

การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน  
และจากเถ้าลอยชานอ้อย



นางสาวจุฑาทิพย์ เพชรอินทร์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-5950-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF LEAD FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING ZEOLITE SYNTHESIZED  
FROM COAL FLY ASH AND FROM BAGASSE FLY ASH



Miss Jutatip Pechin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter-department)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-5950-9



จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ : การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก  
 ถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยขานอ้อย (REMOVAL OF LEAD FROM SYNTHETIC  
 WASTEWATER USING ZEOLITE SYNTHESIZED FROM COAL FLY ASH AND FROM  
 BAGASSE FLY ASH) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ ; 121 หน้า. ISBN 974-17-5950-9

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน  
 และจากถ้ำลอยขานอ้อย ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอย  
 ถ่านหินและจากถ้ำลอยขานอ้อย โดยตรวจสอบคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน  
 บวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์  
 ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสาร  
 ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถใน  
 การแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 565.62 cmol/kg ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์  
 จากถ้ำลอยขานอ้อย คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย  
 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการ  
 แลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 303.19 cmol/kg

การศึกษานี้ได้นำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบ  
 ไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นของ  
 โลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์เพื่อทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่ว พบว่า พีเอช 5 และความเข้ม  
 ข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมของการดูดติดผิว  
 ตะกั่วที่สภาวะดังกล่าว โดยสมการการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำ  
 ลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยขานอ้อยมีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 94.07 และ  
 76.74 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยขานอ้อยมีความสามารถในการกำจัด  
 ตะกั่วในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่งของโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า ได้เท่ากับ  
 ร้อยละ 93.24% และ 91.36% ตามลำดับ

สหสาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....  
 ปีการศึกษา.....2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

# # 4489061520 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : ZEOLITE, COAL FLY ASH, BAGASSE FLY ASH, LEAD

JUTATIP PECHIN : REMOVAL OF LEAD FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING  
ZEOLITE SYNTHESIZED FROM COAL FLY ASH AND BAGASSE FLY ASH

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 121 pp. ISBN 974-17-5950-9

The objective of this research was to study the potential applicability in zeolite syntheses using coal fly ash and bagasse fly ash. This study designedly ascertained the optimum condition of zeolite syntheses comparatively from coal fly ash and bagasse fly ash. The optimum condition was determined by evaluating a cation exchange capacity (CEC) of the synthesized zeolite. The results revealed that the optimum condition exhibiting the highest CEC (565.62 cmol/kg) for synthesized zeolite using coal fly ash was characterized by reaction temperature of 100 °C, activation by NaOH solution concentrated of 2.0 molar and reaction time of 5 days. And similarly, reaction temperature of 90 °C, activation by NaOH solution concentrated of 2.0 molar and reaction time of 4 days showed the highest CEC (303.19 cmol/kg) for bagasse fly ash-derived zeolite.

Lead of removal by using these optimally synthesized zeolites was evaluated with batch test. The batch experiment was utilized to study the influential factors on removal of lead 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 lead were at pH 5 and concentration of 10 mg/l of lead. From Langmuir adsorption isotherm of synthetic wastewater, it was found that the lead adsorption capacities of zeolites synthesized from coal fly ash and bagasse fly ash were 94.07 and 76.74 mg/g of zeolite respectively.

The removal capacities of lead in wastewater from Lead Ingots Factory using zeolites synthesized from coal fly ash and bagasse fly ash were 93.24% and 91.36% respectively.

Field of Study..... Environmental Science..... Student's Signature.....

Academic Year..... 2004..... Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณทุกๆ ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการวิจัยและตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โสมจิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิวงศ์ ศรีบุรี และ รองศาสตราจารย์อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า เพื่อให้เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท โคเจนเนอเรชั่น จำกัด ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างเก้าอี้ถ่านหินเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณโรงงานน้ำตาลสระบุรี จังหวัดสระบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างเก้าอี้ถ่านหินเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการมูลฝอยในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณมานพ ตีระรัตนสมโภช ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ อ.มาละตี ทัยคุปต์ ภาควิชาธรณีวิทยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสีย รวมทั้งคุณจิรประภา เนียมปาน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการ และเพื่อนๆ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุน และคอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	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
2.1.1 ประวัติซีไอไลต์.....	4
2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีไอไลต์.....	5
2.1.3 การแบ่งประเภทของซีไอไลต์.....	9
2.1.4 การสังเคราะห์ซีไอไลต์.....	16
2.1.5 ประโยชน์ของซีไอไลต์.....	19
2.2 ถ้ำลอยถ่านหิน.....	21
2.2.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	22
2.2.2 การจัดรูปของถ้ำลอยขณะทำการเผาไหม้.....	22
2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดับเก็บถ้ำลอยถ่านหิน.....	23
2.2.4 ชนิดของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ.....	24
2.2.5 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน.....	24
2.2.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยถ่านหิน.....	25
2.2.7 ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน.....	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ถ้ำลอยซานอ้อย.....	29
2.3.1 การผลิตน้ำตาล.....	29
2.3.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล.....	29
2.3.1.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไป ใช้ประโยชน์.....	31
2.3.1.3 การเผาซานอ้อยและการจัดการถ้ำลอยซานอ้อยที่เกิดขึ้น.....	32
2.4 สมดุลของการดูดติด.....	32
2.5 การผลิตตะกั่วแห่งจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า.....	36
2.5.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่รถยนต์.....	36
2.5.2 กรรมวิธีการถลุงหลอมตะกั่ว.....	37
2.5.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแห่งจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า.....	38
2.6 โลหะหนัก.....	40
2.6.1 ตะกั่ว.....	40
2.6.2 ประโยชน์ของตะกั่ว.....	41
2.6.3 พิษของตะกั่ว.....	42
2.6.4 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อม.....	42
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 แผนการทดลอง.....	49
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	51
3.3.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยซานอ้อย.....	51
3.3.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิด.....	51



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์.....	52
3.3.3.1 ศึกษาผลของ pH.....	52
3.3.3.2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัส.....	52
3.3.3.3 ศึกษาผลความเข้มข้นของโลหะหนัก.....	53
3.3.3.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	53
3.3.4 การศึกษาการคายออกจากผิวของโลหะตะกั่ว.....	54
3.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง.....	54
3.3.6 ประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	57
4.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยและการหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน.....	57
4.1.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....	57
4.1.2 การทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สภาวะต่าง ๆ.....	58
4.2 สมบัติของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	63
4.2.1 สมบัติของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	63
4.2.2 สมบัติทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	64
4.2.3 สมบัติทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	71
4.3 ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยชานอ้อยแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test).....	76
4.3.1 การหา pH ที่เหมาะสม.....	76

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การหาช่วงเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม.....	80
4.3.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	85
4.3.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิด.....	87
4.4 ศึกษาการชะละลายของโลหะตะกั่ว.....	93
4.5 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย ถ่านหิน และจากเถ้าลอยชานอ้อยกับน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง.....	94
4.6 ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจาก เถ้าลอยชานอ้อย.....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	100
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก.....	108
ภาคผนวก ข.....	112
ภาคผนวก ค.....	114
ภาคผนวก ง.....	116
ภาคผนวก จ.....	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทฤษฎี.....10
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์.....17
ตารางที่ 2.3	สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่าง ๆ .....18
ตารางที่ 4.1	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้น..... 58
ตารางที่ 4.2	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....60
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบผลงานวิจัยการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....62
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....70
ตารางที่ 4.5	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อยและซีโอไลต์ สังเคราะห์.....71
ตารางที่ 4.6	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....73
ตารางที่ 4.7	ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังจากปรับค่า ความเป็นกรดต่างที่พีเอชต่างๆ.....76
ตารางที่ 4.8	ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังผ่านการดูดซับ ด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....78
ตารางที่ 4.9	การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....80
ตารางที่ 4.10	การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....81
ตารางที่ 4.11	ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....86

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.12 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน.....	88
ตารางที่ 4.13 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยซานอ้อย.....	88
ตารางที่ 4.14 ค่าคงที่ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย จากสมการของ Langmuir.....	92
ตารางที่ 4.15 ค่าความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของ ซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ.....	93
ตารางที่ 4.16 การชะไฮดรอนตะกั่วด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดพีเอช 5.8.....	94
ตารางที่ 4.17 ผลการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง.....	95

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	7
รูปที่ 2.2	หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$ .....	7
รูปที่ 2.3	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ.....	10
รูปที่ 2.4	ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่.....	11
รูปที่ 2.5	โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ analcite และ laumontite.....	12
รูปที่ 2.6	โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ natrlite, Brewsterite, ZEM-5.....	12
รูปที่ 2.7	ลักษณะโครงสร้างของ offretite และ Erionite.....	12
รูปที่ 2.8	สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UUD, UDUD และ UDUU.....	13
รูปที่ 2.9	หน่วยทุติยภูมิ Heulandite Group และ Mordenite Group.....	13
รูปที่ 2.10	ลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ mordenite, dachiardite, ferrierite, Epstilbite, bikitaite.....	14
รูปที่ 2.11	ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-5 และภาพร่างพื้นผิวของ ZEM-5.....	14
รูปที่ 2.12	การจัดเรียงตัวของ ZK - 5.....	14
รูปที่ 2.13	หน่วยพอลิฮีดรอลต่าง ๆ ในโครงสร้างของ Melanophlogite และ ZSM-39.....	15
รูปที่ 2.14	ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39.....	15
รูปที่ 2.15	ลักษณะโครงสร้างของ Melanophlogite.....	15
รูปที่ 2.16	ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite.....	16
รูปที่ 2.17	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir.....	34
รูปที่ 2.18	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich.....	35
รูปที่ 2.19	แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตโลหะตะกั่วแห้งโดยใช้เตาหลอมแบบตั้งและใช้ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ เป็นฟลักซ์.....	39
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย.....	56
รูปที่ 4.1	เถ้าลอยถ่านหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต.....	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2	ถ้ำลอยซานอ้อยที่มีลักษณะเป็นก้อนถ้ำที่เปียก มีสีดำ.....63
รูปที่ 4.3	การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์.....64
รูปที่ 4.4	การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์.....65
รูปที่ 4.5	ถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์.....66
รูปที่ 4.6	โครงสร้างและพื้นผิวของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์.....67
รูปที่ 4.7	ถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....68
รูปที่ 4.8	โครงสร้างและพื้นผิวของถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์.....69
รูปที่ 4.9	ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟเฟรคชันของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100° C 5 วัน.....74
รูปที่ 4.10	ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟเฟรคชันของถ้ำลอยซานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 90° C 5 วัน.....75
รูปที่ 4.11	ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็นกรด เป็นด่างที่พีเอชต่าง ๆ.....77
รูปที่ 4.12	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยซานอ้อยที่พีเอชต่าง ๆ.....78
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเขย่ากับ%removal ของตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย.....82
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเวลาสัมผัสโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย.....83
รูปที่ 4.15	ความสามารถในการละลายของตะกั่วที่ค่าพีเอชต่าง ๆ.....85
รูปที่ 4.16	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและ จากถ้ำลอยซานอ้อยที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน.....86
รูปที่ 4.17	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Freundlich ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน.....89
รูปที่ 4.18	ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Langmuir ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน.....90

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Freundlich ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยซานอ้อย.....	91
รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Langmuir ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยซานอ้อย.....	91
รูปที่ 4.21 โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินหลังผ่านการดูด ติดผิว.....	96
รูปที่ 4.22 โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยหลังผ่านการดูด ติดผิว.....	96

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการก่อตั้งและขยายโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย ทำให้เกิดปัญหามลภาวะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่ทุกประเทศกำลังหาทางป้องกันและแก้ไขอยู่ในขณะนี้ เช่น ปัญหามลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและชุมชน ปัญหาทางด้านโลหะเป็นพิษที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะปัญหาน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักปะปนออกมาด้วย โลหะหนักเหล่านี้ได้แก่ ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม ฯลฯ ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีการถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และอาจจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อม ถ้าไม่มีการบำบัดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีหลายวิธี เช่นการตกตะกอนทางเคมี ขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน การใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีแต่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุนและต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาสมบัติและความสามารถต่างๆ ของซีโอไลต์กันมากขึ้นเนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของซีโอไลต์ คือ โครงสร้างที่มีความพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวมากมีความสามารถในการดูดซับสูง และนอกจากนี้ซีโอไลต์ยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนด้วย จากคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ทำให้ซีโอไลต์มีประโยชน์มาก เช่น ใช้ในการลดความกระด้างของน้ำ ใช้จับโลหะหรือสารกัมมันตรังสีในน้ำทิ้ง ใช้เป็นสารดูดความชื้นและก๊าซพิษ เป็นต้น จึงได้มีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาอย่างมากมาย แต่เนื่องจากต้นทุนในการสังเคราะห์นั้นสูงทำให้มีความพยายามที่จะหาวัสดุดิบใหม่ๆ มาทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ ถ้าลดย่านหินจึงนับเป็นวัสดุดิบที่น่าสนใจอีกชนิดหนึ่ง เนื่องมาจากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยแล้วประกอบด้วย สารประกอบซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เมื่อนำถ้ำลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส เช่นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมจะเกิดซีโอไลต์ขึ้นได้ (Querol et al., 1997) นอกจากนี้ ยังนำถ้ำลอยจากขานอ้อยที่เกิดจากการเผาไหม้ขานอ้อยในโรงงานน้ำตาล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งนำมาทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์ในงานวิจัยนี้ด้วย



ในปัจจุบันปัญหาทางด้านโลหะเป็นพิษเป็นปัญหาหนึ่งที่น่าสนใจศึกษาเพราะนับวันจะมีแนวโน้มสะสมเพิ่มมากขึ้นและยังส่งผลต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาได้ช้ามาก และเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้วจะมีผลรบกวนและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตหลายๆ ระบบ การปนเปื้อนของตะกั่ว เข้าสู่สิ่งแวดล้อมนั้นมาจากอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ การใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมเคมีและหมึกพิมพ์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาถึงความเป็นไปได้ และความเหมาะสมที่จะนำถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ เพื่อใช้ในการกำจัดตะกั่วอันจะก่อให้เกิดประโยชน์ คือ สามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีที่มีราคาแพง นอกจากนี้ยังเป็นการนำของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งนับว่าเป็นการช่วยจัดการกับของเสียเหล่านั้นอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย
3. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย
2. ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อย เช่น ขนาดอนุภาค (Particle size) วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างโดยใช้เครื่องสแกนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) พื้นที่ผิว (BET surface area analysis) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) วิเคราะห์สมบัติทางเคมีโดยใช้ XRD และ XRF
3. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย คือ พีเอช (pH) เวลาสัมผัส (contact time) ความเข้มข้นของโลหะหนัก (Concentration of heavy metal ) และ ปริมาณซีโอไลต์โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

4. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอดีที่สังเคราะห์จากถั่วลยถ่านหินและจากถั่วลยชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง
5. ประมาณค่าใช้จ่ายของซีโอดีที่สังเคราะห์ได้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้ง (ถั่วลยถ่านหินและถั่วลยชานอ้อย) มาสังเคราะห์เป็นซีโอดีเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)

##### 2.1.1 ประวัติซีโอไลต์

คำว่า “ซีโอไลต์” นั้นมาจากภาษากรีกสองคำคือ คำว่า ζειν แปลว่า ต้ม (to boil) และ คำว่า λιθο แปลว่า หิน (a stone) ซีโอไลต์ที่เกิดในธรรมชาติจะมีน้ำอยู่ในโพรงซึ่งสามารถแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกหรือโมเลกุลอื่นเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกแล้วจะเกิดฟอง และไอน้ำออกมาจากก้อนผลึกเพราะน้ำที่อยู่ในโพรงจะหลุดออกมา แร่ซีโอไลต์นี้ประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกตของอัลคาไลน์เอิร์ทที่มีน้ำอยู่ภายในโครงผลึก

มนตรี ทองคำ, 2542 อ้างถึงในวิภายู บุญเจริญสุข, 2537 ได้กล่าวถึงประวัติของซีโอไลต์ไว้ดังนี้

ปี 1840 ได้ค้นพบว่าเมื่อผลึกซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก (hydrated zeolites) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (Dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอมโมเนีย เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดออกไซด์ และปรอทได้

ปี 1845 ได้ทำการทดลองพบว่าดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ จะเห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

ปี 1909 ได้ทำการทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง คือ chabazite พบว่าสามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโบรมีนที่อุณหภูมิสูงได้แม้แต่ไอของปรอทก็อาจถูกดูดซับได้

ปี 1925 ค้นพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กๆ และปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ๆ ออกมา ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย Mcbain ในปี ค.ศ. 1932 โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “Molecular sieving”

ปี 1933 ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ chabazite

ปี 1948 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลต์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแรกและได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาโดย Reed และ Breck (1956)

ปี 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ของ faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติ และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ขึ้น

ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะทำภายใต้ภาวะที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมา Milton และคณะทำงาน (1959) ของบริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงทำปฏิกิริยาในภาชนะปิด หรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้พัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์

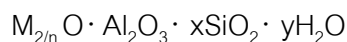
เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี 1948 จนถึงปี 1972 นั้นพบว่ามีผลงานวิจัยเกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์เอเกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารตีพิมพ์อื่นอีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ นอกจากนี้มีรายงานว่า การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้ตั้งแต่ปี 1862 แต่ Breck (1862) ได้ให้ความเห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้ในขณะนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และสารบางตัวยังไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime โดย Barret (1951)

ปี 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) สรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติของอะลูมิเนียม – ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{AlO}_4$ ) และซิลิกอน – ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{SiO}_4$ ) แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) แสดงดังรูปที่ 2.2

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ

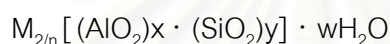


n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ท

x คือ จำนวนโมลของ  $SiO_2$  โดยมากจะมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์



n คือ วาเลนซ์ของไอออนบวก (M)

w คือ จำนวนโมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์

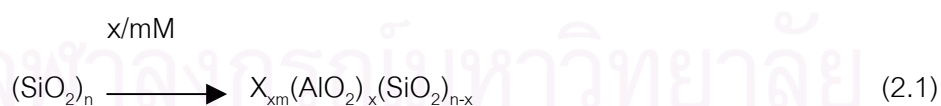
x+y คือ จำนวนรูปทรงเตตระฮีดรอลทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มักจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

ซิลิกอน – ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $SiO_4$ ) จะมีประจุลบสี่ และอะลูมิเนียม – ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $AlO_4$ ) มีประจุเป็นลบห้า

การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน – ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม – ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็นโครงสร้างตาข่ายนั้นทำให้เกิดประจุลบบ้าง เนื่องจาก  $Al^{3+}$  แทนที่  $Si^{4+}$  ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคตไอออนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ดังสมการ

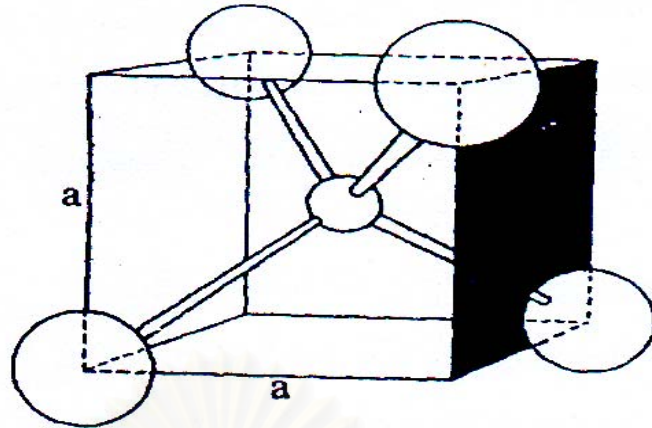
2.1



M คือ แคตไอออนของโลหะที่มีประจุ +m

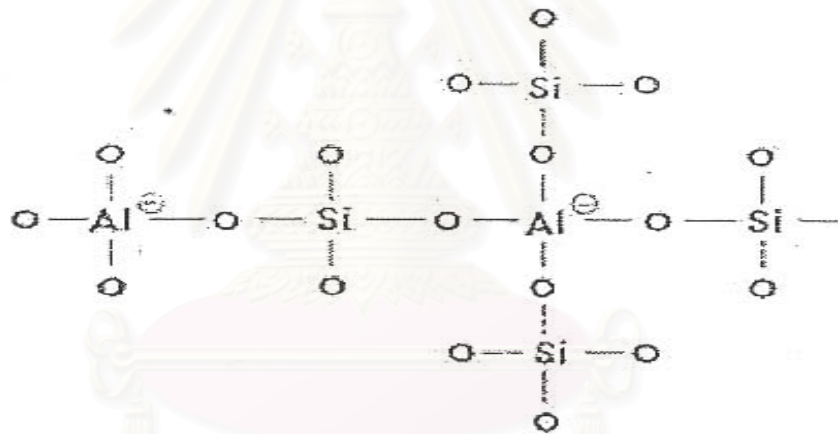
x คือ จำนวนอะตอมของอะลูมิเนียม (Al)

n คือ จำนวนโมลของ  $SiO_2$



รูปที่ 2.1 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

ที่มา : Breck ,1974



รูปที่ 2.2 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ  $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$

ที่มา : สัจชนาก และ สมชาย, 2541

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

1. ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Mineral Zeolite or Naturally Occuring Zeolites) ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของมอนอหรือไดวาเลนต์เบส (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 และโซเดียมไดคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดินแล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไดคาร์บอเนต ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น และทำให้เกิดอะลูมิเนียมซิลิเกตในพื้นดินขึ้น

1.3 Marine Sediments ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้ อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง

1.4 Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

1.5 Hydrothermal Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีแอลคาไลกับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการ เปียกได้ของแร่หินและลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

1.6 Burial Diagenetic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)

1.7 Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน imerstrial และ globules

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

2. ซีโอไลต์ ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic Zeolites) ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น  $\text{AlO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , และ  $\text{K}_2\text{O}$  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 เช่นการใช้ตัวอักษรหรือกลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นที่นิยมมากกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่า และยังมีควมบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมือนกันทุกครั้ง โดยเฉพาะสารเจือปนที่อยู่ในซีโอไลต์ธรรมชาติเช่นปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายในปฏิกิริยา heterogeneous catalyst

### 2.1.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์

1. หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Units) ซึ่งเป็นหน่วยเล็กๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน คือเป็นรูปทรงเตตระฮีดรอลของ  $\text{AlO}_4$  และ  $\text{SiO}_4$

2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units) เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิ ต่อกันเป็นวงรูปเหลี่ยมต่างๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น  $\text{S}_4\text{R}$ ,  $\text{S}_6\text{R}$ , หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น  $\text{D}_4\text{R}$ ,  $\text{D}_6\text{R}$  แสดงดังรูปที่

2.3

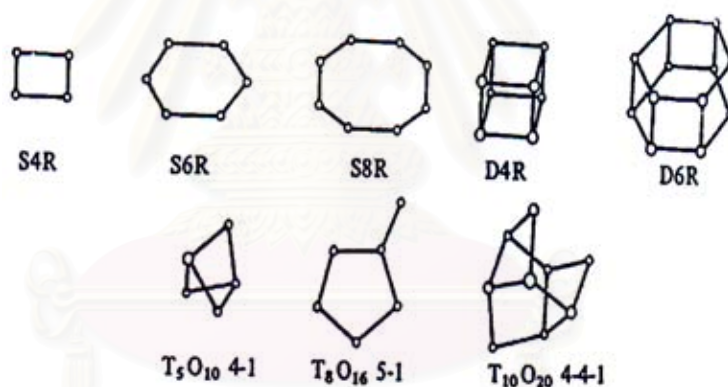
Breck (1974) แบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units : SBU) ได้ 8 ชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ ตามโครงสร้างทุติยภูมิ

ชนิด	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ
1	วงเดี่ยว 4 มุม (single 4-ring, $S_4R$ )
2	วงเดี่ยว 6 มุม (single 6-ring, $S_6R$ )
3	วงเดี่ยว 8 มุม (single 8-ring, $S_8R$ )
4	วงคู่ 4 มุม (Double 4-ring, $D_4R$ )
5	วงคู่ 6 มุม (Double 6-ring, $D_6R$ )
6	วงเชิงซ้อน 4-1 (complex 4-1, $T_5O_{10}4-1$ )
7	วงเชิงซ้อน 5-1 (complex 5-1, $T_8O_{16}5-1$ )
8	วงเชิงซ้อน 4-1-1 (complex 4-1-1, $T_{10}O_{20}4-1-1$ )

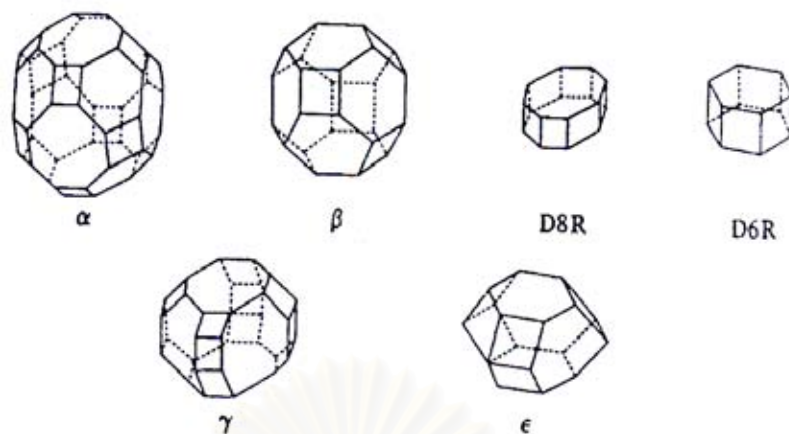
ที่มา : Breck, 1974



รูปที่ 2.3 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ

ที่มา : Breck, 1974

3. หน่วยโครงสร้างหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงขนาดใหญ่ที่สมมาตรได้ จากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น
- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้า หรือ  $\beta$  (truncated octahedral type)
  - รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ  $\alpha$  (truncate cubooctahedron)
  - รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ  $\gamma$  (18-hedron)
  - รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ  $\epsilon$  (11-hedron) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่

ที่มา : Breck, 1974

นอกจากนี้อาจแบ่งซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง 8 ชนิด ข้างต้นดังนี้

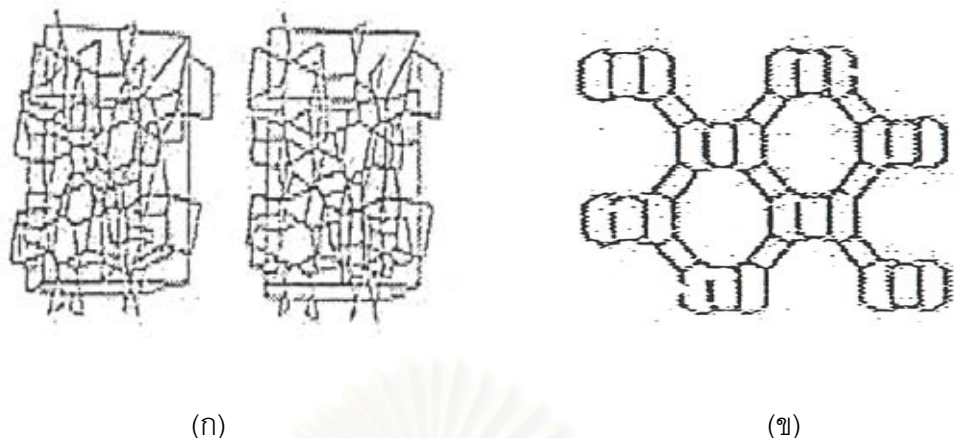
1. Analcite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring โดยจะมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumontite แสดงดังรูปที่ 2.5

2. Natrolite Group มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบคือ Natrolite, Edingtonite และ Thosonite แสดงดังรูปที่ 2.6 (ก)

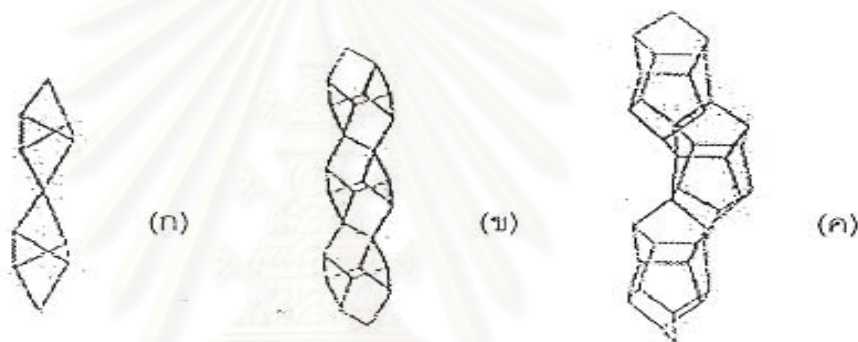
3. Chabazite Group โครงสร้างประกอบไปด้วย 6-ring ต่อขนานกันซึ่งมีการต่อเชื่อมกันมากมายหลายรูปแบบ เช่น แบบ Offretite และ Reionite แสดงดังรูปที่ 2.7

4. Phillipsite Group โครงสร้างประกอบด้วย 4-ring ที่ต่อขนานกันแบบ U (up) และ D (down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.8

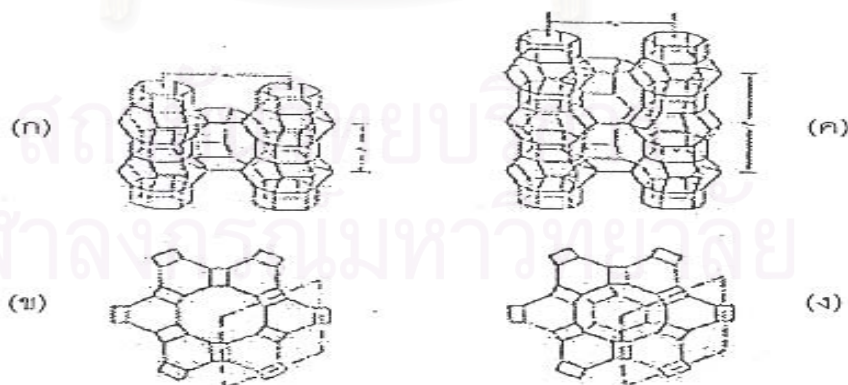
5. Heulandite Group โครงสร้างเกิดจาก 5-ring 4วงต่อเชื่อมกับ 4-ring 2 วง ซึ่งจะเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ถ้าการเชื่อมโยงผ่านโครงสร้างตรงกลางรูปแบบพันธะก็จะเป็นแบบในรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งเมื่อเชื่อมโยงต่อกันจะทำให้เป็นแบบ Brewsterite การเชื่อมต่อของบลดอคโดยผ่านโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ heulandite และ stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-ring ในบางส่วนแสดงดังในรูปที่ 2.9 (ก)



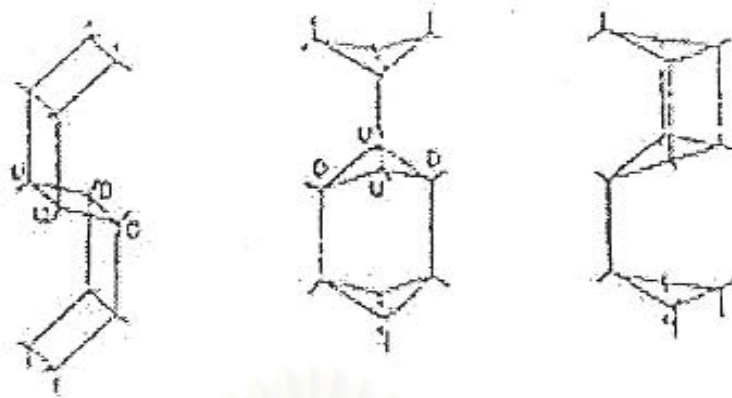
รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ (ก) analcite (ข) laumontite  
ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ  
(ก) natrolite (ข) Brewsterite (ค) ZSM-5  
ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของ offretite และ Erionite  
(ก) offretite (ข) c-projection of offretite (ค) erionite (ง) c-projection of erionite  
ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.8 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UUDD, UDUD และ UDUU

ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



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

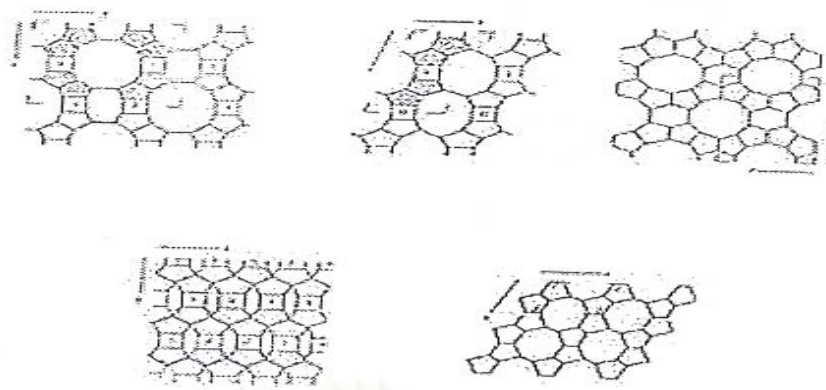
ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542

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 แสดงดังรูปที่ 2.12

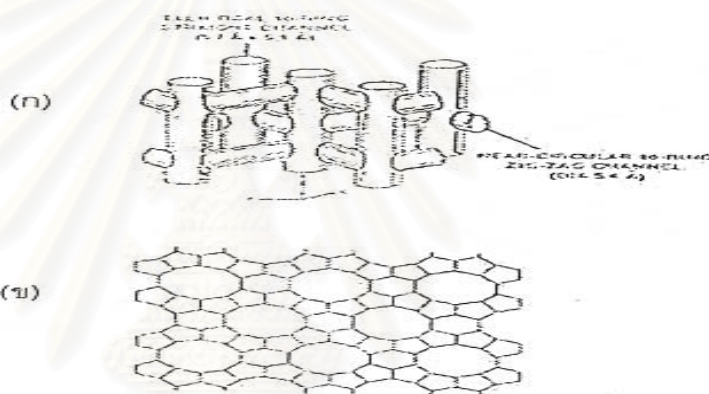
8. Melanophlogite Group ใน กลุ่ม นี้ ประกอบ ไป ด้วย ZEM-39 และ melanophlogite ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น Melanophlogite และ ZEM-39 จะมีหลายรูปแบบเช่น 12-hedron, 14-hedron, 15-hedron และ 16-hedron แสดงดังรูปที่ 2.13, 2.14 และ 2.15

9. Lovdarite Group เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring และ 8-ring แสดงดังรูปที่ 2.16



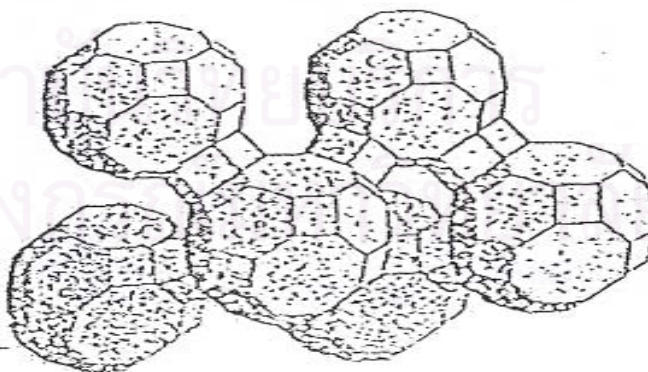
รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ modenite, dachiardite, ferrierite, epstilbite, bikitaite

ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



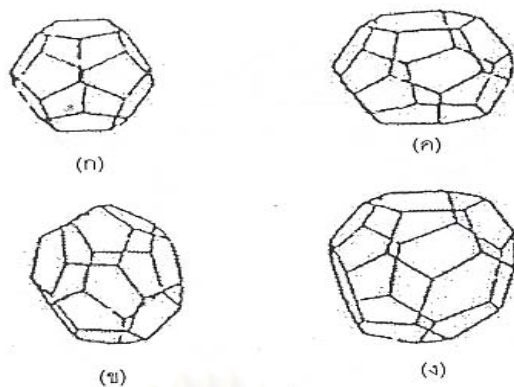
รูปที่ 2.11 (ก) ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-5 (ข) ภาพร่างพื้นที่ผิวของ ZEM-5

ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของ ZK-5

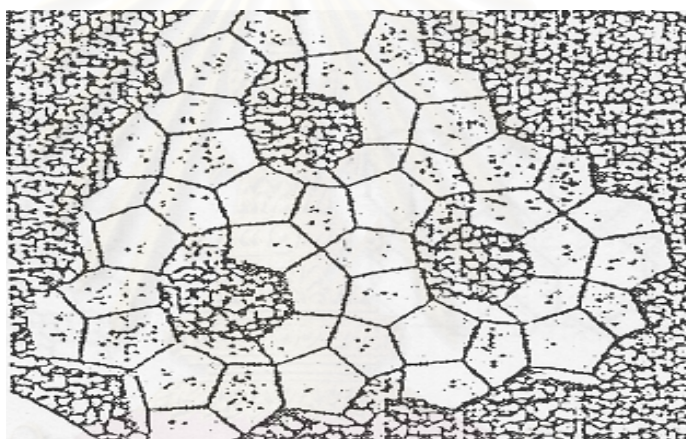
ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.13 หน่วยพอลิฮีดรอลต่าง ๆ ในโครงสร้างของ Melanophlogite และ ZEM-39

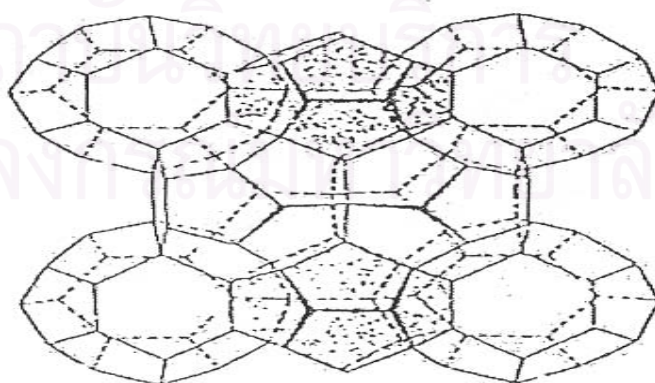
(ก) 12-hedron (ข) 14-hedron (ค) 15-hedron (ง) 16-hedron

ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



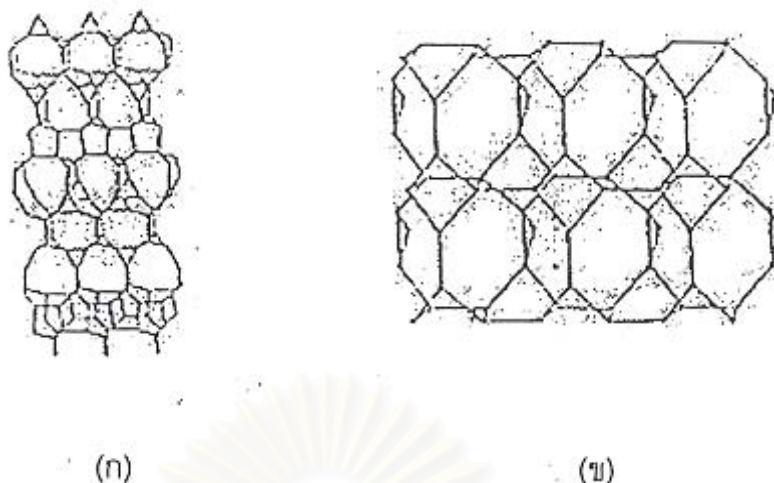
รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39

ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ Melanophlogite

ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite  
ที่มา : Dyer,1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542

#### 2.1.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปจะใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Treatment) และวิธีสังเคราะห์ซิลิเกต (silicate) ในช่วงเวลากว่า 100 ปีที่ผ่านมาได้มีการค้นพบวิธีการสังเคราะห์ขึ้นได้หลายวิธี แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้นเราจะทำให้แหล่งของอลูมินา ซิลิกา และแอลคาไล รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน และจะก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในเวลาที่เกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 °C หรือสูงกว่านั้นที่ความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น ในบางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำยสุดจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์หลายอย่างซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของไอออนบวกของทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่โดยปกติการก่อตัวของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักนั้นอยู่ที่ว่าไอออนบวกที่มีอยู่นั้นจะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ (templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบ หรือแม่พิมพ์เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะ ทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างเหมือนโครงสร้างของแม่แบบนั้นๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เรานำมาเป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ 4 ชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์

ZSM-5 type	$\Omega$ 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 <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> N
Methylquinuclidine		1,3-Diaminopropane	Cyhexylamine
NH <sub>3</sub> + alcohol		1,4-Diaminobutane	N.N' -Dimethylbenzylamine
Alcohol		2,4-Pentanedione	Diethylethanolamine
Glycerol		N-methylpyridimium	Amino Diethylethanolamine

ที่มา : Breck, 1974

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.3 สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ

ค.ศ.	ซีโอไลต์	Hydrothermal Method	ผู้ค้นพบ
1862	Leynite	K silicate+Na aluminate, 170°C	St. Claire Deville
1880	Analcime	Na silicate+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> glass, 180°C	A. De Scheuiten
1882	Analcime	Na silicate+Na aluminate, 180°C	A. De Scheuiten
1883	Analcime	SiO <sub>2</sub> , NaOH solution.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 400 °C	C. Friedel, E. Sarasin
1885	Analcime	Conversion of chabazite, 200 °C	J. Lamberg
1887	Analcime	Kaolin + Na silicate, 200-220°C	J. Lamberg
	Analcime	Feldspars + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 200 °C	
	Natrolite	Scolecite + Nacl	
	Chabazite	Feldspars + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 100 °C	
1890	Chabazite	Recrystallization, 150-170°C	C. Doelter
	Heulandite	Anorthite + H <sub>2</sub> O +CO <sub>2</sub> , 200 °C	
	Analcime	Na <sub>2</sub> O+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O, 100-200	
	Seolecite	°C	
1894	Natrolite	Recrystallization	St. J. Thugutt
1896	Thomsonite	Anorthite, 174-177 °C	C. Friedel
1906	Analcime	Muscovite +NaOH, 200°C	C. Doelter
	Natrolite	Nepheline+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O, 200 °C	
1916	Analcime	Na <sub>2</sub> O, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , 90 °C	E.A. Stephenson
1918	Analcime	Aduraria + NaAlO <sub>2</sub> , 280 °C	W.J. Muller
1927	Mordenite	Na <sub>2</sub> O, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , 300 °C	R.J. Leonard
	Phillipsite	Feldspars+Carbonate,400 °C	
1929	Natrolite	At low pressure	E.Gruner
1936	Analcime	Paragonite + NaOH,400 °C	F.G. Straub
		Na silicate + Na aluminate, 282 °C	

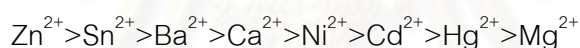
ที่มา : Breck, 1974

### 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) ซีโอไลต์ใช้เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออน
4. ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) จากสมบัติการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์สามารถนำไปใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนของไดวาเลนต์ (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 และเมื่อทับถมกันมากเข้าจะทำให้น้ำเน่าเสีย นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

ตัวอย่างการนำสารซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ

### 1. การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียของชุมชน

ในการศึกษาช่วงเริ่มต้นโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อกำจัดแอมโมเนียมในกระบวนการกำจัดน้ำเสียพบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนของแอมโมเนียมได้ต่ำ ทำให้กำจัดแอมโมเนียมได้น้อยและเสียค่าใช้จ่ายสูง 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 ( $Mg^{2+}$ ) จากสารละลายแล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม โดยที่ผงซักฟอกเหล่านั้นจะรับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมซึ่งลดปริมาณของฟอสเฟตที่มีอยู่ในระดับต่ำ หรือไม่มีอยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ในหลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และในสถานที่อื่นๆ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบนี้มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ซีโอไลต์ในแต่ละปีพบว่ามีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้กันอย่างมากมายแล้วทั่วโลก

การนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้แทนสารฟอสเฟตในผงซักฟอกนั้น ในช่วงแรกนั้นวิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยเหล่านักวิทยาศาสตร์ที่บริษัท เฮลเกล (Henkel) ในประเทศเยอรมัน และบริษัทพรอคเตอร์ แอนด์ แกมเบิล (Procter & Gamble) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาในเรื่องนี้อยู่มากมาย

### 3. การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากได้มีการตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคต จึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่มีไซโตรเลียมและมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ในอนาคต

เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นจากถ่านหินและการสังเคราะห์แก๊สโดยใช้

เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน 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 ค.ศ.1985 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่นิ่ง (fixed bed) และที่ประเทศเยอรมันก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้า และก็สามารถประสบความสำเร็จโดยได้มีการสร้างโรงงานต้นแบบไว้ที่เมืองเวสเซลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึง ร้อยละ 90 และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบอื่นๆ เช่น แก๊สธรรมชาติ มาใช้แทนเมธทานอลได้

#### 4. การแยก กำจัด และนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

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

## 2.2 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash)

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการนำถ่านหินมาบดละเอียด และส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอยถ่านหินเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน และถูกจับไว้โดยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) หรืออาจจะมาจากการดักจับด้วยถุงกรองฝุ่น (Bag Filter) (อนิรุทธ์ รัชไชย, 2528)

## 2.2.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจะประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งจากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3-30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วนจะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ระหว่างการเผาไหม้เช่น ดินเหนียวและดินดานจะสูญเสียไปจากปฏิกิริยา ไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนจากการสลายตัว ซึ่งจะให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับรูปใหม่เกิดเป็นคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3$ ) ในถ่านหินจะมีสารแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ส่วนในเถ้าลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) เถ้าลอยเหล่านี้ประกอบไปด้วยซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบแอสคาไรด์ นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอเนต และซัลเฟต

ระดับปริมาณเถ้าลอยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ต่างๆ กันในโลก หรืออาจต่างกันเนื่องจากระดับชั้นของพื้นผิวในพื้นที่เดียวกัน หรือมีความต่างกันในเมืองที่ต่างกัน

## 2.2.2 การจับรูปของเถ้าลอยขณะทำการเผาไหม้

ขณะทำการเผาไหม้เถ้าลอยจะเกิดการจับรูปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. เถ้าหนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของเถ้าหลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาไอน้ำ ซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีหลายมุมเนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค เถ้าหนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อให้เกิดสแลก (Slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุม
2. ใ เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของในี้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของเถ้าลอยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับเถ้าลอย ปริมาณของใที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ความเข้มข้น และสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3. เถ้าลอย เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งลอยอยู่ในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้และลอยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับแก๊สอื่นๆ เถ้าลอยส่วนใหญ่จะถูกเก็บโดยเครื่องดักทางกล (Mechanical collectors) หรือ เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยจะผ่านเครื่องดักจับและถูกปล่อยออกสู่อากาศไป เถ้าลอยจะมีปริมาณร้อยละ 10-85 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา พบว่าเถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของเถ้าลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าเถ้าลอยที่มีผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ นั้นได้แก่ แมกเนไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มูลไลต์ และควอต

สิ่งที่น่าสนใจของเถ้าลอย คือความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณกว่าร้อยละ 20 ของเถ้าลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลมมีส่วนประกอบของซิลิกา ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 20-200 ไมครอน เถ้าเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการขจัด สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของเซโนสเฟียร์จะคล้ายกับเถ้าลอยดังที่จะกล่าวต่อไป

### 2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บเถ้าลอยถ่านหิน

1. เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatics Precipitators) วิธีควบคุมนี้ใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วระหว่างแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านอนุภาคของเถ้าลอยจะได้รับประจุไฟฟ้าลบ และจะถูกดึงดูดให้เกาะบนขั้วบวก ในทางปฏิบัติเครื่องนี้จะต้องทำความสะอาดอย่างต่อเนื่องโดยการเคาะเพื่อไล่อนุภาคที่ดักเก็บได้

สำหรับการเก็บเถ้าลอยนั้น เครื่องมือที่ใช้ดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 เนื่องจากคุณภาพของถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าจะมีคุณภาพแย่งเพราะมีปริมาณเถ้ามากขึ้น และถ่านนี้ส่วนประกอบจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะฉะนั้นความสามารถในการทำงานของเครื่องตกตะกอนจะต้องเหมาะสมกับเถ้าลอยที่ถูกดักเก็บ เช่น มีความต้านทานไฟฟ้า แต่สมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถ่านหินที่ใช้ หรือการทำงานของหม้อไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

2. ถุงกรอง (Bag Filter House) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคเถ้าลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงในโครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีพอๆ กับเครื่องตกตะกอน และถูกนำไปใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าบางแห่ง

3. ไชโคลน (Cyclone collector) เครื่องไชโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของแก๊สจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกของอนุภาคเถ้าลอยที่หนักออกจากแก๊ส เครื่องไชโคลนควรมีประสิทธิภาพร้อยละ 70-85 เมื่อใช้กับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง เครื่องไชโคลนไฟบอยเลอร์ (Cyclone-Fired Boiler) จะทำให้เกิดเถ้าที่มีขนาดเล็กจำนวนมากกว่าหน่วยที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องไชโคลนจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเครื่องไชโคลนไฟบอยเลอร์

#### 2.2.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ

เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ เถ้าลอยบิโทมินัส และ เถ้าลอยลิกไนต์ ความแตกต่างของเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะหยาบกว่า คือ มีช่วงกว้างกว่า ค่าดัชนีหักเหของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า และพวกเถ้าลอยลิกไนต์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มากกว่าเฟอริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในทางตรงกันข้ามสำหรับเถ้าลอยบิโทมินัสนั้นจะมีปริมาณเฟอริกออกไซด์มากกว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทบิโทมินัสจะเป็นถ่านหินยุคเก่าซึ่งอยู่ในช่วงอายุไตรแอสสิก 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

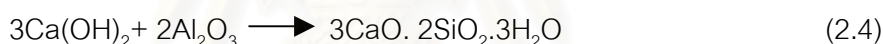
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในประเทศต่างๆ ตามที่รวบรวมและสรุปไว้พบว่าองค์ประกอบของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่างถ่าน

หินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง โดยเฉลี่ยแล้วเถ้าลอยจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังต่อไปนี้

- Silica ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 41-58 โดยน้ำหนัก
- Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 21-27 โดยน้ำหนัก
- Iron Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 4-17 โดยน้ำหนัก
- Lime ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 4-6 โดยน้ำหนัก

ที่เหลือเป็นออกไซด์ของแร่ชนิดต่างๆ ที่ผสมอยู่ในถ่านหิน เช่น  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  เป็นต้น จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้นจะคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ทั้งนี้เพราะว่าทั้งเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

เนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เถ้าลอยจึงสามารถรวมตัวกับปูนขาว (Lime) จึงถือได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุปัวโซลาน (pozzolan) ชนิดหนึ่งปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสารเชื่อมประสาน แสดงดังสมการที่ 2.2 - 2.4 คือ



### 2.2.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยถ่านหิน

จากรายงานของธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ (2526) กล่าวว่าเถ้าลอยถ่านหินมีลักษณะพิเศษเฉพาะคือ มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ มีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีความชื้นเหนียว (plasticity) ต่ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉลี่ยเถ้าลอยในประเทศญี่ปุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.14 ในประเทศอเมริกามีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 และในประเทศอังกฤษประมาณ 2.10 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยนั้นต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินโดยทั่วไปที่ปกติอยู่ในช่วง 2.60 - 2.80 จากการสังเกตโดยใช้กล้องขยายพบว่าเม็ดเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีหลักฐานที่ทำให้เชื่อว่าเม็ดกลมเหล่านี้ด้านในจะกลวง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดดินโดยทั่วไป

เนื่องด้วยเถ้าลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกบด ขนาดของเม็ดเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่านหิน และอุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้ ในสภาพปกติเถ้าลอยจะเป็น



ฝุ่นฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะและเป็นเลนเมื่ออิมตัวด้วยไอน้ำ แต่ถ้าผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม และได้รับการบดอัดที่เพียงพอแล้วถ้าลอยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (unconfined compressive strength) สูง

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

#### สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป

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

ในหน่วยไซโคลนคุณสมบัติของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ้ำประมาณร้อยละ 80 - 85 ของถ้ำที่จะหลอม และรวมตัวกันเกิดเป็นสแลก ส่วนหนึ่งของถ้ำลอยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในหน่วยพัลเวอไรซ์ (Pulverized coal) มีถ้ำลอยเกิดขึ้นร้อยละ 65 - 80 และเกิดเป็นถ้ำหนักร้อยละ 20 - 35 สำหรับคุณสมบัติการหลอมของถ้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ถ้ำที่มีคุณสมบัติการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปของถ้ำหนักนั้นคือ หม้อต้มไอน้ำที่กันเปียกจะก่อให้เกิดถ้ำหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่กันแห้ง

### 2.2.7 ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน

จากรายงานของธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ วิชาญ ภูพัฒน์ (2526) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหินไว้ดังนี้

#### 1. การใช้ถ้ำลอยเป็นวัสดุถม (Fill Material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับถ้ำลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสมและทำการบดอัดอย่างดีแล้ว ถ้ำลอยเป็นวัสดุถมที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูง และเกิดการยุบตัวน้อยค่าสัดส่วนของน้ำหนักสูงสุดที่ถ้ำลอยสามารถรับได้ในการบดอัดถ้ำลอยในห้องปฏิบัติการโดยวิธีบดอัดมาตรฐาน (standard compaction) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 18 - 45 และค่าความหนาแน่นสูงสุด (maximum dry unit weight) จะอยู่ในช่วง 9 - 16 (kN/m<sup>3</sup>) แต่ในสนามเป็นการยากที่จะบดอัด ถ้ำลอยให้ได้

ความหนาแน่นสูงสุด โดยปกติมักจะกำหนดให้บดอัดได้ที่ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของความหนาแน่นสูงสุด

กำลังอัด (unconfined compressive strength) ของเถ้าลอยนอกจากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นจากการบดอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีด้วย เถ้าลอยที่ได้จากการบดอัดแล้วจะมีน้ำหนักเบา และมีกำลังอัดสูงเมื่อเทียบกับดินซึ่งมักจะใช้เป็นวัสดุถมโดยทั่วไป ดังนั้นความนิยมในการนำเอาเถ้าลอยไปใช้เป็นวัสดุถมในพื้นที่ที่เป็นชั้นดินอ่อน เนื่องจากข้อได้เปรียบสองประการ คือ น้ำหนักที่เบาจะช่วยลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อน และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นเถ้าลอยเองจะน้อยมากเพราะมีกำลังอัดสูง

## 2. การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุในโครงสร้างของถนน

ส่วนของถนนที่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ คือ ชั้นรองพื้นทาง (sub-base) และชั้นพื้นทาง (base) แม้ว่าเถ้าลอยที่บดอัดแล้วจะมีกำลังค่อนข้างสูงแต่ยังคงมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานโครงสร้างของถนนโดยลำพังแต่จะสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาว บางครั้งอาจใช้เป็นสารสำหรับปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมือนกับปูนซีเมนต์หรือปูนขาวก็ได้

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เหมือนกับขอยแอกกรีเกต (soil aggregate) โดยมีซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious material) กำลังอัดของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสมบัติของเถ้าลอย ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มความหนาแน่นจากการบดอัด และประสิทธิภาพในการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับเถ้าลอย ในการออกแบบส่วนผสมมักใช้กำลังอัด (unconfined compressive strength) เป็นเกณฑ์กำหนด ในประเทศอังกฤษใช้กำลังอัด  $2.8 \text{ MN/m}^2$  ที่อายุ 7 วัน เป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการปรับปรุงสมบัติขอย แอกกรีเกตต่างๆ ด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าสำหรับเถ้าลอยต้องใช้ปูนซีเมนต์ผสมประมาณร้อยละ 5-15

- การปรับปรุงสมบัติเถ้าลอยด้วยปูนขาว การผสมปูนขาว (lime) ในเถ้าลอยจะช่วยให้กำลังอัดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการเพิ่มกำลังอัดนั้นต่างจากการผสมปูนซีเมนต์ คือ ในกรณีของปูนซีเมนต์นั้นจะมีสารเชื่อมประสานจะเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) ระหว่างปูนขาวกับซิลิกาในเถ้าลอยในเกณฑ์กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมักจะใช้ปูนขาวผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์

- การใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงสมบัติของดิน ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้กำลังอัดของขอยแอกกรีเกตเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่พบว่าจะต้องใช้ปูนขาวผสมกับเถ้าลอยในการใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติ ทั้งนี้เพื่อให้มีปฏิกิริยาปอซโซลานิกสร้างสารเชื่อมประสานได้มากขึ้น ขอยแอกกรีเกตที่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ดีโดยใช้เถ้าลอยผสมปูนขาวได้แก่พวกทรายที่มีมวลละเอียดน้อย

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

3. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เป็นสารเพิ่ม (Admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้งานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้ คือ

- ข้อดี - มีสภาพการใช้งาน (Workability) ดี
- มีความต้านทานต่อการแยกกลุ่ม (Segregation) ดี
  - มีค่าความซึมได้ของน้ำ (Permeability) ดี
  - มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต (Sulphate resistance) ดี
  - เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ช้าทำให้ปริมาณความร้อนที่ระบายออกในขณะที่คอนกรีตแข็งตัวมีค่าน้อย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในกรณีการเทคอนกรีต

- ข้อเสีย - อัตราการเพิ่มของกำลังอัดช้า
- สมบัติของเถ้าลอยแปรปรวนไม่แน่นอน ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก

การใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์

วิชาญ ภูพัฒน์ (2526) ได้กล่าวไว้ว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบผลิตซีเมนต์สามารถทำได้เนื่องจากเถ้าลอยมีซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ด้วยจึงสามารถนำเถ้าลอยนี้ไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ได้

ไม่เฉพาะแต่ในงานคอนกรีตเท่านั้น ที่จะสามารถใช้เถ้าลอยมาผสมทดแทนในบางส่วนของปูนซีเมนต์ได้ งานเกือบทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบก็สามารถนำ เถ้า

ลอยไปใช้ด้วยได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การผลิตคอนกรีตบดค ใช้ในการผลิตซีเมนต์ (cement grouting) เป็นต้น การนำไปใช้อีกอย่างหนึ่งที่แตกต่างไปจากแนวทางที่กล่าวมาในข้างต้นคือ ใช้ทำมวลรวมเบา (light weight aggregate) ในกรณีนี้ถ้าลอยจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 - 1,200 °C ซึ่งจะทำให้เม็ดถั่วลอยเกาะตัวเป็นก้อนที่แข็งมาก และสามารถใช้เป็นมวลรวมแทนหินย้อยได้ มวลรวมนี้จะเบากว่าหินย้อยธรรมดาซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตสำหรับงานอาคาร

## 2.3 ถั่วลอยขานอ้อย (Bagasse fly ash)

ขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาล ในปีหนึ่งๆ มีขานอ้อยที่ผลิตได้ในประเทศไทยไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน ซึ่งร้อยละ 30 ของขานอ้อยเหล่านี้เป็นพลังงานความร้อนในโรงงานน้ำตาล ขานอ้อยที่เหลืออีกจำนวนมากเป็นแหล่งใหญ่ของไฟเบอร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เพื่อทดแทนไม้ใบกว้าง ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุได้หลายประเภท เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถนำขานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงานน้ำตาลอีกด้วย (เกษตรสุชา พูลคำ, 2537)

### 2.3.1 การผลิตน้ำตาล

#### 2.3.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล

มีขั้นตอนดังนี้

##### 1) การเตรียมขานอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่านไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อยออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกอ้อย (Shredders) ซึ่งจะทำให้หน้าตัดอ้อยออกเป็นฝอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

##### 2) การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

อ้อยที่ละเอียดแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อย คือ ชุดลูกหีบที่มีน้ำหนักมากที่ติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4 - 6 ชุด และเพื่อให้มีการสกัดน้ำอ้อยออกมามากที่สุด จึงมีการพรมน้ำอ้อยและน้ำลงไปบนกากอ้อยที่ออกมาจากลูกหีบ แต่ละชุดซึ่งการพรมน้ำนี้จะช่วยให้สามารถสกัดน้ำตาลออกมาจากอ้อย ได้มากกว่าร้อยละ 95

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดครั้งสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้นประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไปแปรรูปเป็น เชื้อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆ ได้

### 3) การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดจะมีลักษณะสีเขียวเข้มถึงดำ ชุ่นข้น และมีสภาพเป็นกรดอย่างอ่อน ดังนั้นจึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำน้ำอ้อยให้เป็นกลางรวมทั้งกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก โดยผ่านกระบวนการทำให้ใส ซึ่งจะใช้ความร้อนและปูนขาวปรับสภาพน้ำอ้อยให้เป็นกลาง และปูนขาวจะจับกับสารละลายต่างๆ ปล่อยให้ตกตะกอนแล้วนำส่วนที่ใสไปทำการต้มเคี่ยวเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป ส่วนตะกอนนั้นจะนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ (Rotary drum vacuum filters) เพื่อแยกเอาส่วนน้ำอ้อยซึ่งยังมีความหวาน กลับเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง ส่วนกากตะกอน (Filter cake) ที่แยกออกจะส่งไปใช้ทำปุ๋ยต่อไป

### 4) การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอ้อยประมาณร้อยละ 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 แมสควิท (Massecuite) เมื่อทำให้แมสควิทนี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็ง พร้อมทั้งจะนำไปแยกผลึกต่อไป

### 5) การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสควิทที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยกที่เรียกว่า Centrifugal ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆ ขนาด 400 - 600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1000 - 1800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (Molasses) ออกไป ส่วนเมล็ดน้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดังเพื่อการจำหน่ายต่อไป

### 2.3.1.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอน และเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

#### 1. กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวสีดำที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของโรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และเหล้า
- ใช้ผลิตเป็นผงชูรส
- ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากมีส่วนประกอบของโพแทสเซียมอินทรีย์ วัตถุ และธาตุอาหารรองอื่นๆ อีกมาก
- ใช้ผสมกับชานอ้อยสำหรับทำถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงใช้ในครัวเรือน

#### 2. กากอ้อยหรือชานอ้อย (Bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ชานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี้ยวน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- ใช้ทำเยื่อกระดาษ
- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ในประเทศไทยจะใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้นโดยปริมาณชานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณชานอ้อยทั้งหมดที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การใช้ชานอ้อยมาทำเยื่อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือชานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก

#### 3. กากตะกอนอ้อย (Filter cake)

เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลหลังจากที่กรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและแคลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

#### 4. ถ้ำลอยขานอ้อย (Bagasse fly ash)

ถ้ำลอยนี้เกิดจากการนำขานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้ถ้ำลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจายจึงมีการฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับถ้ำลอยให้ถ้ำลอยตกลงมา ถ้ำลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนถ้ำที่เปียก มีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้ง

#### 2.3.1.3 การเผาขานอ้อยและการจัดการถ้ำลอยขานอ้อยที่เกิดขึ้น

ขานอ้อยที่เกิดจากการบีบสกัดเอาน้ำอ้อยจะถูกใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาลประมาณร้อยละ 30 โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเผาจะเกิดถ้ำลอยขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 ถ้ำลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องสัมผัสแบบเปียก (Wet collectors) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ก้อนถ้ำที่เปียกนี้จะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งขึ้นรถบรรทุกเพื่อนำไปทิ้งในบ่อเก็บที่เตรียมไว้

#### 2.4 สมดุลของการดูดติด (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดของสารละลายบนผิวของสารดูดติด ในขณะที่เกิดการดูดติดไปเรื่อยๆ นี้สารที่ถูกดูดติดก็มีแนวโน้มที่จะถูกคายกลับมาสู่สารละลายเหมือนเดิมความเข้มข้นของสารละลายจะเปลี่ยนแปลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่จำนวนสารละลายที่ถูกดูดติด และถูกคายกลับออกมาจากการดูดติดก็จะมีปริมาณเท่าๆ กัน ผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดติด และอัตราการคายสารออกก็จะถึงจุดสถานะสมดุลซึ่งจะเรียกว่าสมดุลของการดูดติด โดยที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสารละลายบนผิวของสารดูดติด หรือความเข้มข้นของตัวสารละลายเองการเพิ่มปริมาณสารที่ถูกดูดติดจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย การแสดงจำนวนของสารละลายที่ถูกดูดติดต่อจำนวนของสารดูดติดที่อุณหภูมิคงที่จะเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติด (Adsorption Equilibrium)

ระบบการดูดติดได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดติด โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดติดไว้หลายประการ แต่ที่นิยมนำไปใช้ได้แก่ Freundlich Adsorption Isotherm และ Langmuir Adsorption Isotherm

ก. Langmuir Adsorption Isotherm บางครั้งเรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model มีสมมุติฐานที่สำคัญ ดังนี้

- มีพื้นที่สำหรับการดูดติดจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดติดจะอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน
- แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดติดผิวจะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่าการดูดติดเพียงชั้นเดียว
- ตรงบริเวณดูดติดผิวจะเกิดอัตราการดูดติด และการคายสารออก ซึ่งอัตราการดูดติดมีมากกว่าอัตราการคายสารออกจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล (อัตราการดูดติดเท่ากับการคายสารออก) พลังงานในการดูดติดมีค่าเท่ากันในทุก ๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดติดไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้อย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้

สำหรับสมการ Langmuir เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.5)

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

โดยที่

$X$  =  $X/m$ , ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลาง  
มก./ก.

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว ; มก./ก.

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล ; มก./ล.

$b$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติด ; ล./มก.

เมื่อ  $X$  เข้าสู่  $X_m$  และ  $C_e$  เข้าสู่  $\alpha$  จากสมการเขียนได้เป็น

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

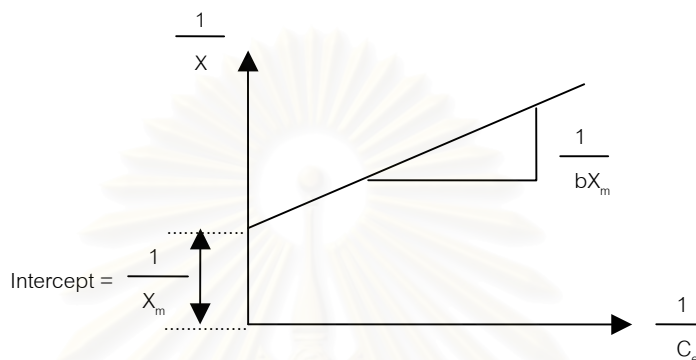
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/X$  กับ  $C_e$  จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน  $1/X_m$  และจุดตัดแกน  $Y$  เท่ากับ

$1/bX_m$  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  $1/C_e$  ได้แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir

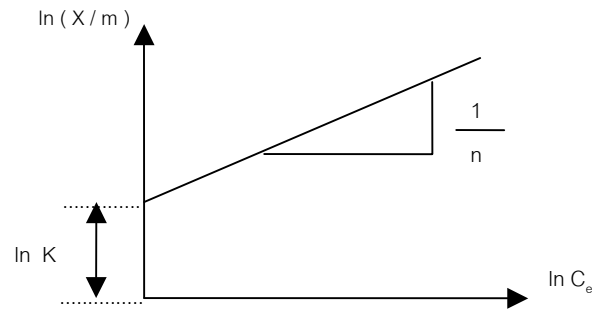
- ข. Freundlich Adsorption Isotherm จัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมากสมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดติดในระบบของเหลว สมการของ Freundlich เขียนได้แสดงดังสมการ (2.8)

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

โดยที่

- $X$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนัก ; มก./ก.  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล ; มก./ล.  
 $K$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว ; ล./ก.  
 $1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการ (2.8) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(X/m)$  และ  $\ln C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 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 ก็จะทำให้พบว่าการดูดติดนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อย 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 สมการที่ได้แสดงดังสมการ (2.9)

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

สมการ (2.9) นี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดติดทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

## 2.5 การผลิตตะกั่วแท่งจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า

### 2.5.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่รถยนต์

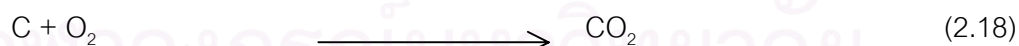
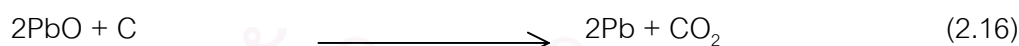
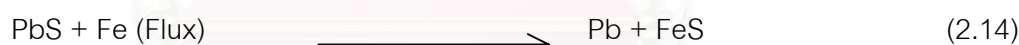
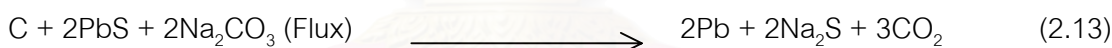
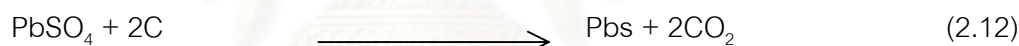
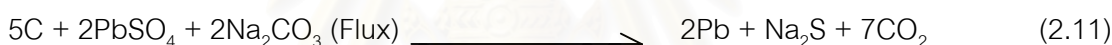
เมื่อพูดถึงแบตเตอรี่ ย่อมหมายถึงแหล่งที่สะสมพลังงานในรูปแบบเคมีแล้วจ่ายเป็นพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้งานเป็นกระแสตรง แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์ (SLI, Starting and Ignition Battery) เป็นแบตเตอรี่น้ำชนิดกรด - ตะกั่ว ใช้งานเป็นต้นกำลังในการติดเครื่องยนต์ เรือยนต์ จุดไฟแสงสว่าง จุดหัวเทียน ฯลฯ (ไสว โฉจนะศุภฤกษ์, 2539) แบตเตอรี่รถยนต์มีส่วนประกอบหลักได้แก่

- เปลือก(Case)** เปลือกแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ เปลือกพลาสติกส่วนใหญ่ เป็นพลาสติกชนิด Polypropylene สามารถนำกลับมาใช้หมุนเวียนใหม่ได้เปลือกอีกชนิดได้แก่ เปลือกยางแข็งหรือเปลือกดำ (Hard rubber) เปลือกชนิดนี้มีปัญหาในการกำจัด และยังมีปัญหาอันตรายจากสารที่ใช้เติมแต่งในเปลือกยาง (Filler material) เช่น Asbestos fibers
- แผ่นธาตุ(Electrodes)** แผ่นธาตุบวก (Positive electrodes) และแผ่นธาตุลบ (Negative electrodes) มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ โครง (grid) ทำด้วยอัลลอยด์โลหะตะกั่วผสมพลวง และเพสต์ (Paste) ซึ่งเป็นส่วนผสมของตะกั่วออกไซด์ กรดกำมะถัน น้ำ และสารปรุงแต่งของแบตเตอรี่แต่ละชนิด แผ่นธาตุที่จุ่มในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นกรดกำมะถัน เมื่อเกิดการถ่ายเทประจุ จะเปลี่ยนเป็นตะกั่วซัลเฟต ( $PbSO_4$ )
- แผ่นกั้น (Separator)** เพื่อที่จะกั้นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบออกจากกัน จำเป็นต้องมีแผ่นกั้นที่มีความพรุนที่ให้สาร Electrolyte ไหลผ่านได้ แผ่นกั้นที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ทั่วไป ได้แก่ PVC cellulose, กระดาษใยแก้ว, Micro porous polyethylene ส่วนประกอบของแผ่นกั้น เมื่อถูกเผาไหม้ในเตาหลอมจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสารพิษที่เป็นสารประกอบของคลอรีน เช่น ไดออกซิน และสารพิษอนินทรีย์ ปนอยู่ในก๊าซที่ออกจากเตาหลอม

**น้ำยาอิเล็กโตรไลต์** เป็นกรดกำมะถันเข้มข้นประมาณ 10-15% ภายหลังจากฟอร์มมิง (Forming) และใช้งาน กรดกำมะถันทำปฏิกิริยากับตะกั่วออกไซด์เป็นตะกั่วซัลเฟต ความเข้มข้นลดลงเหลือประมาณ 3-5% นอกจากส่วนประกอบหลักดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นซึ่งอาจแตกต่างกันไปบ้าง เช่น ขี้ผึ้ง ทองแดงสำหรับแบตเตอรี่บางยี่ห้อ จุกฝาพลาสติก เป็นต้น

### 2.5.2 กรรมวิธีการถลุงหลอมตะกั่ว

เป็นการหลอมโดยใช้สารโซเดียมคาร์บอเนตเป็นฟลักซ์ ช่วยในการดึงซัลเฟอร์ออกจากตะกั่วและลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการหลอมโดยอาจมีการเติมเศษเหล็กลงไปด้วยสัดส่วนของโซดาแอช เหล็ก และถ่านโค้ก จะปรับให้เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ใช้หลอม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ 2.10 - 2.18



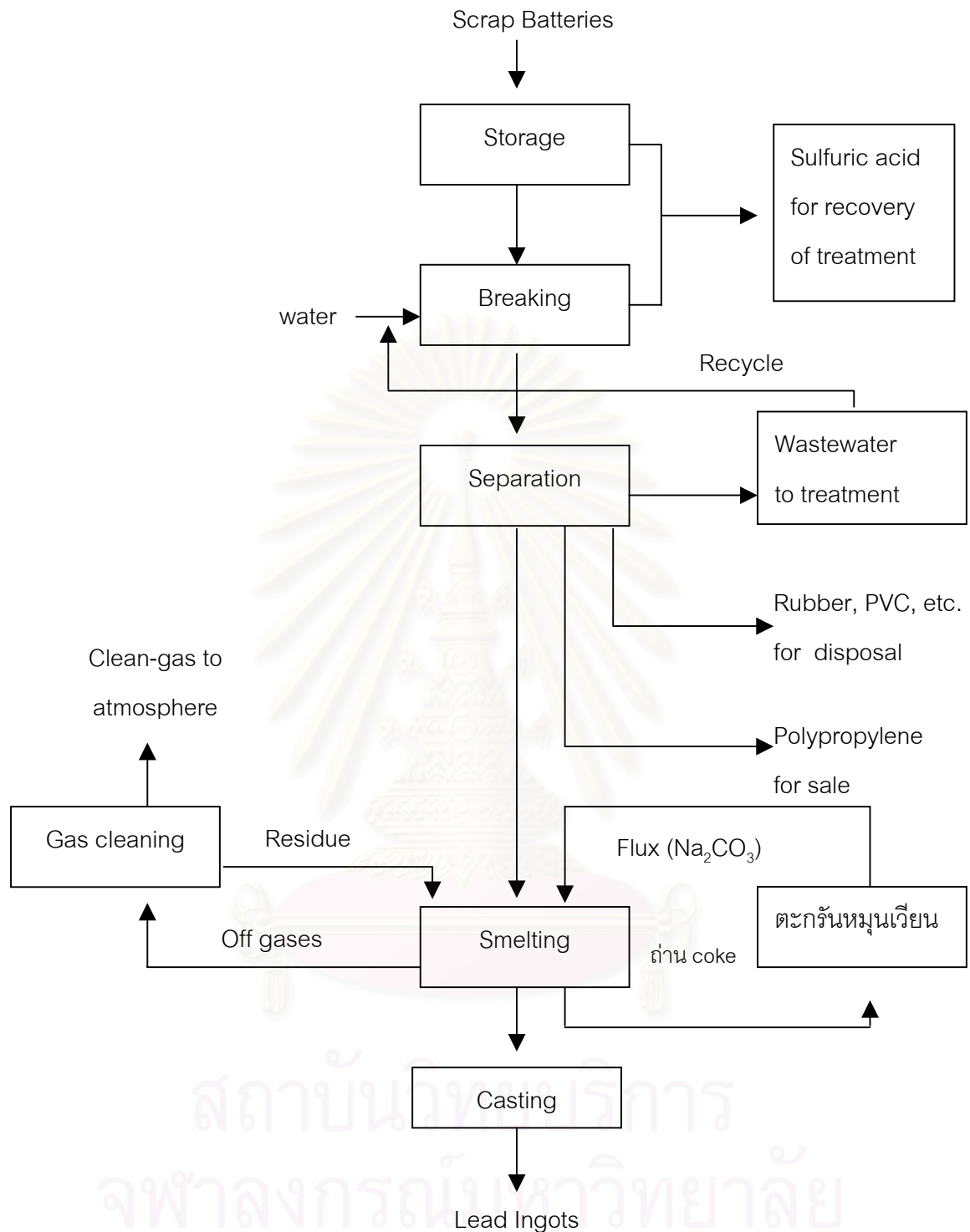
จากปฏิกิริยาเห็นได้ว่า โซเดียมคาร์บอเนตจะรีดิวซ์ตะกั่วซัลไฟด์ให้เป็นตะกั่วและให้สารขึ้นกลาง (Intermediate compound) ของเกลือโซเดียมหลายชนิด ส่วนใหญ่จะเป็น  $Na_2S$  และ  $Na_2S_2O_3$  โดยอาจมี  $Na_2SO_4$  และ  $Na_2S_2O_7$  เจือปนอยู่ด้วย การเติมโซดาแอชอาจช่วยในการลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากเตาหลอม

ปฏิกิริยาของเหล็กที่เติมลงไปจะเป็นเช่นเดียวกับโซดาแอช โดยจะไปรีดิวซ์ตะกั่วซัลไฟด์ให้เป็นตะกั่วแท่ง กากตะกั่วที่เกิดขึ้นในการหลอมด้วยโซดาแอช ประกอบด้วยเกลือซัลไฟด์และออกไซด์ของโซเดียมเหล็ก และตะกั่ว และอาจมีส่วนประกอบของ Silica, Alumina และออกไซด์ของโลหะอื่นๆ เจือปนอยู่ด้วย รวมทั้งถ่านคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดซึ่งอาจสูงถึง 20% กากตะกั่วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเรียกว่า โซเดียมแมท (Sodium sulphide containing matte) ประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{S}$   $\text{FeS}$  และ  $\text{PbS}$  อีกส่วนหนึ่งเป็นกากตะกั่วของออกไซด์ (Slag) ประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{SiO}_2$  (สุรพัทธ์ พันพานิชย์กุล, 2539) ทั้งโซเดียมแมทและกากตะกั่ว (Slag) จะอยู่รวมกันเป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่แยกชั้น (Phase) ให้เห็นอย่างชัดเจน สารประกอบทั้งหมดของกากตะกั่วส่วนใหญ่เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีและมีคุณสมบัติเป็น สารดูดความชื้น (Hygroscopic) ดังนั้นกากตะกั่วที่ได้จึงไม่อยู่ตัวและทำปฏิกิริยากับความชื้นและออกซิเจนในอากาศเกิดเป็น  $\text{NaOH}$  และ  $\text{SO}_2$  ขึ้นได้อีก ขั้นตอนการถลุงหลอมตะกั่วจากแบตเตอรีเก่าแสดงดังรูปที่ 2.19

### 2.5.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่งจากการหลอมแบตเตอรีเก่า

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่ง เกิดขึ้นในขั้นตอนการผ่าแยกชิ้นส่วนแบตเตอรีเก่า (Breaking and Separation) มีการฉีดพ่นน้ำเพื่อหล่อเย็นใบเลื่อยที่ใช้ในการผ่าแยกชิ้นส่วนแบตเตอรี และเพื่อล้างคราบน้ำกรดและน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ออกจากชิ้นส่วนก่อนเข้าสู่เตาหลอม

ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียคือ มีค่า pH ต่ำ และมีตะกั่วละลายปนอยู่สูง การบำบัดในปัจจุบันคือ ใช้สารเคมีปรับค่า pH ของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 7-9 แล้วจึงตกตะกอนแยกตะกอนออกจากน้ำใสส่วนบน ตะกอนที่เกิดขึ้นจะนำไปหลอมรวมในเตาหลอม น้ำใสส่วนบนที่ผ่านการปรับ pH แล้ว จะถูกสูบเวียนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตโดยไม่มีการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันสารเคมีที่ทางโรงงานใช้ในการปรับ pH ได้แก่ ปูนขาว และโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตโลหะตะกั่วแห่งโดยใช้เตาหลอมแบบตั้งและใช้ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เป็นฟลักซ์

## 2.6 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 ภายในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีแผ่เป็นแผ่นได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนักคือ มีค่าออกซิเดชัน (Oxidation number) ได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้รูปที่เสถียรกว่า โลหะหนักอิสระโดยเฉพาอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food chain) (ประภคต เลิศจรัสอร่ามดี, 2539)

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งโลหะต่างๆ ออกตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. โลหะที่ให้คุณประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นต้น
2. โลหะที่ไม่ก่อประโยชน์และโทษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อลูมิเนียม
3. โลหะที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่น ปรอท ตะกั่ว และสารหนู เป็นต้น
4. โลหะประเภทที่ก่อประโยชน์ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับเพียงเล็กน้อยแต่ให้โทษถ้าได้รับปริมาณที่สูง

### 2.6.1 ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุหมู่ 4A ทุกธาตุในหมู่นี้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ตะกั่วมีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วย รัศมีอะตอม (โคเวเลนต์) 154 pm รัศมีไอออน  $M^{+2}$  เป็น 120 pm ความหนาแน่น 11.3 กรัม/ลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1744 องศาเซลเซียส พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนขั้นที่ 1+2 เป็น 2167 กิโลจูล/โมล ขั้นที่ 1+2+3+4 เป็น 9330 กิโลจูล/โมล สภาพไฟฟ้าลบ เท่ากับ 1.55 การนำไฟฟ้าคือออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป  $PbO$ ,  $PbO_2$  และ  $Pb_3O_4$  ซึ่ง  $Pb^{2+}$  จะเสถียรกว่า  $Pb^{4+}$  เลดมอนออกไซด์หรือลิทาร์จได้จากการเผาตะกั่วในอากาศเป็นผงสีเหลือง ถ้าเผา  $PbO$  จะให้  $Pb_3O_4$  ( $2PbO \cdot PbO_2$ ) หรือตะกั่วแดงใช้เป็นสารสีทากันสนิม เลดไดออกไซด์สารสีน้ำตาลแก่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี สลายตัวความร้อนให้  $PbO$  และ  $O_2$  ใช้  $PbO_2$  ในการทำแบตเตอรี่และทำแก้วโดยใช้  $PbO$  แทน  $CaO$  จะได้แก้วฟลินต์ มีดัชนีหักเหสูง ใช้ทำแก้วเจียระไน แก้วของตะกั่ว 2+ โดยทั่วไป

จะไม่ละลายน้ำ ยกเว้นอะซิเตด และไนเตรดเมื่อละลายน้ำก็จะให้ไอออน  $Pb^{2+}$   $Pb^{2+}_{aq}$  เกือบของ ตะกั่ว  $2+$  ทุกชนิดละลายได้ในเบสจำนวนมากให้พอลิเมอร์  $Pb(OH)^{2-}_4$

แร่ตะกั่วเป็นแร่หนึ่งซึ่งได้มีการค้นพบ และนำมาใช้ประโยชน์ภายในประเทศตั้งแต่ สมัยโบราณ แร่ตะกั่วที่เป็นแหล่งใหญ่ มีคุณค่าทางเศรษฐกิจในปัจจุบันได้แก่ แร่ตะกั่ว ในบริเวณอำเภอทองผาภูมิ สังขละบุรี และศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี ถือได้ว่าเป็นแหล่งแร่ตะกั่ว ที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ แร่ตะกั่วที่พบเป็นแหล่งแร่ใหญ่ คือ แร่กาไลนา (Galena,  $PbS$ ) มีสีและสีผง ละเอียดเป็นสีเทาตะกั่ว มีความวาวแบบโลหะ มักพบเป็นรูปลูกบาทหรือลูกเต๋า อาจพบเป็นเม็ด เล็กๆ เกาะกันเป็นก้อนๆ มีความแข็ง 2.5 มีความถ่วงจำเพาะ 7.5 (งามพิศ, 2525 อ้างถึงใน ประภท เลิศจรธอร่ามดี, 2539

## 2.6.2 ประโยชน์ของตะกั่ว

1. ตะกั่วประมาณหนึ่งในสามของผลผลิตนำไปใช้ในรูปของตะกั่วออกไซด์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีแดง (Red lead) สีเหลืองส้ม (Litharge) และสีขาว (Lead carbonate) ตะกั่วขาว และแดงใช้ในการทำสี ตะกั่วสีส้มเป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมกระจก เครื่องเคลือบ บางชนิด

2. ใช้ทำหม้อแบตเตอรี่และโลหะหุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าต่างๆ ประมาณร้อยละ 25 ของผลผลิต

3. สารเตตระเอทิลเลด (Tetraethyllead  $Pb(C_2H_5)_4$ ) ซึ่งเป็นตัวเติมในน้ำมันเบนซินพลังสูงใน อัตรา 3 กรัมต่อแกลลอนและเพื่อให้เครื่องยนต์เดินเรียบขึ้น (Antiknock) ส่วนนี้ใช้ประมาณหนึ่งใน สาม นอกจากนี้เป็นการใช้ที่สูญเสียไปเลยไม่สามารถกลับมาใช้ได้อีก เพราะเผาแล้วกลายเป็นไอ เป็นมลพิษ (Pollution) ต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันเลิกใช้แล้วในประเทศไทยและอีกหลาย ประเทศทั่วโลก

4. ใช้เป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมทำท่อต่างๆ ตลอดจนทำพีวีซี

5. ใช้ในการผลิตกระสุนปืนชนิดต่างๆ

6. ใช้ในอุตสาหกรรมผสมต่างๆ เช่น

6.1 ตะกั่วดีบุก เป็นโลหะบัดกรี (Solder)

6.2 ตะกั่วผสมพลวง เป็นโลหะตัวพิมพ์ (Type metal)

6.3 ตะกั่วผสมดีบุกและทองแดง เป็นโลหะพิวเตอร์ (Pewter)

6.4 ตะกั่วผสมบิวมีสและแคดเมียม เป็นโลหะที่เรียกว่า (Wood's alloy)

6.5 ใช้ในระบบสัญญาณไฟไหม้อัตโนมัติซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 70 องศา (สุจิตร, 2530

อ้างถึงในประภท เลิศจรธอร่ามดี, 2539)



### 2.6.3 พิษของตะกั่ว

อาการของพิษเมื่อได้รับตะกั่วอินทรีย์ การแสดงออกทางจิตจะเด่นชัดกว่าอาการเจ็บไข้ ธรรมดา แต่ในรายรุนแรงจะมีอาการที่พบเห็นได้ทั่วไป คือ ความกระวนกระวาย ผื่นร้ำย จิตหลอน และหลงผิด อาการแทรกซ้อนหลายๆ อย่างจะเด่นชัด ได้แก่ อาการแพ้เจ็อ คลุ้มคลั่ง สับสน และการเก็บตัวไม่สูงสิงกับใคร ถ้าหากได้รับสารตะกั่วมากมายอาจเกิดอาการชักกระตุกทันทีทันใด ในรายที่รุนแรงน้อยกว่าผู้ป่วยอาจเริ่มด้วยการนอนไม่หลับ นอนหลับยาก นอนหลับๆ ตื่นๆ และกระวนกระวาย บางครั้งจะฝันอย่างโหดโผนและน่ากลัว ตอนกลางวันอาจจะมีอาการตื่นเต้นตกใจ ให้เห็น อาการปวดศีรษะจะกลายเป็นเรื่องปกติและมักจะรุนแรง และอาการวิงเวียนศีรษะจะพบได้เสมอ ในรายที่รุนแรงจะต้องมีการควบคุมแนะนำอย่างเข้มงวด และต้องการพยาบาลที่เชี่ยวชาญ ทั้งนี้เนื่องจากอาการประสาทหลอนและแนวโน้มในการฆ่าตัวตายสูง

### 2.6.4 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและผลต่อมนุษย์ของตะกั่ว

ตะกั่วสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและมีผลต่อมนุษย์ได้หลายทางดังนี้

1. ในอดีตการผลิตสีจะผลิตจากสารประกอบตะกั่ว ดังนั้นที่ที่สำคัญของโรคตะกั่วที่เป็นพิษน่าจะมาจากสีเก่าที่ผลิตไว้ เด็กๆ บางคนมีแนวโน้มที่จะกัดเคี้ยวสิ่งของ นิสัยชอบกินอาหารแปลกๆ ทำให้สีที่ประกอบด้วยตะกั่วถูกนำเข้าสู่ระบบย่อยอาหารโดยบังเอิญ
2. ท่อน้ำประปาในบ้านส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของสารตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วเป็นโลหะที่หล่ง่ายทนต่อการกัดกร่อนสูง
3. ตะกั่วที่ใช้บัดกรี เช่น การใช้สารบัดกรีที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว ในกรณีที่น่าระบบทำน้ำร้อนมาใช้ในการบริโภคน้ำร้อนจะกัดเซาะตะกั่วจากสารบัดกรีที่ท่อได้ง่ายกว่าน้ำเย็น นอกจากนี้ ตะกั่วที่ใช้บัดกรีอาหารกระป๋องโดยเฉพาะถ้าหากว่าอาหารถูกปล่อยไว้ในกระป๋องหลังจากเปิดกระป๋องแล้ว กระบวนการกัดเซาะจะละลายตะกั่วจากสารบัดกรีลงในอาหารได้
4. แบตเตอรี่รถยนต์ แบตเตอรี่รถยนต์เก็บไฟแบบกรดตะกั่ว
5. เครื่องสำอางบางประเภทที่มีปริมาณตะกั่วสูง
6. ตะกั่วถ่วงเบ็ดของนักตกปลา ในประเทศอังกฤษ ตะกั่วถ่วงเบ็ดประมาณ 250 ตัน ถูกนักตกปลาปล่อยทิ้งลงในแม่น้ำสายต่างๆ ทุกปี ซึ่งจะมีผลต่อหงส์จะกลืนกินตะกั่วเหล่านี้เข้าไป และตายเพราะตะกั่วเป็นพิษ ซึ่งเป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้หงส์ต้องตายไปเกือบ 3000 ตัวต่อปี เมื่อปี ค.ศ.1964 นายแพทย์มอนครีฟ (Moncrieff) และผู้เข้าร่วมงานประจำโรงพยาบาลเกรท ออร์มอนด์ สตรีท ได้ตรวจสอบตัวอย่างเด็กๆ จำนวน 122 รายที่เป็นโรคปัญญาอ่อนขั้นรุนแรงหรือมีอาการผิด

ปกติทางจิตพบว่าเกือบครึ่งหนึ่งของเด็กเหล่านี้มีระดับตะกั่วในเลือดค่าสูงกว่าปกติ หมายความว่า มีระดับตะกั่วอยู่เกิน 36 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ตัวเลขนี้เป็นขีดสูงสุดที่พวกเขาพบในกลุ่มเด็กปกติที่นำมาใช้เปรียบเทียบ 86 คน

ผลกระทบของตะกั่วต่อทารกในครรภ์ได้ถูกชี้ให้เห็นชัดเจนจากรายงานการศึกษา ดีพิมพ์เมื่อปี 1978 โดยแสดงให้เห็นว่าเด็กที่คลอดตายโดยเฉลี่ยจะมีปริมาณของตะกั่วในกระดูกสูงกว่าเด็กปกติ ตะกั่วมีผลต่อการทำให้แท้งบุตร ไบร-สมิทและผู้ร่วมงานในมหาวิทยาลัยริตติ้งได้พบปริมาณสะสมของตะกั่ว ในเด็กที่คลอดตายมีค่าสูงกว่าในเด็กเกิดใหม่ที่มีชีวิตรอด 5 - 10 เท่า (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2530 อ้างถึงในประภฤต เลิศจรส์อร่ามดี, 2539)

Smith (1975) รายงานว่ามีปริมาณตะกั่วในดินและพืชจะเป็น Exponential function กับระยะห่างจากถนน จากรายงานของ Zimdahl (1975) พบว่าตะกั่วอยู่ในรูปที่พืชใช้ไม่ได้ และพืชจะได้รับธาตุตะกั่วทางรากได้เพียง 0.03 - 0.005 % ในปี ค.ศ.1977 Krause ได้ทดลองพ่นสารประกอบออกไซด์ของตะกั่วที่ไม่ละลายน้ำที่ใบของพืช พบว่าพืชสามารถดูดซับสารประกอบตะกั่วได้ และสรุปว่าพืชได้รับสารตะกั่วจากบรรยากาศได้ทางใบมากกว่าทางราก

จากรายงานการวิจัยโครงการวิจัยศึกษาสมบัติ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับความเป็นพิษของดินในกรุงเทพมหานคร โดยสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (นวลฉวี และ วิชัย, 2521 อ้างถึงในประภฤต เลิศจรส์อร่ามดี, 2539) ได้กล่าวถึงปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมในพืชว่าจากการวิเคราะห์หีจากร่องผักบริเวณอโศกดินแดง พบว่าผักคะน้ามีปริมาณตะกั่วมากกว่าผักขม และในใบพุระหงส์ซึ่งเก็บจากรั้วบ้าน พบว่าปริมาณตะกั่วสูงถึง 389.3 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งรายงานชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักเข้าไปในต้นพืชได้

จากโครงการวิจัยโลหะหนักในพืชผักเศรษฐกิจ โดยวรวิทย์ ชีวาภรณ์ภักดิ์ พบว่าปริมาณตะกั่วในผักคะน้ามีปริมาณตะกั่วบริเวณลำต้นสูงกว่าในใบ โดยในลำต้นมีค่าเฉลี่ย 25.6 ส่วนในล้านส่วน ส่วนในใบมีค่าเฉลี่ย 14.8 ส่วนในล้านส่วน ส่วนปริมาณปรอทในพืชส่วนใหญ่ตัวอย่างพืชตรวจไม่พบ เท่าที่ตรวจมีค่าสูงสุดในหัวผักกาด (0.02 ส่วนในล้านส่วน) จากบริเวณดำเนินสะดวก (วรวิทย์, มปป.อ้างถึงในประภฤต เลิศจรส์อร่ามดี, 2539)

กรณีเด็กหญิงซึ่งอาศัยอยู่หมู่บ้านที่ 3 ตำบลบางครุ อำเภอพระประแดง เสียชีวิตลง และแพทย์วินิจฉัยว่าสาเหตุการตายครั้งนี้เกิดจากสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป จากสภาพหมู่บ้านพบว่า มีผู้นำเอาขี้เถ้าที่ขอมาจากโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่รถยนต์เก่าๆ มาถมถนนในหมู่บ้าน พบว่าผู้ที่อยู่ในหมู่บ้านดังกล่าวส่วนใหญ่มีปริมาณตะกั่วในเม็ดเลือดสูงกว่าระดับปกติมาก จากการศึกษพบว่า

1. ระดับตะกั่วในดิน ที่ผิวดินบริเวณที่ถมกากแบตเตอรี่จะพบปริมาณตะกั่วสูงกว่าถนนที่ไม่ได้ถูกถม นอกจากนี้ระดับของตะกั่วในบริเวณข้างถนนก็จะมีค่าสูงมาก

2. น้ำที่ชาวบ้านนำมาซักผ้ามีตะกั่วอยู่ในระดับ 0.01 ส่วนในล้านส่วน น้ำจากหนองน้ำมีตะกั่ว 0.12 ส่วนในล้านส่วน น้ำบาดาลที่ห่างจากถนน 20 เมตรมีตะกั่ว 0.02 ส่วนในล้านส่วน

3. ระดับตะกั่วในพืชพบว่าโพธิ์พามีระดับตะกั่วสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับผักบุ้งและผักกระเฉด

4. ระดับตะกั่วในปลาและหอย ปลากระดี่มีระดับตะกั่ว 16.5-33.6 ส่วนในล้านส่วน

5. ระดับตะกั่วในเลือดเด็กอยู่ในช่วง 0.15-5.40 ส่วนในล้านส่วน โดยเฉลี่ย 1.28 ส่วนในล้านส่วน (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2520)

จะเห็นได้ว่าปริมาณตะกั่วปัจจุบันแพร่กระจาย และเพิ่มมากขึ้นทั้งในดิน ในน้ำ และในอากาศรอบตัวเรา อันเนื่องมาจากการใช้สารตะกั่วเตตระเอทิลเลด ( $Pb(C_2H_5)_4$ ) เดิมลงไป ในน้ำมันเชื้อเพลิง ประมาณกันว่าจะต้องเติมสารตะกั่วดังกล่าว 3 กรัมหรือประมาณ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เพื่อเพิ่มพลังและช่วยให้เครื่องยนต์เดินเรียบ และพ่นออกมากับแก๊ซจากท่อไอเสียสู่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันอาจใช้ถึง 1 ใน 3 ของผลผลิตของตะกั่วและนับวันจะเพิ่มขึ้นทุกปี และเป็นตะกั่วที่ใช้แล้วสูญไปเลยไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ซ้ำยังเกิดอันตรายแก่คนอื่นอีกด้วย ซึ่งปัจจุบันเลิกใช้แล้ว นอกจากนี้การใช้ถ่านหินซึ่งมีตะกั่วโดยเฉลี่ยส่วนในล้านส่วน ก็สามารถนำโลหะนี้ไปสู่สิ่งแวดล้อมได้เช่นเดียวกัน มีผู้ศึกษาและวิเคราะห์ชั้นของหิมะในประเทศกรีนแลนด์พบปริมาณตะกั่วในบรรยากาศ ซึ่งตกลงมาพร้อมกับหิมะในปี พ.ศ.2483 (สุจิตร์, 2530 อ้างถึงใน ประกฤต เลิศจรัสอร่ามดี, 2539)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mavros, Zouboulis and Lazaridis (1993) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการใช้ถ่านหินมาใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิล โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัดโดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าคาร์เดียและเมกาโปลิส โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาประมาณ 10 นาที ที่ค่าพีเอช 8.5 - 9 จะสามารถกำจัดโลหะนิกเกิลได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ในช่วงค่าพีเอชกลางๆ พบว่าการกำจัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าลอยที่ถูกเติมลงในสารละลายเป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้าลอยอีกด้วยเช่นที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 พบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าคาร์เดียสามารถกำจัดนิกเกิลได้ 60 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าเมกาโปลิส สามารถกำจัดนิกเกิลได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น การทดลองในขั้นต่อมาได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเถ้าลอยกับการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ และคาร์บอน พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะนิกเกิลได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าพีเอชต่ำๆ ส่วนการใช้คาร์บอนพบว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยที่ค่าพีเอชต่ำกว่าค่าพีเอชของการตกตะกอน

บงกช พิภูษณะนาคทนต์และประภัตรา ศศินานนท์ (2538) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ A, X และ Y พบว่า เวลา, อุณหภูมิ, รัศมีไอออน, ขนาดปากทางเข้าโพรง และสัดส่วนโมลของ Si/Al ของซีโอไลต์ A, X และ Y มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน กล่าวคือ  $Cd^{2+}$  ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า  $Pb^{2+}$  สามารถแลกเปลี่ยนที่  $Na^+$  ในซีโอไลต์ทั้งสามชนิดได้ดีกว่าโดย ซีโอไลต์ A และ X ซึ่งมีสัดส่วนโมลของ Si/Al ต่ำกว่า ซีโอไลต์ Y จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าโดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้กำจัด  $Cd^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  จากน้ำทั้งคือ ที่อุณหภูมิห้องใช้เวลาในการกำจัด  $Cd^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  เป็น 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ แต่ถ้าจะให้ประสิทธิภาพดีขึ้นควรใช้อุณหภูมิที่จุดเดือดของสารละลาย

Amrhein et al. (1996) ได้ทำการศึกษาสมบัติของเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในอเมริกา และได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายผสมระหว่างสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของสารละลายต่าง ความเข้มข้นของต่าง ความดัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ความเสถียรของซีโอไลต์ ทดสอบการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย และวิเคราะห์ด้วย เครื่องเอกซ-

เรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโตรโฟโตเมทรี จากผลการวิเคราะห์พบว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล และ ซีโอไลต์โพแทสเซียมคาร์บาไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ตามลำดับ ส่วนสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่เกิดซีโอไลต์ สำหรับที่ความดันสูงเกิดซีโอไลต์โซเดียม - พีแอล ที่ 100 องศาเซลเซียส โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ และซีโอไลต์เอกซ์ ได้จากการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ที่ 250 องศาเซลเซียส

สัญญาภาณ สนิทธารักษ์และสมชาย พานิชสาส์น (2540) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการเตรียมซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การศึกษามวลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเกิดของซีโอไลต์จากเถ้าลอย ซึ่งทำที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 3, 6 และ 10 วัน และศึกษามวลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดซีโอไลต์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 3, 3.5, และ 4 โมลาร์ และทำการทดสอบหาค่า Cation Exchange Capacity (CEC) พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 วันมีค่า CEC สูงที่สุด ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลช่วงหนึ่งได้

Curkovic et al. (1997) ได้ทำการทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสีย โดยใช้ซีโอไลต์ตามธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านขบวนการพิเศษ และซีโอไลต์ที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้จะนำมาทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ซีโอไลต์ 3 แบบ คือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ 1 ตัวอย่าง และซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษอีก 2 ตัวอย่าง โดยซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษทำโดยนำซีโอไลต์ธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 22 และ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ผลของการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และประสิทธิภาพในการกำจัด เมื่อทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิจะพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากขึ้น

Querol et al. (1997) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทำปฏิกิริยาในระบบปิด มีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ (150 - 200 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (8 -10 ชั่วโมง) และความเข้มข้นของด่างที่ใช้ (0.1-1 โมลาร์) ประมาณค่าความดันระหว่างเกิดปฏิกิริยามีช่วงอยู่ระหว่าง 0.48 Mpa ที่ 150 องศาเซลเซียส ถึง 1.55 Mpa ที่ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับ 0.055 ก./มล. ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ส่วนใหญ่คือ ซีโอไลต์กลุ่มโซเดียม-พีแอล (zeolite-Na-PI) จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยมีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  จะเห็นว่าแม้ทำการสังเคราะห์ภายใต้สภาวะเดียวกันแต่ถ้าอัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่างกันก็จะทำให้เกิดซีโอไลต์ต่างชนิดกันไป

Steenbruggen and Hollman (1998) ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยนำเอาเถ้าลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่เกิดปฏิกิริยาในระบบปิด ตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา สัดส่วนของของเหลวต่อของแข็ง (L/S) ความเข้มข้นและชนิดของสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ และจากการทดลองสังเคราะห์เถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 90-150 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (Na - PI) เถ้าลอยถ่านหินจะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ประมาณ 45% และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม (CEC) เพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 2.4 มิลลิสมมูลต่อกรัม จากนั้นได้นำเอาซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำ ปรากฏว่าลำดับความชอบของไอออนของซีโอไลต์คือ  $\text{Ba} > \text{Cu} > \text{Cd} \approx \text{Zn} > \text{Co} > \text{Ni}$

Hollman et al. (1999) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารละลายเบส ความดัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (Zeolite Na - PI) ซีโอไลต์โซเดียม - เอกซ์ (Zeolite Na - X) และโซดาไลต์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ ที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง 2.0-2.5 meq/g

พรรตตินา จรัสรัตนมงคล (2542) ได้ศึกษาการผลิตซีโอไลต์จากแหล่งดินเบา แม่ทะ จังหวัดลำปาง เพื่อเป็นสารดูดซับชนิดหนึ่ง สารละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดโลไมท์ ได้นำมาใช้เป็นวิธีปรับสภาพทางเคมีใน 2 สภาวะ สภาวะหนึ่งกระทำที่อุณหภูมิการเดือดในความดันบรรยากาศ อีกสภาวะหนึ่งทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่า ผลของการบำบัดน้ำเสียในนาุ้งได้ผลน่าพอใจ จากการหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และความถ่วงจำเพาะ ซึ่งเป็นการประเมินค่าซีโอไลต์เพื่อที่จะให้ทราบถึงประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าซีโอไลต์ที่เตรียมจากดินเบาโดยส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดโลไมท์ ได้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึง 15 มิลลิสมมูลต่อ 100 กรัม และมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.20 จากผลการปรับสภาพน้ำเสียในห้องปฏิบัติการพบว่า  $\text{NH}_3$  ได้ลดลงมากกว่า 50% และ  $\text{H}_2\text{S}$  ลดลงเพียง 11% เท่านั้น

มนตรี ทองคำ (2542) ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ้าวลอยถ่านหินที่ใช้เป็นสารตั้งต้นได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเครื่องกวนที่ต้องมีการกวนตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบซีโอไลต์ดังนี้ Zeolite P, Chabazite, Nepheline, Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่นๆ เช่น Sillimanite, Willhendersonite, Gehlenite ภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 619.44 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์ ซึ่งให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้นจากถ้าวลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 52.20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การศึกษากำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงการทดลอง (Experimental research) และทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย (Solidwaste laboratory) หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม (Research Unit of Industrial Waste Management) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้จะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน

3.1.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย และทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3.1.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด

- ทางกายภาพ

1) การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว, ปริมาตรโพรง โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunance- Emmett-teller)

2) วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)

3) การทดสอบหาขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

- ทางเคมี

1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดโดยใช้ X-rays Fluorescences Spectroscopy (XRF)

2) วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้ X-rays Diffraction Spectroscopy (XRD)

3.1.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ คือ เวลา พีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)



3.1.4 ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอย  
ชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
2. ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
3. หม้อดูดความชื้น (Desicator)
4. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม.
5. ครุชีเบิลพอร์ซีเลน พร้อมฝาปิด
6. ปั๊มสุญญากาศ (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 furnance รุ่น 3-1750.USA
13. ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด
14. ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 100,325.mesh
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน : Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL,Model
16. เครื่องวัดพื้นที่ผิว : Specific Surface Area Analyzer, ASAP2000.Germany
17. เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS). Perkin Elmer Instrument,  
Analyst 300 Atomic Adsorption Spectrophotometer. USA
- 18.Laser Particle Size Analyzer Malvern Instruments รุ่น Mastersizer 2000  
Ver.Version 4.00
19. X-rays Diffraction Spectroscopy JOEL รุ่น JDX-8030, JAPAN
20. X-rays Fluorescences Spectroscopy JOEL รุ่น PW 2400 PHILJPS, JAPAN.

### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย

1) การเตรียมเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา นำเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้าและเถ้าลอยขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากเถ้าลอยและทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น จากนั้นนำเถ้าลอยที่ผ่านการอบแล้วมาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 mesh และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh จากนั้นนำไปบรรจุในหม้อดินและปิดฝา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (สาเหตุที่ต้องเผาเพราะว่าต้องการกระตุ้นให้เถ้าลอยทั้งสองประเภทอยู่ในสภาพพร้อมคือเป็นสารประกอบของควอต และมุลไลต์ที่จะทำปฏิกิริยา) หลังจากนั้นปล่อยให้เถ้าลอยทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 และ 3.5 โมลาร์ นำเถ้าลอยที่ผ่านการเผามาชั่งประมาณ 10.00 กรัม และนำสารละลายที่เตรียมไว้มาเทลงในขวดที่ชั่งเถ้าลอยปริมาตร 80 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปเขย่าโดยใช้ Shaker water bath ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 และ 100 องศาเซลเซียสแต่ละอุณหภูมิจะเก็บตัวอย่างที่ 3, 4 และ 5 วัน

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

#### 3.3.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด

นำเถ้าลอยทั้งสองชนิด และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดมาบดให้ละเอียดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 mesh ได้ ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเก็บไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 1) การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว, ปริมาตรโพรง โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunance-Emmett-teller) โดยการวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดเก็บไว้โดยเถ้าลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์
- 2) การทดสอบขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer
- 3) วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)

- 4) วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโทรโฟโตเมทรี (XRD)
- 5) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

### 3.3.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์

#### 3.3.3.1 ศึกษาผลของ pH

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ตะกั่วความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่า pH เท่ากับ 4,5,6 และ 7 ตามลำดับโดยการปรับ pH ด้วยสารละลายเบส 1 N NaOH หรือสารละลายกรด 1 N HNO<sub>3</sub>
- 2) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ตะกั่วความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่า pH เท่ากับ 4,5,6 และ 7 ตามลำดับปริมาตร 100 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
- 3) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อยในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 0.1 กรัม
- 4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42
- 6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS
- 7) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟหาค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.3.3.2 ศึกษาผลของเวลาสัมผัส

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ตะกั่วความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่า pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.1 ปริมาตร 100 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
- 2) เติมซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ลงในขวดแต่ละใบปริมาณ 0.1 กรัม

- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 5,10,20,30,60,90,120,150,180,240,300,900 และ 1440 นาที ตามลำดับ
- 4) แยกซีไอไลต์ออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่า pH น้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS
- 6) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟหาค่าเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด

### 3.3.3.3 ศึกษาผลความเข้มข้นของโลหะหนัก

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ตะกั่วความเข้มข้นดังนี้ 10,15,20 mg/l ปรับ pH ให้เท่ากับค่า pH ที่เหมาะสมจากข้อ (3.3.3.1) ปริมาตร 100 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
- 2) เติมซีไอไลต์ที่เตรียมไว้ ปริมาณ 0.1 กรัมลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด จากข้อ (3.3.3.2)
- 4) แยกซีไอไลต์ออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่า pH ของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

### 3.3.3.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดของซีไอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 10 mg/l มีค่า pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.1 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml ปริมาตร 100 ml ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
- 2) เติมซีไอไลต์ที่เตรียมไว้ช่วงน้ำหนักที่แน่นอน 0,0.01,0.02,0.04,0.08,0.1,0.2 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 3.3.3.2)

- 4) แยกซีไอไลต์ออกโดยกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่า pH ของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS
- 6) นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟและวิเคราะห์ผล

### 3.3.4 การศึกษาการคายออกจากผิวของโลหะตะกั่ว

เพื่อทดสอบความเสถียรของซีไอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยซานฮ้อยที่ดูดซับโลหะตะกั่วแล้ว การทดสอบของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2531 ได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตรายโดยใช้วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) (จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์, 2539)

- 1) นำซีไอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการดูดซับโลหะตะกั่วจากการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.1 มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
- 2) นำซีไอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดจากข้อที่ 1) มาใส่ในน้ำกลั่นซึ่งผสมกรดไฮโดรคลอริกจนมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรสารละลายเป็น 100 เท่า (ml) ต่อน้ำหนักกรัมของซีไอไลต์สังเคราะห์
- 3) เขย่าบนเครื่องเซคเกอร์ 200 รอบต่อนาที ช่วงกว้างการเขย่า 5 เซนติเมตรเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- 4) กรองสารละลายที่ได้ผ่านกระดาษกรอง
- 5) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 4) ไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของซีไอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยซานฮ้อยในการกำจัดตะกั่วโดยนํากรทดลองที่ดีที่สุดจากข้อ (3.3.3.1-3.3.3.4) มาทำการทดลองกับน้ำเสียจริง

- 1) ในการศึกษาได้ทดลองกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่งโดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วเริ่มต้นดังนี้
  - 1.1) ปิเปตต์น้ำตัวอย่างที่กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 มา 50 มิลลิลิตร เทลงในปิเปกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 5 มิลลิลิตร

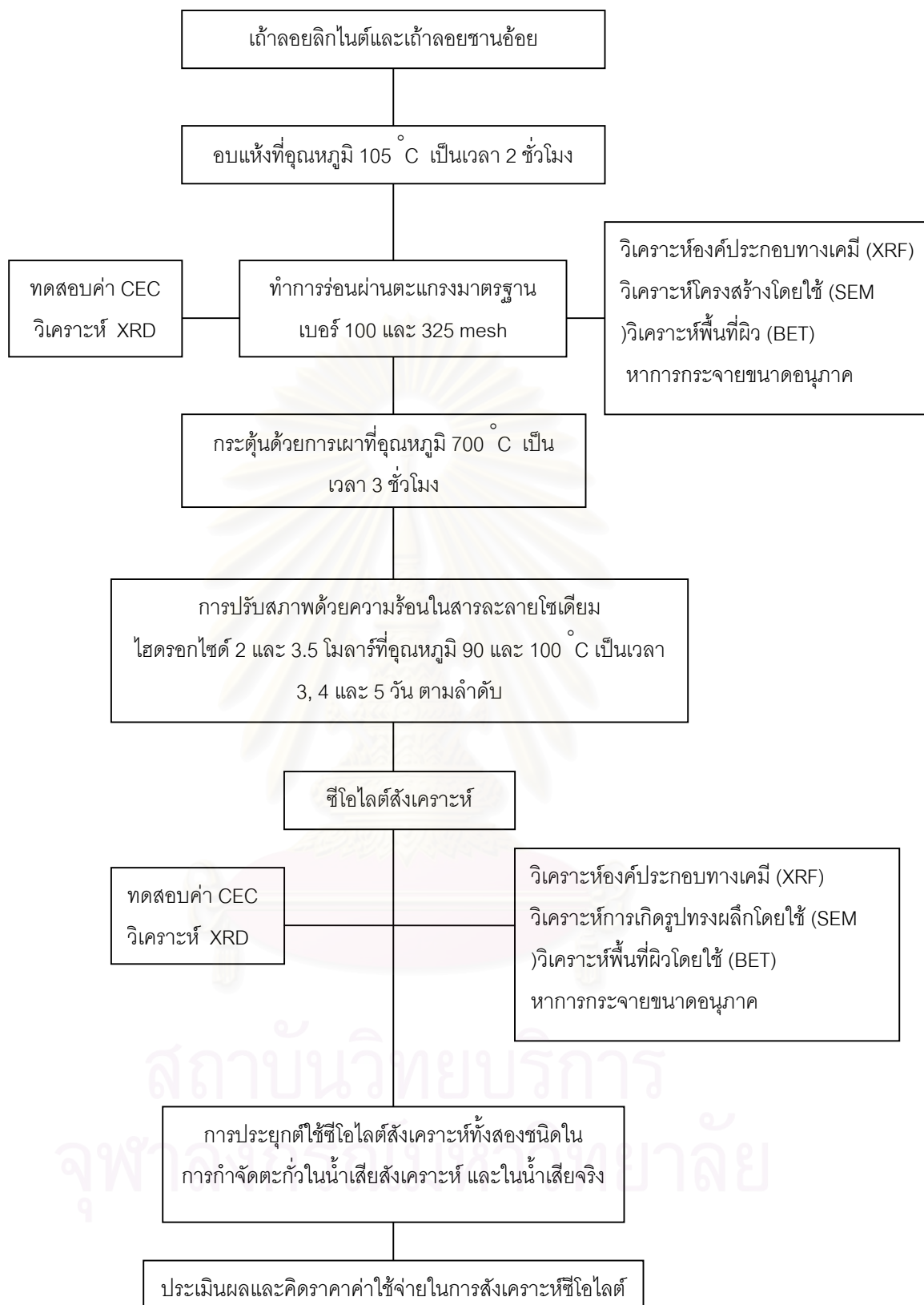
- 1.2) นำไปต้มในตู้ความดันจนกระทั่งสารละลายในบีกเกอร์มีปริมาตรเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร
  - 1.3) เติมน้ำกลั่นในบีกเกอร์ 5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ และนำไปต้มต่อจนน้ำในบีกเกอร์มีปริมาตรเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร
  - 1.4) ทิ้งให้เย็น แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
  - 1.5) เจือจางให้ได้ปริมาตร 1 : 50 โดยการเติมน้ำกลั่นแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็น
  - 1.6) นำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว โดยใช้เครื่อง AAS
- 2) นำน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่งที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 มาปรับ pH ให้ได้ตามการทดลองที่ 3.3.3.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ
  - 3) เติมน้ำกลั่นที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ
  - 4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 3.3.3.2
  - 5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่า pH ของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้
  - 6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

### 3.3.6 ประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ประมาณค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ 1 กิโลกรัม โดยคิดจาก

- ค่าวัตถุดิบ
- ค่าสารเคมี
- ค่าแรงงาน
- ค่าไฟฟ้า

หมายเหตุ เป็นการคิดราคาต้นทุนเท่านั้นไม่ได้คิดค่าการตลาดแต่อย่างใด



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การทดลองศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ การสังเคราะห์ซีโอไลต์จาก ถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย ซึ่งรวมถึงการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออน (CEC) ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของ ถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์ การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการ กำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองชนิด (Batch test) การศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง และการศึกษาการคายออก จากผิวของโลหะตะกั่ว

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยและการหาค่า การแลกเปลี่ยนไอออน (CEC)

##### 4.1.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยชานอ้อยนั้นทำได้โดยการนำ วัสดุดิบ คือ ถ้ำลอยถ่านหินมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนถ้ำลอยชานอ้อยที่มาจากโรงงานน้ำตาลมีลักษณะเป็นถ้ำเปียก จึงต้องตากแดดให้แห้งก่อน จากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้ำลอยทั้งสอง ชนิดที่ผ่านการอบแล้ว มาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 mesh และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้ำลอยทั้งสอง ชนิดที่ผ่านการเผา มาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 และ 3.5 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนถ้ำลอยต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:8 และนำไปให้ความร้อนโดยใช้ อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 90 และ 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3, 4 และ 5 วัน ซึ่งถ้ำลอยประมาณ 100 กรัมสามารถสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ได้ประมาณ 80 กรัม เมื่อ ได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ทุกสภาวะแล้ว จึงนำซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดมาทดสอบค่าความ สามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) เพื่อเลือกสภาวะที่ดีที่สุดมาทำการทดลองขั้นต่อไป



#### 4.1.2 การทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) ของซีโอไลต์ สังเคราะห์ที่สภาวะต่าง ๆ

การทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยชานอ้อยจากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน คือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 5 วัน และสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยชานอ้อย คือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน และเปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้น

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเฉลี่ย (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยถ่านหิน	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเฉลี่ย (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยชานอ้อย
ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (M)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)		
2	90	3	412.03	206.66
		4	425.54	303.19
		5	556.71	276.01
2	100	3	429.97	215.35
		4	450.03	253.11
		5	565.62	286.62
3.5	90	3	389.28	188.92
		4	400.58	201.07
		5	440.46	235.97
3.5	100	3	359.45	202.40
		4	423.47	218.37
		5	472.84	244.92

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 จะพบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น และคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้เลือกสภาวะที่จะใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินคือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุด คือ 565.62 cmol/kg และสำหรับสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยชานอ้อย คือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุดคือ 303.19 cmol/kg

ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทั้งสองชนิด คือ 2 โมลาร์ เนื่องจากให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงซึ่งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ที่เลือกใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amrchein et al., 1996 and Querol et al., 1997 ที่ว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 0.5 โมลาร์ เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์มากที่สุด เพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปย่อยสารประกอบควอตและมุลไลต์ในเถ้าลอยถ่านหินและ เถ้าลอยชานอ้อยจนได้สารประกอบอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และซิลิกาออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ออกมา นอกจากนี้โซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) ยังทำให้โครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลของซิลิกาออกซิเจน เตตระฮีดรอล ( $SiO_4$ ) และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $AlO_4$ ) อยู่ในสภาพเสถียรยิ่งขึ้น ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่า 2 โมลาร์ขึ้นไปไม่เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะที่ความเข้มข้นสูงๆ นั้น สารประกอบควอต และมุลไลต์ในเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อยจะถูกย่อยมากจนทำให้เกิดโครงสร้างของผลึกที่หนาแน่นมาก (Dense Material) เช่น Mullite และ Gehlenite ซึ่งเป็นสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ เพราะว่าซีโอไลต์มีโครงสร้างที่อยู่กันอย่างหลวมๆ (Loose Material) (มนตรี ทองคำ, 2542)

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนก็จะเพิ่มขึ้นสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินจะเลือกระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 5 วัน ส่วนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยชานอ้อยนั้นจะเลือกระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 4 วัน เนื่องจากทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมีค่าสูงที่สุดคือ 565.62 และ 303.19 cmol/kg ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนตรี ทองคำ, 2542 ที่กล่าวว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นการเกิดผลึกซีโอไลต์ก็จะสูงตามไปด้วย เพราะโอกาสในการเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างของถ้ำลอย (ควอตและมุลไลต์) ที่เป็นของแข็งอัญฐานไปเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกย่อมมีมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (cmol/kg)	ถ้ำลอยถ่านหิน	ซีโอไลต์สังเคราะห์ (ถ้ำลอยถ่านหิน)	ถ้ำลอยชานอ้อย	ซีโอไลต์สังเคราะห์ (ถ้ำลอยชานอ้อย)
	60.59	565.62	32.07	303.19

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 565.62 cmol/kg พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมานี้ให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้ดีกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 60.59 cmol/kg และพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 303.19 cmol/kg โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นนี้จะทำให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนดีกว่าถ้ำลอยชานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ซึ่งให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 32.07 cmol/kg

การนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินไปใช้งานส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยอาศัยสมบัติของการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์

งานวิจัยของ Patana et al. (1996) นำ Zeolite A และ Zeolite P ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินมากำจัดทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) และสังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ออกจากน้ำเสีย

งานวิจัยของ Atkins et al. (1995) นำ Zeolite P ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินมากำจัดทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) และสังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ออกจากน้ำเสีย

งานวิจัยของ Singer and Berkgaut (1995) นำ Zolite P ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอย ถ่านหินมากำจัดตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) และสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) ออกจากน้ำเสีย

งานวิจัยของ LopezSalinas et al. (1997) นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอย ถ่านหินมาลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ ซีโอไลต์จากถ้ำลอยลึกในตี่ซึ่งในประเทศไทยยังมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ไม่มากนักส่วนมาก จะเป็นงานวิจัยจากต่างประเทศ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลงานวิจัยการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยลิกไนต์

	Amrhein et al. (1996)	Prasop Virakomphanich (1998)	มนตรี ทองคำ พ.ศ.2542	ปิยะ  पुलเวคินทร์ พ.ศ.2545	งานวิจัยนี้ พ.ศ.2547
<b>วัตถุดิบ</b>	เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในแถบอเมริกาตะวันตก	เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ประเทศไทย	เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ประเทศไทย	เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ประเทศไทย	เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าบริษัทโคเจนเนอเรชั่น จำกัด (COCO.)
<b>วิธีการสังเคราะห์</b>	Hydrothermal Treatment	Hydrothermal Treatment	Hydrothermal Treatment	Hydrothermal Treatment	Hydrothermal Treatment
<b>ภาวะในการทดลอง</b>	NaOH&KOH, Temp.40 60 100 250° C Time 24-240 hr. Pressure 1 atm and pressure bomb	NaOH, Temp.50 80- 90° C Time 24 hr. Pressure 1 atm	NaOH&KOH, Temp.70 100 และ 120° C Time 24-120 hr. Pressure 1 atm	NaOH, Temp.40 70 90 110 130 และ 150° C Time 12-96 hr. Pressure 1 atm	NaOH, Temp.90 และ 100° C Time 72-120 hr. Pressure 1 atm
<b>ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้</b>	Na-P1, Chabazite, zeolite P, zeolite X	Hydroxysodalite	Chabazite, zeolite P, Napheline, Gismomdine	Na-P1,	zeolite P
<b>ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC)</b>	ที่ NaOH 3.5 M 150°C 72hr. เท่ากับ 640 mmol/kg	ที่ NaOH 3.5 M 80-90°C 24hr. เท่ากับ 306 cmol/kg	ที่ NaOH 2.0 M 100°C 72hr. เท่ากับ 619.44 mmol/kg	ที่ NaOH 1.0 M 110 °C 96hr. เท่ากับ 635 cmol/kg	ที่ NaOH 2.0 M 100 °C 120 hr. เท่ากับ 565.62 cmol/kg

## 4.2 สมบัติของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และซีไอไลต์สังเคราะห์

### 4.2.1 สมบัติของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และซีไอไลต์สังเคราะห์

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly ash) เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาบดให้ละเอียด และส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอย (Fly ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน ซึ่งอาจถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตหรืออาจจะมาจากการดักจับด้วยถุงกรองฝุ่น แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เถ้าลอยถ่านหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse Fly ash) เกิดจากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจายจึงมีการฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับเถ้าลอยให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ แสดงดังรูปที่ 4.2

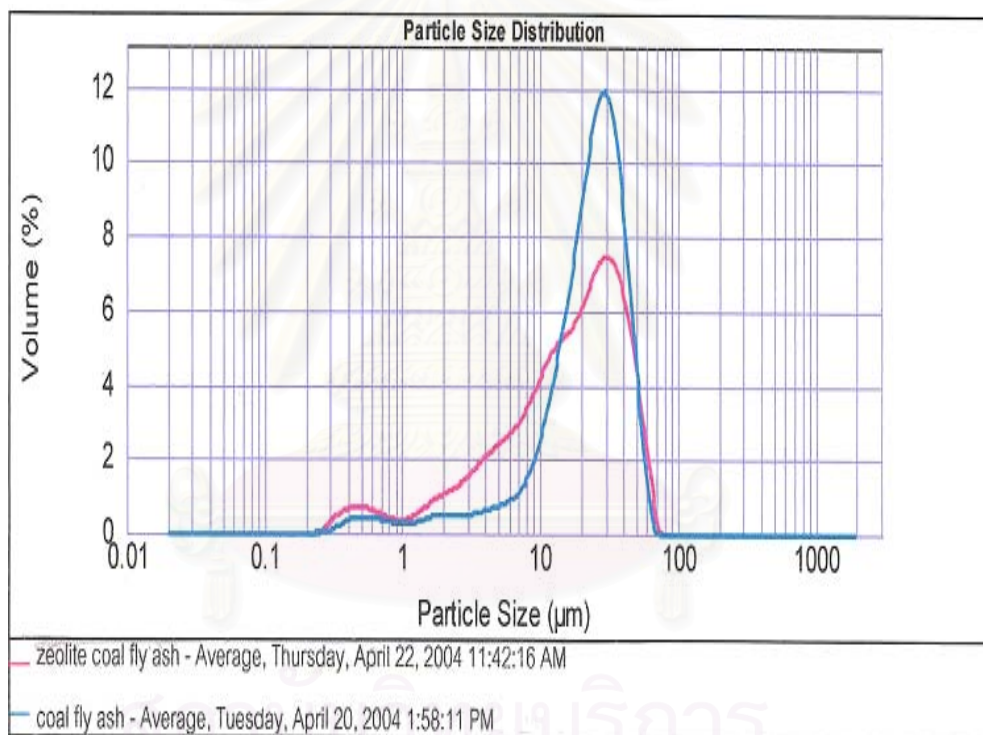


รูปที่ 4.2 เถ้าลอยชานอ้อยที่มีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ

#### 4.2.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

1) การหาการกระจายขนาดของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

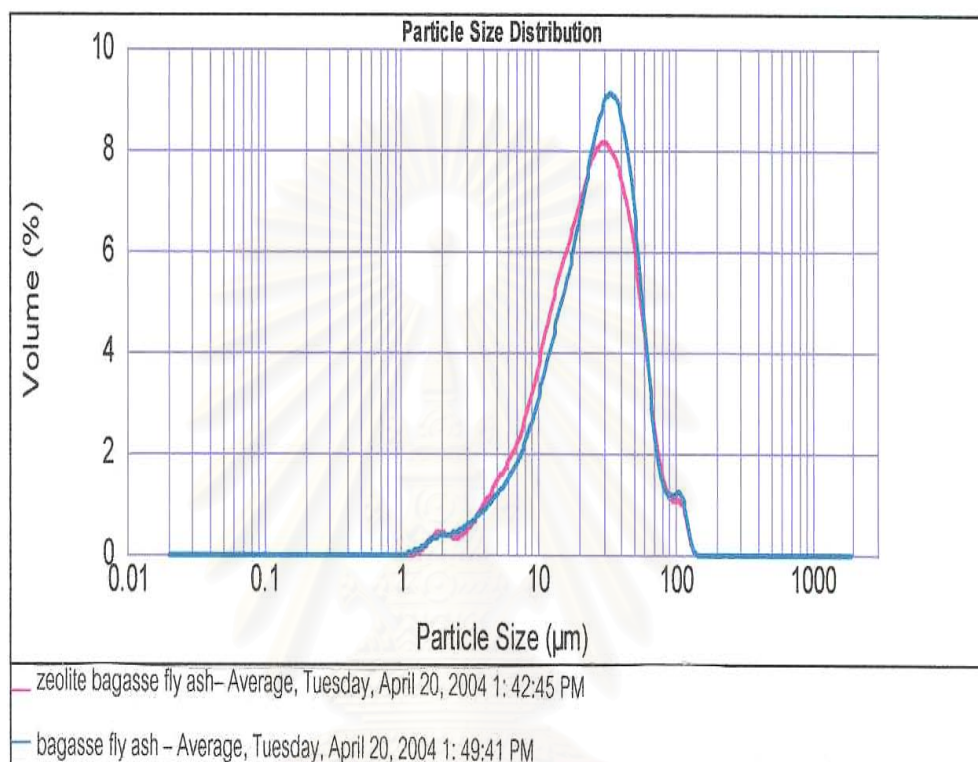
ก. จากการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินจากบริษัท โคเจนเนอเรชั่น จำกัด (COCO.) และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองและการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์

จากรูปที่ 4.3 พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25-80 ไมโครเมตร และเมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์แล้วการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.30-70 ไมโครเมตร นอกจากนี้การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหิน 90 % อยู่ภายใต้ อนุภาคขนาด 43.692 ไมโครเมตร และการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์ 90% อยู่ภายใต้ อนุภาคขนาด 42.936 ไมโครเมตร (รายละเอียดในภาคผนวก ง)

ข. จากการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลสระบุรี และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer พบว่าขนาดของเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้ในการทดลองและขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยขานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์

จากรูปที่ 4.4 พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยขานอ้อยอยู่ในช่วง 1.1-140 ไมโครเมตร และเมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์แล้วการกระจายขนาดอนุภาคจะอยู่ในช่วง 1.3-126 ไมโครเมตร นอกจากนี้การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยขานอ้อย 90 % อยู่ภายใต้ อนุภาคขนาด 57.504 ไมโครเมตรและการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์ 90% อยู่ภายใต้ อนุภาคขนาด 57.283 ไมโครเมตร (รายละเอียดในภาคผนวก ง)



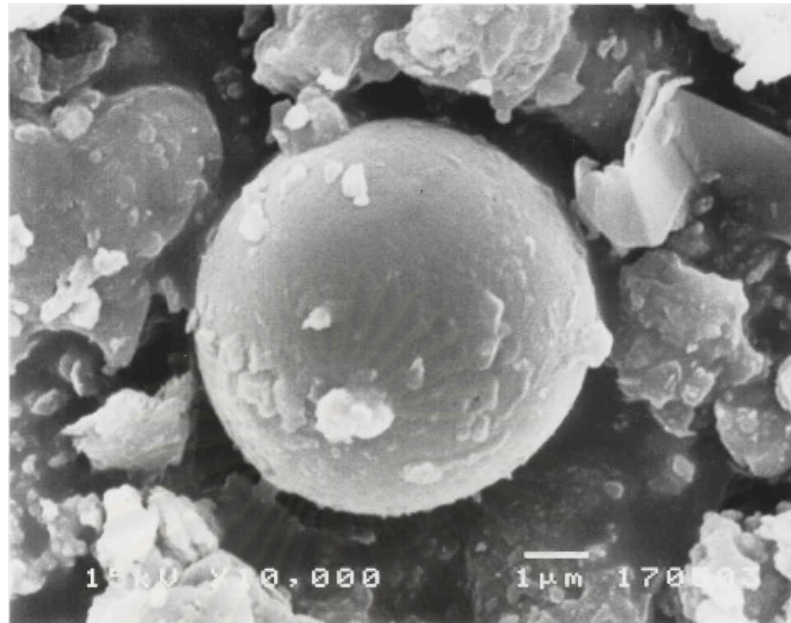
2) ลักษณะรูปร่างของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ถ้ำลอยถ่านหินที่ออกจากเตาเผาใหม่ๆ จะมีสีเทาอมแดงเมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีสีน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 4.5 และจากการวิเคราะห์ถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้กล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) พบว่ารูปร่างของถ้ำลอยถ่านหินมีลักษณะค่อนข้างกลมและกลม (Sub-round to round) และพบว่ารูปร่างของซีโอไลต์สังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไปจากถ้ำลอยถ่านหิน คือ มีลักษณะไม่เป็นทรงกลม พื้นผิวมีความพรุนมากขึ้นและพบว่ามีผลึกซีโอไลต์เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6

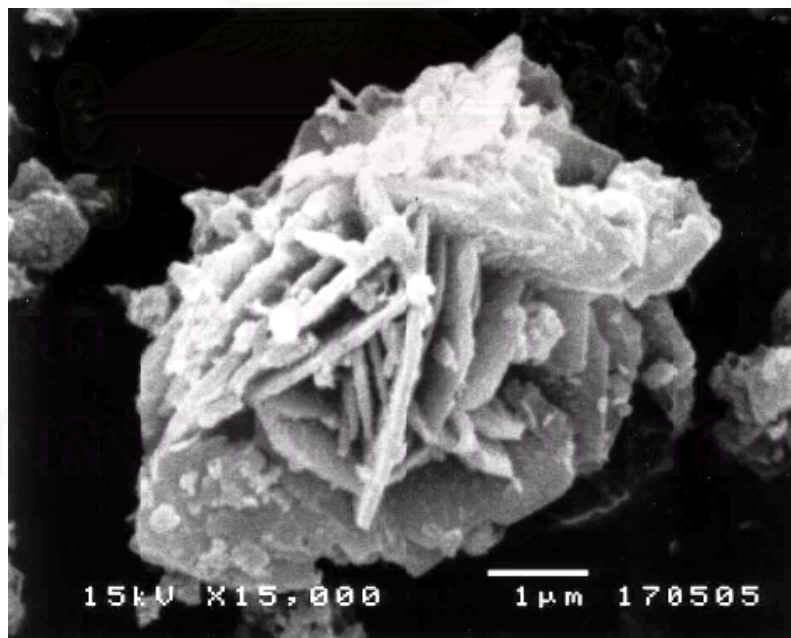


รูปที่ 4.5 ถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) โครงสร้างและพื้นผิวที่ผิวถั่วลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า



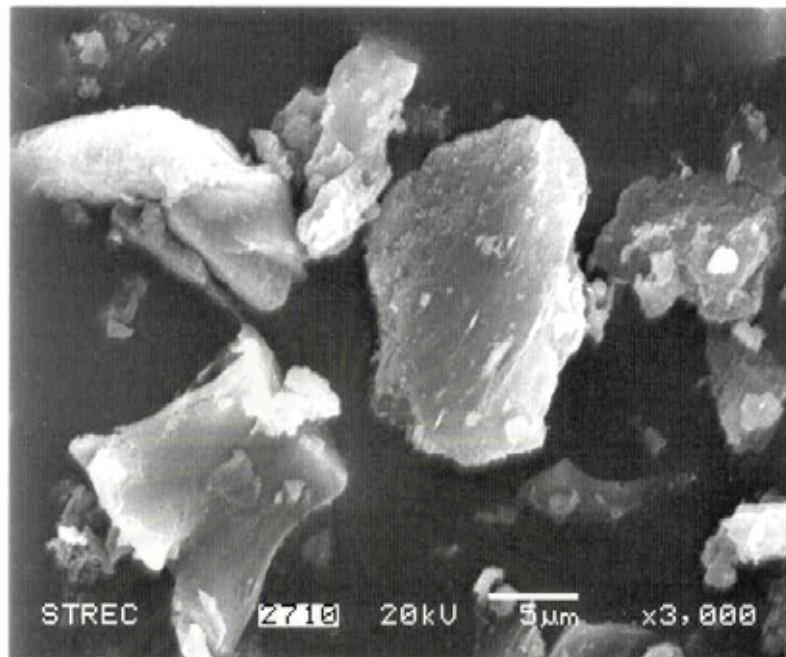
ข) โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์เมื่อใช้กำลังขยาย 15,000 เท่า  
รูปที่ 4.6 โครงสร้างและพื้นผิวของถั่วลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์

ถ้ำลอยซานอ้อยที่ออกจากเตาเผาจะมีสีดำ และซีโอไลต์สังเคราะห์ก็มีสีดำแสดงดังรูปที่ 4.7 และจากการวิเคราะห์ถ้ำลอยซานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) พบว่ารูปร่างของถ้ำลอยซานอ้อยมีลักษณะเป็นรูปทรงที่แตกต่างกันออกไป ไม่แน่นอน มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบและแน่นไม่มีรูพรุน และพบว่ารูปร่างของซีโอไลต์สังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไปจากถ้ำลอยซานอ้อย คือ มีรูพรุนเป็นโพรงเล็กเกิดขึ้นให้เห็นชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.8

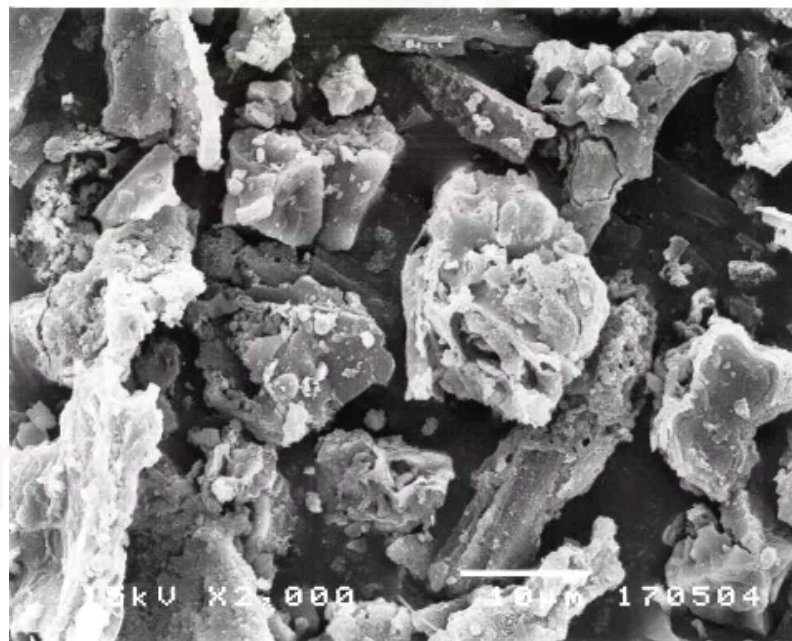


รูปที่ 4.7 ถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) โครงสร้างและพื้นผิวของถ้ำลอยซานอ้อยเมื่อใช้กำลังขยาย 3,000 เท่า



ข) โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์เมื่อใช้กำลังขยาย 2,000 เท่า  
รูปที่ 4.8 โครงสร้างและพื้นผิวของถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์

3) พื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ผลการศึกษาพื้นที่ผิว (Surface area) ปริมาตรโพรง (Pore Volume) ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analysis ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ลักษณะทางกายภาพ	ถ้ำลอยถ่านหิน	ซีโอไลต์สังเคราะห์ (ถ้ำลอยถ่านหิน)	ถ้ำลอยชานอ้อย	ซีโอไลต์สังเคราะห์ (ถ้ำลอยชานอ้อย)
พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	8.56	247.97	91.41	214.03
ปริมาตรโพรง (ลบ.ซม./กรัม)	0.0292	0.2077	0.1174	0.2027

จากตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์ คือ พื้นที่ผิวและปริมาตรโพรง ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้คือ พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินมีค่าเท่ากับ 247.97 และ 8.56 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย และพื้นที่ผิวของถ้ำลอยชานอ้อยมีค่าเท่ากับ 214.03 และ 91.41 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

สำหรับปริมาตรโพรงของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และปริมาตรโพรงของถ้ำลอยถ่านหินมีค่าเท่ากับ 0.2077 และ 0.0292 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนปริมาตรโพรงของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย และปริมาตรโพรงของถ้ำลอยชานอ้อยมีค่าเท่ากับ 0.2027 และ 0.1174 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม จะพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปริมาตรโพรงมีค่าสูงกว่าถ้ำลอยถ่านหินเท่ากับ 7.1130 เท่า และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยปริมาตรโพรงมีค่าสูงกว่า ถ้ำลอยชานอ้อยเท่ากับ 1.7266 เท่า ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยพบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงมากกว่าถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยชานอ้อย ดังนั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยย่อมมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อย

### 4.2.3 สมบัติทางเคมีของแก้วลอยถ่านหิน แก้วลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

1) ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของแก้วลอยถ่านหิน แก้วลอยชานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยทั้งสองชนิดโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ผลวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยถ่านหิน แก้วลอยชานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์ (%โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	แก้วลอยถ่านหิน	ซีโอไลต์สังเคราะห์ (แก้วลอยถ่านหิน)	แก้วลอยชานอ้อย	ซีโอไลต์สังเคราะห์ (แก้วลอยชานอ้อย)
SiO <sub>2</sub>	43.07	42.38	80.74	57.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.15	20.70	5.01	2.62
CaO	14.48	9.50	7.28	14.80
Na <sub>2</sub> O	0.41	14.06	0.24	8.72
K <sub>2</sub> O	0.67	0.66	1.87	0.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.78	7.72	2.72	6.48
MgO	1.35	2.44	1.54	2.89
MnO	0.04	0.10	0.16	0.30
SO <sub>3</sub>	4.22	0.93	0.88	0.77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.31	1.55	1.12
TiO <sub>2</sub>	1.49	0.79	0.23	0.44
ZrO <sub>2</sub>	0.02	0.03	0.01	0.06
NiO	0.03	0.02	-	-
CuO	0.01	0.01	0.03	0.05
SrO	0.03	0.13	0.07	0.04
ZnO	-	-	0.02	0.05

สารประกอบที่พบในแก้วลอยถ่านหิน และแก้วลอยขานอ้อยเป็นสารประกอบเริ่มต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะว่าแก้วลอยทั้งสองชนิดประกอบไปด้วย  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดซีโอไลต์ พบว่าในแก้วลอยถ่านหินมี  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 43.07% และมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 26.15% ส่วนแก้วลอยขานอ้อยมี  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 80.74% และมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 5.01% ซึ่งเมื่อนำแก้วลอยถ่านหินและแก้วลอยขานอ้อยมาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็สามารถทำให้เกิดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นได้

จากตารางที่ 4.5 การหาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์จาก แก้วลอยถ่านหิน พบว่า  $\text{SiO}_2$  ของแก้วลอยถ่านหินจะลดลงเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์จาก 43.07% เป็น 42.38% และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อแก้วลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์จาก 6.78% เป็น 7.72% สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยขานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยขานอ้อยก็เช่นเดียวกัน นั่นคือ  $\text{SiO}_2$  ของแก้วลอยขานอ้อยจะลดลงเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์จาก 80.74% เป็น 57.61% และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อแก้วลอยถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์จาก 2.72% เป็น 6.48%

นอกจากนี้ยังพบว่า  $\text{Na}_2\text{O}$  ของแก้วลอยถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์จาก 0.41% เป็น 14.055% สำหรับแก้วลอยขานอ้อยนั้นพบว่า  $\text{Na}_2\text{O}$  ของแก้วลอยขานอ้อยจะเพิ่มขึ้นเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์จาก 0.24% เป็น 8.723% สาเหตุที่  $\text{Na}_2\text{O}$  เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากการกระตุ้นแก้วลอยทั้งสองชนิดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) เข้าไปประกอบอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{SiO}_4$ ) และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{AlO}_4$ ) ซึ่งทำให้อยู่ในสภาพเสถียรยิ่งขึ้น (มนตรี ทองคำ, 1999)

จากการหาการกระจายขนาดอนุภาคของแก้วลอยถ่านหิน แก้วลอยขานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์ในข้อที่ 4.2.2 (ข้อ 1)) นั้นพบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของแก้วลอยถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25-80 ไมโครเมตร และเมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์แล้วขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.30-70 ไมโครเมตร และสำหรับแก้วลอยขานอ้อยจะพบว่าการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.1-140 ไมโครเมตร และเมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์แล้วขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.3-126 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคเล็กลงเนื่องจากการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่แคบลง และจากการหาสมบัติทางกายภาพของแก้วลอยถ่านหิน แก้วลอยขานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยถ่านหินเพิ่มขึ้นจาก 8.56 เป็น 247.97 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยขานอ้อยนั้นพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 91.41 เป็น 214.03 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้เนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ไปทำให้เกิดการย่อยของซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบของแก้วลอย ทำ

ให้เกิดรูขึ้นที่ผิวของแก้วลอยสามารถให้อากาศที่อยู่ภายในออกมาจากผิวของแก้วลอยได้ และการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังไปเปิดพื้นที่ผิวภายในของแก้วลอยทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น (ปิยะ ภูลิเวคินทร์, 2545)

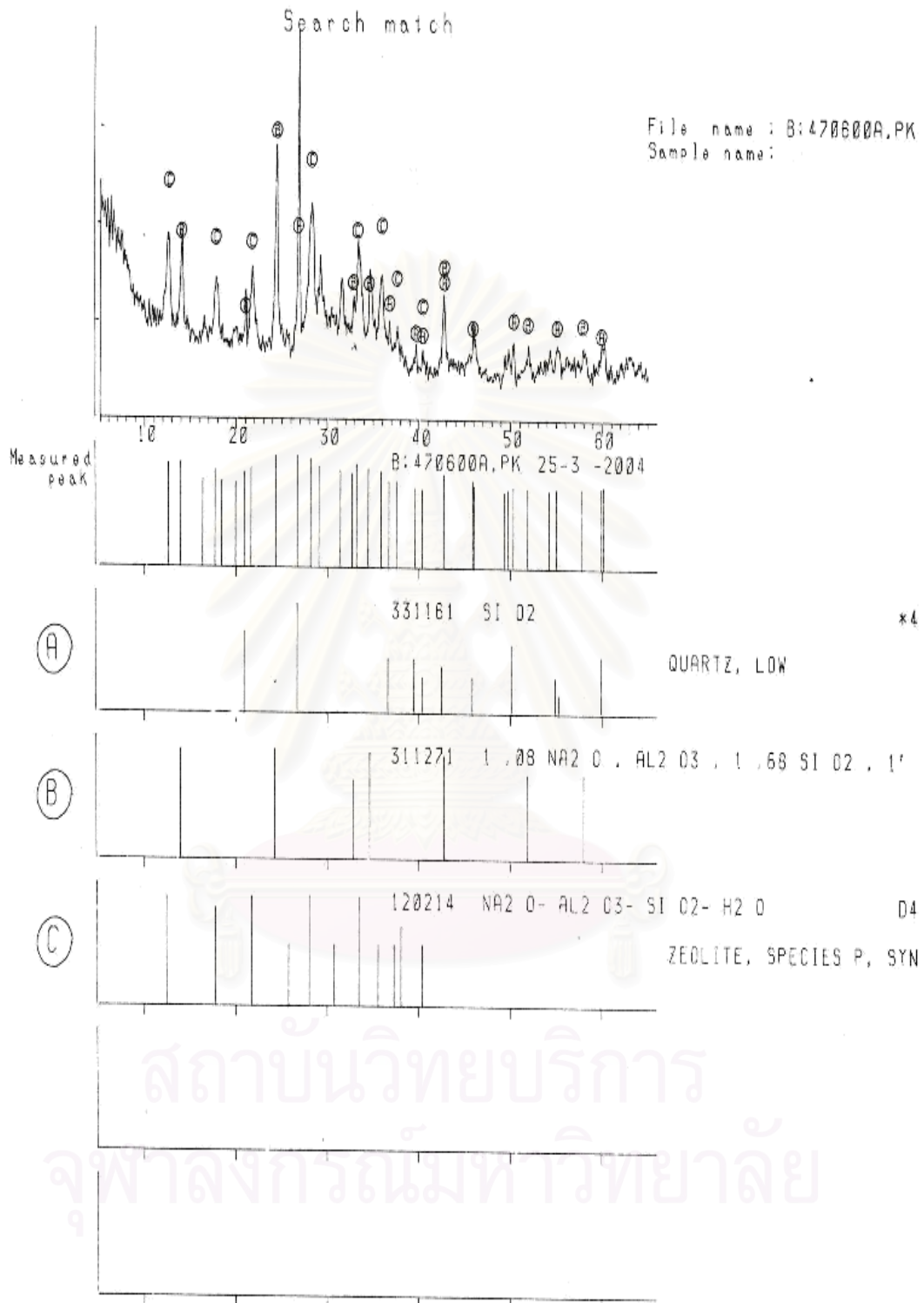
## 2) ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคชัน (XRD)

จากการนำแก้วลอยถ่านหิน และแก้วลอยซ่านอ้อยมาผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคชัน ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อนำแก้วลอยถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายต่างๆ แล้ว สามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P และพบสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz และ Unknow (Sodium Aluminum Silicate Hydrate) และพบว่าเมื่อนำแก้วลอยซ่านอ้อยมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายต่างๆ แล้วสามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P และ Garronite โดยพบสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ คือ Quartz ซึ่งสูตรทั่วไปของซีโอไลต์แสดงดังตารางที่ 4.6

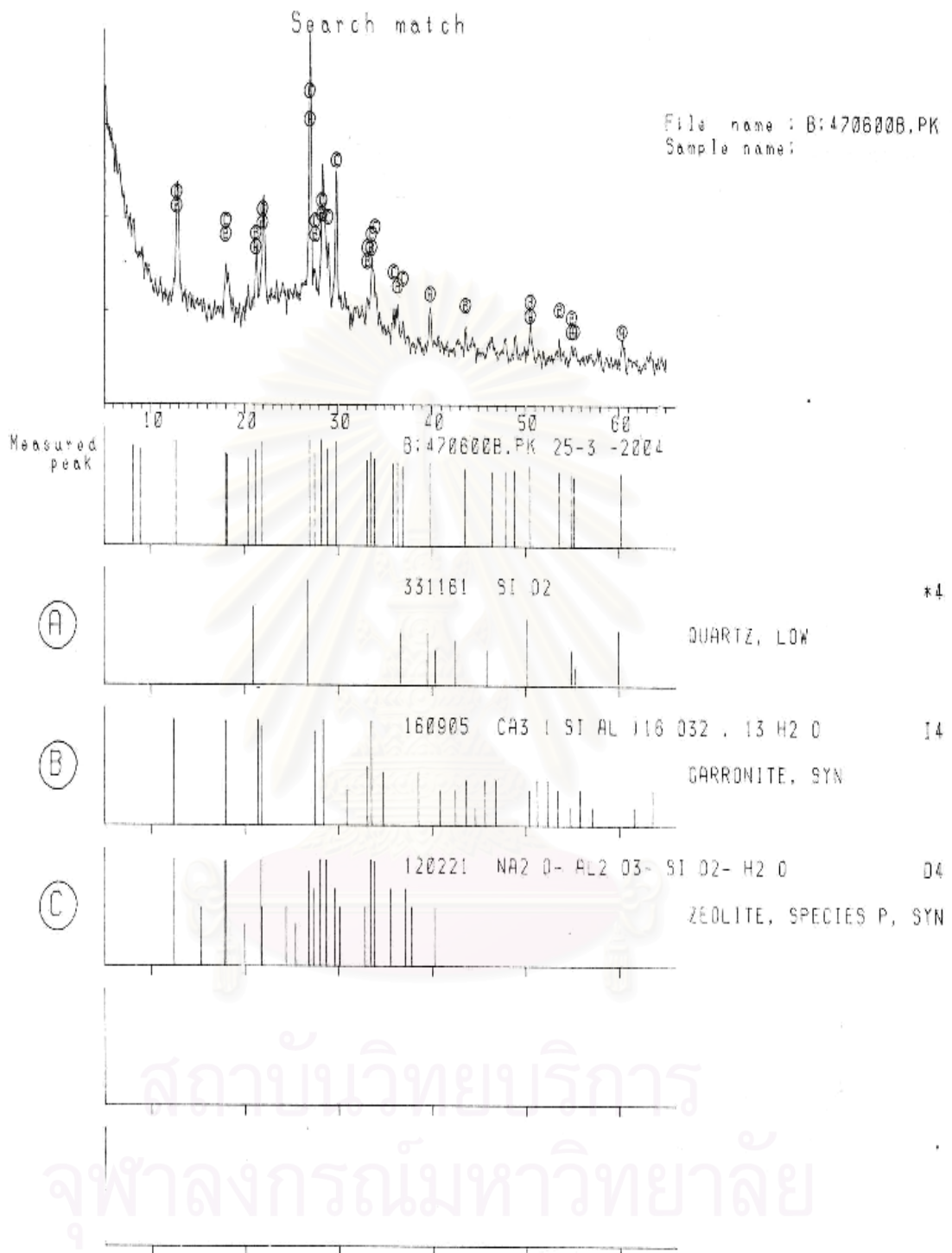
ตารางที่ 4.6 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากแก้วลอยถ่านหินและจากแก้วลอยซ่านอ้อย

ชนิดของแก้วลอยที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้	สูตรทั่วไปของซีโอไลต์
แก้วลอยถ่านหิน	Zeolite P	$\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{10}]15\text{H}_2\text{O}$
แก้วลอยซ่านอ้อย	Zeolite P	$\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{10}]15\text{H}_2\text{O}$
	Garronite	$\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_8\text{SiO}_2]_8] 16\text{H}_2\text{O}$





รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟเฟรคชันของแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 100 °C 5วัน



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟเฟรคชันของแก้วลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 90° C 4 วัน

#### 4.3 การศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยชานอ้อยแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงความเหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง การทดลองแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

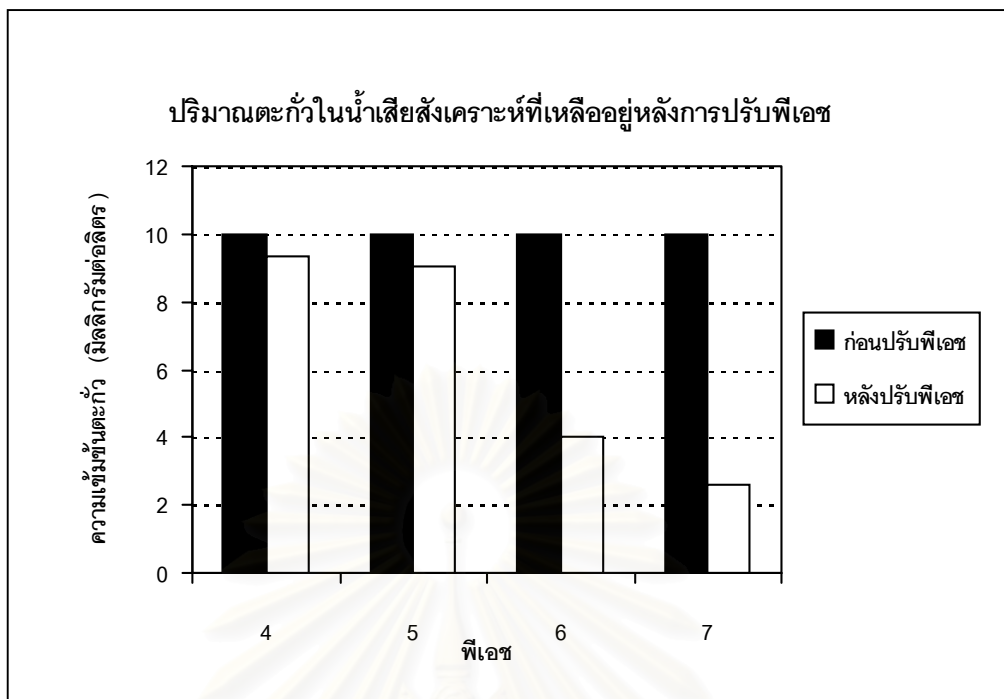
- การหา pH ที่เหมาะสม
- การหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม
- การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม
- การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์

##### 4.3.1 การหา pH ที่เหมาะสม

จากการศึกษาของ Reed,Robertson และ Jamil (1995) พบว่า Pb จะมีการตกตะกอนในรูปของ  $Pb(OH)_2$  ในช่วงพีเอช 5.5 และจะตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึง พีเอช 12-12.5 แล้วจะกลับมาละลายใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงการดูดซับผู้วิจัยจึงทำการทดลองปรับค่าพีเอชต่างๆ ตั้งแต่ 4 – 7 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที แล้วทำการกรองตะกอนที่เกิดขึ้นออก หลังจากนั้นจึงนำไปวัดปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังการตกตะกอน เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมในการศึกษาถึงการดูดซับ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.7 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็นกรดต่างที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสีย หลังปรับพีเอช (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% ตกตะกอน
4	10	9.316	6.84
5	10	9.030	9.70
6	10	4.033	59.67
7	10	2.590	74.10



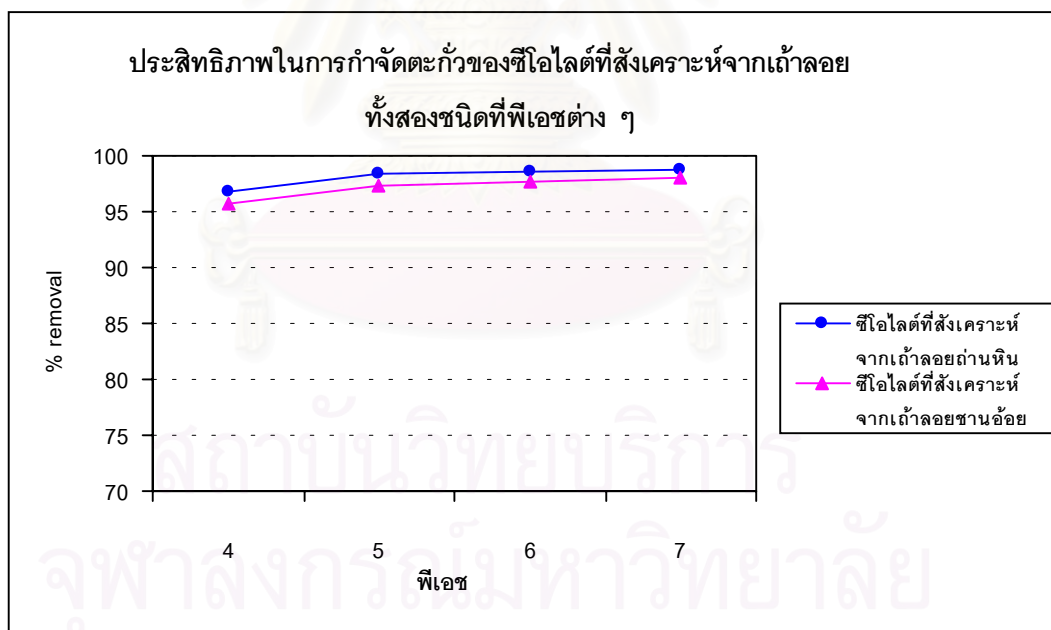
รูปที่ 4.11 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็นกรดต่างที่พีเอชต่าง ๆ

หลังจากนั้นจึงทำการทดลองตามแผนการทดลองต่อไป คือ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 4 - 7 และทำการเติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปริมาณ 0.1 กรัม และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 นาที แล้วกรองเอาผงถ่านออก เพื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวัดปริมาณตะกั่วที่เหลือ ส่วนการทดลองของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยก็ทำเช่นเดียวกันกับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

จากผลการทดลองการหา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังผ่านการดูดซับด้วยซีโอโลดที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย

ประเภท ซีโอโลด	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	% removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอโลดที่ สังเคราะห์ จากถ้ำลอย ถ่านหิน	4	7.44	0.326	0.325	0.329	0.327	96.73
	5	8.37	0.169	0.165	0.161	0.165	98.35
	6	8.65	0.149	0.143	0.150	0.147	98.53
	7	8.91	0.129	0.135	0.130	0.131	98.69
ซีโอโลดที่ สังเคราะห์ จากถ้ำลอย ชานอ้อย	4	7.66	0.421	0.417	0.431	0.423	95.77
	5	8.81	0.265	0.276	0.278	0.273	97.27
	6	8.95	0.235	0.249	0.230	0.238	97.62
	7	9.07	0.192	0.201	0.195	0.196	98.04



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอโลดที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยที่พีเอชต่างๆ

จากผลการทดลองหา pH ที่เหมาะสมในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยที่ pH ต่างๆ กัน มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ pH 4, 5, 6 และ 7 มีเปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 96.73%, 98.35%, 98.53% และ 98.69% ตามลำดับ ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ pH 4, 5, 6 และ 7 มีเปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 95.77%, 97.27%, 97.62% และ 98.04% ตามลำดับ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่ pH 4, 5, 6 และ 7 ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยมีความสามารถในการดูดซับได้ไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาการตกตะกอนของตะกั่วพบว่า ตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนที่ pH ประมาณ 6-7 ดังนั้นในการเลือก pH เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป จะใช้ pH เท่ากับ 5 ซึ่งจากผลการทดลองซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินจะได้เปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 98.35% และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยจะได้เปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 97.27% เนื่องจากเป็นช่วงที่ตะกั่วยังตกตะกอนไม่มากนัก ถ้าเลือก pH สูงกว่านี้จะเป็นการตกตะกอนของตะกั่วมากกว่าการดูดซับ

### 4.3.2 การหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ทำการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.3.2 ข้อมูลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9 - 4.10 และรูปที่ 4.13

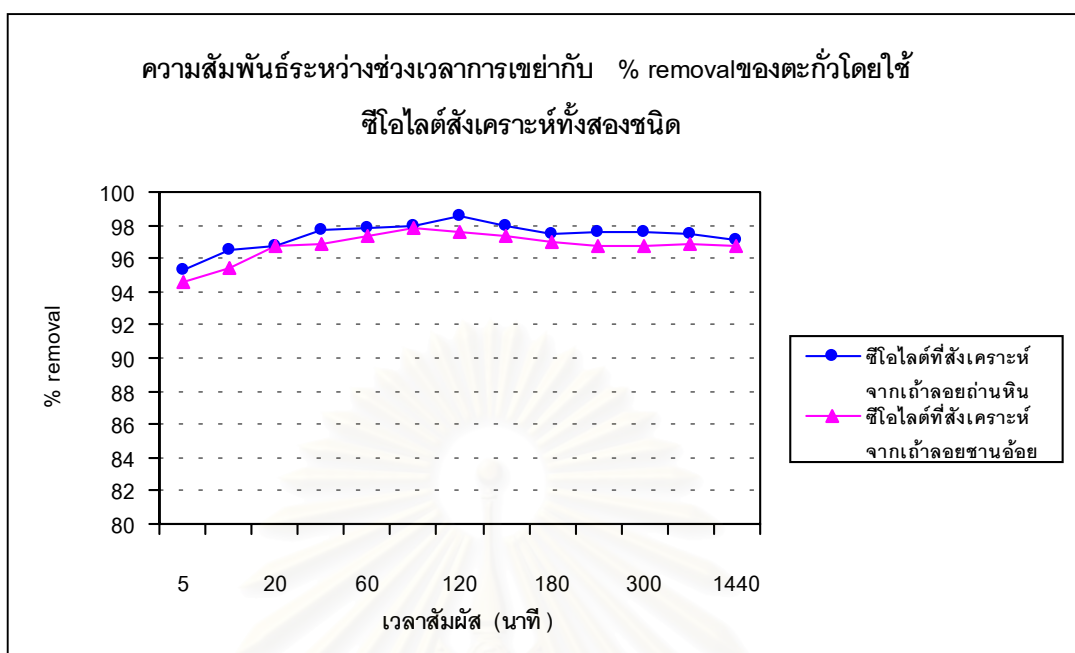
ตารางที่ 4.9 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

	เวลาสัมผัส (นาที)	pHน้ำเสียก่อนเขย่า	pHน้ำเสียหลังเขย่า	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				% removal
				ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย	
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน	5	5	7.15	0.464	0.460	0.470	0.465	95.35
	10	5	7.34	0.346	0.340	0.351	0.346	96.54
	20	5	7.85	0.313	0.320	0.326	0.320	96.80
	30	5	8.14	0.227	0.224	0.220	0.224	97.76
	60	5	8.79	0.216	0.209	0.218	0.214	97.86
	90	5	8.93	0.207	0.203	0.209	0.206	97.94
	120	5	8.95	0.145	0.130	0.148	0.141	98.59
	150	5	8.94	0.206	0.202	0.215	0.193	97.92
	180	5	8.82	0.250	0.256	0.252	0.253	97.47
	240	5	8.87	0.231	0.238	0.235	0.235	97.65
	300	5	8.72	0.247	0.240	0.241	0.243	97.57
	900	5	8.78	0.263	0.258	0.253	0.258	97.42
	1440	5	8.79	0.295	0.289	0.291	0.292	97.08

ตารางที่ 4.10 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย  
ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

	เวลาสัมผัส (นาท)	pHน้ำเสียก่อนเขย่า	pHน้ำเสียหลังเขย่า	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)				% removal
				ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย	
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย	5	5	8.60	0.529	0.537	0.550	0.539	94.61
	10	5	8.78	0.414	0.462	0.481	0.452	95.48
	20	5	8.85	0.324	0.320	0.337	0.327	96.73
	30	5	8.94	0.312	0.319	0.316	0.316	96.84
	60	5	8.96	0.264	0.260	0.270	0.265	97.35
	90	5	9.03	0.217	0.212	0.219	0.216	97.84
	120	5	9.02	0.253	0.250	0.256	0.253	97.47
	150	5	8.95	0.267	0.278	0.262	0.269	97.31
	180	5	8.93	0.299	0.291	0.311	0.300	97.00
	240	5	8.89	0.317	0.320	0.325	0.321	96.79
	300	5	8.85	0.327	0.325	0.321	0.324	96.76
	900	5	8.83	0.318	0.315	0.320	0.318	96.82
	1440	5	8.81	0.325	0.322	0.329	0.325	96.75



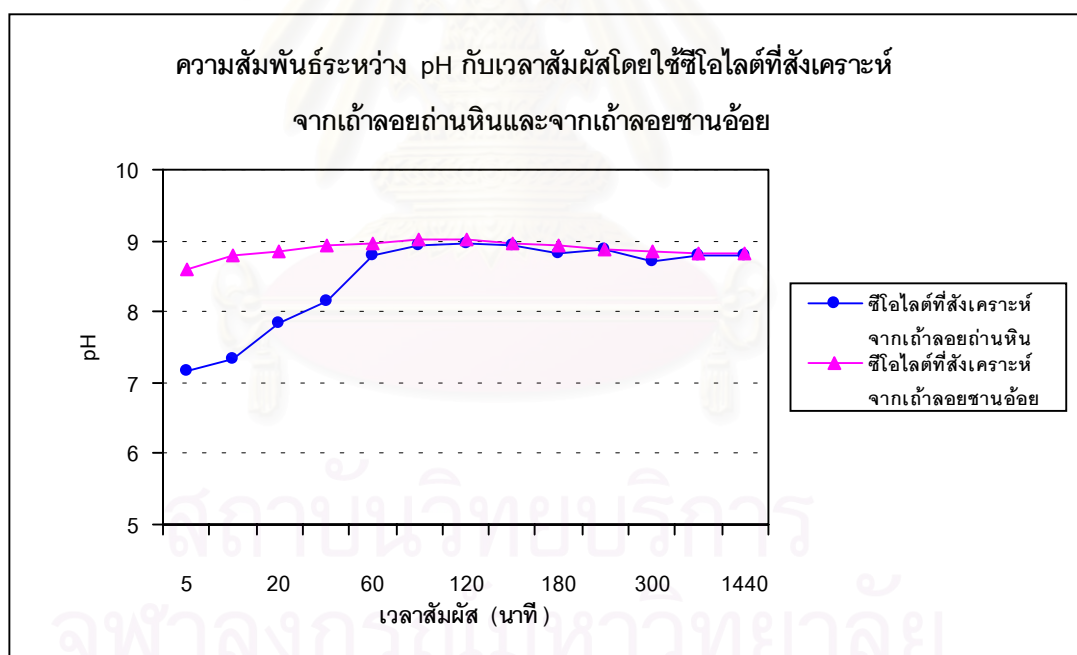


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาการเขย่ากับ % removal ของตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อย

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเขย่าที่ 5 นาทีจนถึง 120 นาทีพบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการกำจัดตะกั่วมากที่สุดที่เวลาการเขย่า 120 นาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.59% หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าลดลง โดยที่หลังจากช่วงเวลาการเขย่า 150 นาที ถึง 1440 นาที เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง 97.08 - 97.92 % และสำหรับเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยนั้น ก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเขย่าที่ 5 นาทีจนถึง 90 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยในการกำจัดตะกั่วมากที่สุดที่เวลาในการเขย่า 90 นาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.84% หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าลดลง โดยหลังจากช่วงเวลาในการเขย่า 120 นาที ถึง 1440 นาที เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง 96.75 - 97.47% ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการ

กำจัดตะกั่วที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

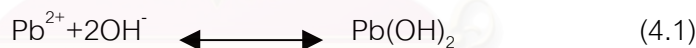
จากกราฟรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อใส่ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยชานอ้อยลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วละลายอยู่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะที่อยู่ในน้ำเสียดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการสัมผัสกับซีโอไลต์สังเคราะห์ และค่อยๆ ซ้ำลงเมื่อเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในที่สุด จะเห็นได้จากกราฟเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วจะมีความชันในช่วงแรกขอเวลาสัมผัสจะมากกว่าในช่วงหลัง และมีความชันลดลงเรื่อยๆ จนมีลักษณะเป็นเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอในที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุกันระหว่างประจุของไอเดียมกับประจุของตะกั่ว และอาจมีปริมาณสูงขึ้นในบางเวลาโดยอาจเกิดจากการผันกลับของการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการดูดติดทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วัลส์ (Faust and Aly, 1987) ทำให้ง่ายที่จะเกิดการผันกลับของการดูดซับ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเวลาสัมผัสโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยชานอ้อย

จากกราฟรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่อเติมซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยลงไปในสารละลายตะกั่ว ในช่วงแรกจะทำให้พีเอชของสารละลายตะกั่วเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับพีเอชของสารละลายก่อนเติมซีโอไลต์สังเคราะห์ โดยพีเอชที่เปลี่ยนแปลงจะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงพีเอช 8 - 9 ทั้งนี้เนื่องมาจากซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดนั้นประกอบไปด้วยซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ประกอบกันเป็นผลึกของโลหะ อัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่างเมื่อใส่ลงในสารละลายจึงทำให้พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงพีเอช 8 - 9

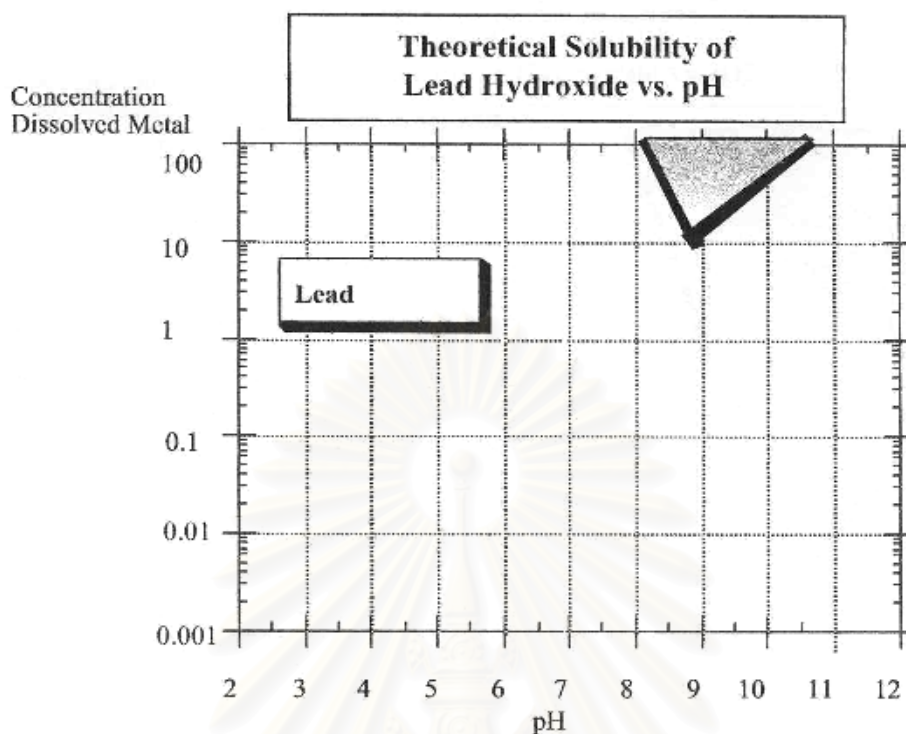
เมื่อเตรียมสารละลายตะกั่วจาก ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) ตะกั่วจะอยู่ในรูปของตะกั่วไอออน ( $\text{Pb}^{2+}$ ) ให้ค่าพีเอชในสารละลายประมาณ 2 จากนั้นจะนำสารละลายตะกั่วไปปรับพีเอชเท่ากับ 5 เพื่อนำมาใช้ในการทดลองเนื่องจากเป็นพีเอชที่เหมาะสมให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งโดยปกติแล้วซีโอไลต์สามารถละลายตัวในสารละลายกรดที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 (บงกช พิภพณะนาคทนต์ และ ประภัตรา ศศินานนท์, 2538) และเมื่อเติมซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดลงไปในสารละลายตะกั่วจะทำให้พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 8 - 9 ดังกล่าวข้างต้น ทำให้ตะกั่วไอออนรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) เกิดเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ( $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ) ดังสมการ 4.1 ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงพีเอชประมาณ 8-10.5 แสดงดังรูปที่ 4.15 และตะกั่วไฮดรอกไซด์จะถูกดูดติดอยู่ที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ (ค่าความสามารถในการละลาย pKsp ของตะกั่วไฮดรอกไซด์ เท่ากับ  $2.5 \times 10^{-16}$ ) ( Sawyer, Mccarty, and Parkin, 1994 )



ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วที่ทำการปรับพีเอชเพื่อใช้ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 5 หลังจากทำปฏิกิริยาจนเข้าสู่สมดุลแล้วพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 8-9 ซึ่งในช่วงพีเอชนี้จะมี  $\text{Pb}^{2+}$  (Mier et al., 2000) สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างประจุของโซเดียมที่มีอยู่ในซีโอไลต์สังเคราะห์กับประจุของตะกั่วที่มีอยู่ในสารละลายได้โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างตะกั่ว และโซเดียมอาจเขียนได้ดังสมการที่ 4.2 (Biskup and Subotoc , 1998)



โดยที่ (S) และ (Z) คือ ประจุในสารละลายและประจุในซีโอไลต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการละลายของตะกั่วที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ที่มา : Ayers, Davis and Gietka, 1994

#### 4.3.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

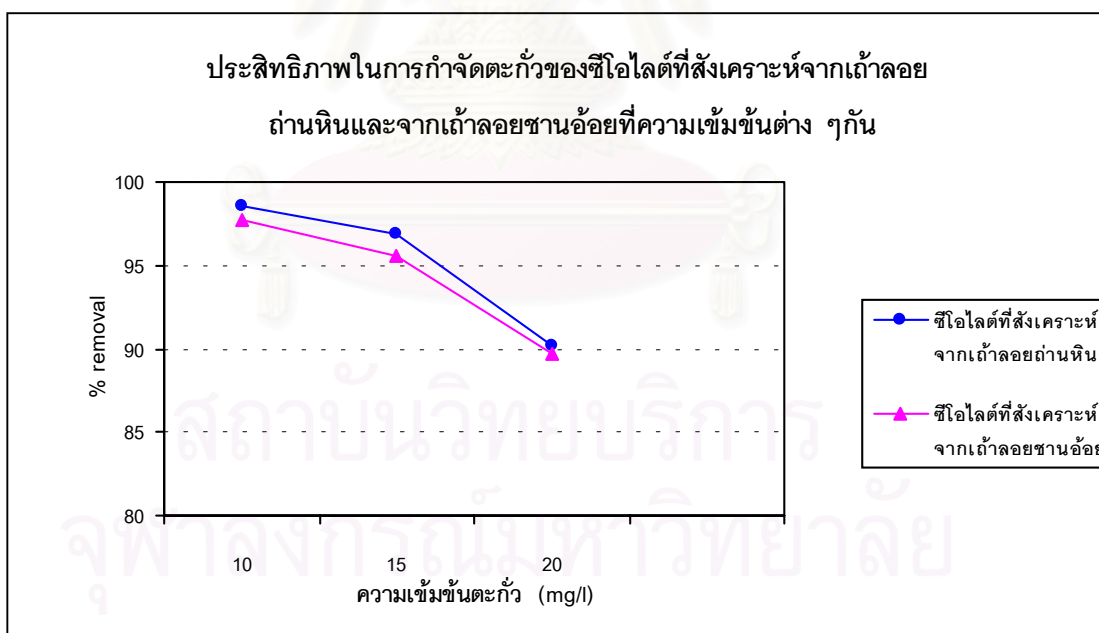
การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม จะทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 10, 15 และ 20 mg/l โดยจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 และใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยจะเขย่าเป็นเวลา 120 นาที และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินจะเขย่าเป็นเวลา 90 นาที

พบว่า การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย สามารถสรุปได้ดังตารางที่

4.11

ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย

ประเภทซีโอไลต์	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	% removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน	10	0.139	0.141	0.138	0.139	98.61
	15	0.471	0.469	0.460	0.467	96.89
	20	1.996	1.974	1.952	1.974	90.13
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย	10	0.221	0.227	0.230	0.226	97.74
	15	0.671	0.669	0.660	0.667	95.55
	20	2.090	2.051	2.024	2.055	89.73



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

จากกราฟรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วจาก 10 เป็น 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าลดลง สำหรับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินพบว่า ประสิทธิภาพ ในการดูดซับตะกั่วลดลงจาก 98.60% เหลือ 96.89% และ 90.13% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยนั้นพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วจะลดลงจาก 97.74% เหลือ 95.55% และ 89.73% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจจะเป็นเนื่องมาจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์คงที่แต่ความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นทำให้โอกาสที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกลดลงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด ซึ่งจะพบว่าในระยะแรกโลหะหนักจะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณรูพรุน ซึ่งมีอยู่บริเวณผิวของซีโอไลต์ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โลหะหนักเหล่านั้นก็จะจับตัวอยู่ได้เพียงแค่วัสดุผิวของซีโอไลต์เท่านั้น โดยมีลักษณะการจับตัวเป็นชั้นๆ ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งจับตัวกันไม่แน่นหรือไม่แข็งแรงมากนัก ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะหลุดออกจากผิวซีโอไลต์ได้ง่าย ดังนั้นที่ความเข้มข้นต่ำๆ ซีโอไลต์จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่า

#### 4.3.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิด

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบแบชท์ (Batch test) โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐาน  $PbNO_3$  พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่ pH เท่ากับ 5 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์อยู่ 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.1 และ 0.2 กรัม เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินใช้เวลาเขย่า 120 นาที ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยใช้เวลาเขย่า 90 นาที จากนั้นแยกน้ำตัวอย่างออกโดยการกรอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 4.12 และ 4.13

ตารางที่ 4.12 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จาก  
ถ้ำลอยถ่านหิน

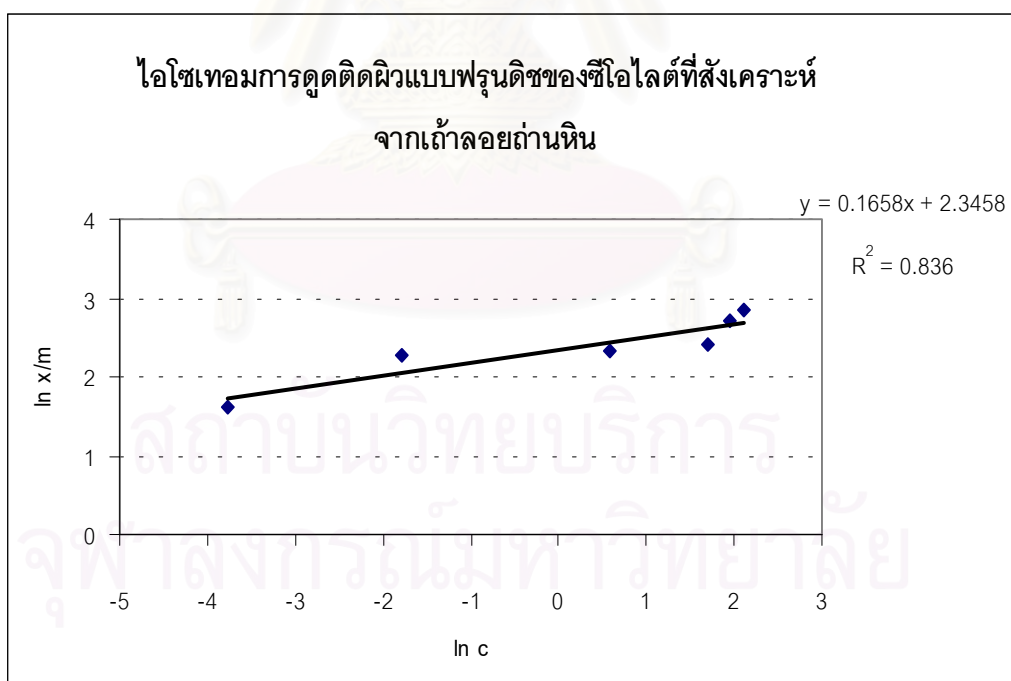
น้ำหนัก ซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นตะกั่ว ที่เหลือเฉลี่ย (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/g)	lnC	ln x/m	1/C	1/X	% removal
0.00	10.00	1.00	-	-	-	-	-	-	0
0.01	8.252	0.83	0.17	17.48	2.11	2.86	0.121	0.057	17.48
0.02	7.004	0.70	0.30	14.98	1.95	2.71	0.143	0.067	29.96
0.04	5.509	0.55	0.45	11.23	1.71	2.42	0.182	0.089	44.91
0.08	1.802	0.18	0.82	10.25	0.59	2.33	0.555	0.098	81.98
0.1	0.167	0.02	0.98	9.83	-1.79	2.29	5.988	0.102	98.33
0.2	0.023	0.00	1.00	4.99	-3.77	1.61	43.47	0.200	99.77

ตารางที่ 4.13 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จาก  
ถ้ำลอยซานอ้อย

น้ำหนัก ซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้น ตะกั่วที่เหลือ เฉลี่ย (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/X	% removal
0.00	10.00	1.00	-	-	-	-	-	-	0
0.01	8.497	0.85	0.15	15.03	2.14	2.71	0.12	0.067	15.03
0.02	7.151	0.72	0.28	14.25	1.97	2.66	0.14	0.070	28.49
0.04	5.932	0.59	0.41	10.17	1.78	2.32	0.17	0.098	40.68
0.08	2.093	0.21	0.79	9.88	0.74	2.29	0.48	0.101	79.07
0.1	0.210	0.02	0.98	9.79	-1.56	2.28	4.76	0.102	97.90
0.2	0.041	0.00	1.00	4.98	-3.19	1.61	24.39	0.201	99.59

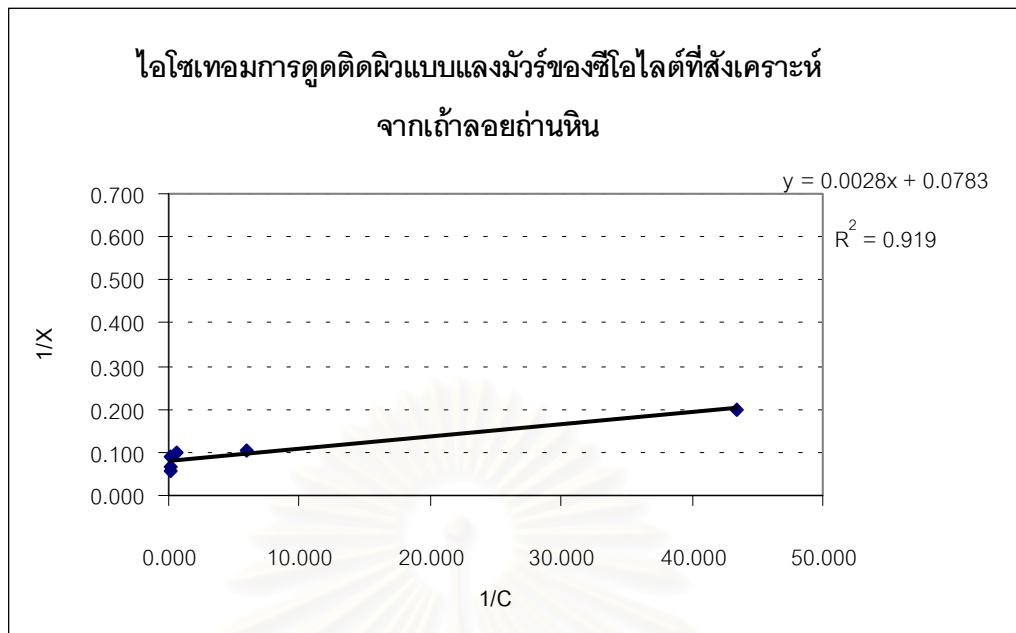
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.12 และ 4.13 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อย ซึ่งสมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดติดผิวมีอยู่หลายสมการแต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 3 สมการ คือ Langmuir, BET และ Freundlich แต่สำหรับการดูดซับไอออนในสารละลายนิยมใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich มาอธิบายการดูดติดผิวโดยในการทดลองนี้จะเลือกใช้สมการของ Langmuir มาอธิบาย เนื่องจากผลการทดลองการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อยที่ค่าพีเอช 5 และความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 10 mg/l ซึ่งเป็นพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดติดผิวตะกั่วของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหาค่า  $R^2$  ของแต่ละสมการทั้ง Langmuir และ Freundlich แล้วพบว่าค่า  $R^2$  ของสมการ Langmuir มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่า จึงเลือกสมการของ Langmuir มาอธิบายได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.17-4.20

- 1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Freundlich ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน





รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Langmuir ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

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

จากรูปที่ 4.18 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ  $1/X_m = 0.0028$

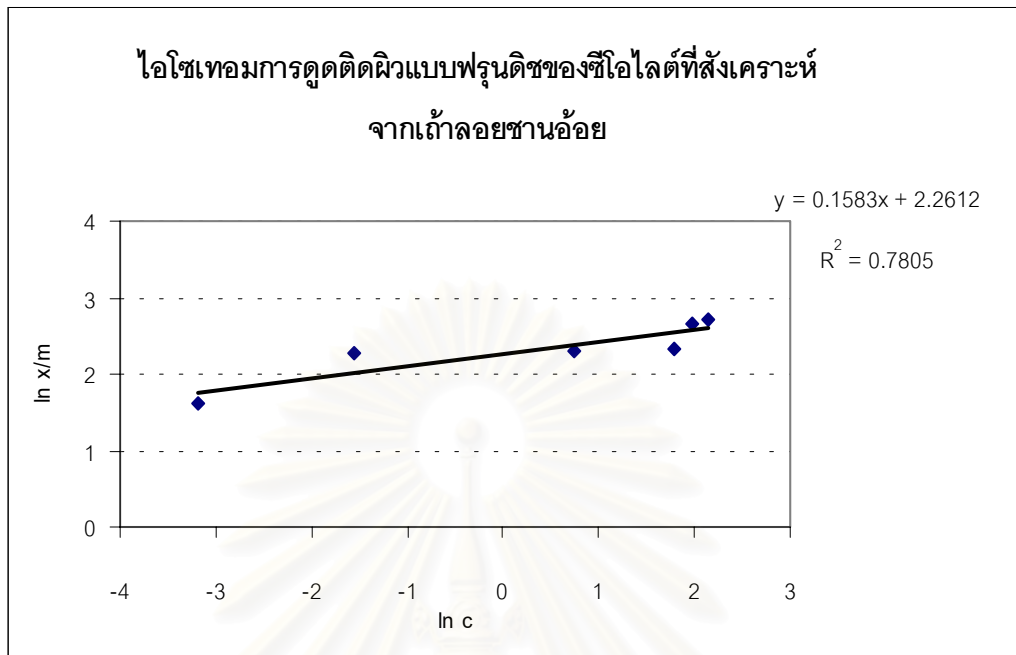
จุดตัดแกน 1/X เท่ากับ  $1/X_m b = 0.0783$

$$b = 0.03576$$

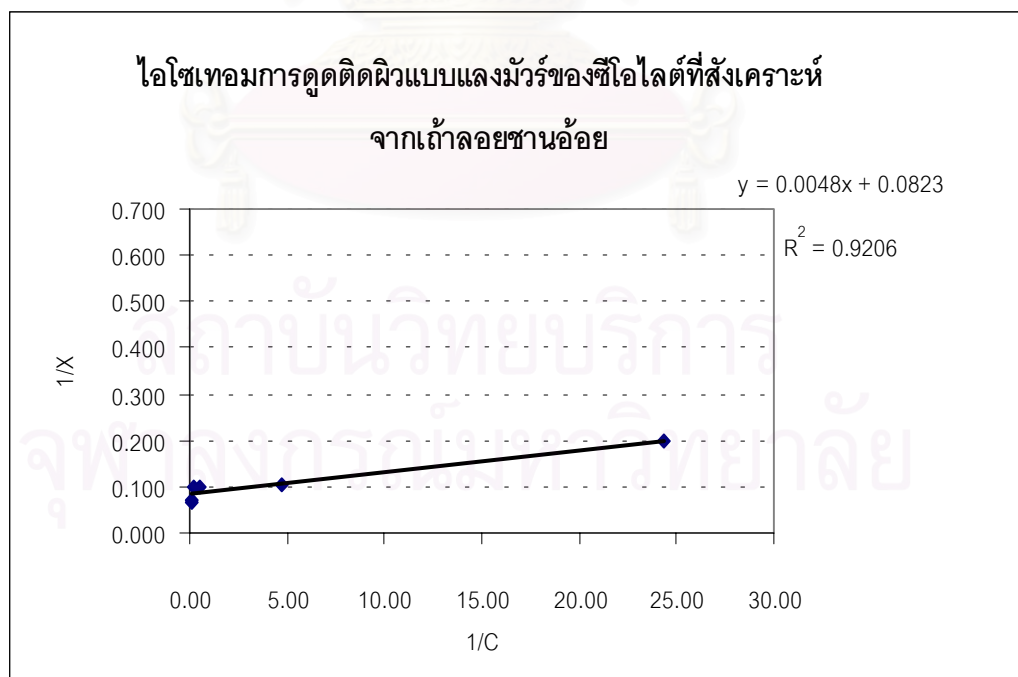
$$X = 12.77 C_e / (1 + 0.03576 C_e)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Freundlich ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบ Langmuir ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย

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

จากรูปที่ 4.18 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ  $1/X_m = 0.0048$

จุดตัดแกน  $1/X$  เท่ากับ  $1/X_m b = 0.0823$

$$b = 0.05832$$

$$X = 12.15 C_e / (1 + 0.05832 C_e)$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 10 mg/l จะได้ค่าความหนาแน่นของการดูดติดผิวสูงสุด  $X_{max}$  ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ค่าคงที่ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยจากสมการของ Langmuir

ชนิดของซีโอไลต์สังเคราะห์	$1/X_m$	b	$X_{max}$ (mg/g)
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน	0.0028	0.03576	94.07
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย	0.0048	0.05832	76.74

จากตาราง 4.14 พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน 1 กรัม สามารถดูดติดผิวตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 94.07 มิลลิกรัม ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย 1 กรัม สามารถดูดติดผิวตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 76.74 มิลลิกรัม ซึ่งจะเห็นว่าซีโอไลต์ในปริมาณที่เท่ากันคือ 1 กรัม ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วได้มากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์กับถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 10 mg/l แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ

สารดูดซับ	ค่าความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วสูงสุด (mg/g)	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (%)	งานวิจัย
1. ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์ม	68.096	95.33	สุจรรย์ คุษเสงี่ยม (2544)
2. ถ่านซีแปปิง	116.181	96.01	ปนัดดา คำรัตน์ (2546)
3. ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน	94.07	97.74	งานวิจัยนี้
4. ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย	76.74	94.72	งานวิจัยนี้

#### 4.4 การชะละลาย

การทดสอบการชะละลายของการวิจัยนี้ จะใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยขานอ้อยที่เกิดจากสภาวะที่ได้จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3

การศึกษากการชะไอออนตะกั่วจะทำโดยนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย 0.1 กรัม มาดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ คือสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 5 นำซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดข้างต้นที่ดูดซับตะกั่วแล้ว มาศึกษากการชะไอออนตะกั่วด้วยน้ำกลั่น และสารละลายกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.8 โดยสารละลายกรดดังกล่าวมีส่วนผสมของน้ำกลั่นผสมกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วนปริมาตรสารละลายเป็น 100 เท่า (ml) ต่อ น้ำหนักกรัมของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 4.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 การชะไอออนตะกั่วด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดพีเอช 5.8

ชนิดของซีโอไลต์ สังเคราะห์	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/l)	ชะด้วย น้ำกลั่น (mg/l)	พีเอช หลังเขย่า	ชะด้วยสารละลาย กรดพีเอช 5.8	พีเอช หลังเขย่า
ซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน	10.00	0.00	7.55	N.D.	7.58
ซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยชานอ้อย	10.00	0.00	7.83	N.D.	7.80

หมายเหตุ : N.D. (Non Detect)

จากตารางที่ 4.16 พบว่าเมื่อชะด้วยน้ำกลั่นวัดความเข้มข้นตะกั่วในน้ำชะได้เท่ากับ 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าไม่มีการชะละลายของตะกั่วออกจากซีโอไลต์ เมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวชะละลาย หรือกล่าวได้ว่าเกิดการดูดซับอย่างมั่นคงแข็งแรง ส่วนการชะด้วยสารละลายกรดพีเอช 5.8 พบว่าตะกั่วถูกชะออกมาได้น้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะการดูดซับของซีโอไลต์มีทั้งการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกร่วมด้วย จึงทำให้มีการหลุดออกเกิดขึ้นน้อยมาก

ด้วยเหตุนี้หากนำไปใช้ในงานจริง เมื่อใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดจนหมดสภาพแล้วไม่ควรนำมากรองทิ้งไว้ เนื่องจากอาจเกิดการชะละลายออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้จึงควรจะต้องมีการนำไปทำลายฤทธิ์โดยกระบวนการที่ทำให้เป็นก้อน (Solidification) ต่อไป โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์เป็นกระบวนการที่ทำให้สารต่างๆ ถูกยึดไว้ และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางเคมีออกมาได้ ก่อนที่จะนำไปฝังกลบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป

#### 4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยกับน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง

ตัวอย่างน้ำเสียจริงที่ใช้ทำการศึกษาจะเป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง ซึ่งมี pH เท่ากับ 1.83 โดยสภาพที่ใช้ในการบำบัดจะใช้จากสถานะต่างๆ ที่ได้ในหัวข้อ 4.3 ใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 5 ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.1 กรัม ปริมาตรของน้ำเสีย 100 ml นำไปเขย่า 200 รอบต่ออนาที ซี

โอไรด์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินจะใช้เวลาเขย่า 120 นาที ส่วนซีโอไรด์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยจะใช้เวลาเขย่า 90 นาที แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วละลายของตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังการเขย่า ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.17

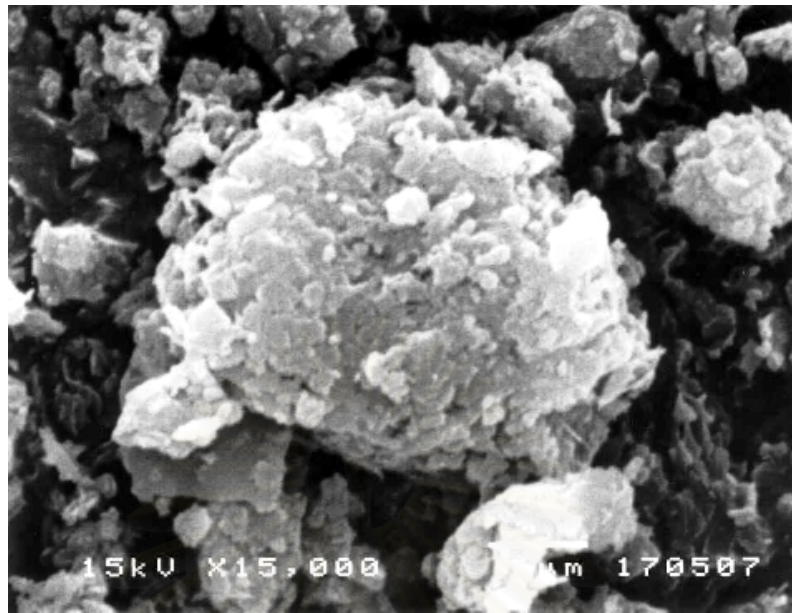
ตารางที่ 4.17 ผลการดูดซับด้วยซีโอไรด์สังเคราะห์ของน้ำเสียจากโรงงาน

ชนิดของซีโอไรด์สังเคราะห์	พีเอชก่อนเขย่า	พีเอชหลังเขย่า	ความเข้มข้นของตะกั่วเจือ (mg/l)		% removal
			ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
ซีโอไรด์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน	5.0	7.11	2.487	0.168	93.24
ซีโอไรด์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย	5.0	7.66	2.487	0.215	91.36

จากการศึกษาที่ได้พบว่าการดูดซับโลหะตะกั่วของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตตะกั่วแห่งที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ จะมีประสิทธิภาพในการถูกดูดซับด้วยซีโอไรด์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และประสิทธิภาพในการถูกดูดซับด้วยซีโอไรด์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยเท่ากับ 93.24% และ 91.36% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการดูดซับโลหะตะกั่ว จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของซีโอไรด์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจริงจะลดปริมาณโลหะตะกั่วลงได้มากและมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นประสิทธิภาพของการตกตะกอนและการดูดซับร่วมกัน

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างหลังผ่านการเขย่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งได้เลือกสภาวะเดียวกับที่ได้ทำการทดลองไว้แล้วในหัวข้อ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอชที่ได้กับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมจะพบว่ามีค่าไม่เกินมาตรฐาน (รายละเอียดในภาคผนวก จ) ดังนั้นภายหลังการดูดซับด้วยซีโอไรด์แล้วจึงไม่ต้องมีการปรับค่าพีเอช

เมื่อนำซีโอไรด์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดติดผิวตะกั่วในน้ำเสียไปวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope : SEM) จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินหลังจากการดูดติดผิว



รูปที่ 4.22 แสดงโครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินหลังจากการดูดติดผิว

จะเห็นว่า พื้นผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย หลังจากผ่านการดูดติดผิวตะกั่ว จะพบว่าพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดเปลี่ยนแปลงไป จากเดิม โดยพื้นผิวที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์จะถูกปิดจากอนุภาคของตะกั่วที่ถูกดูดติดผิว

#### 4.6 ประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย

ค่าใช้จ่ายในการผลิตประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า และค่าแรงงาน ดังนี้

##### 4.6.1 ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

ในการผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 1000 กรัม เป็นปริมาณที่ผลิตได้ต่อการเผา 1 ครั้ง

- 1) เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อยไม่เสียค่าใช้จ่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าและโรงงานน้ำตาล ตามลำดับ
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ประมาณ 640 กรัมต่อเถ้าลอยแต่ละชนิดปริมาณ 1000 กรัม ซึ่ง NaOH 1 ขวดขนาด 1000 กรัมราคา 35 บาท ดังนั้นคิดเป็นเงินเท่ากับ 22.4 บาท
- 3) น้ำกลั่นใช้ประมาณ 4 ลิตร ราคาลิตรละ 4 บาท คิดเป็นเงินเท่ากับ 16 บาท

##### 4.6.2 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต

สำหรับซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดประมาณ 1000 กรัม

- 1) ค่าไฟในการอบ : การอบใช้เตาอบที่มีกำลังไฟฟ้า 2,800 วัตต์ คิดเป็น 2.8 กิโลวัตต์โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2543) จะทำการอบที่ 105 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการอบเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชานอ้อย 2 ชั่วโมง ซึ่งจะทำการอบพร้อมกันและทำการอบซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง รวมเวลาทั้งหมดในการอบ 6 ชั่วโมง



คำนวณค่าใช้จ่าย

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 2.8 \times 6 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 34.71 \text{ บาท} \end{aligned}$$

2) ค่าไฟในการเผา : การเผาใช้เตาเผาเยื่อหุ้ม Fernace รุ่น 3-1750 ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าของเตาเผาเป็น 3,100 วัตต์ หรือ 3.1 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2543) ทำการเผาที่ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งจะทำการเผาถ้ำลอย ถ่านหิน และถ้ำลอยชานอ้อยพร้อมกัน

คำนวณค่าใช้จ่าย

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 3.1 \times 3 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 19.21 \text{ บาท} \end{aligned}$$

3) ค่าไฟในการให้ความร้อนกับถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยที่ผสมกับ NaOH เพื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ การให้ความร้อนจะใช้ Heating Water Bath เยื่อหุ้ม MEMMERT ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าของเครื่อง 2,000 วัตต์ หรือ 2 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2543) ทำการให้ความร้อนสำหรับถ้ำลอยถ่านหิน 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 5 วัน คิดเป็น 120 ชั่วโมง ส่วนถ้ำลอยชานอ้อยจะให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน คิดเป็น 96 ชั่วโมง

คำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับถ้ำลอยถ่านหิน

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 2 \times 120 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 495.82 \text{ บาท} \end{aligned}$$

คำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับถ้ำลอยชานอ้อย

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 2 \times 96 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 396.65 \text{ บาท} \end{aligned}$$

#### 4.6.3 ค่าแรงที่ใช้ในการผลิต

ค่าแรงที่ใช้ในการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การร่อนเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งการผลิตซีโอไลต์ 1000 กรัมใช้เวลาในการเตรียมประมาณ 1 ชั่วโมง คิดค่าแรง 23.25 บาท / ชั่วโมง

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดเพื่อผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 1000 กรัมมีค่าเท่ากับ  $22.4+16+34.71+19.21+495.82+23.25 = 611.39$  บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดเพื่อผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 1000 กรัมมีค่าเท่ากับ  $22.4+16+34.71+19.21+396.65+23.25 = 512.22$  บาท

จากการประเมินต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดพบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมีราคาต้นทุนสูงกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย ซึ่งจากการทดลองความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดนั้นพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นการเลือกใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยน่าจะเกิดความคุ้มค่ากว่าการใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย สามารถสรุปได้ดังนี้

##### 1) การสังเคราะห์ซีโอไลต์

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินคือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย คือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 565.62 cmol/kg และ 303.19 cmol/kg ตามลำดับ

พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น คือเท่ากับ 8.56 ตารางเมตร/กรัม เป็น 247.97 ตารางเมตร/กรัม และ 91.41 ตารางเมตร/กรัมเป็น 214.03 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ

จะพบว่าปริมาตรโพรงของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าสูงกว่าเถ้าลอยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น เท่ากับ 7.1130 เท่า และ 1.7266 เท่า ตามลำดับ

##### 2) การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

การหาพีเอชที่เหมาะสม

พีเอช 5 เป็นพีเอชที่เหมาะสมของการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากเป็นพีเอชที่ตะกั่วยังตกตะกอนไม่มากนัก ถ้าเลือก pH สูงกว่านี้จะเป็นการตกตะกอนของตะกั่วมากกว่าการดูดซับ เพราะตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนที่ pH ประมาณ 6 - 7

### การหาช่วงเวลาสัมพัทธ์

เวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมของการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน คือ 120 นาที และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยคือ 90 นาที มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 98.59 และ 97.84 ตามลำดับ

### การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยมีค่าลดลงตามลำดับ ดังนั้นที่ความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิด

### การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิด

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วที่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดติดผิวคือน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 mg/l พีเอชเท่ากับ 5 พบว่าสอดคล้องกับสมการของ Langmuir โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน 1 กรัมมีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 94.07 มิลลิกรัม ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย 1 กรัมมีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 76.74 มิลลิกรัม ดังนั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน จึงมีความสามารถในการดูดติดผิวมากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย

3) การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่ง

ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่างจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย เท่ากับ 93.24% และ 91.36% ตามลำดับ จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจริงสามารถลดปริมาณโลหะตะกั่วลงได้มากพอสมควรและมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วใกล้เคียงกัน

4) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยขานอ้อยมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำเสียจริง โดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก และมีการตกตะกอนร่วมด้วย

5) จากการประเมินต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมีราคาต้นทุนสูงกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยคือ 611.39 บาท และ 512.22 บาท ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ เช่น แกลบที่เหลือทิ้งจากการสีข้าว กากตะกอนของระบบผลิตน้ำประปา ดินเบา เป็นต้น มาใช้เป็นวัตถุดิบ

2) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสชนิดอื่นๆ เช่น KOH, LiOH เป็นต้น เพราะสารละลายเบสที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะให้ซีโอไลต์ที่ต่างชนิดกัน

3) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้วในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ครั้งแรกมาใช้เป็นสารกระตุ้นอีกครั้ง เพื่อดูว่าสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้อีกหรือไม่ และมีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร

4) ควรศึกษาการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ในการดูดซับน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดเพื่อดูผลของโลหะหนักแต่ละตัวว่ามีผลต่อการดูดซับติดกันอย่างไร

5) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมว่าการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นได้อีกหรือไม่

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

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

เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จันทร์นา สงวรรณรุ่งวงศ์. 2539. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ซีเมนต์ลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทรรศินา จรัสรัตนมงคล. 2542. การผลิตซีโอไลท์ด้วยดินเบาให้เป็นสารดูดซับ และการทดลองบำบัดน้ำเสียในนาุ้ง. งานค้นคว้าอิสระวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2526. ซีเมนต์ลอยกับงานอุตสาหกรรม. ประโยชน์ของกากของเสียจากโรงงานไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

บงกช พิภพขณะนาคนนต์. และ ประภัตรา ศศิณานนท์. 2538. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งโดยใช้ซีโอไลท์ A, X และ Y. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปนัดดา คำรัตน์. 2546. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากซีเมนต์ของโรงงานน้ำยางชั้นในการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประกฤต เลิศจรสอร่ามดี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีเมนต์ลอยฟางข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปิยะ पुलิเวคินทร์. 2545. การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำโดยใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์จากถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ซีโอไลท์จากถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วิชาญ ภูพัฒน์. 2526. การใช้ซีเมนต์ในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์. อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- วิภายู บุญเจริญสุข. 2537. รายงานปัญหาพิเศษ เรื่อง ซีโอไลท์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัญญาชาติ สนิทธวารยัน. และ สมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลท์จากเถ้าลอยซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุจรรย์ คุษเสงี่ยม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรพัทธ์ พันพานิชย์กุล. 2542 . การทำเสถียรกากตะกั่วจากโรงงานหลอมแบดเตอรีเก่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไสว โฉมระสุภฤกษ์. 2539. ปัญหาและแนวทางการแก้ไขมลพิษในการหลอมตะกั่วจากแบดเตอรีเก่า. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการโรงงาน ฉบับ ก.พ. – พ.ค. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อนิรุทธ์ ธงไชย. 2528. การใช้ประโยชน์ซีเมนต์ในงานวิศวกรรม. เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่ 3 เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบท. ขอนแก่น.

## ภาษาอังกฤษ

- Alley, R. 2000. *Water Quality Control Handbook*. New York : McGraw-Hill.
- 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.
- Ayers, D.M., Davis, A.P. and Gietka, P.M. 1994. Removing Heavy Metals from Wastewater. [Online].  
Available from : <http://www.ercumd.edu/TES/techtips/PMG%20metal%20precip%20man.pdf> [2004, May 25].
- Biskup, B. and Subotic B. 1998. Removal of Heavy Metallons from Solution by Means of Zeolites.I. Thermodynamics of the Exchange Process between Cadmium Ions from Solution and Sodium Ions from Zeolit A. Seperation Science and Technology.33(4): 449-466.
- Breck, D.W. 1974. Zeoliet 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.
- Faust, S.D., and Aly O.M. 1987. Adsorption processe 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.
- Patane, G., DiPasquale, S., Corigiano, F. and Mavilia, L. 1996. Use of Zeolitised waste material in the removal of Copper (II) and Zinc (II) from waste water. Annali. Di. Chmica.86: 87-98.
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A. and Lopezsoler, 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.
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L. and Parkin, G.F. 1994. Chemistry for environmental engineering 4<sup>th</sup> ed. New York : McGraw-Hill.
- Singer, A. and Berggaut, 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.
- Virakornphanich, P. and Egashira, K. 1998. Synthesis of Zeolite from Waste Lignite Ash from Thailand. Soil Sci Plant Nutri. 44(4): 707-711.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ (มนตรี ทองคำ, 2542)

#### เครื่องมือที่ใช้

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

#### วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม (Calcium Exchange Solution) 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม  
ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต 2.938 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้ววัดปริมาตรขนาด 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายให้ได้ 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. ไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์

## 4. สารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 87.5 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก) 570 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตรขนาด 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

## 5. สารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ 0.005 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ชั่งอิตีทีเอ ไดโซเดียม ไดไฮเดรต (disodium ethylenediaminetetraacetate dihydrate) 3.743 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตร 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

สอบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอโดยชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต (ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์) ประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอนถึง 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 สารละลายบัฟเฟอร์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อมีสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ จากสูตร

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

(โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)

เมื่อ  $m$  คือ มวลของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นมิลลิกรัม

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 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 ปิดปาก ปีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องกวนไฟฟ้า เปิดเครื่องกวนไฟฟ้าให้หมุนด้วยความเร็ว เกิน 600 รอบต่อนาที เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 นาที

3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน แล้วถ่ายใส่ลงในสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม (ข้อ 2) อย่างรวดเร็วพร้อมกับจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาที่เมื่อครบเวลา 15 นาที ใช้กระบอกฉีดยาดูดสารละลายแขวนลอย 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร กรองอย่างรวดเร็ว โดยใช้ เวลาไม่เกิน 15 วินาที ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศและกระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 42 สารละลาย ที่กรองได้ต้องใส ถ้าไม่ใสให้ปฏิบัติใหม่ตั้งแต่ข้อ (1) จนถึงเมื่อสารละลายที่กรองได้ต้องใส

4. ใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายส่วนใสที่กรองได้ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดแก้ว รูปกรวยขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมล ต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัฟเฟอร์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ ไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอจนถึง จุดยุติเมื่อมีสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน

5. ทำแบลนด์เปรียบเทียบ ถ้าปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 2 ครั้ง ต่างกันเกิน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ทำแบลนด์เปรียบเทียบใหม่

การคำนวณ

คำนวณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม จากสูตร

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

มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์ (100 - L)

เมื่อ  $V_1$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลาย ตัวอย่างเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

- $V_2$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลงค์เป็น  
ลูกบาศก์เซนติเมตร
- C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอเป็นโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
- 100.09 คือ มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต
- m คือ มวลของตัวอย่างเป็นกรัม
- L คือ น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา เป็นร้อยละ

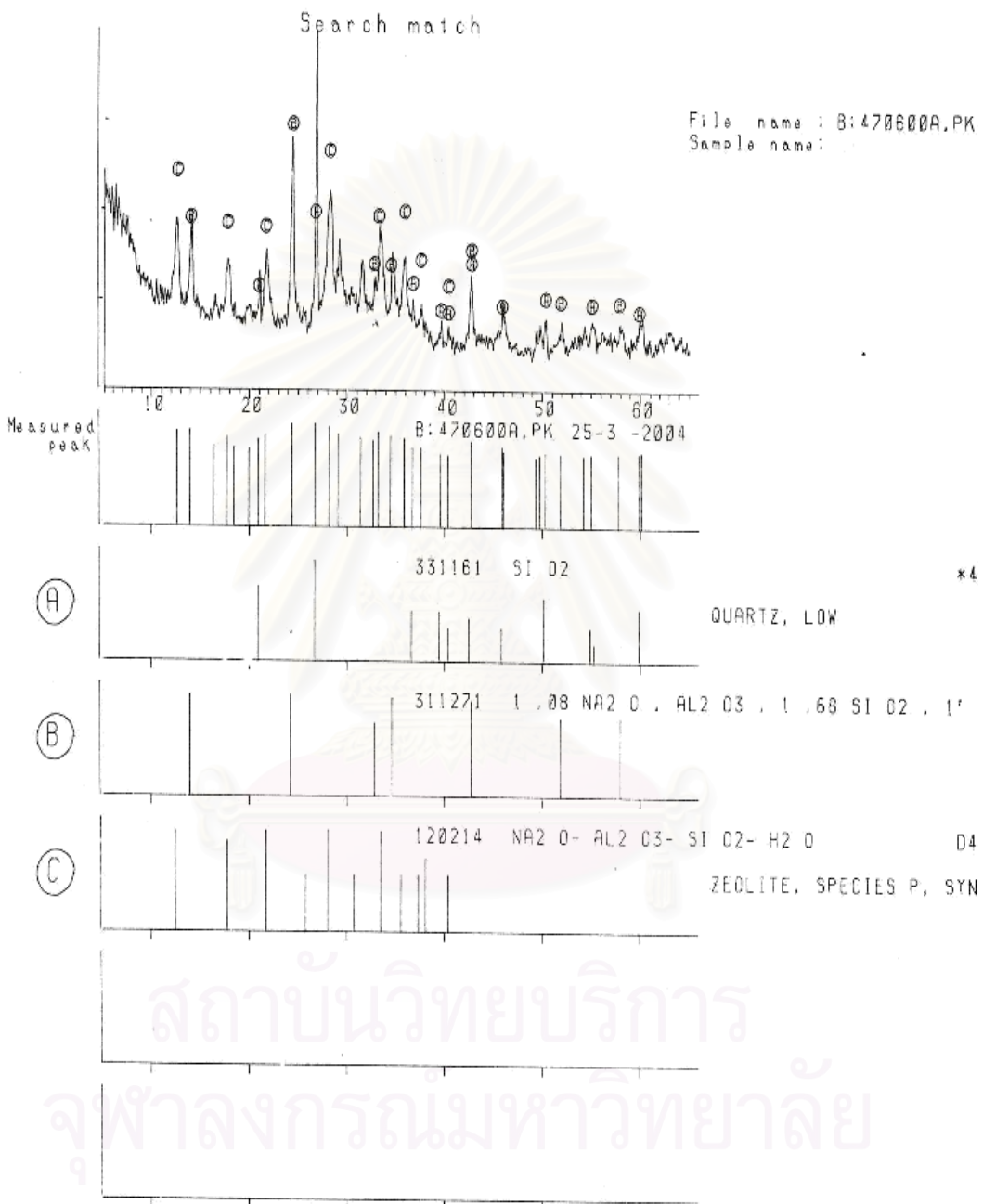
หมายเหตุ : ตัวอย่างที่ใช้ก่อนนำมาวิเคราะห์ ต้องเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (ที่ปราศจากซิลิกาเจล) ที่มี  
ภาชนะบรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปวิเคราะห์

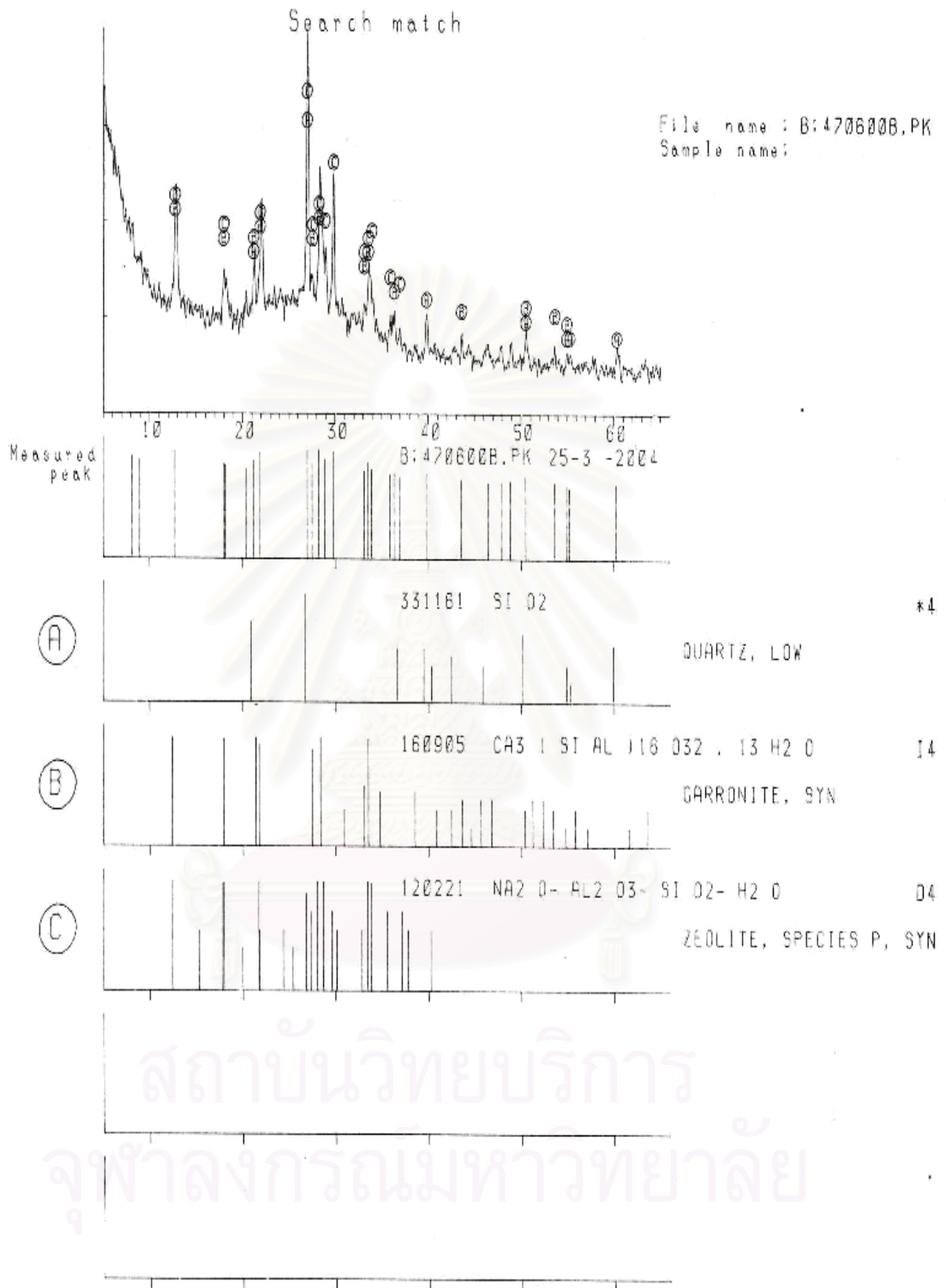


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟเฟรกชัน





ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟเฟรคชันของเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 90° C 4 วัน



## ภาคผนวก ค

## X – RAY DIFFRACTION DATA

1. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟเฟรคชันของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

$2\theta$ (°)	D (Å <sup>o</sup> )	I (counts)	I / I <sub>o</sub>
12.44	7.109	144	48
13.92	6.357	148	49
16.32	5.427	80	26
17.64	5.024	111	37
18.32	4.839	74	25
19.88	4.462	72	24
20.88	4.251	101	33
21.60	4.111	120	40
24.24	3.669	215	71
26.64	3.343	302	100
28.12	3.171	167	55
29.00	3.076	129	43
31.40	2.847	109	36
32.68	2.738	97	32
33.12	2.703	138	46
34.44	2.602	118	39
35.84	2.503	107	35
36.60	2.453	75	25
37.44	2.400	74	25
39.52	2.278	60	20
40.28	2.237	55	18
42.60	2.121	99	33
45.80	1.980	78	26
46.00	1.971	65	22
49.24	1.849	53	18
49.64	1.835	55	18
50.20	1.816	62	21
51.80	1.763	60	20
54.16	1.692	57	19
54.96	1.669	59	20
57.80	1.594	58	19
59.80	1.545	62	21
60.12	1.538	64	21

## 2. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟเฟรคชันของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขาน้อย

$2\theta$ (°)	D (Å)	I (counts)	I / I <sub>o</sub>
8.08	10.933	189	49
8.96	9.861	161	42
12.68	6.975	228	60
17.88	4.657	144	38
18.08	4.902	135	35
20.28	4.375	117	31
21.12	4.203	164	43
21.88	4.059	215	56
26.92	3.309	382	100
27.44	3.248	138	36
28.20	3.162	247	65
28.80	3.097	166	43
29.72	3.004	228	60
33.00	2.712	109	29
33.48	2.674	151	40
33.88	2.644	115	30
35.76	2.509	96	25
36.24	2.477	103	27
36.80	2.440	86	23
39.68	2.270	100	26
43.48	2.080	81	21
46.32	1.959	71	19
47.76	1.903	69	18
48.80	1.865	73	19
50.44	1.808	88	23
53.52	1.711	69	18
54.88	1.672	63	16
55.20	1.663	59	15
60.24	1.535	68	18

ภาคผนวก ง

1. ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

Result Analysis Report

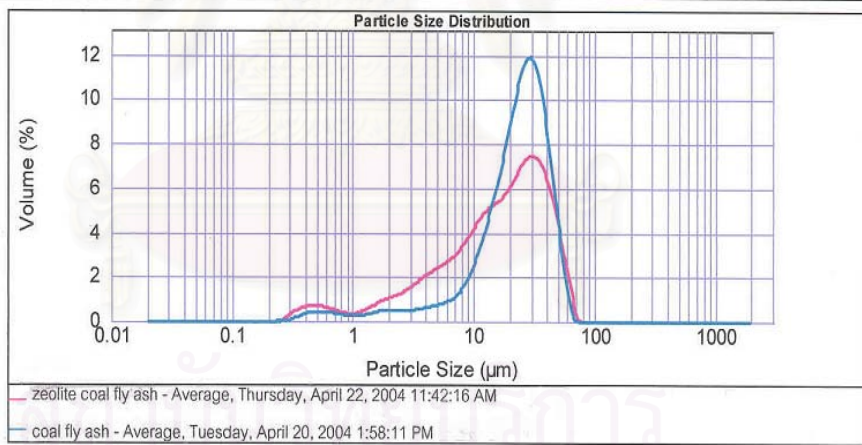
Sample Name: coal fly ash & zeolite - Average  
 SOP Name: Measured: Thursday, April 22, 2004 11:42:16 AM  
 Sample Source & type: Factory Measured by: Default Analysed: Thursday, April 22, 2004 11:42:17 AM  
 Sample bulk lot ref: Averaged Result Source: Averaged

Particle Name: Default Accessory Name: Hydro 2000MU (A) Analysis model: Single narrow mode Sensitivity: Enhanced  
 Particle RI: 1.520 Absorption: 0.1 Size range: 0.020 to 2000.000 um Obscuration: 11.10 %  
 Dispersant Name: Water Dispersant RI: 1.330 Weighted Residual: 0.772 % Result Emulation: Off

Concentration: 0.0177 %Vol Span : 1.452 Uniformity: 0.443 Result units: Volume

Specific surface area : 0.687 m<sup>2</sup>/g Surface Weighted Mean D[3,2]: 8.740 um Vol. Weighted Mean D[4,3]: 25.023 um

d(0.1): 7.517 um d(0.5): 24.391 um d(0.9): 42.936 um



Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %	Size (um)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.18	7.086	0.94	50.238	2.55	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.20	7.962	1.22	56.368	1.12	389.052	0.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.24	8.934	1.62	63.246	1.62	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.30	10.024	2.15	70.963	0.14	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.34	11.247	2.77	79.621	0.00	553.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.37	12.619	3.48	89.337	0.00	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.37	14.159	4.25	100.237	0.00	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.05	2.244	0.36	15.887	5.10	112.468	0.00	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.13	2.518	0.36	17.825	6.07	126.191	0.00	893.357	0.00
0.056	0.00	0.399	0.21	2.825	0.38	20.000	7.09	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.28	3.170	0.38	22.440	8.06	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.31	3.557	0.40	25.179	8.75	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.33	3.991	0.49	28.251	8.96	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.30	4.477	0.53	31.698	8.53	224.404	0.00	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.26	5.024	0.58	35.566	7.48	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.22	5.637	0.65	39.905	5.94	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.19	6.325	0.76	44.774	4.22	316.979	0.00		
0.142	0.00	1.002		7.086		50.238		355.656			

2. ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยซันอ้อยเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยซันอ้อย

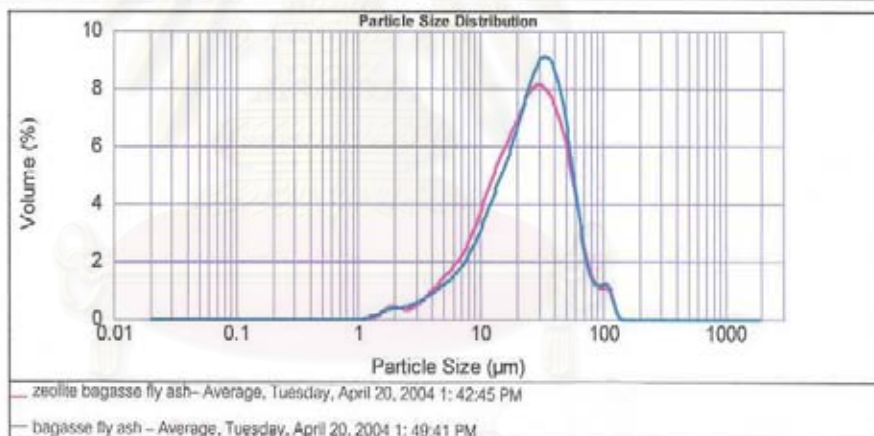
Result Analysis Report

Sample Name: bagasse fly ash & zeolite - Average      SOP Name:      Measured: Tuesday, April 20, 2004 1:49:41 PM  
 Sample Source & type: Factory      Measured by: Default      Analysed: Tuesday, April 20, 2004 1:49:42 PM  
 Sample bulk lot ref:      Result Source: Averaged

Particle Name: Default      Accessory Name: Hydro 2000MU (A)      Analysis model: Single narrow mode      Sensitivity: Enhanced  
 Particle RI: 1.520      Absorption: 0.1      Size range: 0.020 to 2000.000 um      Obscuration: 14.39 %  
 Dispersant Name: Water      Dispersant RI: 1.330      Weighted Residual: 1.092 %      Result Emulation: Off

Concentration: 0.0337 %Vol      Span: 1.816      Uniformity: 0.588      Result units: Volume  
 Specific surface area: 0.368 m<sup>2</sup>/g      Surface Weighted Mean D[3,2]: 16.311 um      Vol. Weighted Mean D[4,3]: 31.174 um

d(0.1): 8.223 um      d(0.5): 27.133 um      d(0.9): 57.504 um



Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	1.50	50.206	4.67	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.126	0.00	7.962	1.78	56.300	3.48	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.02	8.924	2.12	63.245	2.29	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.419	0.07	10.024	2.51	70.963	1.39	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.598	0.14	11.247	2.84	79.621	0.95	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.22	12.619	3.20	89.337	0.67	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.26	14.159	3.59	100.237	0.47	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.29	15.987	3.78	112.400	0.31	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.38	17.825	4.68	126.191	0.08	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.42	20.000	5.23	141.588	0.00	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.42	22.440	5.80	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	0.51	25.179	6.31	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.71	28.281	6.68	200.000	0.00	1415.882	0.00
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.71	31.696	6.68	224.404	0.00	1590.650	0.00
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.83	35.566	6.86	251.795	0.00	1792.502	0.00
0.112	0.00	0.798	0.00	5.637	0.96	39.905	6.77	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.890	0.00	6.325	1.10	44.774	6.38	316.979	0.00		
0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	1.28	50.206	5.60	355.656	0.00		

## ภาคผนวก จ

## มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคและมาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด

ตาราง จ.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค

คุณลักษณะ	1	2	3*	
	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด(Maximum Acceptable Concentration)	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด(Maximum Allowable Concentration)
ทางกายภาพ	สี(colour)	แพลตินัม-โคบอลต์(Platinum-Cobalt)	5	15
	รส(Taste)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	กลิ่น(Odour)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	ความขุ่น(Turbidity)	ซิลิกา สเกล ยูนิต(Silica scale unit)	5	20
	ค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH)	-	5-9	ไม่เกิน 9.2

ทางเคมี	ปริมาณสารทั้งหมด( Total Solid)	มก./ล.(mg/l)	500	1500
	เหล็ก (Fe)	“	0.5	1.0
	แมงกานีส (Mn)	“	0.3	0.5
	เหล็กและแมงกานีส	“	0.5	1.0
	ทองแดง (Cu)	“	1.0	1.5
	สังกะสี (Zn)	“	5.0	15.0
	แคลเซียม (Ca)	“	75**	200
	แมกนีเซียม (Mg)	“	50	150
	ซัลเฟต (SO <sub>4</sub> )	“	200	250***
	คลอไรด์ (Cl)	“	250	600
	ฟลูออไรด์ (F)	“	0.7	1.0
	ไนเตรต (NO <sub>3</sub> )	“	45	45
	Alkybenzyl Sulfonate	“	0.5	1.0
	Phenolic substances as phenol	“	0.001	0.002

ตาราง จ.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค(ต่อ)

คุณลักษณะ	1	หน่วย	2	3*
	ดัชนีคุณภาพน้ำ		เกณฑ์กำหนดสูง สุด(Maximum Acceptable Concentration)	เกณฑ์อนุโลมสูง สุด(Maximum Allowable Concentration)
สารเป็นพิษ	ปรอท(Hg)	มก./ล.(mg/l)	0.001	-
	ตะกั่ว(Pb)	“	0.05	-
	อาร์เซนิก(As)	“	0.05	-
	เซเลเนียม(Se)	“	0.01	-
	โครเมียม(Cr hexavalent)	“	0.05	-
	ไซยาไนด์(CN)	“	0.2	-
	แคดเมียม(Cd)	“	0.01	-
	บาเรียม(Ba)	“	1.0	-
ทางจุลชีววิทยา	แอสตันดาร์ดเพลต เคานต์(Standard plate Count)	Colonies/cm <sup>3</sup>	500	-

	เอ็มพีเอ็น(MPN)	Coliform Organism/100 cm <sup>3</sup>	น้อยกว่า2.2	-
	อี.โคไล(E.coli)		ไม่มี	-

หมายเหตุ \* เกณฑ์ที่อนุโลมให้สูงสุดตามสดมภ์ที่ 3 นั้น เป็นเกณฑ์ที่อนุญาติให้สำหรับ น้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่มีความจำเป็นต้องใช้บริโภคเป็นการชั่วคราวและน้ำที่มีคุณลักษณะอยู่ในระหว่างเกณฑ์ของสดมภ์ที่ 2กับสดมภ์ที่ 3 นั้นไม่ใช่หน้าที่ให้เครื่องหมายมาตรฐานได้

\*\* หากแคลเซียมมีปริมาณสูงกว่าที่กำหนดและแมกนีเซียมมีปริมาณต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐาน ให้พิจารณาแคลเซียมและแมกนีเซียมในเทอมของความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) ถ้ารวมความกระด้างทั้งหมดเมื่อคำนวณปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต มีปริมาณต่ำกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ถือว่าน้ำนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน

การแบ่งระดับความกระด้างของน้ำดังต่อไปนี้

0 ถึง 75 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่าอ่อน

75 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่ากระด้างปานกลาง

150 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่ากระด้าง

300 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่ากระด้างมาก

\*\*\* หากซัลเฟตมีปริมาณถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียมต้องมีปริมาณไม่เกินมิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำบริโภค ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95ตอนที่ 68 ลงวันที่ 4 กรกฎาคม 2521

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ เกิดวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนหอวัง และระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย