์มีสองเวเลนซ์ ชนิดที่มีวาเลนซ์ 3 (โครมิกออกไซด์ และโครมิกซัลเฟต) ใช้ในโลหะผสมและอุตสาหกรรมฟอกหนัง และชนิดที่มีวาเลนซ์ 6 นำไปใช้ในการผลิตเม็ดสี ช่วยรักษาเนื้อไม้ ชุบเครื่องประดับ ป้องกันการกัดกร่อน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว ทำแก้วมีสีเป็นเงางาม และใช้ในอุตสาหกรรมพิมพ์ย้อมผ้า ขนสัตว์ และไหม

2.5.6 พิษของโครเมียม

1) พิษต่อพืชน้ำ โครเมียมมีพิษ ต่อพืชน้ำในน้ำดำ เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษของโครเมียมกับ โลหะชนิดอื่นๆ เช่น สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และปรอท แม้วามีปฏิกิริยาที่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชที่ความเข้มข้น 0.5 -5 มิลลิกรัม โครเมียม (+6) ต่อลิตร แต่โปรแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ก็ช่วยในการเจริญเติบโตของพืชน้ำบางชนิดได้ ซึ่งความเป็นพิษต่อพืชของโครเมียมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พีเอช และโลหะหนักตัวอื่นๆ

2) พิษต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำทะเล โครเมียมมีพิษน้อยเนื่องจากการยังยั้งโดยแคทไอออน ส่วนพิษแบบเรื้อรังของโครเมียมทำให้มีอาการมินง ยับยั้งการเจริญเติบโต ทำให้ขนาดของร่างกายเล็กลง และอาจทำให้อัตราการเจริญพันธุ์และการรอดชีวิตของรุ่นหลานลดลง

3) พิษต่อมนุษย์ โครเมียมไม่ก่อเกิดพิษเฉียบพลัน เนื่องจากโครเมียมในธรรมชาติมีความคงตัวสูง อย่างไรก็ตามโครเมียม (+6) มีความเป็นพิษสูงกว่าโครเมียม (+3) เนื่องจากเป็นสารก่อให้เกิดการระคายเคืองและมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยทางเดินอาหาร ผิวหนัง และทางเดินหายใจ แต่ผลกระทบต่อผู้ประกอบอาชีพส่วนใหญ่เป็นที่ระบบผิวหนังและทางเดินหายใจ ในสภาพธรรมชาติโครเมียม (+6) ถูกรีดิวซ์ไปเป็นโครเมียม (+3) ซึ่งช่วยลดความเป็นพิษของโครเมียมที่ระบายทิ้งออกมา โครเมียม (+6) มีสมบัติก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ส่วนโครเมียม (+3) ถึงแม้ไม่มีผลรุนแรงแต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

2.6 วิธีการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย (อดิศักดิ์, 2543 และ อัญชลี , 2535)

2.6.1 การรีดิวซ์โครเมียม (+6) ที่ละลายอยู่ในน้ำ

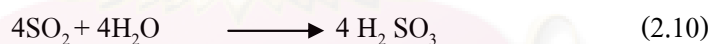
โครเมียมที่ปล่อยมากับน้ำทิ้งอยู่ในรูปโครเมียม (+6) เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดโครเมียม (+6) ด้วยปฏิกิริยารีดักชันให้ค่าพีเอชของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 2-3 ด้วยกรดซัลฟูริก เพื่อให้โครเมียม (+6) เปลี่ยนอยู่ในรูปโครเมียม (+3)

Sittis (1973) ได้กล่าวถึงการรีดิวซ์โครเมียม (+6) ว่าการรีดิวซ์โครเมียม (+6) ไปเป็นโครเมียม (+3) ประสิทธิภาพการรีดิวซ์เกิดไม่ถึง 100% เพราะยังมีโครเมียม (+6) บางส่วนตกค้างอยู่ ซึ่งการตกค้างของโครเมียม (+6) ที่เหลืออยู่นั้นขึ้นอยู่กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ค่าพีเอชของปฏิกิริยา และชนิดของสารรีดิวซ์ด้วย

2.6.1.1 สารเคมีที่ใช้รีดิวซ์โครเมียม (+6)

สารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียม (+6) มีดังนี้

(1) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) นิยมใช้เพราะราคาถูก เหมาะสำหรับระบบบำบัดขนาดใหญ่ แต่มีข้อควรระวังเนื่องจากว่า ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายของมนุษย์ เพราะเป็นแก๊สพิษ สามารถรั่วซึมออกมาสู่ภายนอกได้ การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารรีดิวซ์ทำปฏิกิริยากับน้ำเป็นกรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) จึงไม่จำเป็นต้องเติมกรดอีก



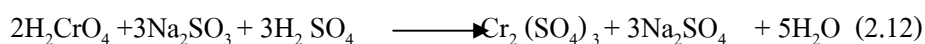
(2) สารประกอบซัลไฟท์ นอกจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว เกลือซัลไฟท์ก็สามารถใช้ในการกำจัดโครเมียมได้เช่นกัน โดยเกลือซัลไฟท์ในรูปต่างๆที่ใช้กันมีดังนี้

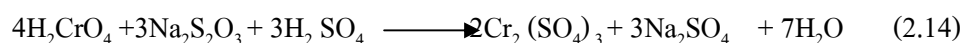
(2.1) โซเดียมซัลไฟท์ ($\text{Na}_2 \text{SO}_3$)

(2.2) โซเดียมไบซัลไฟท์ (NaHSO_3)

(2.3) โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_5$)

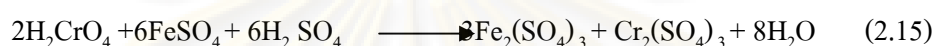
การใช้เกลือซัลไฟท์เป็นสารรีดิวซ์ ทำให้เกิดค้างขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการเติมกรดเพื่อปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2-3 ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันระหว่างโครเมียมกับเกลือซัลไฟท์และกรดซัลฟูริก แสดงได้ดังสมการ (2.12-2.14)





(3) เฟอร์รัสซัลไฟต์ (FeSO_4) อยู่ในรูปของแข็ง หรืออาจเตรียมเป็นสารละลายก่อนใช้รีดิวซ์โครเมียม (+6) โดยใช้ร่วมกับกรดซัลฟูริกที่พีเอช 2-3 แต่การใช้เฟอร์รัสซัลไฟต์ทำให้เกิดตะกอนมากกว่าการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือสารประกอบซัลไฟต์ เนื่องจากเหล็กเฟอร์รัส (+2) ออกซิไดส์เป็นเหล็กเฟอร์ริก (+3) เมื่อทำปฏิกิริยากับโครเมียม (+6) และเกิดได้เร็วที่พีเอชต่ำกว่า 3

ปฏิกิริยารีดักชันระหว่างเฟอร์รัสซัลไฟต์กับโครเมียม(+6) และกรดซัลฟูริก แสดงดังสมการ (2.15)



Patterson (1985) กล่าวถึงการใช้เฟอร์รัสซัลไฟต์เป็นตัวรีดิวซ์ที่พีเอชการทำปฏิกิริยา 30 นาที มีโครเมียม (+6) เหลืออยู่ 1 mg/l แต่ถ้าพีเอชมากกว่า 4 ต้องเพิ่มในการทำปฏิกิริยาเป็น 1 ชั่วโมง สำหรับประสิทธิภาพในการรีดิวซ์โครเมียม (+6) ของสารรีดิวซ์แต่ละชนิด ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพการรีดิวซ์โครเมียม(+6)ของสารรีดิวซ์แต่ละชนิด (Patterson, 1985)

สารรีดิวซ์	ความเข้มข้นของโครเมียม(+6) mg/l	
	ก่อนกำจัด	หลังกำจัด
1.ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	100	<0.05
	1.3	0
	0.23-1.5	0.1
2. ไบซัลไฟท์	140	0.7-1.0
	450-688	<0.01
3.เมตาไบซัลไฟท์	70	0.5
4.เฟอร์รัสซัลไฟต์	1,300	0.01

2.6.1.2 ปริมาณสารเคมีที่ใช้รีดิวซ์โครเมียม (+6)

ปริมาณสารเคมีทางทฤษฎีในการกำจัดโครเมียม 1mg/l แสดงดังตารางที่ 2.5 แต่ในทางปฏิบัติ ควรใส่มากกว่าค่าทางทฤษฎีประมาณ 2 เท่า เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 2.5 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม 1 mg/l (ตามทฤษฎี) (Eckenfelder, 1985)

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ตามทฤษฎี(mg/l)
FeSO ₄ ·7H ₂ O	16.03
H ₂ SO ₄	6.01
Lime(90%)	9.48
Na ₂ S ₂ O ₄ (97.5%)	2.81
H ₂ SO ₄	1.52
Lime(90%)	2.38
SO ₂	1.90
Lime(90%)	2.38
NaHSO ₃	3.00
H ₂ SO ₄	1.41
Lime(90%)	2.38

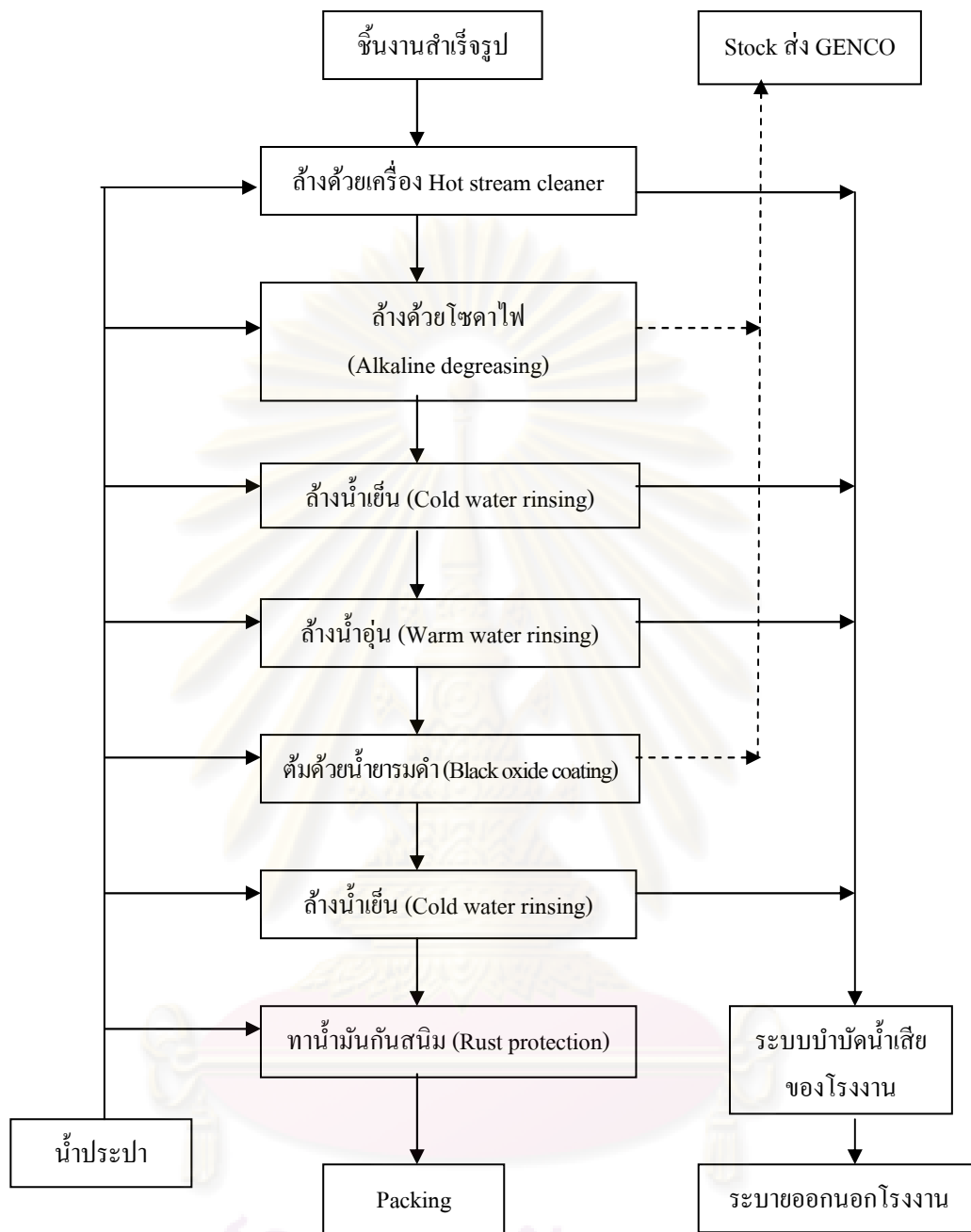
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 การรมดำโลหะ

2.7.1 กระบวนการรมดำโลหะ

กระบวนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะมีขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 2.19

Raw work pieces	คือ ชิ้นงานสำเร็จรูปที่ต้องการจะรมดำผิว ซึ่งผ่านการกลึงไสขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว
Hot stream cleaner	คือ การล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยไอน้ำในเครื่อง Hot stream vapor
Alkaline degreasing	คือ ขั้นตอนการกำจัดความสกปรกในรูปฝุ่น ไขมัน หรือรอยขีดข่วนที่ผิวชิ้นงาน โดยการต้มชิ้นงานในสารละลายโซดาไฟเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100°C นาน 30 นาที และต้องคอยเติมน้ำแทนส่วนที่ระเหยไปเพื่อให้ชิ้นงานจมอยู่ในน้ำยาเคมีตลอดเวลา
Water rinsing	หลังจากจุ่มชิ้นงานในถังน้ำยาเคมีในเวลาที่เหมาะสมแล้วนำชิ้นงานขึ้นมาล้างทำความสะอาดโดยใช้น้ำสะอาด
Black oxide coating	คือ ขั้นตอนการรมดำผิวชิ้นงานโดยการต้มชิ้นงานในน้ำยารมดำ SUGICUT™ CS-58Y ซึ่งเป็นด่างเข้มข้นที่อุณหภูมิ ประมาณ 185 °C นาน 2-3 ชั่วโมง และจะต้องคอยเติมน้ำแทนส่วนที่ระเหยไปเพื่อให้ชิ้นงานจมอยู่ในน้ำยาเคมีตลอดเวลา
Rust protection	การป้องกันผิวชิ้นงานจากการเกิดสนิมก่อนหีบห่อ โดยการชโลมน้ำมันกันสนิมที่ผิวชิ้นงาน
Packing	การบรรจุหีบห่อชิ้นงานที่ผ่านการรมดำแล้วเพื่อเตรียมส่งจำหน่าย



หมายเหตุ

หมายถึง น้ำประปา และน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต

หมายถึง น้ำค้างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline)

รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ

2.7.2 น้ำเสียจากกระบวนการรมดำผิวโลหะ

น้ำเสียจากการรมดำผิวโลหะ โรงงานรมดำ มีน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1) น้ำเสียทั่วไป เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดผิวชิ้นงานจากกระบวนการผลิตในขั้นตอน Hot stream cleaner และ Water rinsing มีลักษณะเป็นด่าง เนื่องจากการปนเปื้อนของน้ำด่างมีไขมันจากน้ำมันหล่อลื่นบนผิวชิ้นงานปนอยู่เล็กน้อย น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยการปรับ pH ให้เป็นกลาง (Neutralization) แล้วจึงระบายออกนอกโรงงาน

2) น้ำด่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) เป็นส่วนผสมของน้ำด่างโซดาไฟจากขั้นตอน Alkaline degreasing และน้ำด่างจากน้ำยารมดำ SUGICUT™ CS-58Y ในขั้นตอน Black oxide coating มีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด มีความเป็นด่างสูง และถูกจำแนกเป็นของเสียอันตราย (Hazardous Waste) ปัจจุบันทางโรงงานได้ทำสัญญาจ้างบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) ให้เป็นผู้บำบัดและทำลายฤทธิ์

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mavros Zoubulis และ Lazaridis (1993) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมใช้ถ่านหินมาใช้กำจัดโลหะนิเกิล โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัด โดยใช้เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าการเคหะและเมกาโพลิติส โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาประมาณ 10 นาทีที่ค่าพีเอช 8.5 ถึง 9 จะสามารถกำจัดโลหะนิเกิลได้เกือบ 10 เปอร์เซ็นต์แต่ในช่วงค่าพีเอชกลางๆพบว่า การกำจัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าลอยที่ถูกเติมลงในสารละลายเป็นสำคัญ นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้าลอยอีกด้วยเช่นที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 พบว่าเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าการเคหะสามารถกำจัดนิเกิลได้ 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าเมกาโพลิติส สามารถกำจัดโลหะนิเกิลได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น การทดลองในขั้นต่อมาได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเถ้าลอยกับการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ และคาร์บอน พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะนิเกิลได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าพีเอชต่ำๆ ส่วนการใช้คาร์บอนพบว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยที่ค่าพีเอชต่ำกว่าของการตกตะกอน

Amrhein และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาสมบัติของเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในอเมริกา และได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ

สารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือชนิดของสารละลายต่าง ความเข้มข้นของต่าง ความดัน และระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออน ความเสถียรของซีโอไลต์ ทดสอบการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง เอกซ์-เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตเมทรี จากผลการวิเคราะห์พบว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล และซีโอไลต์โพแทสเซียมคาร์บาไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วันตามลำดับส่วน สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่เกิด ซีโอไลต์ สำหรับที่ความดันสูงเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล ที่ 100 องศาเซลเซียส โดยทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ และซีโอไลต์เอกซ์ได้จากการทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ที่ 250 องศาเซลเซียส

สัญญาถ สันธवार และสมชาย พานิชสาส์น (2540) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการเตรียมซีโอไลต์จากถ้ำ ลอยถ่านหินที่โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเกิด ซีโอไลต์จากถ้ำลอย ซึ่งทำที่อุณหภูมิ 40, 60, และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 3, 6 และ 10 วัน และศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดซีโอไลต์ โดยใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3, 3.5 และ 4 โมลาร์ และทำการทดสอบหาค่า Cation Exchange Capacity (CEC) พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.5 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 วัน มีค่า CEC สูงที่สุด ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ ได้มีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลช่วงหนึ่งได้

Curkovic, Cerjan-Stefanovic และ Filipan (1996) ได้ทำการทดลองกำจัดตะกั่วและ แคลเซียมออกจากน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ตามธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านขบวนการพิเศษ และซีโอไลต์ที่ ผ่านการสังเคราะห์โดยซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้จะนำมาทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในการ ทดลองครั้งนี้จะใช้ซีโอไลต์ 3 แบบคือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ 1 ตัวอย่าง และซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการ พิเศษอีก 2 ตัวอย่าง โดยซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษทำโดยนำซีโอไลต์ธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา ในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ผลของการกำจัดตะกั่วและแคลเซียม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ที่ ผ่านขบวนการพิเศษจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และ ประสิทธิภาพในการกำจัด เมื่อทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิจะพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากขึ้น

Steenbruggen และ Hollman (1998) ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยนำเอาเถ้าลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่เกิดปฏิกิริยาในระบบปิด ตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา สัดส่วนของของเหลวต่อของแข็ง (L/S) ความเข้มข้นและชนิดของสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ และจากการทดลองสังเคราะห์เถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่อุณหภูมิ 90-150 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นคือ ซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (Zeolite Na-PI) เถ้าลอยถ่านหินจะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ประมาณ 45% และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 2.4 มิลลิสมมูลต่อกรัม จากนั้นได้นำเอาซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำ ปรากฏว่าลำดับความชอบของไอออนของซีโอไลต์คือ $Ba > Cu > Cd > Zn > Co > Ni$

Hollman, Steenbruggen และ Janssen-Jurkovicova (1999) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายเบส ความดัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (Zeolite Na-PI) ซีโอไลต์โซเดียม-เอกซ์ (Zeolite Na-X) และโซดาไลต์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง 2.0-2.5 meq/g

พรรศริมา จรัสรัตนมงคล (2542) ได้ศึกษาการผลิตซีโอไลต์จากแหล่งดินเบา แม่ทะ จังหวัดลำปางเพื่อเป็นสารดูดซับชนิดหนึ่ง สารละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดโลไมท์ ได้นำมาใช้เป็นวิธีปรับสภาพทางเคมีใน 2 สภาวะ สภาวะหนึ่งกระทำที่อุณหภูมิการเดือดในความดันบรรยากาศ อีกสภาวะหนึ่งทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่า ผลของการบำบัดน้ำเสียในนาุ้งได้ผลน่าพอใจ จากการหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุและความถ่วงจำเพาะ ซึ่งเป็นการประเมินค่าซีโอไลต์เพื่อที่จะให้ทราบถึงประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าซีโอไลต์ที่เตรียมจากดินเบาโดยส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดโลไมท์ ได้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึง 15 มิลลิสมมูลต่อ 100 กรัม และมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.20 จากผลการปรับสภาพน้ำเสียในห้องปฏิบัติการพบว่า NH_3 ได้ลดลงมากกว่า 50% และ H_2S ลดลงเพียง 11% เท่านั้น

มนตรี ทองคำ (2542) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารตั้งต้นที่ใช้คือถ้ำลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเครื่องกวนที่มีการกวนตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) พบซีโอไลต์ดังนี้ Zeolite P, Chabazite, Nepheline, Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่นๆ เช่น Sillimanite, Willhendersonite, Gehlenite สภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 619.44 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์ ซึ่งให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้นจากถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 52.20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์

ปิยะ ปุติเวคินทร์ (2545) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินโดยตรวจสอบคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำ โดยศึกษาผลของตัวแปร 5 ชนิด คือ ขนาดอนุภาคของถ้ำลอย อุณหภูมิกระตุ้น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิกระตุ้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและ เวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 110 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 96 ชั่วโมง โดยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้มีคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกประมาณ 635 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ในการศึกษาครั้งนี้นำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้ไปทดสอบหาความสามารถในการกำจัดแคดเมียมแบบไม่ต่อเนื่องจากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 0.2 และ 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์สังเคราะห์แบบเม็ดที่อัตราการระบรทุกทางศาสตร์ 0.22 และ 0.44 ล./ตร.ซม./ซม. ตามลำดับและที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 0.79 และ 0.44 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์สังเคราะห์แบบเม็ด ที่อัตราการระบรทุกทางศาสตร์ 0.22 และ 0.44 ล./ตร.ซม./ซม. ตามลำดับ

เลิศ รักสันติชาติ (2545) ศึกษาหาวิธีการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ที่ผ่านการดูดซับเอทิลีน ไกลคอลในขั้นตอนการอบแห้งของกระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ซึ่งมีวิธีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพครั้งนี้ คือการให้ความร้อนในสภาพบรรยากาศที่มีแต่ไนโตรเจน การเผาภายใต้บรรยากาศ

ที่มีออกซิเจนปนอยู่ การล้างด้วยน้ำกลั่นและเผา วิธีสุดท้าย คือ การล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำกลั่น และเผา พบว่า การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์โดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่สามารถกำจัดโมเลกุลของคาร์บอนที่เหลืออยู่บนซีโอไลต์ได้สมบูรณ์ขึ้น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพโดยการเผา ได้แก่ เผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์สามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนและนำกลับมาใช้ใหม่ 2 ครั้ง

จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ (2547) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย โดยตรวจสอบคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งจะให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 565.62 cmol/kg ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์เถ้าลอยขานอ้อย คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งจะให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 303.19 cmol/kg และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียได้เท่ากับร้อยละ 93.24% และ 91.36% ตามลำดับ

พรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ (2547) ได้ศึกษาแนวทางในการใช้น้ำค้างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) จากอุตสาหกรรมรมดำในกระบวนการตกตะกอนตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมการหลอมแบตเตอรี่เก่า โดยเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนอีก 2 ชนิด ได้แก่ NaOH และ Na_2CO_3 เมื่อตกตะกอนด้วยน้ำค้างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8.5–10.5 การใช้ร่วมกับโพลีเมอร์ประจุลบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนได้ดีที่ความเข้มข้น 1.8 มก./ล. สามารถกำจัดตะกั่วในรูปตะกั่วละลายและตะกั่วทั้งหมด เท่ากับ 100 และ 99.22% ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การตกตะกอนด้วยน้ำค้างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) ให้ประสิทธิภาพดีในการบำบัดตะกั่วในรูปตะกั่วละลาย ตะกั่วทั้งหมดและความขุ่น ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะสามารถสามารถนำ น้ำค้างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) จากอุตสาหกรรมรมดำมาใช้บำบัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมหลอมตะกั่วแท่งจากแบตเตอรี่เก่าได้

อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล (2549) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยด้วยสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ (Spent

alkaline) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อย คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 418.36 cmol/kg และ 286.29 cmol/kg ตามลำดับ นำซีโอไลต์สังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ที่พีเอช 5 และความเข้มข้นตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วดีที่สุด มีค่าความสามารถในการดูดติดพิวตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 78.31 และ 65.23 มิลลิกรัมต่อกรัม ซีโอไลต์ ตามลำดับ

Querol และคณะ (1997) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทำปฏิกิริยาในระบบปิดมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ 150 – 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 8 - 10 ชั่วโมง และความเข้มข้นของด่างที่ใช้ 0.1 - 1 โมลาร์ ประมาณค่าความดันระหว่างปฏิกิริยามีช่วงอยู่ระหว่าง 0.48 Mpa ที่ 150 องศาเซลเซียส ถึง 1.55 Mpa ที่ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับ 0.55 ก./มล. ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ส่วนใหญ่คือ ซีโอไลต์กลุ่มโซเดียม-พีแอล (Zeolite-Na-PI) จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยมีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ จะเห็นว่าแม้ทำการสังเคราะห์ภายใต้สภาวะเดียวกันแต่อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ต่างกันจะทำให้เกิดซีโอไลต์ต่างชนิดกันไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการของสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 แผนการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้จะแบ่งเป็น 6 ขั้นตอน

1) ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

2) การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย และทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3) ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด ซึ่งส่งตัวอย่างตรวจวิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ทางกายภาพ

(1) การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว, ปริมาตรโพรง โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer- Emmett-Teller)

(2) วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)

(3) การทดสอบหาการกระจายขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

- ทางเคมี

(1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดโดยใช้ X-rays Fluorescence Spectroscopy (XRF)

(2) วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้ X-rays Diffraction Spectroscopy (XRD)

4) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ คือ เวลา พีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) ในน้ำเสียสังเคราะห์

5) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก เวลา และปริมาณของซีโอไลต์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

6) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียจริง โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่ง (Column Test)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
- 3) โถดูดความชื้น (Desiccators)
- 4) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
- 5) ครุชีเบิลพอร์ซีเลน พร้อมฝาปิด
- 6) เครื่องสูบลูญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
- 7) Heating Water bath: Model WB 7/14/22/29/45 ของ MEMMERT
- 8) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) PH 1-20, DKK Corporation. Japan
- 9) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง: AND HM-300-Japan
- 10) เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ K รุ่น VRN -360
- 11) ตู้อบความร้อน: WTB Binding Germany
- 12) เตาเผา: Valeam box furnace รุ่น 3-1750.USA
- 13) ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด
- 14) ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 100 และ 325 Mesh
- 15) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน : Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL, Model
- 16) เครื่องวัดพื้นที่ผิว: Specific Surface Area Analyzer, ASAP2000.Germany
- 17) เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS). Perkins Elmer Instrument, Analyst 300 Atomic Adsorption Spectrophotometer. USA
- 18) X-rays Diffraction Spectroscopy JOEL รุ่น JDX-8030, JAPAN

19) X-rays Fluorescence Spectroscopy JOEL รุ่น PW 2400 PHILIPS, JAPAN.

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline)

ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของสารละลายต่างที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline) ดังนี้

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
- ปริมาณ โลหะละลายและโลหะทั้งหมด ได้แก่ As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, และ Pb

3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย

1) การเตรียมเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา นำเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้า และเถ้าลอยขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากเถ้าลอยและทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำเถ้าลอยที่ผ่านการอบแล้ว มาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 Mesh และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 Mesh จากนั้นนำไปบรรจุในหม้อดินและปิดฝา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (สาเหตุที่ต้องเผาทะเพราะว่าต้องการกระตุ้นให้เถ้าลอยทั้งสองประเภทอยู่ในสภาพพร้อมคือเป็นสารประกอบของควอตซ์ และมูลไสต์ที่จะทำปฏิกิริยา) หลังจากนั้นปล่อยให้เถ้าลอยทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

2) เตรียมสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline) ความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ 2.0 โมลาร์ 2.5 โมลาร์ และ 3.0 โมลาร์ นำเถ้าลอยที่ผ่านการเผามาชั่งประมาณ 15 กรัม และนำสารละลายที่เตรียมไว้มาทดลองในขวดที่ซึ่งเถ้าลอยปริมาตร 120 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปเขย่าโดยใช้ Shaker water bath (แสดงดังรูปที่ 3.1) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียสแต่ละอุณหภูมิจะเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 วัน

3) เมื่อทำปฏิกิริยาตามภาวะต่าง ๆ เสร็จแล้ว นำเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ผ่านการทำปฏิกิริยามากรองแยกเถ้าลอยโดยล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง แล้วนำเถ้าลอยไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด

3.4.3 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิด

นำถ้ำลอยทั้งสองชนิด และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดมาบดให้ละเอียดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 mesh ได้ ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเก็บไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 1) วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)
- 2) วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโตรโฟโตเมทรี (XRD)
- 3) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

3.4.4 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์

ในการทดลองได้ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม โดยเตรียมจากโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ซึ่งโพแทสเซียมไดโครเมตมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 294 กรัม และโครเมียมมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 52 กรัม ทำการเตรียมเป็นสารละลายเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต 2.828 กรัม ละลายในน้ำ 200 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (ASTM D1687-92) ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำได้โดยการเจือจางสารละลายเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร แล้วจึงเติมกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) 1 มิลลิลิตร เพื่อควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ตลอดการทดลอง

3.4.4.1 ศึกษาผลของพีเอช

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่าพีเอช เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ โดยการปรับพีเอชด้วยสารละลายเบส 0.1 N NaOH หรือสารละลายกรด 0.1 N HNO_3
- 2) นำน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ปริมาตร 100 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)

- 3) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย ปริมาณ 0.1 กรัมลงในขวด
- 4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.4.2 ศึกษาผลของเวลา

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสม (จากข้อ 3.4.4.1) ปริมาตร 100 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ปริมาณ 0.1 กรัมลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 900 และ 1440 นาที ตามลำดับ
- 4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.4.3 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนัก

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมความเข้มข้น 10, 15 และ 20 mg/l ปรับพีเอช ให้เท่ากับค่าพีเอช ที่เหมาะสม (จากข้อ 3.4.4.1) ปริมาตร 100 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ปริมาณ 0.1 กรัมลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 3.4.4.2)
- 4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.4.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีโอไลต์

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสม (จากข้อ 3.4.4.1) ปริมาตร 100 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ในช่วงน้ำหนักที่แน่นอนปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.1 และ 0.2 กรัมลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 3.4.4.2)
- 4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.5 ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยชานอ้อยในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยนำการทดลองที่ดีที่สุดจากข้อ (3.4.4.1-3.4.4.4) มาทำการทดลองกับน้ำเสียจริง

- 1) นำน้ำเสียจากโรงงานเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 มาปรับพีเอชให้ได้ตามการทดลองที่ 3.4.4.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ
- 2) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 3.4.4.2
- 4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าพีเอชของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.6 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหินที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม

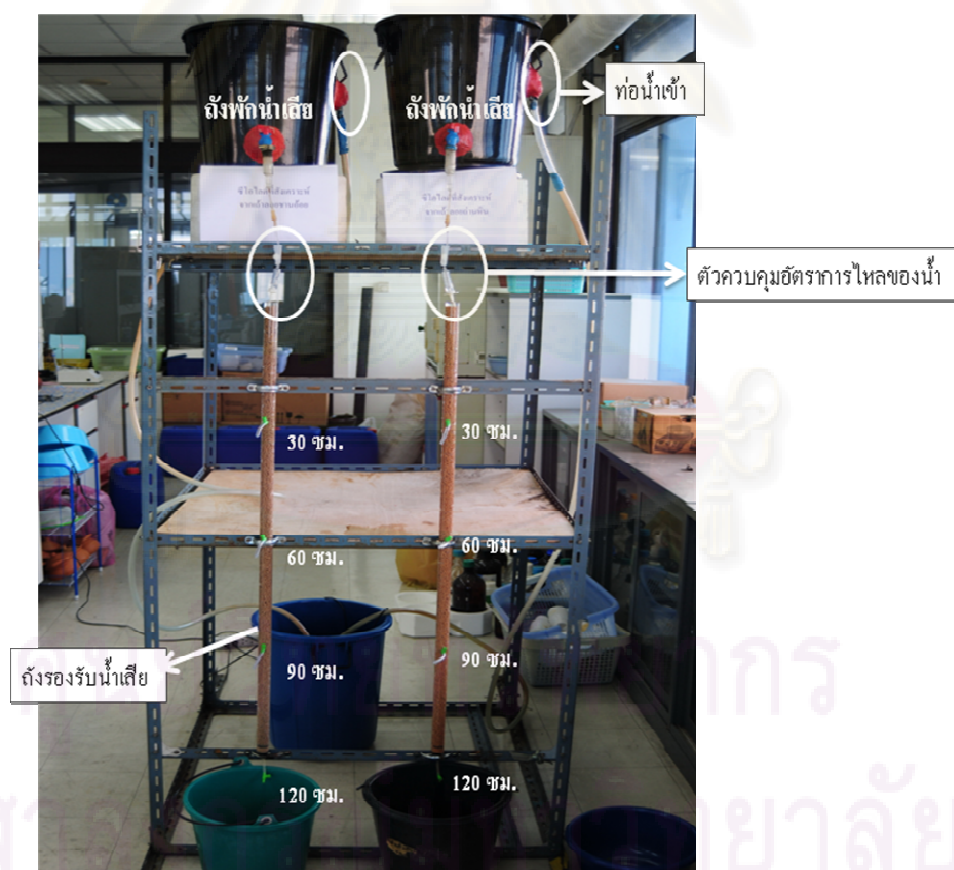
- 1) นำสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่ใช้แล้วปริมาณ 5 กรัม และ 10 กรัม ลงในขวดแต่ละความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 60 และ 180 นาที ตามลำดับ
- 4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42
- 5) นำซีโอไลต์ที่กรองได้ไปอบให้แห้งและปล่อยให้เย็นไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- 6) นำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมาใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กับปริมาณซีโอไลต์ พิเอชที่เหมาะสม และระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 3.4.4.1 – 3.4.4.4

3.4.7 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหินโดยทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) (แสดงดังรูปที่ 3.2)

- 1) บรรจุซีโอไลต์ชนิดเม็ดขนาด 4 มิลลิเมตร ลงไปในถังดูดติดผิวแบบแท่งที่เป็นท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร จะเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์ที่ 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร
- 2) ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ทราบค่าความเข้มข้นของโลหะหนักโครเมียมทั้งหมดที่เหลืออยู่แน่นอนและปรับพีเอชที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.4.1 เข้าสู่คอลัมน์ โดยปล่อยให้ไหลจากด้านบนลงด้านล่าง ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อชั่วโมง
- 3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมทั้งหมดที่ระดับความลึกที่ได้กำหนดไว้ จนกว่าค่าความเข้มข้นของโลหะหนักโครเมียมจะใกล้เคียงกับน้ำเข้า จึงยุติการทดลอง
- 4) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณเฮกซะวาเลนที่โครเมียมทั้งหมดที่เหลือ โดยเครื่อง AAS
- 5) นำผลที่ได้มาเขียนกราฟ Break through curve ของประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย



รูปที่ 3.1 เครื่อง Shaker water bath สำหรับทำปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์



รูปที่ 3.2 คอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป และเจาะเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การทดลองศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากกระบวนการรณดำโลหะ (Spent alkaline)

ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้ว พบว่าสารละลายต่างที่ใช่แล้วเป็นส่วนผสมของสารละลาย NaOH และน้ำยารณดำ SUGICUT CS-58 Y มีลักษณะสมบัติเบื้องต้น คือ เป็นของเหลวขุ่นหนืด และมีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มากที่สุด คือ ปริมาณทั้งหมดเท่ากับ 24.4 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมา คือ โครเมียม 13.55 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ใช่แล้วจากกระบวนการรณดำโลหะ

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้	
	ทั้งหมด	ที่ละลายได้
As	0.02 มก./ล.	0.02 มก./ล.
Cd	ND	ND
Cr	13.55 มก./ล.	12.24 มก./ล.
Cu	0.56 มก./ล.	0.50 มก./ล.
Fe	24.4 มก./ล.	19.4 มก./ล.
Hg	ND	ND
Ni	0.51 มก./ล.	0.49 มก./ล.
Pb	0.28 มก./ล.	0.16 มก./ล.

ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายต่างที่ใช้แล้วมีค่าประมาณ 14.50–15.90 โมลาร์
ในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้แล้วมีค่าประมาณ 15.16–15.20 ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนและค่าพีเอชของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว

วัน เดือน ปี	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนของ สารละลายต่างที่ใช้แล้ว (โมลาร์)	ค่าพีเอช
3 มี.ค. 2550	14.49	15.16
17 มี.ค. 2550	14.81	15.17
26 มี.ย 2550	15.49	15.19
9 ก.ค.2550	15.27	15.18
16 ส.ค. 2550	15.13	15.17
25 ก.ย. 2550	15.76	15.19
19 ต.ค. 2550	15.82	15.20
27 ต.ค.2550	15.85	15.20
17 พ.ย. 2550	15.89	15.20

**4.2 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย และการหาค่า
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC)**

**4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอย
ขานอ้อย**

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly ash) เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาบดให้ละเอียด และ
ส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอย (Fly ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัด
ออกจากปล่องควัน ซึ่งอาจถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตหรืออาจจะมาจากการดักจับ
ด้วยถุงกรองฝุ่น มีลักษณะร่วนและเป็นสีดำเทา ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เถ้าลอยถ่านหินที่มีลักษณะร่วนและเป็นสีดำเทา

เถ้าลอยขานอ้อย (Bagasse Fly ash) เกิดจากการนำขานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจายจึงมีการฉีดย้ำน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับเถ้าลอยให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียกมีสีดำ ดังรูปที่ 4.2



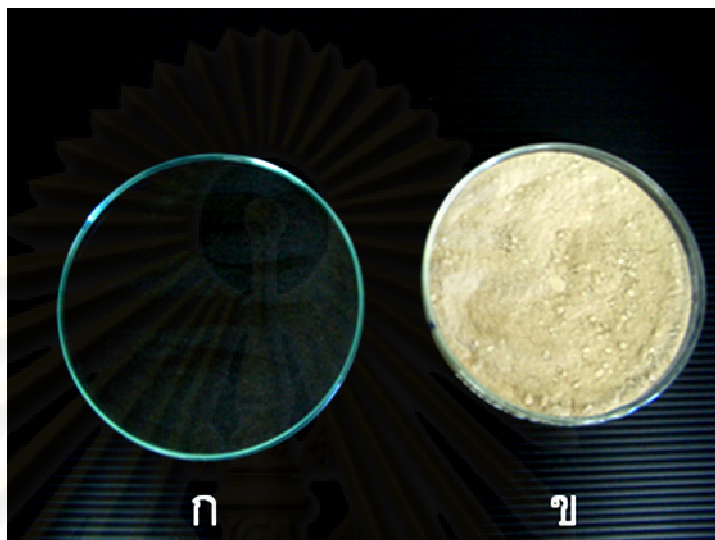
รูปที่ 4.2 เถ้าลอยขานอ้อยที่มีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ

4.2.3 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์

สังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยขานอ้อยนั้นทำได้โดยการนำวัตถุดิบ คือ เถ้าลอยถ่านหินมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่มาจากโรงงานน้ำตาลมีลักษณะเป็นเถ้าเปียก จึงต้องตากแดดให้แห้งก่อนจากนั้นจึงนำเถ้าลอยขานอ้อยไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบแล้ว มาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 mesh และร่อนผ่านตะแกรง

เบอร์ 325 mesh แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยปล่อยให้เย็นที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีดำเทาเป็นสีน้ำตาลแดง ดังรูปที่ 4.3 จากนั้นนำตัวอย่างที่เผาแล้วนำมาตั้งเคราะห์ โดยกระตุ้นด้วย Spent alkaline ดังรูปที่ 4.4



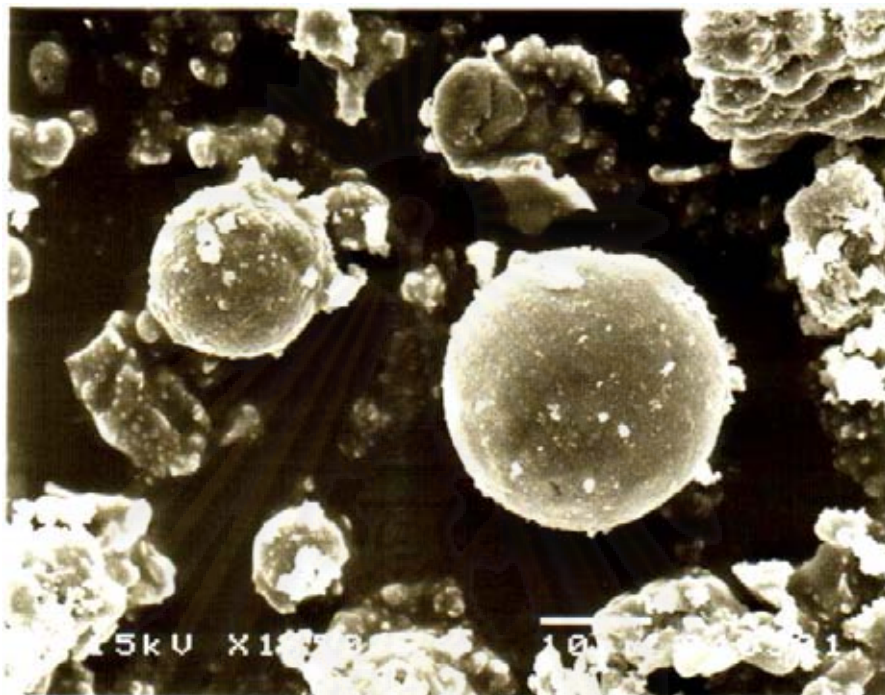
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างจากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีดำเทาเป็นสีน้ำตาลแดง
(ก) ตัวอย่างจากถ้ำลอยถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการเผา
(ข) ตัวอย่างจากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



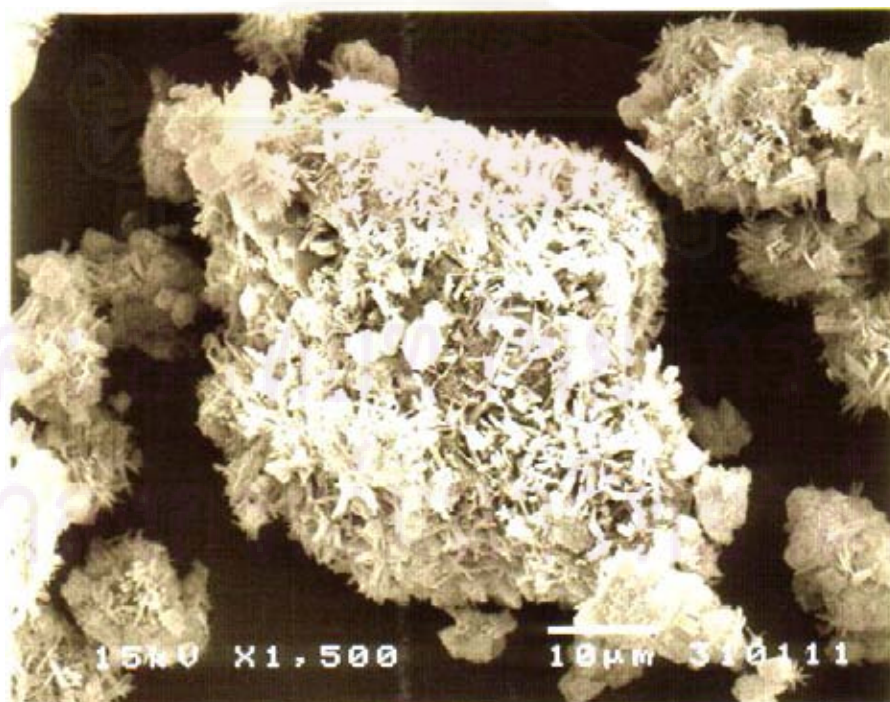
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

จากการวิเคราะห์ถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคป (SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่ารูปร่างของถ้ำลอยถ่านหินมีลักษณะ

ค่อนข้างกลมถึงกลม (Sub-round to round) ดังรูปที่ 4.5 และพบว่ารูปร่างของซีโอไลต์สังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไปจากถ้ำลอยถ่านหิน คือ มีลักษณะไม่เป็นทรงกลม พื้นผิวมีความพรุนมากขึ้นและพบว่าผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 โครงสร้างและพื้นที่ผิวถ้ำลอยถ่านหิน



รูปที่ 4.6 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

ถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีเทาอ่อนดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีเทา

(ก) ตัวอย่างจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการเผา

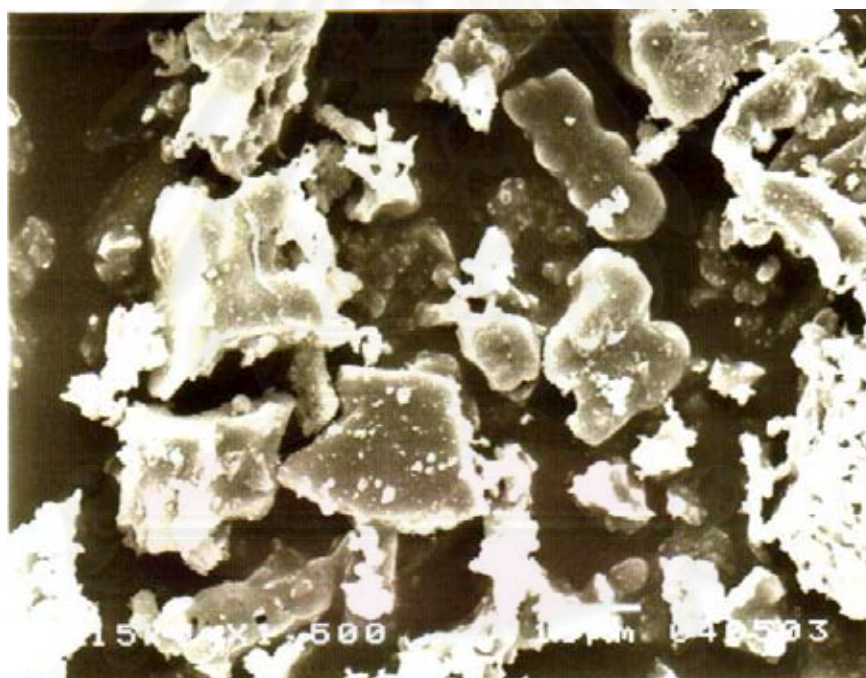
(ข) ตัวอย่างจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ให้เป็นซีโอไลต์ ดังรูปที่ 4.8



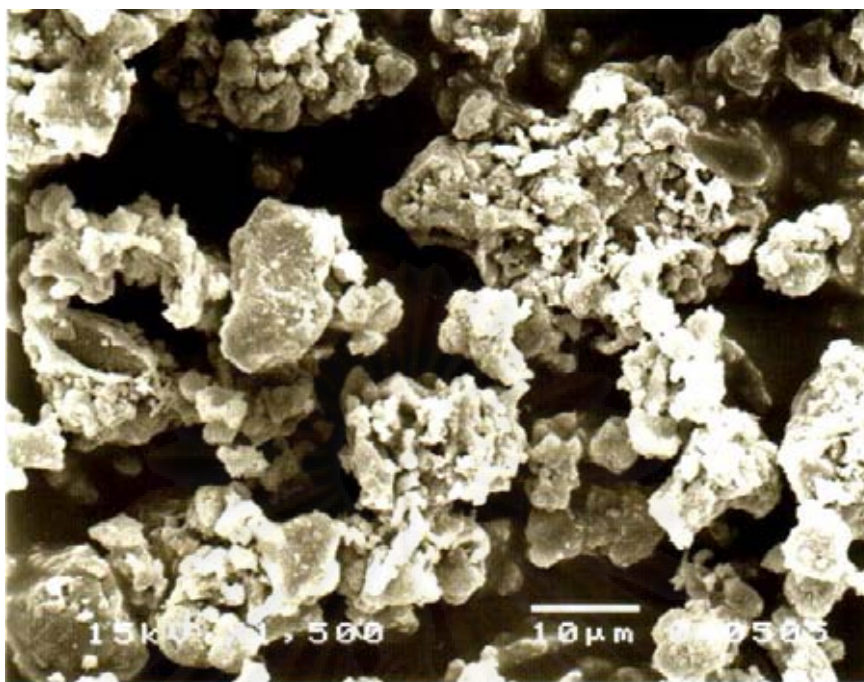
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

และจากการวิเคราะห์แก๊วลอยซานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่ารูปร่างของแก๊วลอยซานอ้อยมีลักษณะเป็นรูปทรงที่แตกต่างกันออกไป ไม่แน่นอน มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบและแน่นไม่มีรูพรุน และพบว่ารูปร่างของซีโอไลต์สังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไปจากแก๊วลอยซานอ้อย คือ มีรูพรุนเป็นโพรงลึกเกิดขึ้นให้เห็นชัดเจน ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 โครงสร้างและพื้นที่ผิวแก๊วลอยซานอ้อย

ศูนย์วิจัยทรัพยากรทดแทน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

4.2.2 การทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่สถานะต่าง ๆ

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยชานอ้อยนั้นทำได้โดยนำเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ผ่านการเผามาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างจากกระบวนการรมค่าโลหะ (Spent alkaline) ที่ความเข้มข้น 2.0, 2.5 และ 3.0 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ Spent alkaline เท่ากับ 1:8 และนำไปให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 80 และ 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1, 2, 3 และ 4 วัน ซึ่งเถ้าลอยประมาณ 100 กรัมสามารถสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ได้ประมาณ 80 กรัม โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดจะมีสีอ่อนลงกว่าเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อยที่ยังไม่ได้กระตุ้น เมื่อได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ทุกสถานะแล้ว จึงนำซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดมาทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) เพื่อเลือกสถานะที่ดีที่สุดมาทำการทดลองขั้นต่อไป

1) การทดสอบค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

ผลการทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างจากกระบวนการรณค่าโลหะ(Spent alkaline) ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นโดยสารละลาย Spent alkaline	ค่า CEC (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นโดยสารละลาย Spent alkaline
ความเข้มข้น ของสารละลาย (M)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา (วัน)		
1.5	80	1	431.93	190.69
		2	439.14	202.62
		3	442.64	212.35
		4	446.61	238.28
2.0	80	1	426.08	190.94
		2	429.27	214.50
		3	439.06	242.52
		4	450.62	262.50
2.5	80	1	423.46	190.65
		2	429.86	214.74
		3	445.82	250.77
		4	446.01	286.68
3.0	80	1	441.61	197.05
		2	453.85	216.74
		3	456.32	223.72
		4	473.74	253.72
1.5	100	1	422.64	187.05
		2	426.34	198.87
		3	427.62	213.72
		4	428.29	224.26

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC (cmol/kg zeolite) ของเถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นโดยสารละลาย Spent alkaline	ค่า CEC (cmol/kg zeolite) ของเถ้าลอยขานอ้อย ที่กระตุ้นโดยสารละลาย Spent alkaline
ความเข้มข้น ของสารละลาย (M)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา (วัน)		
2.0	100	1	427.71	169.89
		2	427.82	199.87
		3	434.82	213.67
		4	435.45	241.32
2.5	100	1	426.03	175.05
		2	427.66	189.01
		3	428.05	206.09
		4	433.64	217.32
3.0	100	1	437.35	173.98
		2	454.43	199.97
		3	454.91	232.45
		4	457.98	245.09

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้เลือกสภาวะเหมาะสมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ ที่ความเข้มข้น 3.0 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุด คือ 473.74cmol/kg และสำหรับสภาวะเหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่ กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ ที่ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุดคือ 286.68cmol/kg

ความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินชนิด คือ 3.0 โมลาร์ และการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อย คือ 2.5 โมลาร์

เนื่องจากให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูง ซึ่งความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline ที่เลือกใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amrchein et al.,1996 และ Querol et al.,1997 ที่ว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 0.5 โมลาร์ เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์มากที่สุด เพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปย่อยสารประกอบควอตและมุลไลต์ในถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยจนได้สารประกอบอะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ออกมา นอกจากนี้โซเดียมไอออน (Na^+) ยังทำให้โครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลของซิลิกาออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) อยู่ในสภาพเสถียรยิ่งขึ้น ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่า 2 โมลาร์ขึ้นไป ไม่เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะที่ความเข้มข้นสูงๆ นั้น สารประกอบควอต และมุลไลต์ในถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยจะถูกย่อยมากจนทำให้เกิดโครงสร้างของผลึกที่หนาแน่นมาก (Dense Material) เช่น Mulite และ Gehlenite ซึ่งเป็นสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ เพราะซีโอไลต์มีโครงสร้างที่อยู่กันอย่างหลวมๆ (Loose Material) (มนตรี ทองคำ, 2542)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยจะเลือกระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 4 วัน เนื่องจากทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนตรี ทองคำ (2542) ที่กล่าวว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเกิดผลึกซีโอไลต์ก็จะสูงตามไปด้วย เพราะโอกาสในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ้ำลอย (ควอตและมุลไลต์) ที่เป็นของแข็งอस्थฐานไปเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกย่อมมีมากขึ้นด้วย ตารางที่ 4.4 สรุปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ชนิดของถ้ำลอย และซีโอไลต์สังเคราะห์	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยน แคลเซียมไอออน (cmol/kg)
ถ้ำลอยถ่านหิน	66.87
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	473.74
ถ้ำลอยชานอ้อย	34.18
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	286.68

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ความเข้มข้น 3.0 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 473.74 cmol/kg ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 286.68 cmol/kg โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมานี้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้ดีกว่าเถ้าขานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 34.18 cmol/kg

3) การหาพื้นที่ผิวของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์

ผลการศึกษาพื้นที่ผิว (Surface Area) ปริมาตรโพรง (Pore Volume) ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยเครื่อง Specific Surface Area Analysis ด้วยวิธี BET (Brunance-Emmett-Teller) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ลักษณะทางกายภาพ	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรโพรง (ลบ.ซม./กรัม)
ชนิดของเถ้าลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์		
เถ้าลอยถ่านหิน	16.94	0.0083
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	54.47	0.0272
เถ้าลอยขานอ้อย	2.55	0.0522
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	18.01	0.1047

จากตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 54.47 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนพื้นที่ผิวของ ถ้ำลอยซานอ้อย ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่า เท่ากับ 18.01 ตารางเมตรต่อกรัม

สำหรับปริมาตรโพรงของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 0.0272 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ส่วนปริมาตร โพรงของถ้ำลอยซานอ้อย ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 0.1047 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของ ซีโอไลต์ คือ พื้นที่ผิวและปริมาตรโพรง โดยซีโอไลต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงมากจะทำให้มี ความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของถ้ำลอย ถ่านหิน ถ้ำลอยซานอ้อย ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อยพบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อยมีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรง มากกว่าถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยซานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ดังนั้นซีโอไลต์สังเคราะห์จึง มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ้ำลอยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 สมบัติทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

1) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อยที่ไม่ได้เผา และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ผลวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

องค์ประกอบ	ในถ้ำลอย ถ่านหิน (%)	ในซีโอไลต์สังเคราะห์ จากถ้ำลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย Spent alkaline (%)
SiO ₂	49.070	47.200
CaO	17.060	16.550
Fe ₂ O ₃	3.890	5.260
Al ₂ O ₃	23.860	21.256
K ₂ O	0.850	0.257
Na ₂ O	0.540	8.280
MgO	0.060	0.145
MnO ₂	0.025	0.034
TiO ₂	1.859	1.070
ZrO ₂	0.073	0.101
NiO	0.022	0.026
SrO	0.151	0.204
ZnO	0.029	0.042
Rb ₂ O	0.005	0.005
BaO	0.151	0.167
SO ₃	7.030	1.210
CuO	0.012	0.017
PbO	0.007	0.010
Rb ₂ O	0.005	0.005
P ₂ O ₅	0.390	0.155

จากตารางที่ 4.6 สารประกอบที่พบในถ้ำลอยถ่านหิน เป็นสารประกอบเริ่มต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะว่าถ้ำลอยถ่านหินประกอบไปด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดเป็นซีโอไลต์ในถ้ำลอยถ่านหินมี SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับ 49.070 เปอร์เซ็นต์ 23.860 เปอร์เซ็นต์ 3.890 เปอร์เซ็นต์ 17.060 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำถ้ำลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย Spent alkaline ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่ผ่านการใช้งานจากระบวนการรมค่าโลหะอุตสาหกรรมจะสามารถทำให้เกิดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นมาได้

จากองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline พบว่า SiO_2 และ Al_2O_3 ของถ้ำลอยถ่านหินจะลดลงเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ โดยถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 49.070 เปอร์เซ็นต์ เป็น 47.200 เปอร์เซ็นต์ และจาก 23.860 เปอร์เซ็นต์ เป็น 21.256 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ Fe_2O_3 ของถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะเพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ จาก 3.890 เปอร์เซ็นต์ เป็น 5.260 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามี Na_2O ของถ้ำลอยถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ที่กระตุ้น Fe_2O_3 ด้วยสารละลาย Spent alkaline ทำให้โซเดียมไอออน (Na^+) เข้าไปประกอบอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาออกซิเจนเตตระฮีดรอล และ อะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ซึ่งทำให้อยู่ในสภาพที่เสถียรยิ่งขึ้น (มนตรี ทองคำ, 2542)

จากการที่อัตราส่วนของ Na_2O ในถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline เพิ่มขึ้นจึงทำให้ส่งผลต่ออัตราส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline โดยจะมีอัตราส่วนของ Na_2O ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของ Fe_2O_3 ในถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการที่สารละลาย Spent alkaline มีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ปริมาณมากจึงทำให้อัตราส่วนของ Fe_2O_3 เพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย

องค์ประกอบ	ในเถ้าลอย ขานอ้อย (%)	ในซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยขานอ้อย กระตุ้นด้วย Spent alkaline (%)
SiO ₂	60.21	59.31
CaO	9.16	8.19
Fe ₂ O ₃	7.42	9.98
Al ₂ O ₃	5.98	4.37
K ₂ O	1.00	0.66
MgO	0.01	0.05
MnO	0.04	0.06
TiO ₂	0.11	0.19
ZrO ₂	0.13	-
NiO	0.10	-
SrO	0.07	0.01
ZnO	0.16	0.09
Rb ₂ O	0.03	0.01
BaO	0.19	0.11
SO ₃	-	-
CuO	-	-
PbO	-	-

จากตารางที่ 4.7 สารประกอบที่พบในเถ้าลอยขานอ้อยเป็นสารประกอบเริ่มต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะเถ้าลอยทั้งสองชนิดประกอบไปด้วย SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดซีโอไลต์ พบว่าในเถ้าลอยขานอ้อยมี SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เท่ากับ 60.21 เปอร์เซ็นต์ 5.98 เปอร์เซ็นต์ 7.42 เปอร์เซ็นต์ และ 9.16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเถ้าลอยขานอ้อยมาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารละลาย Spent alkaline ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่ผ่านการใช้งานจากกระบวนการรมค้ำโลหะ จะสามารถทำให้เกิดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นได้

จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยและถ้ำลอยขานอ้อย ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline พบว่า SiO_2 และ Al_2O_3 ของถ้ำลอยขานอ้อยจะลดลงเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ โดยถ้ำลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 60.21 เปอร์เซ็นต์ เป็น 59.31 เปอร์เซ็นต์ และจาก 5.98 เปอร์เซ็นต์ เป็น 4.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ Fe_2O_3 ของถ้ำลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะเพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยขานอ้อยถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ จาก 7.42 เปอร์เซ็นต์ เป็น 9.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า Na_2O ของถ้ำลอยขานอ้อยจะเพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยขานอ้อยถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ที่กระตุ้น Fe_2O_3 ด้วยสารละลาย Spent alkaline ทำให้โซเดียมไอออน (Na^+) เข้าไปประกอบอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาออกซิเจนเตตระฮีดรอล และ อะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ซึ่งทำให้ อยู่ในสภาพที่เสถียรยิ่งขึ้น (มนตรี ทองคำ, 2542)

จากการที่อัตราส่วนของ Na_2O ในถ้ำลอยขานอ้อยที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline เพิ่มขึ้นจึงทำให้ส่งผลต่ออัตราส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในถ้ำลอยขานอ้อยที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline โดยจะมีอัตราส่วนของ Na_2O ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของ Fe_2O_3 ในถ้ำลอยขานอ้อยที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการที่สารละลาย Spent alkaline มีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มากจึงทำให้อัตราส่วนของ Fe_2O_3 เพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยขานอ้อยถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์

2) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

จากการนำถ้ำลอยถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นที่สถานะต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าเมื่อนำถ้ำลอยถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline สามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P1 และ Unnamed zeolite (Sodium Aluminum Silicate Hydrate) และพบสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz- SiO_2 ดังตารางที่ 4.9

จากการนำถ้ำลอยขานอ้อยมาผ่านการกระตุ้นที่สถานะต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าเมื่อนำถ้ำลอยขานอ้อยมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline สามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P1 และพบสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz- SiO_2 ดังตารางที่ 4.9 (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.8 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย

ชนิดของเถ้าลอย	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้	สูตรทั่วไปของซีโอไลต์
เถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	Zeolite P1 Unnamed zeolite	$[\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}]12\text{H}_2\text{O}$ $[1.08(\text{Na}_2\text{O})(\text{Al}_2\text{O}_3)1.68(\text{SiO}_2)]1.8\text{H}_2\text{O}$
เถ้าลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	Zeolite P1	$[\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}]12\text{H}_2\text{O}$

4.4 การศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยชานอ้อย แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงความเหมาะสมในการดูดซับ โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) การทดลองแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

- การหาพีเอชที่เหมาะสม
- การหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม
- การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม
- การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์

4.4.1 ผลจากการศึกษาหาพีเอชที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของพีเอชที่ทำการศึกษาถึงการดูดซับผู้วิจัยจึงทำการทดลองปรับค่าพีเอชต่างๆ ตั้งแต่ 2-7 โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 2-7 และทำการเติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 0.1 กรัม และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 นาที แล้วกรองเอาผงซีโอไลต์ออกเพื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวัดปริมาณโครเมียมที่เหลือ ส่วนการทดลองของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยก็ทำเช่นเดียวกันกับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

ผลการทดลองการหาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งไม่ได้ทำการหาค่าร้อยละของการตกตะกอนที่เกิดจากอิทธิพลของพีเอช ตามลำพัง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังผ่านการดูดซับด้วย ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย

ประเภท ซีโอไลต์	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (mg/l)	เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพ การกำจัด
			ค่าเฉลี่ย \pm SD	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย Spent alkaline	2.01	6.02	0.183 ± 0.0036	98.17
	3.02	7.03	0.214 ± 0.0025	97.86
	4.01	7.25	0.350 ± 0.0030	96.50
	5.03	7.39	0.785 ± 0.0050	92.15
	6.02	7.59	0.799 ± 0.0031	92.01
	7.01	7.68	0.812 ± 0.0020	91.88
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยชานอ้อย กระตุ้นด้วย Spent alkaline	2.01	5.72	0.398 ± 0.0026	96.02
	3.02	6.89	0.456 ± 0.0015	95.44
	4.01	7.07	0.490 ± 0.0015	95.10
	5.03	7.32	0.700 ± 0.0025	93.00
	6.02	7.43	0.802 ± 0.0030	91.98
	7.01	7.58	0.887 ± 0.0056	91.13

หมายเหตุ: ผลการทดลองที่ได้แสดงในภาคผนวก ง

จากผลการทดลองหาพีเอชที่เหมาะสมในตารางที่ 4.9 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยที่พีเอชต่างๆ มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline พบว่าที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 98.17%, 97.86%, 96.50%, 92.15%, 92.01% และ 91.88% ตามลำดับ ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline พบว่าที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 96.02%, 95.44%, 95.10%, 93.00%, 91.98% และ 91.13% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมที่กล่าวมานั้นยังไม่ได้ทำการหักค่าร้อยละของการตกตะกอน

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นในการเลือกพีเอช เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไปจะใช้พีเอช เท่ากับ 2 ซึ่งจากผลการทดลองซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะได้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 98.17% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะได้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 96.02% เนื่องจากเป็นช่วงที่โครเมียมยังตกตะกอนไม่มากนัก ถ้าเลือกพีเอชสูงกว่านี้จะเป็นการตกตะกอนของโครเมียมมากกว่าการดูดซับ

4.4.2 ผลการหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ทำการทดลองตามหัวข้อที่ 3.4.4.2 ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.10-4.11

ตารางที่ 4.10 การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ง)

	เวลาสัมผัส (นาที)	pH น้ำเสีย ก่อนเขย่า	pH น้ำเสีย หลังเขย่า	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (Cr ₂ O ₇ ²⁻) (mg/l)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัด Cr ₂ O ₇ ²⁻
				ค่าเฉลี่ย ± SD	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	5	2.00	6.59	0.470 ± 0.0086	95.30
	10	2.00	6.66	0.417 ± 0.0042	95.83
	20	2.00	7.25	0.390 ± 0.0065	96.1
	30	2.00	7.38	0.293 ± 0.0040	97.07
	60	2.00	7.07	0.284 ± 0.0035	97.16
	90	2.00	7.72	0.271 ± 0.0025	97.29
	120	2.00	7.68	0.214 ± 0.0032	97.86
	150	2.00	7.09	0.221 ± 0.0020	97.79
	180	2.00	7.57	0.245 ± 0.0040	97.55
	240	2.00	7.45	0.256 ± 0.0035	97.44
	300	2.00	7.55	0.286 ± 0.0030	97.14
	900	2.00	6.93	0.285 ± 0.0053	97.15
1440	2.00	7.61	0.301 ± 0.0020	96.99	

ตารางที่ 4.11 การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ง)

	เวลาสัมผัส (นาท)	pH น้ำเสีย ก่อนเขย่า	pH น้ำเสีย หลังเขย่า	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (mg/l)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัด ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)
				ค่าเฉลี่ย \pm SD	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	5	2.00	6.59	0.502 \pm 0.0026	94.98
	10	2.00	7.17	0.460 \pm 0.0153	95.40
	20	2.00	7.21	0.394 \pm 0.0015	96.06
	30	2.00	7.35	0.366 \pm 0.0031	96.34
	60	2.00	7.52	0.297 \pm 0.0010	97.03
	90	2.00	7.62	0.264 \pm 0.0026	97.36
	120	2.00	7.74	0.235 \pm 0.0036	97.65
	150	2.00	7.63	0.253 \pm 0.0025	97.47
	180	2.00	7.59	0.257 \pm 0.0025	97.43
	240	2.00	7.53	0.259 \pm 0.0026	97.41
	300	2.00	7.48	0.286 \pm 0.0021	97.14
	900	2.00	7.43	0.296 \pm 0.0010	97.04
	1440	2.00	7.41	0.306 \pm 0.0036	96.94

จากตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเขย่าที่ 5 นาทีจนถึง 120 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโครเมียมมากที่สุดที่เวลาการเขย่า 120 นาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.86 % หลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าลดลง โดยที่หลังจากช่วงเวลาการเขย่า 150 นาที ถึง 1440 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยที่ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 95.30-97.86%

สำหรับประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline นั้นก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเขย่าที่ 5 นาทีจนถึง 120 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโครเมียมมากที่สุดที่เวลาในการเขย่า 120 นาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.65% หลังจากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าลดลง โดยที่หลังจากช่วงเวลาการเขย่า 150 นาที ถึง 1440 นาที ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยที่ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะมีค่าอยู่ระหว่าง 94.98%-97.65% ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

จากตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่อใส่ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยขานอ้อยลงไป ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียมละลายอยู่ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะที่อยู่ในน้ำเสียดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการสัมผัสกับซีโอไลต์สังเคราะห์ และจะค่อยๆ ซาลงเมื่อเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในที่สุด จะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะมีความชันในช่วงแรกเป็นเวลาสัมผัสจะมากกว่าในช่วงหลัง และมีความชันลดลงเรื่อยๆ จนมีลักษณะเป็นเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอในที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุกันระหว่างประจุของโซเดียมกับประจุของโครเมียม และอาจมีปริมาณสูงขึ้นในบางเวลา โดยอาจเกิดจากการผกผันของการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Faust and Aly,1987) ทำให้ง่ายที่จะเกิดการผกผันของการดูดซับ

4.4.3 ผลจากการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม จะทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 10, 15 และ 20 mg/l โดยจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์พีเอชเท่ากับ 2 และใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที

พบว่าการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.12 ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย

ประเภทซีโอไลต์	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (mg/l)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (Cr ₂ O ₇ ²⁻) (mg/l)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัด (Cr ₂ O ₇ ²⁻)
		ค่าเฉลี่ย ± SD	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย Spent alkaline	10	0.204 ± 0.0010	97.96
	15	0.616 ± 0.0042	95.89
	20	0.887 ± 0.0021	95.56
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย กระตุ้นด้วย Spent alkaline	10	0.398 ± 0.0026	96.02
	15	0.692 ± 0.0015	95.39
	20	1.101 ± 0.0030	94.49

หมายเหตุ: ผลการทดลองที่ได้แสดงในภาคผนวก

จากตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมจาก 10 เป็น 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าลดลง สำหรับซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมเป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรคือ 97.96%, 95.89% และ 95.56% ตามลำดับ และส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมเป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ 96.02%, 95.39% และ 94.49% ตามลำดับ

ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์คงที่แต่ความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้นทำให้โอกาสที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกลดลงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการดูดซับโครเมียมของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด ซึ่งจะพบว่าในระยะแรกโลหะหนักจะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณรูพรุน ซึ่งมีอยู่บริเวณผิวของซีโอไลต์ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โลหะหนักเหล่านั้นก็จะจับตัวอยู่ได้เพียงแค่บริเวณผิวของซีโอไลต์เท่านั้น โดยมีลักษณะการจับตัวเป็นชั้นๆ ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งจับตัวกันไม่แน่นหรือไม่แข็งแรงมากนัก ดังนั้นจึงมีโอกาที่จะหลุดออกจากผิวซีโอไลต์ได้ง่าย ดังนั้นที่ความเข้มข้นต่ำๆ ซีโอไลต์จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมได้ดีกว่า (Biskup และ Subotic, 1998)

4.4.4 ผลจากการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐาน $K_2Cr_2O_7$ พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของโครเมียมที่ถูกดูดซับที่พีเอชเท่ากับ 2 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์อยู่ 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.1 และ 0.2 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และใช้เวลาเขย่า 120 นาที จากนั้นแยกน้ำตัวอย่างออกโดยการกรอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังตารางที่ 4.13-4.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

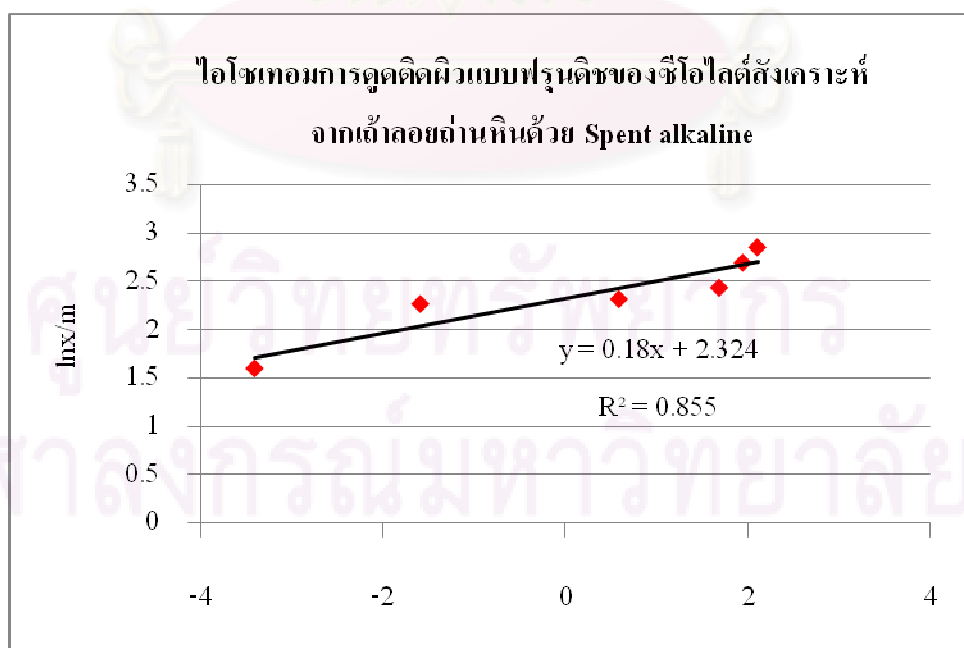
น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือเฉลี่ย $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (mg/l)	X (mg)	x/m (mg/g)	lnC	LnX/m	1/C	1/X	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัด ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)
0.00	10	0	-	-	-	-	-	0
0.01	8.251	0.17	17.49	2.11	2.86	0.12	0.057	17.49
0.02	7.005	0.30	14.97	1.95	2.70	0.14	0.066	29.95
0.04	5.409	0.46	11.48	1.69	2.44	0.18	0.087	45.91
0.08	1.802	0.82	10.25	0.59	2.32	0.55	0.097	81.98
0.1	0.203	0.97	9.77	-1.59	2.27	4.92	0.102	97.97
0.2	0.033	1.00	4.98	-3.41	1.60	30.30	0.200	99.67

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

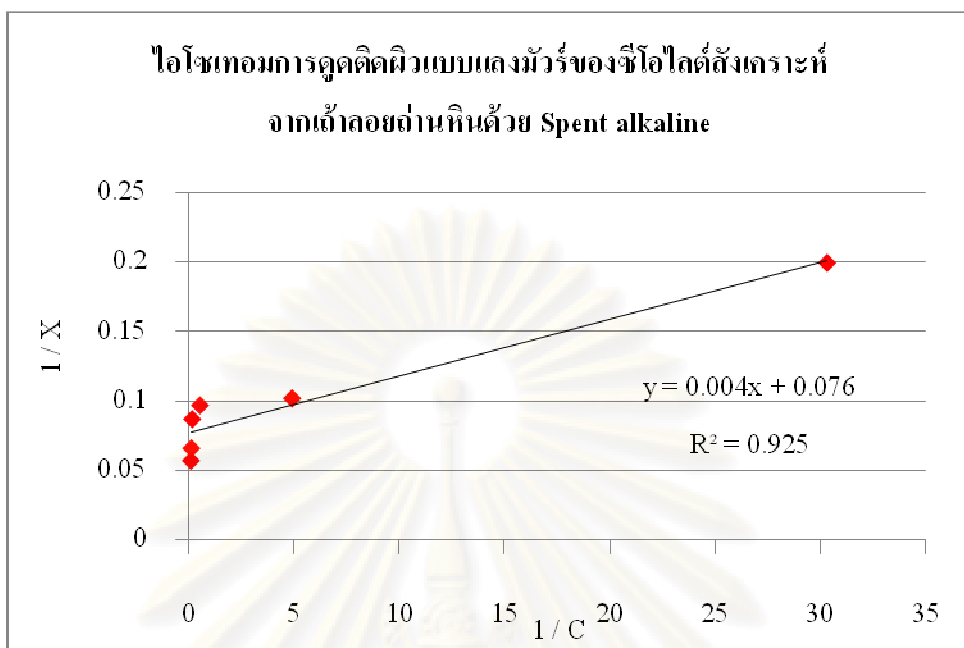
น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือเฉลี่ย $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (mg/l)	X (mg)	x/m (mg/g)	lnC	LnX/m	1/C	1/X	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัด ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)
0.00	10	0	-	-	-	-	-	0
0.01	8.498	0.15	15.02	2.14	2.70	0.11	0.067	15.02
0.02	7.511	0.25	12.44	2.01	2.52	0.13	0.080	24.89
0.04	5.932	0.41	10.17	1.78	2.31	0.16	0.098	40.68
0.08	2.097	0.79	9.87	0.74	2.29	0.47	0.101	79.03
0.1	0.398	0.96	9.60	-0.92	2.26	2.51	0.104	96.02
0.2	0.054	0.99	4.97	-2.91	1.60	18.51	0.201	99.46

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.13-4.14 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งสมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีอยู่หลายสมการแต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่ด้วยกัน 3 สมการ คือ Langmuir, BET และ Freundlich แต่สำหรับการดูดซับไอออนในสารละลายนิยมใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich มาอธิบายลักษณะการดูดซับโดยในการทดลองนี้จะเลือกใช้สมการของ Langmuir หรือเรียกอีกอย่างว่า Ideal Localized Monolayer Model มาอธิบาย เนื่องจาก สมการของ Langmuir จะใช้ได้ดีกับ Monolayer absorption และซีโอไลต์สังเคราะห์มีลักษณะเป็น Monolayer มากกว่าที่จะเป็น Multiplelayer คือการที่มีการดูดซับเพียงชั้นเดียว นอกจากนี้ ผลการทดลองการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยที่ค่าพีเอช 2 และความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม 10 mg/l ซึ่งเป็นพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหาค่า R^2 ของแต่ละสมการทั้ง Langmuir และ Freundlich แล้วพบว่าค่า R^2 ของสมการ Langmuir มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่า จึงเลือกสมการของ Langmuir มาอธิบายได้ผลดังรูปที่ 4.14-4.17

1) ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับผิวโครเมียมแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

จากสมการของ Langmuir $X = X_m b C_e / (1 + b C_e)$

จากรูปที่ 4.12 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ $1/X_m = 0.004$

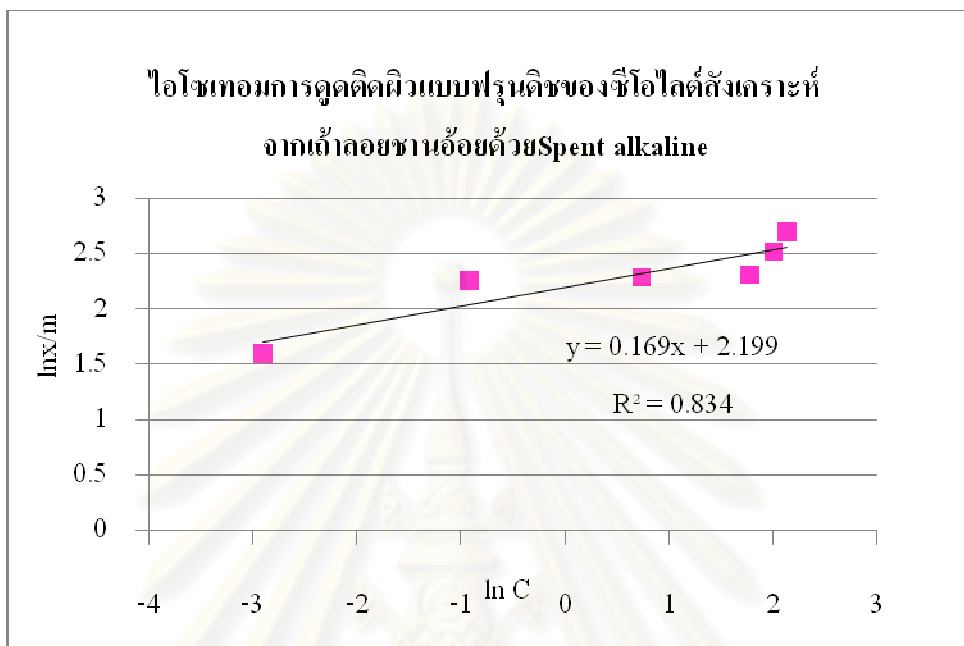
จุดตัดแกน 1/X เท่ากับ $1/X_m b = 0.076$

$$b = 0.0526$$

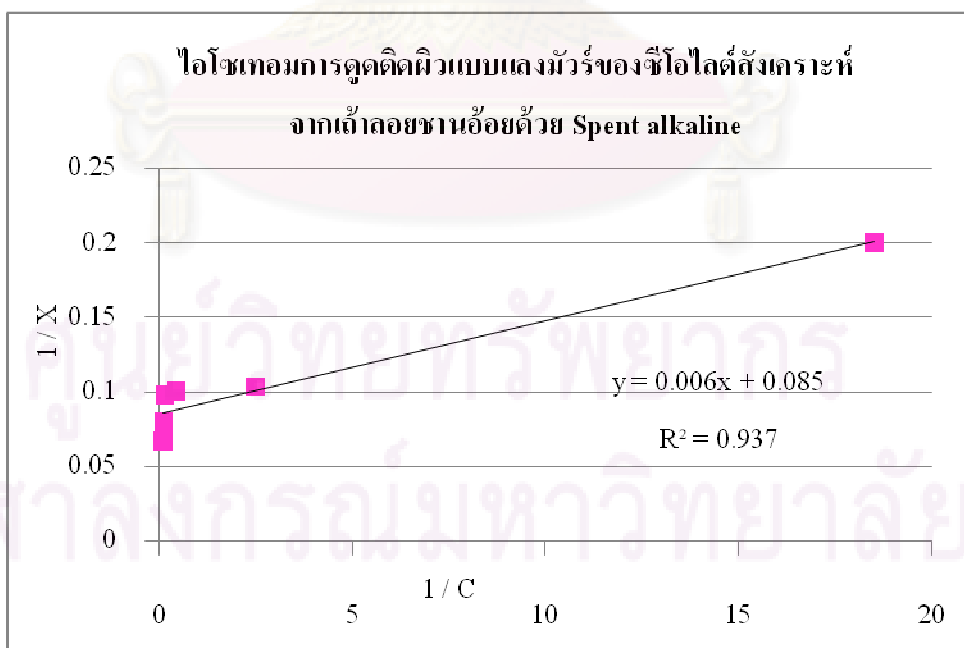
$$X = 13.15 C_e / (1 + 0.0526 C_e)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline



รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

จากสมการของ Langmuir $X = X_m b C_e / (1 + b C_e)$

จากรูปที่ 4.14 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ $1/X_m = 0.006$

จุดตัดแกน $1/X$ เท่ากับ $1/X_m b = 0.085$

$$b = 0.0706$$

$$X = 11.77 C_e / (1 + 0.0706 C_e)$$

ตารางที่ 4.15 ค่าคงที่ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยจากสมการของ Langmuir

ชนิดของซีโอไลต์สังเคราะห์	$1/X_m$	B	X_{max} (mg/g)
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	0.004	0.0526	86.17
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	0.006	0.0706	68.99

จากตารางที่ 4.15 พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดฟิวโครเมียมสูงสุดได้เท่ากับ 86.17 มิลลิกรัมและซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดฟิวโครเมียมสูงสุดได้เท่ากับ 68.99 มิลลิกรัม

4.5 ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะโครเมียมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อยกับน้ำเสียจริง

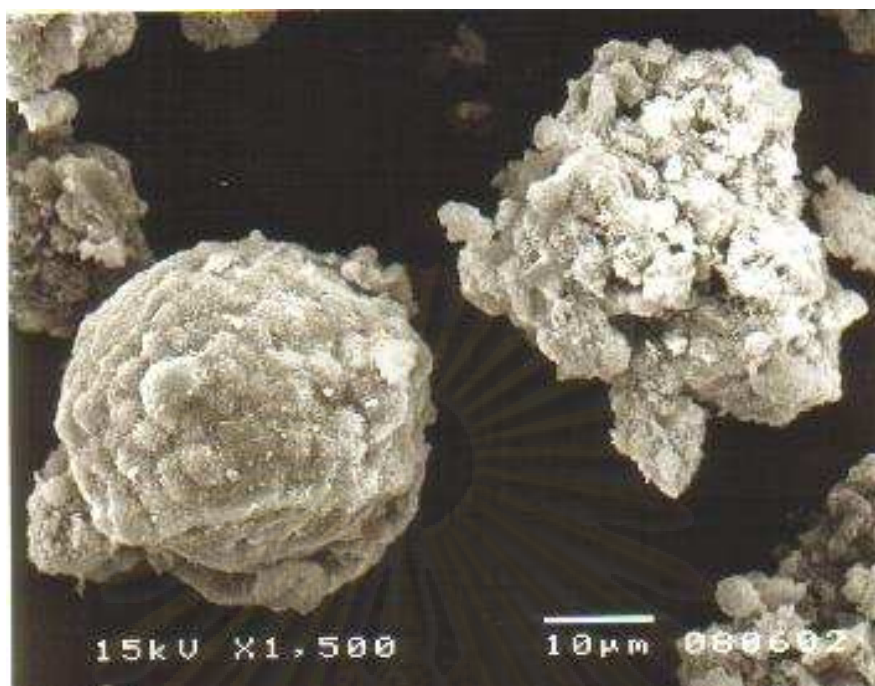
ตัวอย่างน้ำเสียจริงที่ใช้ทำการศึกษาจะเป็นน้ำเสียจากโรงงานไทยปาร์เกอร์ไรซ์ซึ่งจำกัด ซึ่งมีพีเอชเท่ากับ 5.02 โดยสภาวะที่ใช้ในการบำบัดจะใช้จากสภาวะต่างๆ ที่ได้ในหัวข้อ 4.4 ซึ่งทำการปรับค่าพีเอชเท่ากับ 2.0 (ใช้ H_3PO_4 และ NaOH ในการปรับพีเอช) และใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.1 กรัม ปริมาตรของน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่า 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาเขย่า 120 นาที แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมละลายของตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังการเขย่า ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการดูดซับโลหะโครเมียมด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ของน้ำเสียจริง

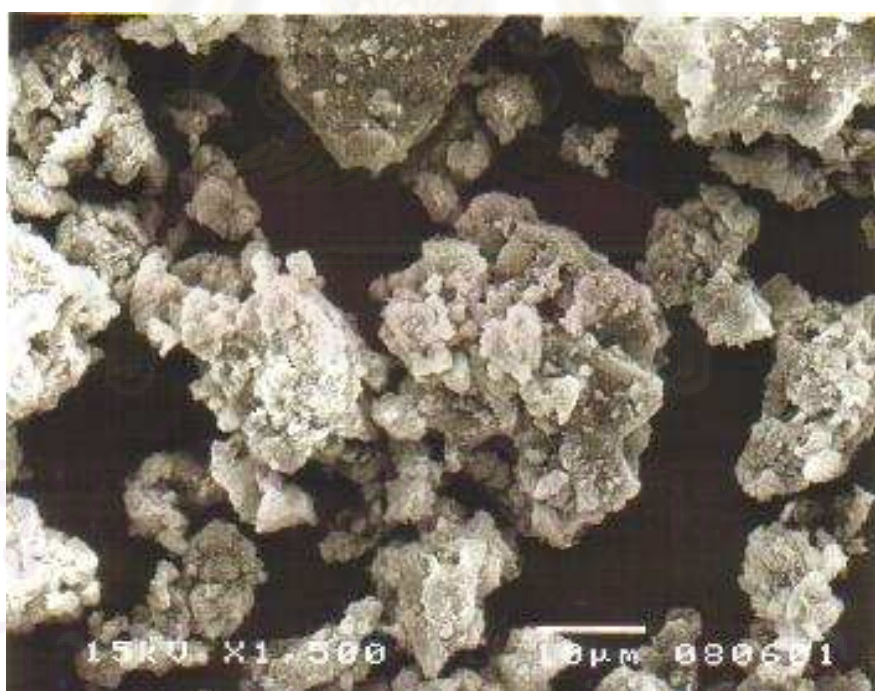
ชนิดของ ซีโอไลต์สังเคราะห์	pH ก่อนเขย่า	pH หลังเขย่า	ความเข้มข้นของ โครเมียมเฉลี่ย ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (mg/l)		เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพ การกำจัด ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)
			ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วย Spent alkaline	2.00	7.78	7.058	0.205	97.09
ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยขานอ้อยกระตุ้น ด้วยSpent alkaline	2.00	8.01	7.058	0.323	95.42

จากการศึกษาที่ได้พบว่าการดูดซับโลหะโครเมียมของน้ำเสียจริงจากโรงงานที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ จะมีประสิทธิภาพในการถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 97.09% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 95.42% เมื่อพิจารณาการดูดซับโลหะโครเมียมจากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจริงจะลดปริมาณโลหะโครเมียมลงได้มาก

เมื่อนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยขานอ้อยที่ผ่านการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียไปวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope : SEM) โดยกำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าพื้นผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสถานะต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยพื้นผิวที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์จะถูกปิดจากอนุภาคของโครเมียมที่ถูกดูดติดผิว ดังรูปที่ 4.15-4.16



รูปที่ 4.15 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังผ่านการดูดติดผิวในน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.16 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังผ่านการดูดติดผิวในน้ำเสียจริง

4.6 ผลจากศึกษาการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหินที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

ขั้นตอนนี้นำซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้แล้วจากสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมมาทำการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) โดยทำการแปรค่าของปริมาณเข้มข้นในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และแปรค่าปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้แล้วเป็น 1 และ 3 กรัม มาล้างด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เป็นเวลา 60 และ 180 นาทีตามลำดับ จากนั้นนำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วนำไปใช้ในการกำจัดโครเมียม โดยใช้สถานะที่เหมาะสมมาทำการทดลองการฟื้นฟูสภาพ (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)

ตารางที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เวลา 60 นาที

ประเภทซีโอไลต์	น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	สารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น (%)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (mg/l)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัด ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)
			ค่าเฉลี่ย \pm SD	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วย Spent alkaline	1	1	0.610 \pm 0.0085	93.90
	1	5	0.643 \pm 0.0017	93.57
	1	10	0.725 \pm 0.0021	92.75
	3	1	0.456 \pm 0.0046	95.44
	3	5	0.535 \pm 0.0017	94.65
	3	10	0.681 \pm 0.0015	93.15
	ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยกระตุ้นด้วย Spent alkaline	1	1	0.734 \pm 0.0020
1		5	0.732 \pm 0.0021	92.68
1		10	0.762 \pm 0.0035	92.38
3		1	0.654 \pm 0.0030	93.46
3		5	0.673 \pm 0.0021	93.27
3		10	0.691 \pm 0.0015	93.09

ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เวลา 180 นาที

ประเภทซีโอไลต์	น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	สารละลายไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น (%)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (mg/l)	เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัด ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)
			ค่าเฉลี่ย \pm SD	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย Spent alkaline	1	1	0.63 \pm 0.0032	93.68
	1	5	0.65 \pm 0.0010	93.49
	1	10	0.74 \pm 0.0025	92.57
	3	1	0.55 \pm 0.0026	94.47
	3	5	0.58 \pm 0.0032	94.23
	3	5	0.69 \pm 0.0025	93.06
	3	10	0.69 \pm 0.0025	93.06
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย กระตุ้นด้วย Spent alkaline	1	1	0.65 \pm 0.0021	93.45
	1	5	0.75 \pm 0.0030	92.55
	1	10	0.78 \pm 0.0030	92.25
	3	1	0.64 \pm 0.0025	93.55
	3	5	0.68 \pm 0.0020	93.22
	3	5	0.68 \pm 0.0020	93.22
	3	10	0.70 \pm 0.0020	92.97

จากตารางที่ 4.17 ได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหินที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียม โดยใช้สารละลายไฮโดรคลอริกให้ได้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้ พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline ที่ปริมาณ 3 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก 1% เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดคือ 95.44% ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline ที่ปริมาณ 3 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก 1% เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดคือ 93.46%

จากตารางที่ 4.18 ได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหินที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในกำจัดโครเมียม โดยใช้สารละลาย

ไฮโดรคลอริกให้ไลโมแลกของสารที่ถูกดูดซับไว้ พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline ที่ปริมาณ 3 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก 1 เปอร์เซ็นต์ เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดคือ 94.47% ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline ที่ปริมาณ 3 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก 1 % เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดคือ 93.55%

4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยและเถ้าลอยถ่านหินโดยทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test)

การทดลองนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจริงด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ผ่านการขึ้นรูป โดยผสมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้กับดินขาว (Kaolin) ในอัตราส่วน 1:0.2 ผสมน้ำกลั่นให้พอเหนียวขึ้น แล้วนำมาปาดลงพิมพ์ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และนำเม็ดซีโอไลต์ออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเป็น 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง เก็บใส่ตู้ดูดความชื้น (แสดงผังรูปที่ 4.17)

โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง ซึ่งได้นำสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจริงมาใช้ในการทดลอง และทำการบรรจุซีโอไลต์ที่อัดเม็ดบรรจุลงในท่ออะคริลิกใส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 เซนติเมตร จะเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์ที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดยทำการชั่งน้ำหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปก่อนการบรรจุ ผลของปริมาตรและน้ำหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่บรรจุในระดับความลึกต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.19 ทำการเติมน้ำกลั่นประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงท่อ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ โดยการเติมน้ำกลั่นผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งเพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลาหนึ่งวันก่อนการป้อนน้ำเสียจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.19 ปริมาตรและน้ำหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่บรรจุในระดับความลึกต่างๆ

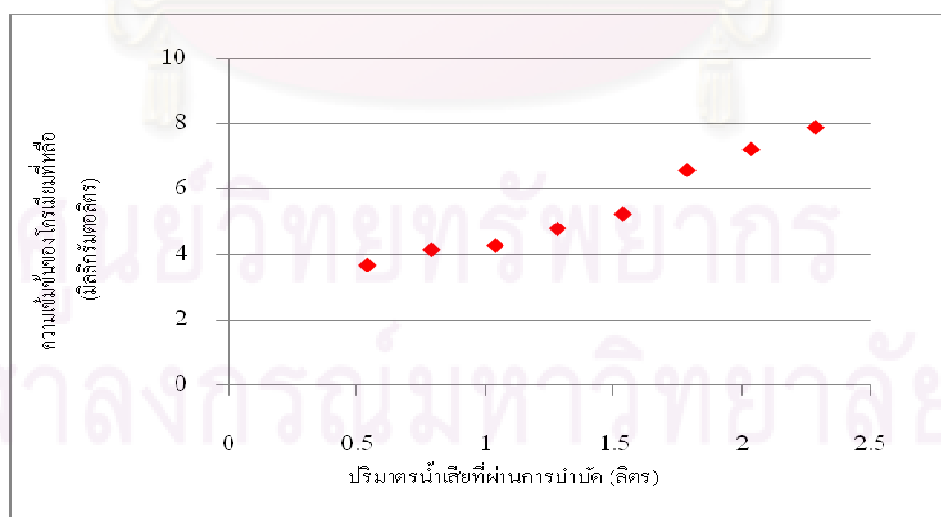
ความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ (เซนติเมตร)	ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ สังเคราะห์ (ลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)
30	0.1245	77.66
60	0.2490	155.32
90	0.3735	232.98
120	0.4983	310.64

ปรับพีเอชของน้ำเสียจริงเป็น 2.00 ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ เป็นผลจากการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ 4.4.1 วิเคราะห์หาปริมาณที่เหลืออยู่ของโครเมียม และทำการป้อนน้ำเสียจริงเข้าสู่คอลัมน์โดยการปล่อยให้ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ด้วยอัตราการไหล 0.249 ลิตรต่อชั่วโมง (วิธีคำนวณอัตราการไหลแสดงในภาคผนวก ง) หรือเวลากักเก็บในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งเท่ากับ 120 นาที ซึ่งเป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.4.2 เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ตามลำดับ ทุกๆ 1 ชั่วโมง สำหรับวัดปริมาณที่เหลืออยู่ของโครเมียมด้วย AAS หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งเบรคทูร์จ (Breakthrough curve) ระหว่างปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย โดยการคำนวณ Bed Volume ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก

ถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline

ตารางที่ 4.20 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินในระดับความลึก 30 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน เท่ากับ 0.1245 ลิตร

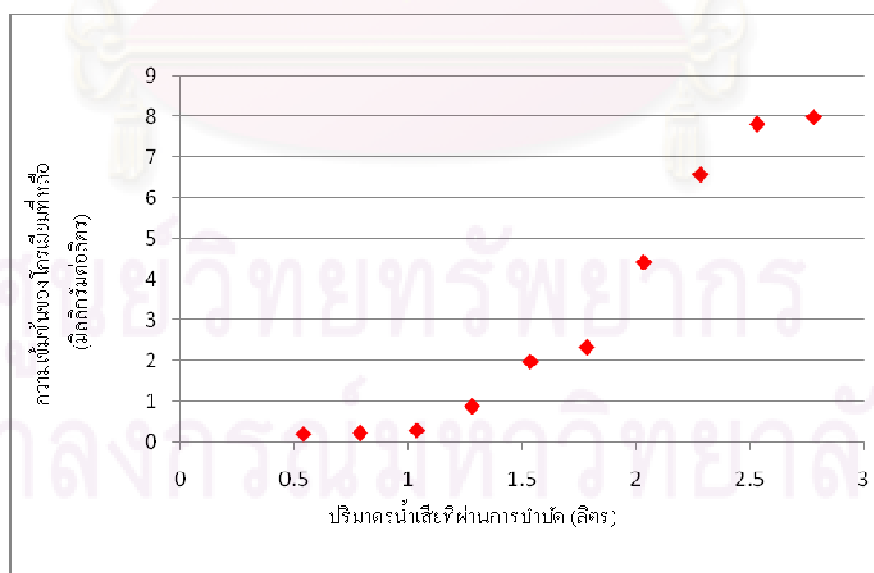
เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	4.33	2.00	6.37	3.673
3	0.788	6.33	2.00	6.48	4.142
4	1.037	8.33	2.00	6.65	4.276
5	1.28	10.33	2.00	6.48	4.789
6	1.536	12.34	2.00	6.23	5.241
7	1.785	14.34	2.00	6.13	6.587
8	2.034	16.34	2.00	5.92	7.231
9	2.284	18.34	2.00	5.84	7.896



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ตารางที่ 4.21 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินในระดับความลึก 60 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน เท่ากับ 0.2490 ลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	2.16	2.00	8.21	0.214
3	0.788	3.16	2.00	8.47	0.237
4	1.037	4.17	2.00	8.78	0.302
5	1.28	5.17	2.00	7.89	0.895
6	1.536	6.17	2.00	7.69	1.986
7	1.785	7.17	2.00	6.81	2.341
8	2.034	8.17	2.00	7.23	4.417
9	2.284	9.17	2.00	7.35	6.568
10	2.533	10.17	2.00	7.08	7.801
11	2.782	11.17	2.00	7.19	7.974

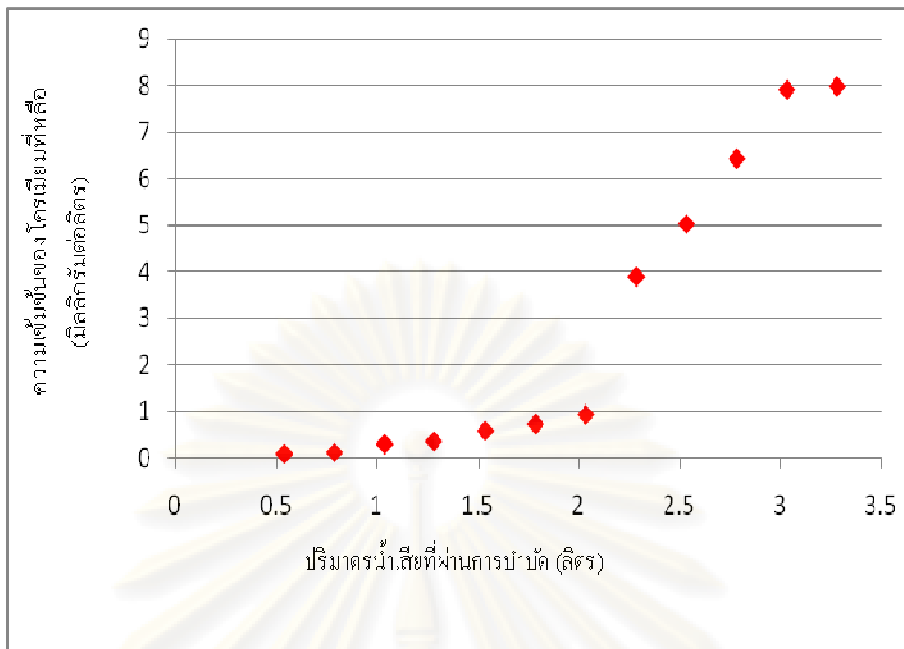


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ตารางที่ 4.22 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินในระดับความลึก 90 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน เท่ากับ 0.3735 ลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้น โครเมียมที่เหลือ (Cr ₂ O ₇ ²⁻) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	1.44	2.00	8.91	0.076
3	0.788	2.11	2.00	8.43	0.108
4	1.037	2.78	2.00	8.03	0.287
5	1.28	3.44	2.00	7.94	0.347
6	1.536	4.11	2.00	7.81	0.571
7	1.785	4.78	2.00	8.79	0.719
8	2.034	5.45	2.00	8.42	0.918
9	2.284	6.11	2.00	7.51	3.891
10	2.533	6.78	2.00	7.36	5.024
11	2.782	7.45	2.00	7.83	6.431
12	3.031	8.12	2.00	8.70	7.913
13	3.280	8.78	2.00	8.76	7.987

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

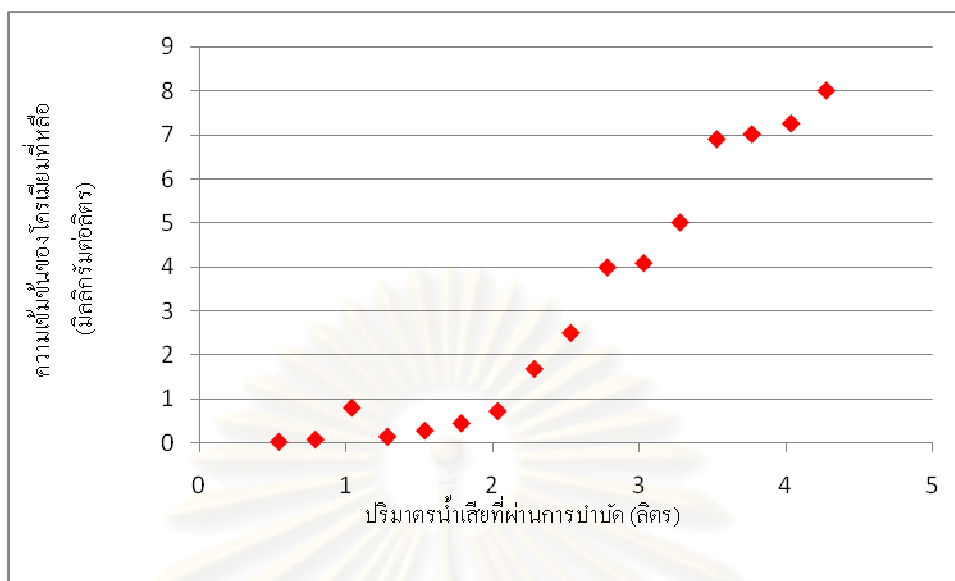


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 90 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ตารางที่ 4.23 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินในระดับความลึก 120 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน เท่ากับ 0.4983 ลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้น โครเมียมที่เหลือ (Cr ₂ O ₇ ²⁻) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	1.08	2.00	9.02	0.016
3	0.788	1.58	2.00	8.79	0.069
4	1.037	2.08	2.00	8.53	0.789
5	1.28	2.58	2.00	8.42	0.132
6	1.536	3.08	2.00	8.71	0.269
7	1.785	3.58	2.00	8.92	0.438
8	2.034	4.08	2.00	9.05	0.713
9	2.284	4.58	2.00	7.68	1.673
10	2.533	5.08	2.00	8.07	2.489
11	2.782	5.58	2.00	8.09	3.981
12	3.031	6.08	2.00	8.06	4.079
13	3.280	6.58	2.00	7.01	5.002
14	3.530	7.08	2.00	7.92	6.895
15	3.77	7.58	2.00	8.06	7.008
16	4.038	8.08	2.00	8.54	7.251
17	4.278	8.58	2.00	8.89	8.002

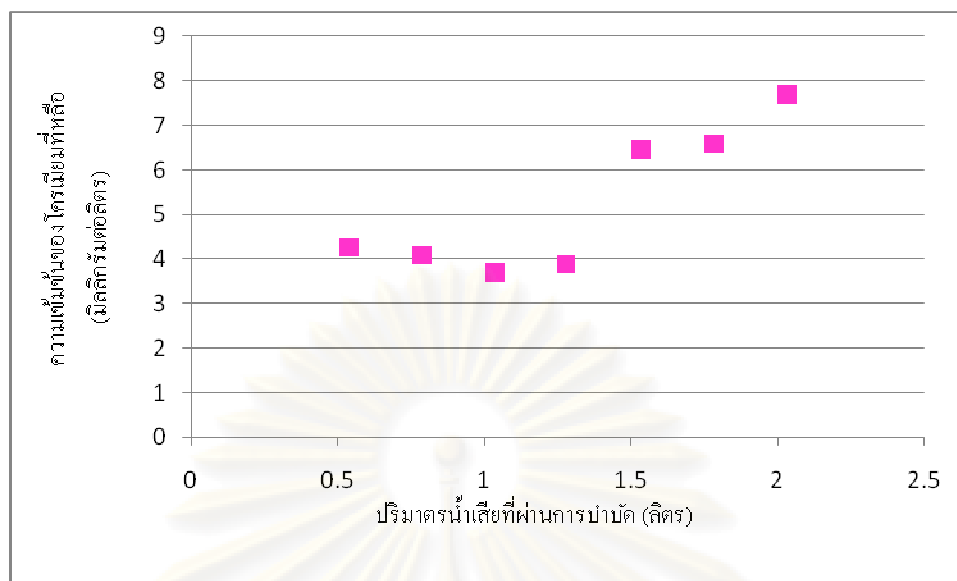
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ตารางที่ 4.24 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานฮวยในระดับความลึก 30 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานฮวย เท่ากับ 0.1245 ลิตร

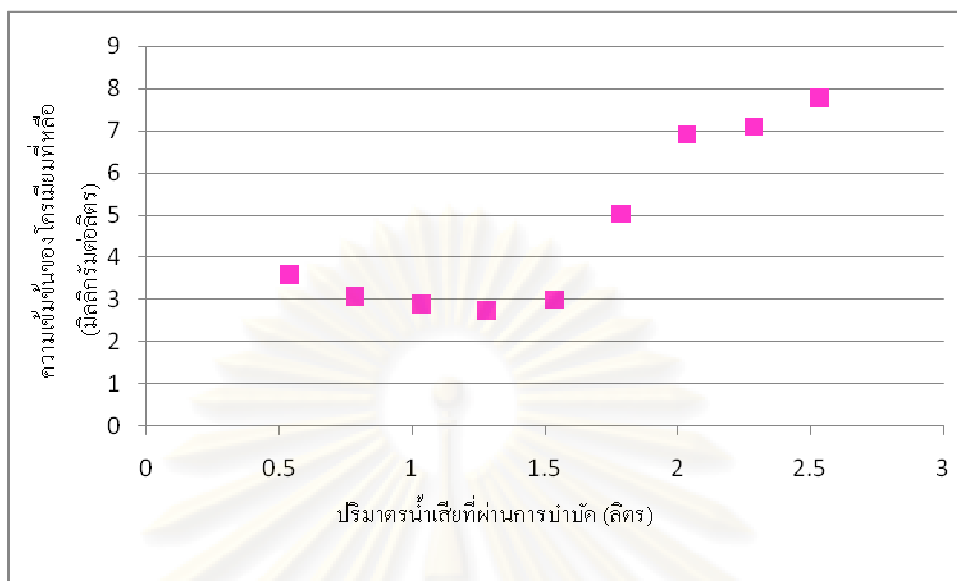
เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	4.33	2.00	6.58	4.273
3	0.788	6.33	2.00	6.98	4.102
4	1.037	8.33	2.00	7.42	3.707
5	1.28	10.33	2.00	7.51	3.897
6	1.536	12.34	2.00	7.02	6.456
7	1.785	14.34	2.00	6.89	6.587
8	2.034	16.34	2.00	7.10	7.687



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ตารางที่ 4.25 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินในระดัความลึก 60 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย เท่ากับ 0.2490 ลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	2.16	2.00	6.98	3.591
3	0.788	3.16	2.00	5.89	3.076
4	1.037	4.17	2.00	6.91	2.895
5	1.28	5.17	2.00	7.85	2.741
6	1.536	6.17	2.00	7.03	3.001
7	1.785	7.17	2.00	6.98	5.039
8	2.034	8.17	2.00	7.13	6.918
9	2.284	9.17	2.00	7.64	7.104
10	2.533	10.17	2.00	8.08	7.787

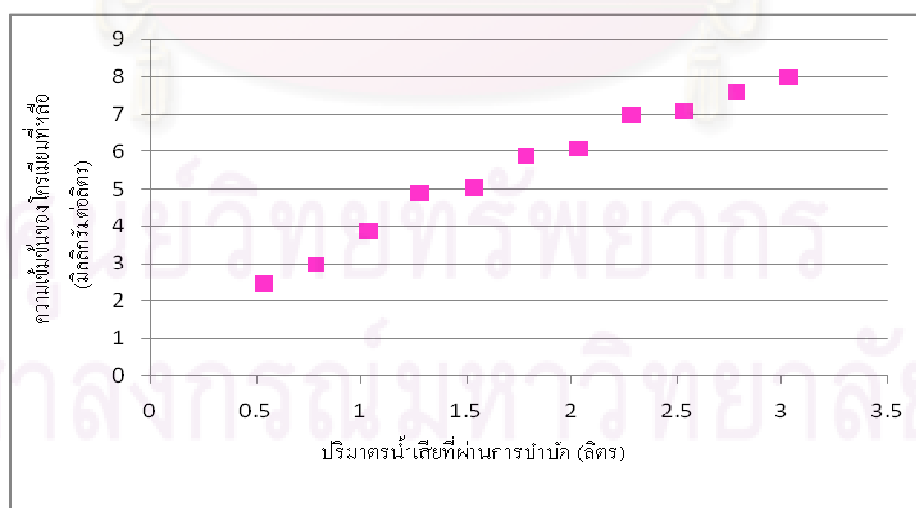


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานฮ้อยที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.26 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินในระดับความลึก 90 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย เท่ากับ 0.3735 ลิตร

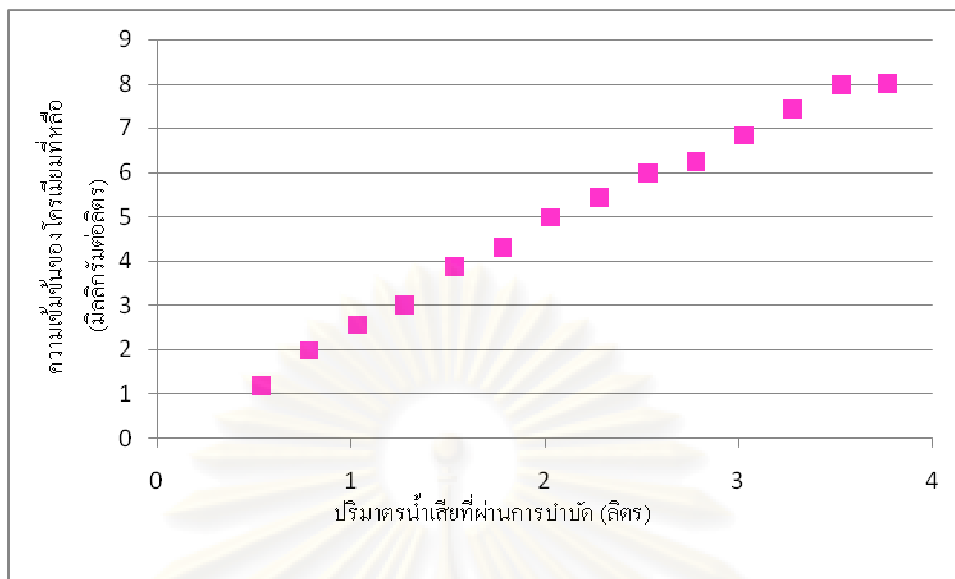
เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	1.44	2.00	6.98	2.478
3	0.788	2.11	2.00	7.03	2.981
4	1.037	2.78	2.00	7.98	3.875
5	1.28	3.44	2.00	6.78	4.892
6	1.536	4.11	2.00	8.03	5.036
7	1.785	4.78	2.00	7.92	5.892
8	2.034	5.45	2.00	8.17	6.083
9	2.284	6.11	2.00	7.32	6.983
10	2.533	6.78	2.00	7.90	7.089
11	2.782	7.45	2.00	8.02	7.589
12	3.031	8.12	2.00	8.24	7.998



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่ระดับความลึก 90 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

ตารางที่ 4.27 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแห้งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินในระดับความลึก 120 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8.015 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย เท่ากับ 0.4983 ลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอชน้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอชน้ำเสีย สุดท้าย	ความเข้มข้น โครเมียมที่เหลือ (Cr ₂ O ₇ ²⁻) (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2	0.539	1.08	2.00	7.03	1.187
3	0.788	1.58	2.00	7.53	1.984
4	1.037	2.08	2.00	7.94	2.563
5	1.28	2.58	2.00	7.98	3.002
6	1.536	3.08	2.00	8.26	3.872
7	1.785	3.58	2.00	7.92	4.302
8	2.034	4.08	2.00	8.01	4.984
9	2.284	4.58	2.00	7.42	5.438
10	2.533	5.08	2.00	7.74	5.982
11	2.782	5.58	2.00	7.34	6.235
12	3.031	6.08	2.00	8.01	6.831
13	3.280	6.58	2.00	7.89	7.421
14	3.530	7.08	2.00	8.05	7.982
15	3.77	7.58	2.00	8.87	8.009



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริงที่ผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

จากตารางที่ 4.20 - 4.27 แสดงความสามารถในการกำจัดปริมาณโครเมียมของคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline ณ จุดยุติ ที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่าความสามารถในการกำจัดปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานน้ำเสียจริงที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร เท่ากับ 2.28, 2.78, 3.28 และ 4.27 ลิตร ตามลำดับ แสดงปริมาตรของน้ำในหน่วย Bed Volume จะได้ 18.34, 11.17, 8.78 และ 8.58BV ตามลำดับ ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดปริมาณโครเมียมของคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline ณ จุดยุติ ที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่าความสามารถในการกำจัดปริมาณโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานน้ำเสียจริงที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร เท่ากับ 2.03, 2.53, 3.03 และ 3.77 ลิตร ตามลำดับ แสดงปริมาตรของน้ำในหน่วย Bed Volume จะได้ 16.34, 10.17, 8.12 และ 7.58BV ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการกำจัดซีโอไลต์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การสังเคราะห์ซีโอไลต์

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือที่ความเข้มข้น 3.0 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 473.74cmol/kg ส่วนสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือที่ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 286.68cmol/kg

ชนิดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ Zeolite P1 และ Unnamed zeolite ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ Zeolite P1

2) การศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

- การหาพีเอชที่เหมาะสม

ที่พีเอชเท่ากับ 2 เป็นพีเอชที่เหมาะสมของการศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียด่างเคราะห์ เนื่องจากเป็นพีเอชที่โครเมียมยังตกตะกอนไม่มากนัก ถ้าเลือกพีเอชสูงกว่านี้จะเป็นการตกตะกอนของโครเมียมมากกว่าการดูดซับ

- การหาช่วงเวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของการศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียด่างเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือที่เวลาสัมผัส 120 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียด่างเคราะห์สูงสุดเท่ากับ 97.86

เปอร์เซ็นต์ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือที่เวลาสัมผัส 120 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุดเท่ากับ 97.65 เปอร์เซ็นต์

- การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยและจากถ้ำลอยซานอ้อยมีค่าลดลงตามลำดับ ดังนั้นที่ความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย

- การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมของซีโอไลต์สังเคราะห์

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมที่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 10 mg/l พีเอชเท่ากับ 2 พบว่าสอดคล้องกับสมการของ Langmuir โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยซานอ้อยในปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับโครเมียมสูงสุดได้เท่ากับ 86.17 มิลลิกรัม ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดซับโครเมียมสูงสุดได้เท่ากับ 68.99 มิลลิกรัม ซึ่งจะเห็นว่าซีโอไลต์ในปริมาณที่เท่ากัน คือ 1 กรัม ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมได้มากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย

3) การศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจริง

ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจริง โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 97.09% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 95.42% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจริงสามารถลดปริมาณโลหะโครเมียมลงได้คือ

4) การศึกษาการฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากถ้ำลอยซานอ้อยและถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมแล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดโครเมียม พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent

alkaline ที่ปริมาณ 3 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก 1% เป็นเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดคือ 95.44% ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline ที่ปริมาณ 3 กรัม ใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก 1% เป็นเวลา 180 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดคือ 93.55%

5) การศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจริงโดยการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจริงของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดโดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งความสูง 120 เซนติเมตร โดยได้ทำการปรับพีเอชในน้ำเสียจริงเป็น 2.00 โดยปล่อยน้ำเสียไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างด้วยอัตราการไหล 0.249 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าเวลาในการใช้งานของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ในการกำจัดโครเมียม เท่ากับ 9 11 13 และ 17 ชั่วโมง ตามลำดับ และการบำบัดน้ำเสียได้เท่ากับ 18.34 11.17 8.78 และ 8.58 BV ตามลำดับ ในขณะที่ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ในการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 8 10 12 และ 15 ชั่วโมง และสามารถบำบัดน้ำเสียได้เท่ากับ 16.34 10.17 8.12 และ 7.58 BV ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

- 1) ควรมีการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งจากผลผลิตจากการเกษตรอื่นๆมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์
- 2) ควรศึกษาการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ไปกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบในการทำประปา เพื่อลด THMs ในน้ำประปา
- 3) ควรมีการศึกษาเถ้าลอยที่เหลือจากที่ไม่ผ่านการร่อนมาเป็นส่วนประกอบแล้วนำกลับมาพัฒนาใช้เป็นวัสดุในการทำอิฐเบา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและ ผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. 2547. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2530. หลักเคมี 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ทรงศินา จรัสรัตนมงคล. 2542. การผลิตซีโอไลต์ด้วยดินเบาให้เป็นสารดูดซับ และการทดลอง บำบัดน้ำเสียในนาุ้ง. งานค้นคว้าอิสระวิทยาศาตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2526. ซีโอไลต์กับงานอุตสาหกรรม. ประโยชน์ของกากของเสียจากโรงงาน ไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- ประกฤต เลิศจรัสพร้อมดี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เถ้า ยางข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะ แวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะ ปุฒิเวคินทร์. 2545. การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอย ถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ. 2547. การใช้น้ำค้างที่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมนมดำในกระบวนการ ตกตะกอนตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมการหลอมแบตเตอรี่เก่า. วิทยานิพนธ์ปริญญา โทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เลิศ รักษ์สันติชาติ. 2545. การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ที่ใช้แล้วสำหรับการดูดซับเอทีเอ็นไกลคอลล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชาญ ภูพัฒน์. 2526. การใช้ซีเมนต์ในงานผลิตปูนซีเมนต์. อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์.
กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

วิภาฯ บุญเจริญสุข. 2537. รายงานปัญหาพิเศษ เรื่อง ซีโอไลท์. คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2542. คู่มือผู้ควบคุมและปฏิบัติงานระบบบำบัดมลพิษโรงงาน.
กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท).

สัญญาถ สินขวรายัน. และ สมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลท์จากเถ้าลอยซึ่งเกิด
จากการเผาไหม้ถ่านหิน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี
เทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล. 2549. การสังเคราะห์ซีโอไลท์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยเพื่อ
กำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์. 2543. การกำจัดโครเมียม (ประจุ+6) ในน้ำเสียโดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนิรุทธ์ ชงไชย. 2528. การใช้ประโยชน์ซีเมนต์ในงานวิศวกรรม. เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่
ที่ 3 เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบท. ขอนแก่น.

อัญชลี จันทวรรณนกุล. 2535. การกำจัดโครเมียมโดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไคซ์เบด.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

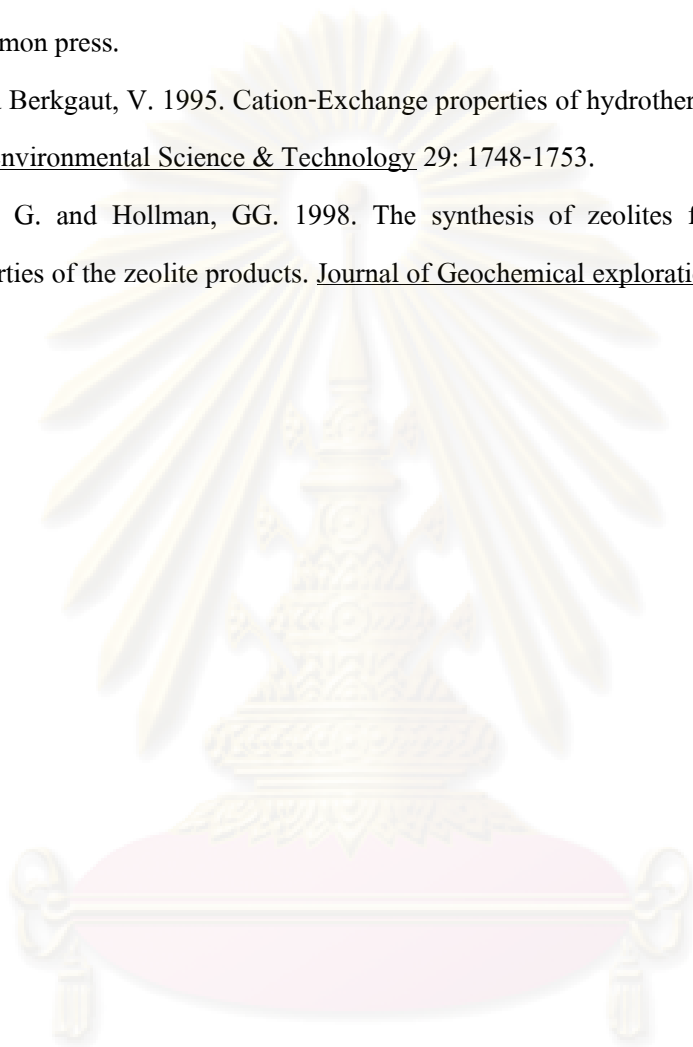
- Amrhein, C., Haghnia, GH., Kim, TS., Morher, PA., Amanios and Delta, T.L. 1996. Synthesis and Properties of Zeolites from Coal Fly ash. Environmental Science & Technology 30: 735-742.
- Atkins, M., Glasser, FP. and JACK, JJ. 1995. Zeolite-P in Cements-its Potential for Immobilizing Toxic and radioactive-waste species. Waste Management 15:127-135.
- Breck, D.W. 1974. Zeolite Molecular Sieve : Structure, Chemistry, and Use. New York : John Wiley & Sons.
- Curkovic, L., Cerjan-Stefanovic, S. and Filipan, T. 1996. Metal Ion Exchange and Modified Zeolites. Wat. Res. 31 (6): 1379-1382.
- Dyer, A. 1988. Introduction to Zeolite Molecular Sieves. New York : John Wiley & Sons : 69-97.
- Eckenfelder W.W. 1989. Industrial Water Pollution Control. 2 nd ed. New York : MCGraw – Hill.
- Faust, S.D., and Aly O.M. 1987. Adsorption processes for water treatment. Boston : Butterworths Publisher.
- Hollman, G.G., Steenbruggen, G. and Janssen-Jurkovicova, M. 1999. A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. Fuel 78: 1225-1230.
- LopezSalins, E., Salas, P., Schifter, I., Moran, M., Castillo, S. and Mogica, E. 1997. Reduction of NO by CO using a zeolite catalyst obtained from fly ash. Studies in Surface Science and Catalyst 105: 1565-1570.
- Mavros, P., Zouboulis, A.I., and Lazaridis, N.K. 1993. Removal of Metal Ion from Wastewater The Case of Nickel. Envi. Tech. 14:83-93
- Mier, M.V., Callejas, R.L., Gehr, R., Blanca, E., Cisneros, J. and Alvarez, P.J.J. 2000. Heavy Metal Removal with Mexican Clinoptilolite: Multi-Component ionic Exchange. Wat. Res. 35 (2): 373-378.
- Patterson J. W. 1985 Industrial Wastewater Treatment Technology. Boston.
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A. and Lopezsofer, A. 1997. Synthesis of Na-Zeolites from fly ash. Fuel :793-799.

Reed, B. E., Jamil, M. and Thomas, B. 1996. Effect of pH, empty bed contact time and hydraulic loading rate on leading rate on lead removal by granular activated carbon columns. Water Environmental Research 68(5): 877-882.

Rochow E.G. and Abel E.W. 1973. The Chemisting of germanium,tin and lead. Oxford : Pergamon press.

Singer, A. and Berkgaut, V. 1995. Cation-Exchange properties of hydrothermally treated coal fly-ash. Environmental Science & Technology 29: 1748-1753.

Steenbruggen, G. and Hollman, GG. 1998. The synthesis of zeolites from fly ash and the properties of the zeolite products. Journal of Geochemical exploration 62: 305-309.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

วิธีหาความเข้มข้นของ Spent alkaline

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีหาความเข้มข้นของ Spent alkaline โดยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (potassium hydrogen phthalate) ซึ่งเป็นสารมาตรฐานปฐมภูมิ (ศุภชัย ไร่เทียม, 2543)

วิธีเตรียมสารละลาย

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (potassium hydrogen phthalate, KHP)

เตรียมโดยนำโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตชนิดรีเอเจนต์เกรดไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งให้ได้น้ำหนักของสารที่แน่นอน และมีมวลอยู่ระหว่าง 2.0 – 2.4 กรัม นำมาละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต จากสูตร

$$\begin{array}{l} \text{ความเข้มข้นของ KHP} \\ \text{(โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} \end{array} = \frac{m}{204.23} \times \frac{1000}{100}$$

เมื่อ m คือ มวลของ KHP เป็นกรัม

204.23 คือ มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

2. สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) เข้มข้น 0.5 กรัมต่อ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. เตรียมสารละลาย Spent alkaline โดยเจือจาง 1:100 ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ Spent alkaline

1. บรรจุสารละลาย Spent alkaline ที่เตรียมไว้ลงในบิวเรต บันทึกระดับของสารละลายบนสเกลก่อนการไทเทรต
2. ใช้บิวเรต 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดูดสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ใต้ลงในขวดชมพูขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอินลงไป แล้วเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอินลงไป 2 – 3 หยด เขย่าสารละลายที่ได้ แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลาย Spent alkaline จากบิวเรตจนได้สีชมพูอ่อนเกิดขึ้น บันทึกระดับของสารละลาย Spent alkaline บนสเกลของบิวเรตอีกครั้ง และหาปริมาตรของสารละลาย Spent alkaline ที่ใช้
3. ทำการไทเทรตซ้ำอีกครั้ง หาปริมาตรของสารละลาย Spent alkaline ที่ใช้จะต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าเกินต้องทำการไทเทรตซ้ำอีกครั้ง นำปริมาตรของสารละลาย Spent alkaline ที่ใกล้เคียงกันสองค่ามาหาค่าเฉลี่ย นำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline จากสูตร

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline} = \frac{25}{V} \times M$$

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของ KHP (โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)

V คือ ปริมาตรของ Spent alkaline ที่ใช้ในการไทเทรต (ลูกบาศก์เดซิเมตร)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (มนตรี ทองคำ, 2542) มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องกวนไฟฟ้าพร้อมแท่งแม่เหล็ก
2. นาฬิกาจับเวลา
3. กระบอกนิตยา (ปราศจากเข็มนิตยา) ขนาด 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร
4. เครื่องกรองสุญญากาศ
5. กระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 42
6. ขวดรูปชมพู่
7. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม (Calcium Exchange Solution) 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต 2.938 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้ววัดปริมาตรขนาด 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้ได้ 10.0 ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก) และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตรขนาด 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร
3. ไฮดรอกซีแนฟทอลลูอินดิเคเตอร์
4. สารละลายบัพเฟอร์
สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 87.5 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก) 570 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตรขนาด 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร
5. สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ 0.005 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
ชั่งอีดีทีเอไดโซเดียมไดไฮเดรต (disodium ethylenediaminetetraacetate dihydrate) 3.743 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตร 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

สอบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอโดยชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต (ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์) ประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอนจนถึง 0.0001 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วปริมาตรขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร ใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายนี้ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดแก้วรูปกรวยขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัพเฟอร์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อมีสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ จากสูตร

$$\text{สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ} = \frac{m}{V \times 100.09 \times 50}$$

(โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)

เมื่อ m คือ มวลของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นมิลลิกรัม

V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัมในครุชชีเบลพร้อมฝา ให้ทราบมวลแน่นอน แล้วนำครุชชีเบลและฝาไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปิดฝาครุชชีเบลนำออกจากเตาเผา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์จนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่ง คำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา

จากสูตร

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

เมื่อ m_1 คือ มวลตัวอย่างก่อนเผา เป็นกรัม

m_2 คือ มวลตัวอย่างหลังเผา เป็นกรัม

2. ถ่ายสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่แท่งแม่เหล็ก ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องกวนไฟฟ้า เปิดเครื่องกวนไฟฟ้าให้หมุนด้วยความเร็วเกิน 600 รอบต่อนาที เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 นาที

3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน แล้วถ่ายใส่ลงในสารละลาย แลกเปลี่ยนแคลเซียม (ข้อ 2) อย่างรวดเร็วพร้อมกับจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาทันที เมื่อครบเวลา 15 นาที ใช้กระบอกจี้ดยาคูดสารละลายแขวนลอย 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร กรองอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาไม่เกิน 15 วินาที ด้วยเครื่องกรองสูญญากาศและกระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 42 สารละลาย ที่กรองได้ต้องใส ถ้าไม่ใสให้ปฏิบัติใหม่ตั้งแต่ข้อ (1) จนถึงเมื่อสารละลายที่กรองได้ต้องใส

4. ใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายส่วนใสที่กรองได้ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดแก้ว รูปกรวยขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อ ลูกบาศก์เดซิเมตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัพเฟอร์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีเนฟฟอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อมี สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน

5. ทำเบลนด์เปรียบเทียบ ถ้าปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 2 ครั้ง ต่างกันเกิน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ทำเบลนด์เปรียบเทียบใหม่

การคำนวณ

คำนวณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม จากสูตร

$$\text{ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม} = \frac{(V_2 - V_1 \times c \times 100.09 \times 25) \times 100}{m(100 - L)}$$

มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลาย ตัวอย่างเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ ที่ใช้ในการไทเทรตกับเบลนด์ เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

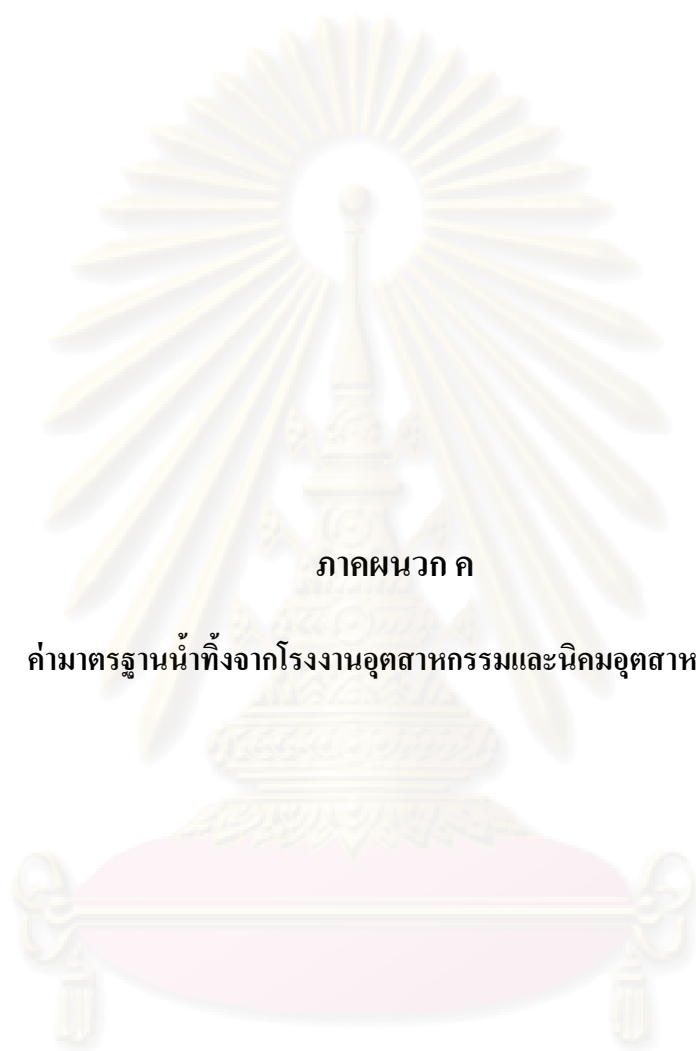
C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอเป็น โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

100.09 คือ มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต

m คือ มวลของตัวอย่างเป็นกรัม

L คือ น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา เป็นร้อยละ

หมายเหตุ : ตัวอย่างที่ใช้ก่อนนำมาวิเคราะห์ ต้องเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (ที่ปราศจากซิลิกาเจล) ที่มี ภาชนะบรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปวิเคราะห์



ภาคผนวก ค

คำมาตรฐานนำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก. ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือล่งสู่ทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก.ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
9. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
10. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร (แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.)	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
16.1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
16.2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
16.3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16.4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
16.5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
16.6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
16.8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
16.10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	- Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
16.11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	- Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
16.12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	- Atomic Absorption Cold Vapour Techique

ที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) วันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



ภาคผนวก ง

ผลปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง1. ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังผ่านการดูดซับด้วย ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย

ประเภท ซีโอไลต์	พีเอช เริ่มต้น	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การกำจัด (Cr ₂ O ₇ ²⁻) (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย Spent alkaline	2.01	0.187	0.182	0.180	0.183	98.17
	3.02	0.216	0.211	0.214	0.214	97.86
	4.01	0.498	0.504	0.501	0.350	96.50
	5.03	0.785	0.780	0.790	0.785	92.15
	6.02	0.798	0.802	0.796	0.799	92.01
	7.01	0.814	0.810	0.812	0.812	91.88
	7.01	0.814	0.810	0.812	0.812	91.88
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยชานอ้อย กระตุ้นด้วย Spent alkaline	2.01	0.401	0.397	0.396	0.398	96.02
	3.02	0.457	0.455	0.458	0.456	95.44
	4.01	0.489	0.492	0.490	0.490	95.10
	5.03	0.698	0.701	0.703	0.700	93.00
	6.02	0.799	0.802	0.805	0.802	91.98
	7.01	0.886	0.882	0.893	0.887	91.13
	7.01	0.886	0.882	0.893	0.887	91.13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง2. การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

	เวลาสัมผัส (นาที)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพการกำจัด ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	5	0.468	0.479	0.462	0.470	95.30
	10	0.412	0.420	0.418	0.417	95.83
	20	0.397	0.384	0.391	0.390	96.1
	30	0.298	0.291	0.291	0.293	97.07
	60	0.284	0.287	0.280	0.284	97.16
	90	0.271	0.269	0.274	0.271	97.29
	120	0.217	0.211	0.216	0.214	97.86
	150	0.221	0.223	0.219	0.221	97.79
	180	0.246	0.249	0.241	0.245	97.55
	240	0.259	0.252	0.256	0.256	97.44
	300	0.289	0.286	0.283	0.286	97.14
	900	0.283	0.291	0.281	0.285	97.15
	1440	0.299	0.303	0.301	0.301	96.99

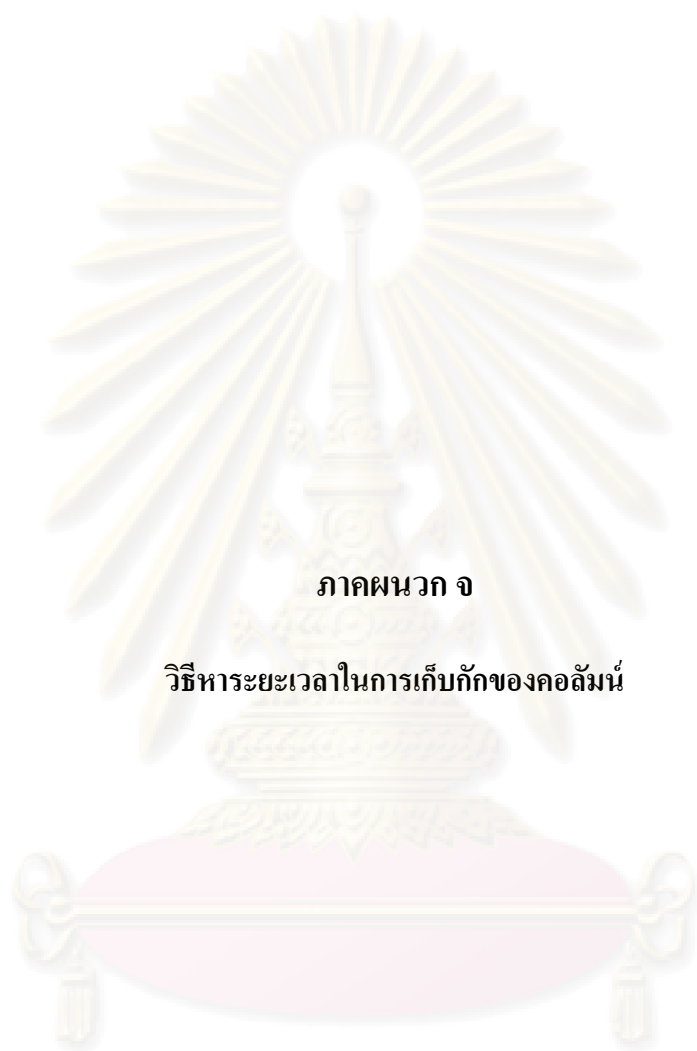
ตาราง ง3. การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่ กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

	เวลา สัมผัส (นาที)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การกำจัด (Cr ₂ O ₇ ²⁻) (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ซีโอไลต์ สังเคราะห์ จาก ถ้ำลอย ชานอ้อย ที่กระตุ้น ด้วย Spent alkaline	5	0.499	0.503	0.504	0.502	94.98
	10	0.448	0.454	0.477	0.460	95.40
	20	0.394	0.392	0.395	0.394	96.06
	30	0.367	0.363	0.369	0.366	96.34
	60	0.296	0.298	0.297	0.297	97.03
	90	0.267	0.263	0.262	0.264	97.36
	120	0.232	0.234	0.239	0.235	97.65
	150	0.253	0.256	0.251	0.253	97.47
	180	0.257	0.259	0.262	0.257	97.43
	240	0.269	0.270	0.274	0.259	97.41
	300	0.288	0.284	0.287	0.286	97.14
	900	0.295	0.297	0.296	0.296	97.04
	1440	0.302	0.307	0.309	0.306	96.94

ตาราง ง4. ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์
ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย

ประเภท ซีโอไลต์	ความเข้มข้น เริ่มต้นของ โครเมียม (mg/l)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน	10	0.203	0.205	0.204	0.204	97.96
กระตุ้นด้วย Spent alkaline	15	0.619	0.611	0.617	0.616	95.89
	20	0.889	0.885	0.886	0.887	95.56
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยชานอ้อย	10	0.401	0.397	0.396	0.398	96.02
กระตุ้นด้วย Spent alkaline	15	0.694	0.692	0.691	0.692	95.39
	20	1.098	1.101	1.104	1.101	94.49

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

วิธีหาระยะเวลาในการเก็บกักของคอสมัน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาระยะเวลาในการเก็บกักของคอลัมน์

จากผลการทดลองแบบ batch พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมของน้ำเสียจริงโดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย คือ เวลา 2 ชั่วโมง นำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาในการเก็บกักของคอลัมน์ที่มีขนาดภายใน 2.3 เซนติเมตร ความยาว 120 เซนติเมตร โดยคำนวณได้ดังนี้

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A)} = \pi D^2 / 4 \quad \text{m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของคอลัมน์ (V)} &= A \times h \\ &= \pi D^2 / 4 \times h \quad \text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{อัตราการไหล (Q)} = \text{อัตราการกรอง (V)} \times \text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A)}$$

$$Q = (\pi D^2 / 4) \times V \quad \text{m}^3 / \text{hr}$$

ต้องการให้มีเวลาเก็บกัก 2 ชั่วโมง ดังนั้น เวลาเก็บกัก (t) = ปริมาตรคอลัมน์ (V) / อัตราการไหล (Q)

$$2 \text{ hr} = \frac{A \times h}{(\pi D^2 / 4) \times V}$$

$$V = \frac{(\pi D^2 / 4) \times h}{(\pi D^2 / 4) \times 2}$$

$$= 1.2 / 2$$

$$= 0.6 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$$

$$\text{อัตราการไหล (Q)} = \text{อัตราการกรอง (V)} \times \text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A)}$$

$$Q = 0.6 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{hr} \times \pi (0.023)^2 / 4 \text{ m}^2$$

$$= 2.49285 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{hr}$$

$$\text{หรือ} \quad = 0.00415 \text{ L} / \text{min}$$

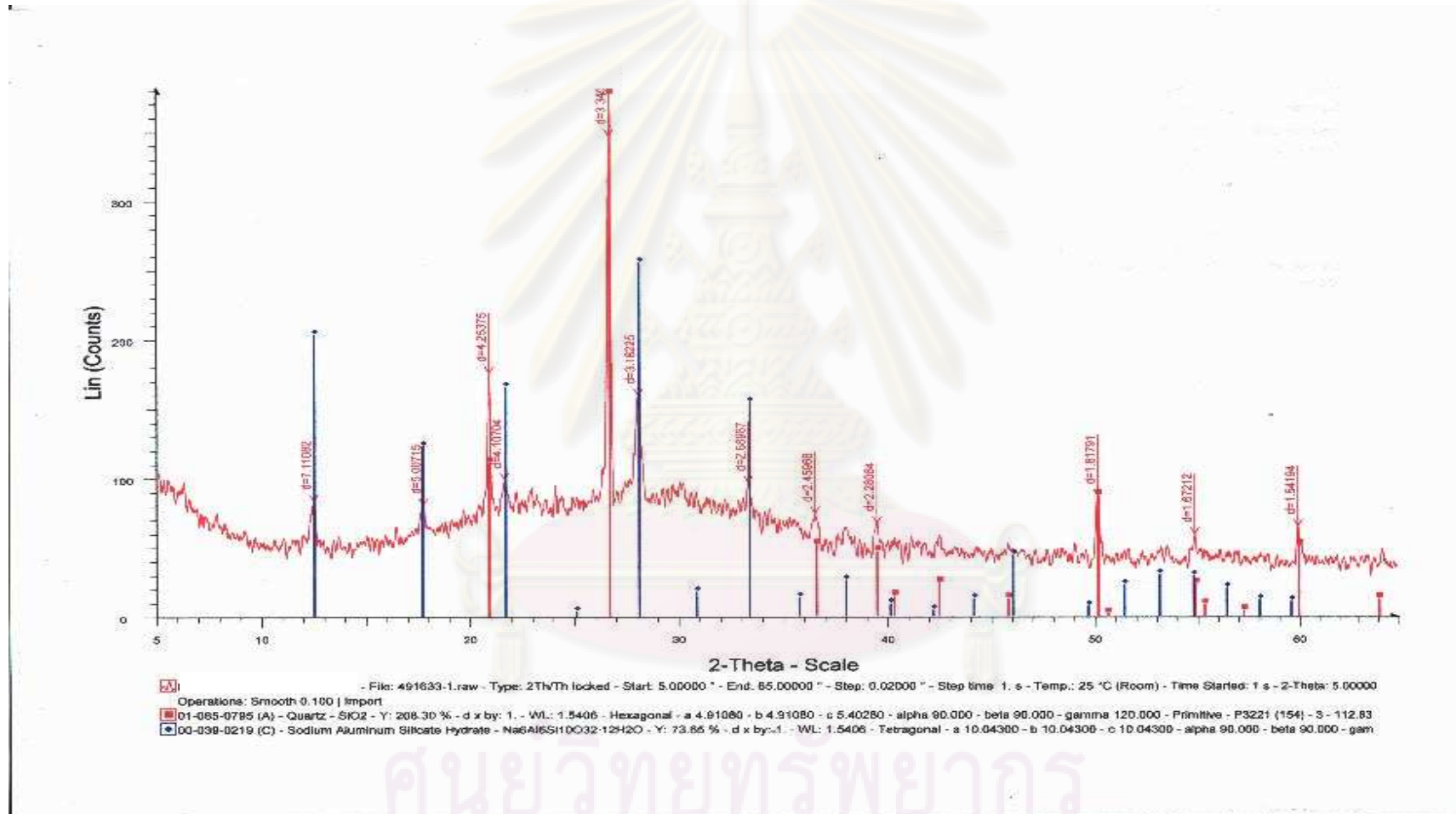
ดังนั้นวัดอัตราการไหลโดยใช้กระบอกตวงใน 1 นาที น้ำต้องไหลเป็นปริมาตร 4.15 มิลลิลิตร



ภาคผนวก ฉ

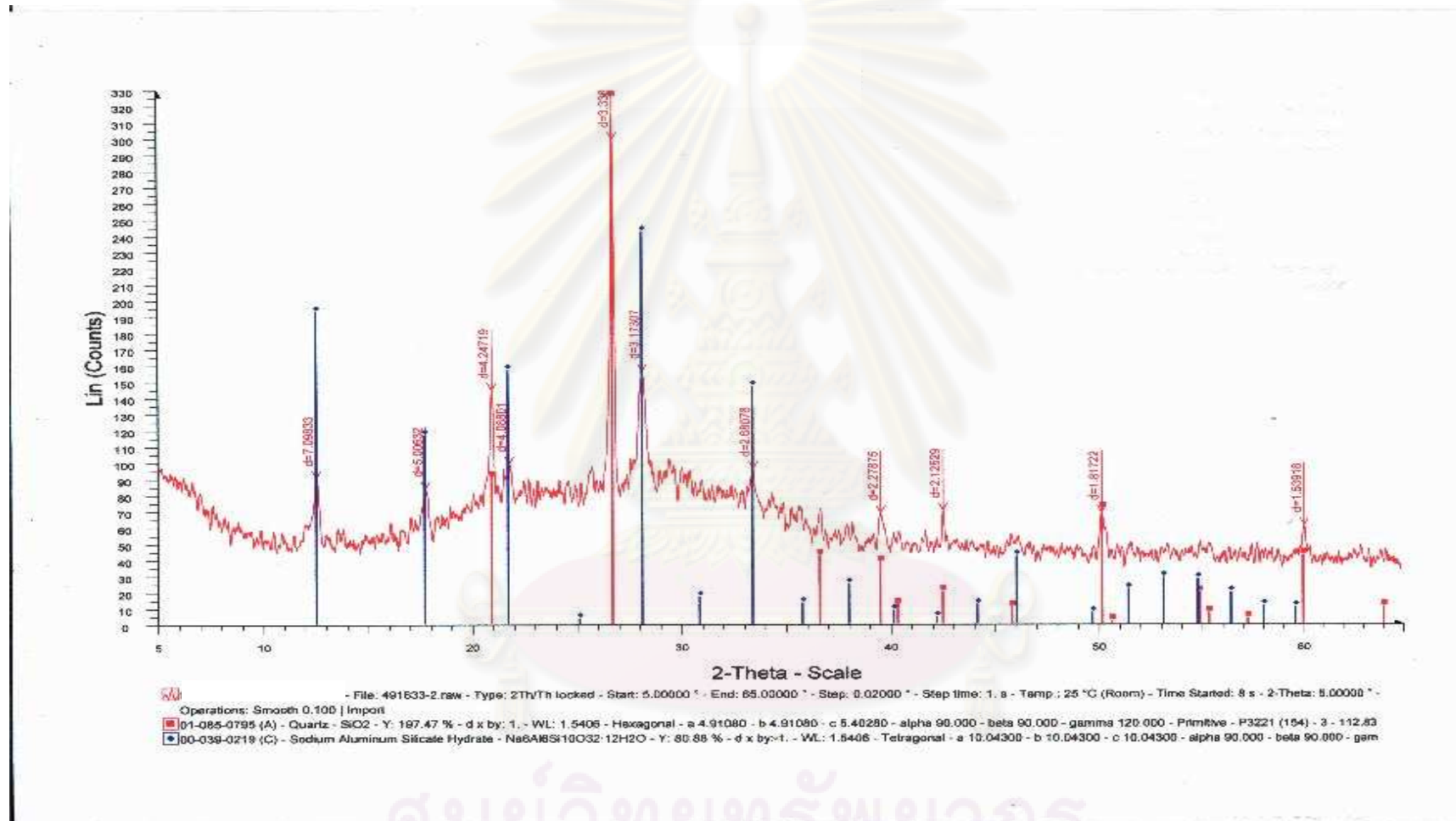
ผลการวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 3.0 M 80°C 4 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่จ.2 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์คิฟเฟรคชันของแก้วลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 2.5 M 80°C 4 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว เพ็ญพร ฉายะวานิชย์ เกิดวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนพระหฤทัยคอนแวนต์ และระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากคณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย