

การกำจัดแอมโมเนียในนาุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน



นายปธานิน แสงอรุณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

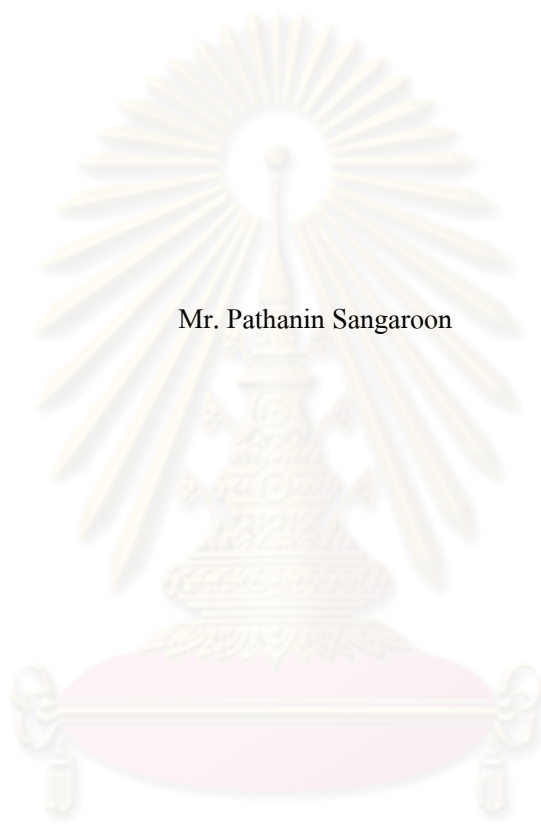
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AMMONIA REMOVAL FROM SHRIMP POND USING ZEOLITE
SYNTHESIZED FROM COAL FLY ASH



Mr. Pathanin Sangaroon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดแอมโมเนียในนาุ้งโดยใช้ซีโอไลท์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน
โดย	นายปรานิน แสงอรุณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... กณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เตชะธีราวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พุทธรังษี)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

ปธานิน แสงอรุณ : การกำจัดแอมโมเนียในน้ำกุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน (AMMONIA REMOVAL FROM SHRIMP POND USING ZEOLITE SYNTHESIZED FROM COAL FLY ASH.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์, 144 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายค่างที่ใช่แล้ว (spent alkaline) ได้ทำการ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline 3 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วันให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนไฮดรอกไซด์เท่ากับ 470.75 cmol/kg

การศึกษาครั้งนี้ได้นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโครเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่า ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโครเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ คือ 1 กรัมซีโอไลต์ สามารถกำจัดแอมโมเนียในโครเจนได้ 11.38 มิลลิกรัมแอมโมเนียในโครเจน ที่พีเอชน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นเท่ากับ 6 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 180 นาที นำไปทดสอบไอโซเทอมการดูดซับสามารถอธิบายได้โดย ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยผ่านการกระตุ้นด้วย Spent alkaline มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโครเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับร้อยละ 82 ของปริมาณแอมโมเนียในโครเจนทั้งหมด และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโครเจนในน้ำเสียจริงได้เท่ากับร้อยละ 74.87

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิติกร ๒๕๕๑.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5070579021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ZEOLITE / COAL FLY ASH / AMMONIA / SHRIMP POND

PATHANIN SANGAROON : AMMONIA REMOVAL FROM SHRIMP POND

USING ZEOLITE SYNTHESIZED FROM COAL FLY ASH. THESIS ADVISOR :

ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 144 pp

The objective of this research was to study the potential applicability in synthesis using coal fly ash. The results revealed that the optimum conditions for synthesis zeolite from coal fly ash by spent alkaline is temperature of 80 °C, spent alkaline solution of 3 molar and contact time of 4 days, Calcium ion exchange capacity of synthesis zeolite was 470.75 cmol/kg

Synthesis zeolite was conducted to investigate the capacity of ammonia removal from the synthetic wastewater contained with Ammonia-Nitrogen at 2 mgL⁻¹, batch experiment were performed to investigate the parameters affecting the Ammonia-Nitrogen removal in synthetic wastewater from shrimp pond, such as zeolite dosage, pH, contact time and adsorption isotherm of Ammonia-Nitrogen removal. The results demonstrated that the optimum zeolite dosage in order to remove 11.38 mg ammonia nitrogen from synthetic wastewater with 1 gram of zeolite can remove Ammonia-Nitrogen mg-NH₃-N at pH 6, contact time 180 minutes and adsorption isotherm could explain by Langmuir isotherm. Zeolite synthesized from coal fly ash activated by spent alkaline has the capacity for ammonia removal from synthetic wastewater 82.00 % of total ammonia nitrogen. The removal performance of ammonia nitrogen in wastewater from shrimp pond using zeolites synthesized from coal fly ash was 74.87 %

Department : Environmental Engineering.....

Field of Study : Environmental Engineering.....

Academic year 2008

Student's Signature Pathanin Sangaroon

Advisor's Signature..... T. Srisatit

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำปรึกษา ให้ความรู้ ข้อคิดเห็น ความช่วยเหลือ ชี้แนะ และแก้ไขสิ่งที่บกพร่องมาโดยตลอด อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ นับตั้งแต่แนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนกระทั่งจบโครงการ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พุททวงษ์ และอาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำชี้แนะ ปรึกษา ช่วยแก้ไข จนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้อุปการะเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และเจ้าหน้าที่ ห้องธุรการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้เสมอมา

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ครูวรรณชนา วงษ์สุด ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ครูบาอาจารย์ ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สารประกอบไนโตรเจน (แอมโมเนีย และไนไตรท์).....	4
2.2 คุณภาพน้ำในบ่อกึ่งกลาดำ.....	6
2.2.1 ความเค็ม.....	7
2.2.2 ค่าความเป็นกรดต่างหรือพีเอช.....	8
2.2.3 ค่าอัลคาไลน์ในน้ำหรืออัลคาไลน์ดี.....	9
2.2.4 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ.....	10
2.2.5 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า).....	12
2.3 ซีโอไลต์.....	13
2.3.1 ประวัติและวิวัฒนาการของซีโอไลต์.....	13
2.3.2 นิยามของซีโอไลต์.....	16
2.3.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะ โครงสร้าง.....	19
2.3.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	33
2.3.5 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์.....	36
2.3.6 ประโยชน์ของซีโอไลต์.....	37

2.4	เถ้าลอยถ่านหิน.....	41
2.4.1	สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	41
2.4.2	การจัดรูปของเถ้าลอยขณะทำการเผาไหม้.....	42
2.4.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักเก็บเถ้าลอยถ่านหิน.....	43
2.4.4	ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ.....	44
2.4.5	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน.....	44
2.4.6	สมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยถ่านหิน.....	45
2.4.7	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบางประการที่เกิดจากเถ้าลอย.....	46
2.4.8	ประโยชน์ของเถ้าลอยถ่านหิน.....	47
2.5	การดูดติดผิว.....	49
2.5.1	กลไกการดูดติดผิว.....	50
2.5.2	ประเภทของการดูดติดผิว.....	51
2.5.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	51
2.5.4	สมมูลของการดูดติดผิว.....	52
2.6	การรรมดำโลหะ.....	56
2.6.1	กระบวนการรรมดำโลหะ.....	56
2.6.2	น้ำเสียจากกระบวนการรรมดำผิวโลหะ.....	57
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	58
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	66
3.1	รูปแบบการวิจัย.....	66
3.2	แผนงานวิจัย.....	66
3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	67
3.4	วิธีดำเนินการวิจัย.....	67
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	75

4.1	ผลของการศึกษาลักษณะเบื้องต้นและสมบัติของสารละลายต่าง ที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมด้าโลหะ (Spent alkaline)	75
4.2	ผลของการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน	77
4.3	ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดแอม โมเนียในโตรเจน ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน	89
4.4	ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	97
4.5	ผลการศึกษาสมบัติของน้ำเสียจากนาุ้งและผลการศึกษาประสิทธิภาพ ในการกำจัดแอม โมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจากนาุ้ง.....	100
4.6	ผลการประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ จากถ้ำลอยถ่าน หิน โดยใช้สารละลาย spent alkaline.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....		104
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	104
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	105
รายการอ้างอิง.....		106
ภาคผนวก.....		110
ภาคผนวก ก	ร้อยละ ของแอม โมเนียที่พีเอช และอุณหภูมิของน้ำ ในระดับต่างๆ กัน	111
ภาคผนวก ข	วิธีการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline.....	112
ภาคผนวก ค	วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม.....	114
ภาคผนวก ง	วิธีวิเคราะห์หาแอม โมเนียในโตรเจน	118
ภาคผนวก จ	ผลการวิเคราะห์ X-rays Diffraction Spectroscopy (XRD) ผลการวิเคราะห์ X-rays Fluorescence Spectroscopy (XRF) ผลการวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry	121
ภาคผนวก ฉ	ผลการศึกษาลักษณะน้ำเสียจากนาุ้ง.....	139

ภาคผนวก ข	มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย	
	และเกษตรกรรม.....	142
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		144



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ส่วนประกอบของแร่ธาตุหลัก ในน้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำจืด.....	7
ตารางที่ 2.2	ผลกระทบของฟิเอชต่อปลา.....	9
ตารางที่ 2.3	ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนต่อกุ้งกุลาดำ.....	11
ตารางที่ 2.4	เปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ฟิเอชต่าง ๆ กัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	12
ตารางที่ 2.5	ประวัติของการสังเคราะห์ซีโอไลต์	15
ตารางที่ 2.6	การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทฤษฎี.....	21
ตารางที่ 2.7	โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจำแนกตาม Secondary Building Units	22
ตารางที่ 2.8	คุณลักษณะของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ.....	32
ตารางที่ 2.9	สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ.....	34
ตารางที่ 2.10	ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็น โครงสร้างของผลึก ซีโอไลต์.....	36
ตารางที่ 2.11	สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป.....	46
ตารางที่ 4.1	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนและค่าฟิเอชของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว.....	76
ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักทั้งหมดและค่าเฉลี่ยโลหะที่ละลายได้ ของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว.....	76
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวและค่าเฉลี่ยปริมาตรโพรงของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	81
ตารางที่ 4.4	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์.....	82
	ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ	82
ตารางที่ 4.5	ค่าเฉลี่ยความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหินและ ซีโอไลต์สังเคราะห์.....	86

ตารางที่ 4.6	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	87
ตารางที่ 4.7	ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักทั้งหมดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	89
ตารางที่ 4.8	ค่าร้อยละการกำจัดของแอมโมเนียในโตรเจนหลังผ่านการบำบัดด้วย ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	91
ตารางที่ 4.9	ค่าร้อยละการกำจัดของแอมโมเนียในโตรเจนหลังผ่านการบำบัด..... ด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่ ค่าพีเอชต่าง ๆ	94 94
ตารางที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาในการสัมผัสกับประสิทธิภาพ การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน	96
ตารางที่ 4.11	ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียในโตรเจน ในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน	97
ตารางที่ 4.12	ค่าคงที่ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินจากสมการของแลงมัวร์.....	99
ตารางที่ 4.13	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยซีโอไลต์ ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	100

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปสะสมอยู่ในส่วนต่างๆของบ่อเลี้ยงกุ้ง ในระบบปิด.....	4
ภาพที่ 2.2 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม ในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	16
ภาพที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$	16
ภาพที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	20
ภาพที่ 2.5 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ.....	20
ภาพที่ 2.6 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่.....	24
ภาพที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Analcite และ Laumont.....	25
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Natrolite, Brewsterite และ ZSM-5.....	25
ภาพที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite.....	26
ภาพที่ 2.10 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UDD, UDUD และUDUU.....	26
ภาพที่ 2.11 หน่วยทุติยภูมิ Heulandite Group และ Stilbite.....	27
ภาพที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของ Ferrierite, Bikitaite, Dachiardite, ZEM-5.....	28
ภาพที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของ Mordenite และ Epstilbite และ ZEM-11.....	29
ภาพที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของ Sodalite, A, และ ZK-5	30
ภาพที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-39 และ Melanophlogite.....	31
ภาพที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite.....	32
ภาพที่ 2.17 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว.....	50
ภาพที่ 2.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich.....	53
ภาพที่ 2.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir.....	55
ภาพที่ 2.20 ขั้นตอนการรรมค่าโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมค่าโลหะ.....	56

ภาพที่ 3.1	ผังรวมการวิจัย.....	71
ภาพที่ 3.2	ผังการวิจัยสมบัติของสารละลายต่าง.....	72
ภาพที่ 3.3	ผังการวิจัยสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน.....	73
ภาพที่ 3.4	ผังการวิจัยปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	73
ภาพที่ 3.5	ผังการวิจัย การหาสภาวะที่เหมาะสมของซีโอไลต์.....	74
ภาพที่ 4.1	ลักษณะของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว.....	75
ภาพที่ 4.2	ลักษณะของเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต.....	77
ภาพที่ 4.3	ตัวอย่างเถ้าลอยถ่านหินเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	78
ภาพที่ 4.4	ตัวอย่างซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน.....	78
ภาพที่ 4.5	พื้นที่ผิวของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500.....	79
ภาพที่ 4.6	พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยกระตุ้นด้วย สารละลาย spent alkaline เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	80
ภาพที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้กับประสิทธิภาพการ กำจัดแอมโมเนียในโตรเจน.....	92
ภาพที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน.....	94
ภาพที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาในการสัมผัสกับประสิทธิภาพ การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน.....	96
ภาพที่ 4.10	ไอโซทอมการดูดติดแบบพรุนดลิกซ์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	98
ภาพที่ 4.11	ไอโซทอมการดูดติดแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	99
ภาพที่ 4.12	พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการดูดติดผิว เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันกิจการการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในประเทศไทยมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตต่างประเทศได้ ถือเป็นอาชีพที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งเป็นอย่างมาก จึงทำให้มีผู้นิยมทำการเพาะเลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้น เพื่อสนองความต้องการของตลาด ปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดตามมาคือ ปัญหาความเสื่อมโทรมของคุณภาพสิ่งแวดล้อมและการระบาดของโรคในพื้นที่เลี้ยงกุ้งรุนแรงขึ้น ซึ่งในเทคนิคการเลี้ยงกุ้งระบบปิดหรือการเลี้ยงกุ้งแบบเติมน้ำหรือถ่ายน้ำน้อยนั้น ก็เป็นการพัฒนาปรับปรุงเทคนิคการเลี้ยงอีกชนิดหนึ่งเพื่อลดความเสี่ยงที่ทำให้กุ้งติดเชื้อและตายในระหว่างการเลี้ยง แต่การเลี้ยงกุ้งในระบบปิดก็มีข้อเสียอยู่เช่นกัน เนื่องจากของเสียและสิ่งขับถ่ายจากการเลี้ยงกุ้งจะสะสมอยู่ในบ่อเลี้ยง เช่น แอมโมเนีย ไนไตรท์ โดยเฉพาะแอมโมเนียนั้นซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีบทบาทสำคัญในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพราะมีความสารพิษต่อสัตว์น้ำและปฏิกิริยาสำหรับการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช (Hargreaves, 1998) แอมโมเนียเป็นสารพิษที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำในความเข้มข้นที่ต่ำ ค่าความเป็นพิษเฉียบพลันของแอมโมเนียโดยเฉลี่ยจากสัตว์ทะเล 17 ชนิด อยู่ที่ 1.86 mg NH₃/l (USEPA, 1984, 1987 อ้างถึงใน Randall and Tsui, 2002) และในนาุ้งนั้นแอมโมเนียส่วนใหญ่ได้มาจากการขับถ่ายของกุ้งและอาหารเหลือตกค้าง เมื่อเลี้ยงกุ้งไปนานๆความเข้มข้นของแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงจึงสูงขึ้น จนอาจถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อกุ้งได้ ในการเลี้ยงกุ้งโดยทั่วไปจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่ให้สูงเกินไป แต่การกระทำเช่นนี้อาจไปสร้างผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติที่รองรับน้ำทิ้งได้ จึงควรมีวิธีการที่กำจัดหรือลดปริมาณแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงเพื่อให้กุ้งเจริญเติบโตต่อไปได้

ประเทศไทยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลักชนิดหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้า และเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ถ่านหินที่นำไปใช้เมื่อถูกเผาไหม้แล้วจะทำให้เกิดถ่านหินในปริมาณสูงเกือบถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของถ่านหินที่นำไป มีความพยายามที่จะนำถ่านหินไปใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น เช่น สังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ ทำปุ๋ยโพแทสเซียม เป็นตัวดูดซับในปล่อง (Kikuchi, 1999) และ นำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีต ใช้ในงานก่อสร้างถนน ใช้เป็นคันทาง เป็นวัสดุถม และเป็นวัสดุดิบในการผลิตอิฐ เป็นต้น การนำถ่านหินมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์เป็นวิธีการที่สำคัญวิธีการหนึ่งในการจัดการของ

เสียด ซึ่งซีโอไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไอออนบวกของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูง เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และเรซินซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการค้าจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียด แต่มีราคาแพงและค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพหลังการใช้มีราคาสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมาใช้ในการกำจัดแอมโมเนียในนาุ้ง เพื่อเป็นการเพิ่มผลผลิตกุ้งให้กับเกษตรกรรวมถึงช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากแอมโมเนียในนาุ้งอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้รวมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ

1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในนาุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่างๆ ที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) ซึ่ง เถ้าลอยถ่านหินที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้เป็นเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสซึ่ง นำมาจากโรงงาน โทเรเท็กซ์ ไทล์มิลล์ จำกัด อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม ส่วนสารละลายต่างๆ ที่ใช้แล้วนำมาจากโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะอุตสาหกรรม จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งการวิจัยมีขั้นตอนดังนี้คือ

1.3.1 สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินในสภาวะต่างๆ อาทิ อุณหภูมิการเผา อุณหภูมิในการกระตุ้น และปัจจัยอื่นๆ

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยใช้สารละลายต่างๆ ที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) จากกระบวนการรมดำโลหะมาเป็นสารเริ่มต้นทดแทนค่าใหม่ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

1.3.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนแคทไอออนและการดูดซับในน้ำเสียดสังเคราะห์จากนาุ้ง ได้แก่ ปริมาณซีโอไลต์ พีเอช ค่า ซีโอดี ของน้ำเสียด ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัส และทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียดจากนาุ้ง โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

1.3.5 ประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้ง (เถ้าลอยถ่านหิน โซเดียมไฮดรอกไซด์จากอุตสาหกรรมรมดำโลหะอุตสาหกรรม) กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ อันเป็นการลดของเสียอุตสาหกรรมที่จะต้องถูกกำจัด

1.4.2 สามารถนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินไปใช้ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียในนาุ้งได้ รวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการเลี้ยงกุ้ง

1.4.3 เป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้ง (เถ้าลอยถ่านหินสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีคุณภาพดีขึ้น



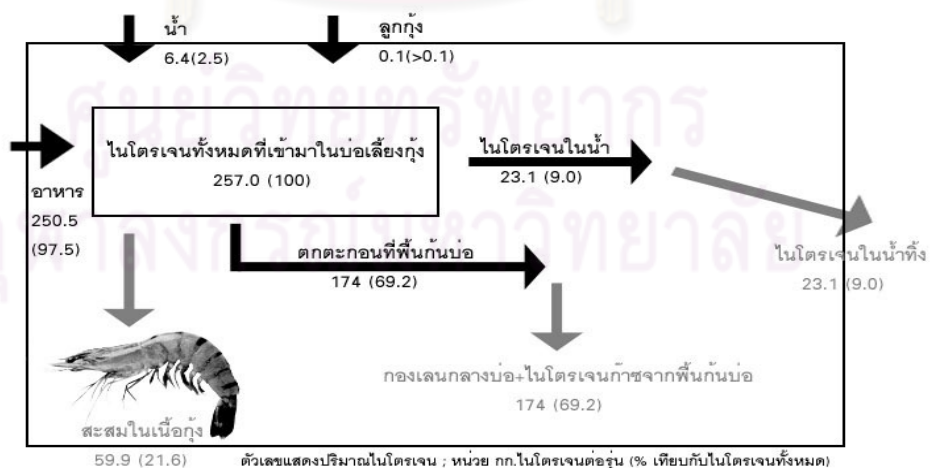
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบไนโตรเจน (แอมโมเนีย และไนไตรท์) (พรเลิศ จันทร์รัชกุล และชลอ ลิมสุวรรณ, 2549)

แอมโมเนียและไนไตรท์ เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อกุ้งและสัตว์น้ำ แหล่งของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำส่วนใหญ่มาจากสารอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากกระบวนการนำสลายนของเศษอาหารที่เหลือ แพลงก์ตอนที่ตาย เศษซากพืชซากสัตว์ และสารอินทรีย์อื่นๆ โดยจุลินทรีย์ แล้วปล่อยแอมโมเนียออกมาสู่แหล่งน้ำโดยตรง ในสภาวะที่มีออกซิเจนแบคทีเรียจำพวกไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (nitrifying bacteria) จะเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทตามลำดับ แอมโมเนียเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อกุ้งและสัตว์น้ำอื่นๆ ยกเว้นแพลงก์ตอนพืชและแบคทีเรียที่ใช้แอมโมเนียเป็นอาหาร (ดังภาพที่ 2.1) แอมโมเนียที่พบอยู่ในน้ำจะอยู่ในสองรูปแบบคือ แอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ในการวัดแอมโมเนียโดยทั่วไปจะวัดรวมทั้งสองรูป แอมโมเนียทั้งสองรูปแบบนี้จะเปลี่ยนกลับไปกลับมาตามพีเอชของน้ำและอุณหภูมิของน้ำ โดยเฉพาะพีเอชของน้ำที่สูงขึ้น อัตราส่วนของแอมโมเนีย (NH_3) จะสูงขึ้นทำให้ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมีมากขึ้น แต่ถ้าพีเอชของน้ำลดลง แอมโมเนียในรูปแอมโมเนียมไอออนจะมีในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำลดลง



ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปและสะสมอยู่ในที่ส่วนต่างๆของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด

ภาพที่ 2.1 ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปสะสมอยู่ในที่ส่วนต่างๆของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด (พรเลิศ และชลอ, 2549)

เมื่อแอมโมเนียในน้ำปริมาณสูงขึ้น จะมีผลให้การขั้วถ่ายแอมโมเนียของกุ้งทำได้น้อยลง ทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อ ส่งผลให้พีเอชของเลือดเพิ่มขึ้น และมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ แอมโมเนียจะทำให้การใช้ออกซิเจนของเนื้อเยื่อสูงขึ้น แอมโมเนียจะไปทำลายเหงือกและความสามารถในการขนส่งออกซิเจนและทำให้กุ้งอ่อนแอติดเชื้อโรคได้ง่าย ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้สัตว์น้ำตายโดยปกติอยู่ในช่วง 0.4-2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของ NH_3 แต่แอมโมเนียระหว่าง 0.1-0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้กุ้งโตช้า สำหรับระดับที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงกุ้งควรน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

แอมโมเนียในน้ำจะเป็นอาหารของแบคทีเรียในกลุ่มไนโตรไฟอิงแบคทีเรีย เช่น ไนโตรโซโมแนส (*Nitrosomonas spp.*) จะใช้แอมโมเนียเป็นอาหาร และเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ ส่วนไนโตรแบคเตอร์ (*Nitrobacter spp.*) จะเปลี่ยนไนไตรท์เป็นไนเตรท ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจำเป็นต้องมีแหล่งของคาร์บอนซึ่งได้มาจากไบคาร์บอเนตจากการเติมวัสดุลงไป ทำให้แบคทีเรียมีสารอาหารครบถ้วนและดูดซึมแอมโมเนียไปใช้ได้ดี ในขณะเดียวกันแบคทีเรียในกลุ่มนี้ต้องการน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เพื่อการเผาผลาญอาหารสร้างพลังงาน การขาดออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนไม่พอเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แอมโมเนียเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทไม่สมบูรณ์

ผลจากการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะทำให้ปริมาณแอมโมเนียลดลง มีการใช้ออกซิเจนมากขึ้น ทำให้น้ำมีออกซิเจนลดลงและเนื่องจากมีการใช้ไบคาร์บอเนต และปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา จะทำให้น้ำมีพีเอชต่ำลง ในกรณีที่น้ำมีออกซิเจนหรือปริมาณแบคทีเรียไม่เพียงพอจะทำให้การเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียเป็นไนเตรทเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และจะทำให้เกิดการสะสมของไนไตรท์ในน้ำได้ ความเป็นพิษของไนไตรท์ต่อสัตว์น้ำเกิดจากการที่ไนไตรท์ไปออกซิไดซ์เหล็ก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบิน ทำให้กลายเป็นเมทฮีโมโกลบินจึงไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ ทำให้เกิดการตายเนื่องจากการขาดออกซิเจน ในสัตว์ประเภทพวกกุ้งและปูมีเลือดสีน้ำเงินมีฮีโมไซยานิน ไนไตรท์จะเข้าจับกับเม็ดเลือดได้น้อยกว่า ไนไตรท์จึงมีความเป็นพิษต่อกุ้งน้อยลงความเป็นพิษมาจากเลือดกุ้งไม่สามารถจับตัวกับออกซิเจน ทำให้กุ้งขาดออกซิเจนได้

นอกจากนี้ไนไตรท์ในเลือดกุ้งจะทำให้ระดับโปรตีน และพีเอชของเลือดกุ้งลดลงซึ่งทำให้ชีวเคมีในเลือดกุ้งเปลี่ยนแปลง การสะสมของยูเรียในเลือดกุ้งและมีการดูดซึมน้ำมาก ทำให้สมดุลเกลือแร่เปลี่ยนไป ไนไตรท์จะเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่พบในปริมาณน้อยในแหล่งน้ำธรรมชาติ ในการเลี้ยงกุ้งทะเลระบบเปิดมีการถ่ายน้ำมากจะพบไนไตรท์ในระดับ 0.01-0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ระดับความเป็นพิษของไนไตรท์จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำและค่าพีเอชน้ำลดลง นอกจากนี้ความเป็นพิษของไนไตรท์จะถูกยับยั้งโดยคลอไรด์ในน้ำ ดังนั้นในน้ำ

ทะเลซึ่งมีคลอไรด์สูง ความเป็นพิษของไนโตรเจนต่อสัตว์น้ำจึงค่อนข้างต่ำ เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งที่ใช้น้ำทะเลโดยตรงนั้นปัญหาของความเป็นพิษของไนโตรเจนต่อกุ้งจะน้อย แต่สำหรับเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งด้วยน้ำความเค็มต่ำซึ่งมีปริมาณของคลอไรด์ในน้ำน้อย ปัญหาความเป็นพิษของไนโตรเจนต่อกุ้งจึงเกิดได้ง่ายกว่า การเติมเกลือลงในน้ำที่มีความเค็มต่ำจึงมีความจำเป็นอย่างมาก หากพบว่าค่าไนโตรเจนในบ่อสูง การพบไนโตรเจนในระดับ 0.5-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรในบ่อเลี้ยงที่กึ่งกินอาหารน้อยลงจากการเลี้ยงแบบระบบปิดโดยใช้น้ำหมุนเวียนที่มีการรักษาออกซิเจนให้อยู่ในระดับที่พอเพียงต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง (มากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าปริมาณไนโตรเจนสูงถึง 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถเลี้ยงกุ้งโดยไม่มีปัญหาในการจัดการให้อาหาร ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นน่าจะไม่ได้มาจากความเป็นพิษของไนโตรเจนโดยตรง

การป้องกันหรือแก้ปัญหาเรื่องความเป็นพิษของแอมโมเนีย และไนโตรเจนสูง โดยการควบคุมปริมาณอาหารไม่ให้เหลือกับการควบคุมค่าของพีเอชในบ่อให้อยู่ระหว่าง 7.5-8.5 อีกทั้งมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและการให้อากาศที่พอเพียง ปัญหาความเป็นพิษจากสารประกอบไนโตรเจน ทั้งสองตัวนี้จะหมดไป ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนและมีสารอินทรีย์คาร์บอนไม่เพียงพอ แทนที่แบคทีเรียในกลุ่มดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (denitrifying bacteria) เช่น ซูโดโมนาส (*Pseudomonas spp.*) อัลคาลิเจเนส (*Alkaligenes spp.*) และวibriโอ (*Vibrio spp.*) จะเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้าย แต่จะทำให้เกิดไนโตรเจนแทน ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นไม่สมบูรณ์

ดังนั้นการสะสมของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก

1. กระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) ไม่สมบูรณ์เนื่องจากขาดออกซิเจน และความไม่สมดุลของสัดส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C:N ratio)
2. กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) ที่ไม่สมบูรณ์ เพราะกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในสภาวะตามธรรมชาติเป็นไปได้ยาก เนื่องจากจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยประกอบหลายอย่าง โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากเพื่อดึงอิเล็กตรอนออก (Electron Transfer System; ETS) จึงเกิดการสะสมของไนโตรเจน
3. กระบวนการไนเตรตรีดักชัน (nitrate reduction) ในสภาวะที่ขาดออกซิเจนที่พื้นบ่อจะมีจุลินทรีย์บางชนิดสามารถดึงออกซิเจนจากไนเตรทมาใช้ จนเกิดเป็นไนโตรเจนและมีการสะสมเกิดขึ้น

2.2 คุณภาพน้ำในบ่อกุ้งกุลาดำ (พรเลิศ จันทร์รัชชกุล และชะลอ ลิมสุวรรณ, 2549)

การเลี้ยงกุ้งกุลาดำในทุกระบบไม่ว่าจะเป็นการเลี้ยงด้วยน้ำความเค็มปกติ ความเค็มต่ำ การเลี้ยงโดยใช้ระบบน้ำหมุนเวียนหรือระบบปิดก็ตาม การจัดการเรื่องคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง มีความสำคัญมาก ผู้เลี้ยงกุ้งต้องมีความรู้และเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้น เพื่อหาแนวทางในการป้องกันและแก้ไขเพื่อลดปัญหาต่างๆที่อาจจะมีผลต่อสุขภาพของกุ้งและการเจริญเติบโต ทำให้ผลผลิตต่ำ คุณสมบัติของน้ำที่มีความสำคัญในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำมีดังนี้

2.2.1 ความเค็ม (Salinity)

กุ้งกุลาดำเป็นกุ้งทะเลที่มีความสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค็มได้ ในช่วงกว้างและถ้าความเค็มเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างช้าๆสามารถปรับตัวอยู่ที่ความเค็มเป็นศูนย์เป็นเวลานานประมาณ 30 วัน หรือความเค็มที่เพิ่มขึ้นจนถึง 45 พีพีที (ส่วนในพันส่วน) แต่ความเค็มที่เหมาะสมและการเจริญเติบโตดีที่สุด ถ้าไม่มีปัญหาเรื่องโรค คืออยู่ระหว่าง 15-20 พีพีที แต่ในปัจจุบันพบว่า การเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ความเค็ม 3-10 พีพีที จะง่ายกว่าการเลี้ยงด้วยน้ำทะเลความเค็มปกติ คือความเค็มระหว่าง 30-35 พีพีที เนื่องจากน้ำที่มีความเค็มต่ำมีปัญหาจากโรคน้อยมาก โดยเฉพาะปัญหาจากโรคแบคทีเรียเรืองแสงและแพลงก์ตอนในกลุ่มไดโนแฟลกเจลเลต เกษตรกรหลายรายจึงได้หันมาเลี้ยงกุ้งกุลาดำด้วยน้ำความเค็มต่ำมากขึ้น

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของแร่ธาตุหลัก (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำจืด

(Boyd (1982) อ้างถึงในพรเลิศ จันทร์รัชชกุล และชะลอ ลิ้มสุวรรณ, 2549)

แร่ธาตุ	น้ำทะเล	น้ำกร่อย	น้ำจืด
คลอไรด์	19,000	12,090	6
โซเดียม	10,500	7,745	8
ซัลเฟต	2,700	998	16
แมกนีเซียม	1,350	125	11
แคลเซียม	400	308	42
โพแทสเซียม	380	75	2
ไบคาร์บอเนต	142	156	174
อื่นๆ	86	35	4
รวม	34,558	21,529	263

2.2.2 ความเป็นกรดต่างหรือพีเอช (pH)

พีเอชของน้ำมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของกุ้งกุลาดำมาก เนื่องจากพีเอชมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำตัวอื่นๆอีก เช่น มีผลต่อความเป็นพิษของแอมโมเนีย ไนโตรเจน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น พีเอชของน้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ควรอยู่ระหว่าง 7.5-8.5 และความแตกต่างของพีเอชในรอบวันไม่ควรมากกว่า 0.5 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของดิน ค่าความเป็นด่าง (อัลคาไลน์นิตี้) การผลิตและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับปริมาณแพลงก์ตอนพืช

น้ำที่ผ่านบริเวณที่ดินเป็นกรดหรือดินเปรี้ยวจะมีพีเอชต่ำ เนื่องจากความเป็นกรดที่ละลายออกมาจากเนื้อดิน จะทำให้พีเอชของน้ำต่ำ โดยทั่วไปแล้วดินบริเวณป่าชายเลนมักจะเป็นดินเปรี้ยว ซึ่งเกิดจากการสะสมของไฟโรท์ ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างเหล็กและกำมะถันในชั้นดิน ในสภาพที่ขาดออกซิเจน ลักษณะดินส่วนมากมักจะมีการสะสมของสารอินทรีย์จากพืชต่างๆสูง ดินพวกนี้เมื่อขุดขึ้นมาสัมผัสอากาศ ไฟโรท์จะทำปฏิกิริยากับอากาศเป็นกรดกำมะถัน (กรดซัลฟูริก) พีเอชของดินจะต่ำ ในบริเวณที่ดินเป็นกรดเหล่านี้เมื่อสูบน้ำเข้าไปในบ่อจะเห็นได้ชัดว่าน้ำจะมีสีส้มและมีตะกอนสนิมเหล็กเป็นจำนวนมาก การแก้ปัญหาดินกรดทำได้โดยสูบน้ำเข้าไปขังไว้ในบ่อและล้างบ่อหลาย ๆ ครั้ง เมื่อด่างจนเพียงพอแล้วคือพีเอชของน้ำค่อยๆสูงขึ้นเติมน้ำเข้าบ่อให้ระดับน้ำในบ่อสูงกว่าหรือเสมอกับบ่อข้างเคียงแล้วเติมวัสดุปูนหากน้ำในบ่อมีพีเอชที่ต่ำมาก แพลงก์ตอนในบ่อจะเกิดขึ้นยาก เกษตรกรต้องเติมวัสดุปูนเพื่อเพิ่มพีเอชของน้ำตอนเช้าเวลาประมาณ 6.00 น. ให้ถึง 7.5 จะช่วยให้แพลงก์ตอนพืชเพิ่มจำนวนได้เร็วขึ้นระหว่างการเลี้ยงต้องตรวจวัดค่าพีเอชน้ำอยู่เสมอ เมื่อพบว่าพีเอชตอนเช้าเริ่มต่ำกว่า 7.5 ให้รีบเติมวัสดุปูนเพื่อเพิ่มค่าพีเอชขึ้นมาในบ่อที่มีแพลงก์ตอนพืชมากหรือในบ่อที่มีสีน้ำเข้มจัด การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในรอบวันจะมากขึ้นด้วย โดยพีเอชของน้ำจะต่ำสุดในตอนเช้ามีดเมื่อมีการสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายของเสียโดยแบคทีเรียและการหายใจของกุ้งและแพลงก์ตอนรวมทั้งสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในบ่อ ส่วนในตอนบ่ายพีเอชของน้ำจะสูงที่สุดเนื่องจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชมีการดึงคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ ในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ โดยทั่วไปพีเอชของน้ำในรอบวันไม่ควรแตกต่างมากกว่า 0.5 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำในรอบวันมากเกินไปจะมีผลทำให้กุ้งเครียดมีผลต่อการเจริญเติบโตด้วย การแก้ปัญหาโดยการลดปริมาณแพลงก์ตอนหรือถ่านน้ำมากขึ้นเพื่อลดความเข้มข้นของสีน้ำ หรือในกรณีที่ค่าอัลคาไลน์ในน้ำต่ำ จำเป็นต้องมีการเติมวัสดุปูน เพื่อเพิ่มระดับค่าอัลคาไลน์จะทำให้พีเอชของน้ำตอนเช้า และตอนบ่ายเปลี่ยนแปลงน้อยลง ส่วนในกรณีที่พีเอช

ตอนบ่ายสูงมากในบ่อที่มีสีน้ำเข้มจัดเนื่องจากมีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ไปในการสังเคราะห์แสงมากการเปิดเครื่องให้อากาศแบบเคล้าน้ำแทนการใช้เครื่องให้อากาศแบบใบพัดดีน้ำจะทำให้การเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนไม่มากนักซึ่งมีผลให้พีเอชของน้ำตอนบ่ายไม่สูงจนเกินไป

ผลของพีเอชต่อกุ้งมีการศึกษาไม่มากนักแต่ น่าจะคล้ายกับปลาซึ่ง Boyd (1982) ได้สรุปไว้คร่าวๆ ดังนี้ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของพีเอชต่อปลา

พีเอช	ผลกระทบ
น้อยกว่า 4	เป็นกรดปลาจะตาย
มากกว่า 4-6	การเจริญเติบโตช้า
มากกว่า 6-9	การเจริญเติบโตดีที่สุด
มากกว่า 9-11	การเจริญเติบโตช้า
มากกว่า 11	เป็นด่างปลาจะตาย

2.2.3 ค่าอัลคาไลน์ในน้ำหรืออัลคาไลน์ตี (Alkalinity)

ความเป็นด่างหรือที่เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งนิยมเรียกกันว่า ค่าอัลคาไลน์ มีความสำคัญมากในการเพาะเลี้ยงกุ้ง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการรอดและการเจริญเติบโตของกุ้งกุลาดำและกุ้งทะเลทุกชนิด ค่าอัลคาไลน์ที่เหมาะสมกับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำอยู่ระหว่าง 80-150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทั่วไปการรักษาระดับอัลคาไลน์ให้คงที่นั้น จะใช้วัสดุปูนในกลุ่มคาร์บอเนต ส่วนการเพิ่มอัลคาไลน์อาจใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนต แล้วแต่ระดับพีเอชของน้ำ น้ำที่มีค่าอัลคาไลน์ต่ำ ส่วนมากจะพบในบริเวณที่ดินเป็นกรดจัด ลูกกุ้งระยะที่เพิ่งปล่อยลงในบ่อจะลอกคราบไม่ออกในลักษณะคราบติดหัวและตาย ทำให้มีอัตราการรอดต่ำ นอกจากนั้นในบ่อที่มีหอยจิ้งกหรือหอยเจดีย์จำนวนมากในระยะที่เริ่มปล่อยลูกกุ้ง การเจริญเติบโตของหอยจะใช้แคลเซียมในน้ำไปสร้างเปลือก ทำให้ค่าอัลคาไลน์ต่ำลงเรื่อยๆ มีผลทำให้กุ้งตายจากการลอกคราบไม่ออกได้ น้ำทะเลที่ตามปกติจะมีค่าอัลคาไลน์ ระหว่าง 120-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามีลูกหอยจิ้งกเป็นจำนวนมากภายในระยะเวลา 30 วัน ค่าอัลคาไลน์อาจจะลดลงเหลือเพียง 40 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ จะทำให้อัตรารอดในบ่อนั้นต่ำมาก

2.2.4. ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen)

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีผลต่อการกินอาหารการเจริญเติบโตและสุขภาพกุ้ง ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำเกินไปอาจมีผลทำให้กุ้งตายได้ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำในบ่อจะเปลี่ยนแปลงคล้ายกับพีเอชคือมีค่าต่ำสุดตอนเช้ามืด เนื่องจากใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์และการหายใจของสิ่งมีชีวิตในบ่อในตอนกลางวันเมื่อมีแสงแดดแพลงก์ตอนพืชเริ่มมีการสังเคราะห์แสง ปริมาณออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นและจะมีปริมาณสูงสุดในตอนบ่าย

ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความเค็ม น้ำที่มีความเค็มและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นออกซิเจนละลายได้น้อยลง เช่นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จุดอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจืดเท่ากับ 7.54 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อความเค็มเพิ่มขึ้นเป็น 35 พีพีที ออกซิเจนจะอิ่มตัวที่ 6.22 มิลลิกรัมต่อลิตร ปัญหาการขาดออกซิเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำจะพบในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ปล่อยกุ้งไปในปริมาณมากหรือกุ้งมีอัตราการรอดสูงมากแต่มีเครื่องให้อากาศไม่เพียงพอ โดยเฉพาะในช่วงเดือนสุดท้าย ในบ่อที่มีกุ้งหนาแน่นเมื่อมีการให้อาหารในปริมาณที่มากในแต่ละวันอาหารที่เหลือและของเสียที่กุ้งขับถ่ายออกมามากนั้น จะมีการดึงออกซิเจนไปใช้ในการย่อยสลายสิ่งเหล่านี้ รวมทั้งการหายใจของแพลงก์ตอนที่หนาแน่นและการหายใจของกุ้งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในบ่อจะมีผลทำให้ออกซิเจนในตอนเช้ามืดต่ำลงมาก ถ้ามีกุ้งในปริมาณมากและเครื่องให้อากาศไม่เพียงพอ กุ้งอาจจะลอยตามผิวน้ำตั้งแต่ตอนกลางคืนหลังเที่ยงคืนจนถึงตอนเช้ามืด เมื่อออกซิเจนที่ละลายในน้ำอยู่ในช่วง 1.7-2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณออกซิเจนที่สูงกว่าระดับนี้กุ้งจะไม่ลอย แต่พบว่าถ้าออกซิเจนต่ำกว่า 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร กุ้งจะไม่แข็งแรงการกินอาหารจะลดต่ำกว่าปกติ ในช่วงที่กุ้งกำลังลอกคราบ ถ้าระดับออกซิเจนต่ำกุ้งอาจจะลอกคราบแล้วตายได้ ดังนั้นควรจะวัดค่าออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอเป็นประจำอย่างน้อยวันละครั้งในช่วงเช้าหรือวันละหลายๆครั้ง สำหรับบ่อที่มีการเลี้ยงกุ้งอย่างหนาแน่น เพื่อเป็นข้อมูลในการเลี้ยง และเป็นแนวทางในการเลี้ยงกุ้งในรุ่นต่อไป การวัดค่าออกซิเจนควรจะวัดในบริเวณที่ลึกที่สุดของบ่อ หรือก้นบ่อ เนื่องจากกุ้งกุลาดำจะใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณพื้นบ่อ

การแก้ปัญหาเรื่องการขาดออกซิเจนในบ่อที่มีกุ้งอย่างหนาแน่นและกุ้งมีขนาดใหญ่ ต้องมีเครื่องให้อากาศและการเปลี่ยนถ่ายน้ำอย่างพอเพียงดังตาราง ที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนต่อกึ่งกลางดำ (พรเลิศ จันทร์รัฐชกุล และชะลอ ลิมสุวรรณ, 2549)

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ผลกระทบ
มากกว่า 4	กึ่งเจริญเติบโตดี สารอินทรีย์สลายตัวได้เร็ว
3-4	กึ่งเจริญเติบโตช้าลง การสะสมของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น
น้อยกว่า 3	กินอาหารน้อยลง การเจริญเติบโตช้า โอกาสป่วยเพิ่มขึ้น
น้อยกว่า 2	กึ่งจะลอย กึ่งตัวที่อ่อนแอจะลอกคราบแล้วตาย
น้อยกว่า 1	กึ่งจะตาย

การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในบ่อเลี้ยงกึ่งขึ้นอยู่กับ การได้รับออกซิเจนและการใช้ออกซิเจน

การได้รับออกซิเจน ได้มาจากแพลงก์ตอนพืชสังเคราะห์แสงในตอนกลางวันที่มีแสงแดด ถือเป็นแหล่งที่ให้ออกซิเจนในน้ำมากที่สุด ปริมาณออกซิเจนที่ได้จะมีมากกว่าการใช้ในการหายใจของแพลงก์ตอนพืชและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในบ่อ รวมทั้งการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียในการย่อยสลายอินทรีย์สาร ในตอนกลางวัน ออกซิเจนจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่เริ่มมีแสงแดดจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวและมักจะสูงกว่าจุดอิ่มตัว ในบ่อที่มีปริมาณแพลงก์ตอนมากหรือสีน้ำเข้ม ปริมาณที่มีมากเกินไปส่วนหนึ่งจะระเหยออกไป แต่เป็นไปอย่างช้าๆ ถ้าไม่มีคลื่นลมแรงบ่อยครั้ง จะพบว่าปริมาณออกซิเจนสูงกว่าจุดอิ่มตัวถึง 2 เท่า เช่นในบ่อเลี้ยงกึ่งระบบปิดด้วยน้ำความเค็มต่ำและมีสีน้ำเข้มจัดนอกจากนั้นน้ำยังได้รับออกซิเจนจากอากาศโดยตรงจากกระแสลม ทำให้ออกซิเจนจากบรรยากาศละลายน้ำได้ ในกรณีที่ออกซิเจนในน้ำต่ำกว่าจุดอิ่มตัวแต่จะเกิดอย่างช้าๆ ที่ละน้อย ซึ่งน้อยกว่าอัตราการใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และการหายใจการเปิดเครื่องให้อากาศเป็นแหล่งที่สำคัญ ในการผลิตออกซิเจนในการเลี้ยงกึ่งแบบพัฒนา เนื่องจากการปล่อยกึ่งอย่างหนาแน่น ของเสียที่เกิดจากการย่อยสลายอาหารที่เหลือและสิ่งขับถ่ายจากกึ่งมีมาก จำนวนเครื่องให้อากาศจะต้องมีเพียงพอและมีประสิทธิภาพในการให้ออกซิเจนและทำให้ตะกอนต่างๆ ในบ่อรวมกันตรงบริเวณกลางบ่อได้

การสูญเสียออกซิเจน เกิดจากการหายใจของแพลงก์ตอนพืชและสิ่งมีชีวิตทั้งหมดในบ่อ จะมีการใช้ออกซิเจนตลอดเวลาทั้งในกลางวันและกลางคืนแบคทีเรียใช้ออกซิเจนเพื่อการย่อยสลายอินทรีย์สารทั้งกลางวันและกลางคืน อินทรีย์สารจะเป็นพวกเศษอาหาร สิ่งขับถ่ายจากแพลงก์ตอนพืชและสัตว์ ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายอินทรีย์สารเพื่อการดำรงชีวิต เรียกโดยทั่วไปว่า Biochemical Oxygen Demand (BOD) จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณของแบคทีเรีย และอุณหภูมิสำหรับปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยตรงโดยไม่ผ่านแบคทีเรีย เรียกว่า Chemical Oxygen Demand (COD) มักจะมีค่ามากกว่าออกซิเจนส่วนที่แบคทีเรียใช้ การขาดแคลนออกซิเจนในสภาพนี้จึงรุนแรงกว่า

2.2.5 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า)

ในสภาพที่ขาดออกซิเจน แบคทีเรียบางชนิดจะสามารถใช้กำมะถัน (ซัลเฟอร์) ในรูปซัลเฟต และสารประกอบกำมะถันตัวอื่นๆ ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์และเปลี่ยนสารประกอบซัลเฟต เหล่านี้ให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ ซึ่งจะอยู่ในสามรูปแบบคือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรซัลไฟด์ไอออน และไบซัลไฟด์ไอออน สัดส่วนของแต่ละชนิดที่พบจะขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ น้ำที่มีพีเอชต่ำจะมีร้อยละของไฮโดรเจนซัลไฟด์(ก๊าซไข่เน่า)สูงแต่เมื่อพีเอชสูงขึ้น ร้อยละของไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะลดลงแต่มีไฮโดรซัลไฟด์ไอออน และไบซัลไฟด์ไอออนมากขึ้นความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำลดลงด้วย

ตารางที่ 2.4 ร้อยละของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่พีเอชต่าง ๆ กันอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Boyd (1982) อ้างถึงในพรเลิศ จันทรรัชกุล และชะลอ ถัมสุวรรณ, 2549)

พีเอช	ร้อยละ
5.0	99.0
5.5	97.0
6.0	91.1
6.5	76.4
7.0	50.6
7.5	24.4
8.0	9.3
8.5	3.1
9.0	1.0

ที่พีเอชของน้ำประมาณ 7.0 ซัลไฟด์จะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรซัลไฟด์ไอออน เท่ากัน ไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถซึมผ่านเยื่อเมมเบรน (cell membrane) เข้าไปในร่างกายของสัตว์ได้ในขณะที่รูปแบบที่เป็นไอออนซึมผ่านเข้าไปได้น้อยกว่าซัลไฟด์มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและไม่เสถียรในน้ำที่มีออกซิเจนและพีเอชประมาณ 7 หรือสูงกว่า 7 เพราะจะถูกออกซิไดส์อย่างช้าๆ ในน้ำทะเลที่พีเอชประมาณ 8.3 ร้อยละ 6 อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในตะกอนเลนพีเอช 7.0 ประมาณร้อยละ 50 จะอยู่ในรูปของ H_2S ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการขาดออกซิเจน เนื่องจากไปขัดขวางการใช้ ออกซิเจนภายในเซลล์ทำให้ปริมาณแลคเตท (lactate) ในเลือดสูงขึ้นความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะรุนแรงกว่าการขาดออกซิเจนระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อกุ้งกุลาดำคือ 0.033 มิลลิกรัมต่อลิตร การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ส่วนใหญ่มาจากการให้อาหารมากเกินไป หรือแพลงก์ตอนพืชตายเป็นจำนวนมากแล้วเกิดการเน่าสลาย ฟันบ่อที่มีสีดำ และมีกลิ่นคล้ายไข่เน่า เป็นลักษณะการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ การแก้ปัญหาทำได้โดยเพิ่มเครื่องให้อากาศ ลูกเลนหรือตะกอนสีดำที่เน่าเสียพื้นบ่อออกไป

2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.3.1 ประวัติและวิวัฒนาการของซีโอไลต์

คำว่า “ซีโอไลต์” มาจากภาษากรีกสองคำ คือ คำว่า Zeo แปลว่า ต้ม (to boil) และคำว่า lithos แปลว่า หิน (a stone) รวมความแปลว่า “boiling stone” หรือหินที่สามารถเดือดได้ ซีโอไลต์ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1756 โดยนักธรณีวิทยาชาวสวีเดน ชื่อ Axel F. Cronstedt ซึ่งเป็นผู้ใช้นี้เป็นคนแรกหลังจากสำรวจพบซีโอไลต์ คือ stibite และได้เป็นผู้ค้นพบสมบัติที่แปลกของแร่ชนิดนี้ คือ เมื่อนำไปให้ความร้อน (ต้ม) จะเกิดฟองเดือดขึ้นมสามารถเห็นการระเหยของน้ำได้ชัดเจน (Dyer, 1988)

วิชา ภูเขาภิณูสุข (2537), Breck (1974) และ Dyer (1988) ได้กล่าวถึงประวัติของซีโอไลต์ไว้ดังนี้

ปี ค.ศ. 1840 ได้ค้นพบว่าเมื่อผลึกของซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ใน โครงผลึก (Hydrated zeolites) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (Dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-framework) สามารถดูดซับแอลกอฮอล์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดซัลไฟด์ และปรอทได้

ปี ค.ศ. 1845 ได้ทำการทดลองพบว่า ดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของ

แคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ จะเห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

ปี ค.ศ. 1909 ได้ทำการทดลองดูดซับก๊าซของซีโอไลด์ชนิดหนึ่ง คือ chabazite พบว่าสามารถดูดซับก๊าซแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงได้ แม้แต่ไอปรอทก็อาจถูกดูดซับได้

ปี ค.ศ. 1925 ค้นพบว่าซีโอไลด์มีคุณสมบัติในการเลือกดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ และปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ๆ ออกมาซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย Mebain ในปี ค.ศ. 1932 โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า "Molecular sieving"

ปี ค.ศ. 1933 ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลด์ที่ชื่อ chabazite

ปี ค.ศ. 1948 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลด์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแรกและได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลด์เอขึ้นมาโดย Reed และ Breck ในปี ค.ศ. 1956

ปี ค.ศ. 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับ โครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ของ faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติและซีโอไลด์ชนิดเอที่สังเคราะห์ขึ้น

ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลด์จะทำภายใต้สภาวะที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ได้ ซีโอไลด์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1959 Milton และคณะทำงาน ของบริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลด์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูง ทำปฏิกิริยาในภาชนะปิด หรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้พัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลด์ เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 จนถึงปี 1972 นั้นพบว่า มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของ ซีโอไลด์เอเกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารตีพิมพ์อีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลด์ในการนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ นอกจากนี้มีรายงานว่า การสังเคราะห์ซีโอไลด์ทำได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1862 แต่ Breck ได้ให้ความเห็นว่า สารที่สังเคราะห์ได้ในขณะนั้น ไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกชัน และสารบางตัวยังไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลด์ชนิด analcime โดย Barret ในปี ค.ศ. 1951

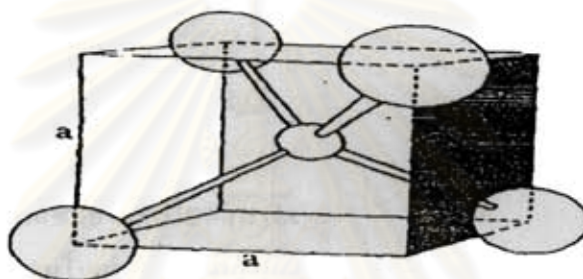
ปี ค.ศ. 1980 ได้มีการค้นพบซีโอไลด์ในธรรมชาติกว่า 40 ชนิด และซีโอไลด์กว่า 100 ชนิด ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาในขณะที่มีความต้องการใช้ซีโอไลด์สังเคราะห์อย่างมากในเชิงพาณิชย์ แต่ความต้องการใช้ซีโอไลด์ธรรมชาติยังคงมีอยู่อย่างจำกัด กล่าวคือ จะมีการใช้ซีโอไลด์ธรรมชาติก็ต่อเมื่อการใช้ซีโอไลด์สังเคราะห์ในพื้นที่นั้น ไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ทั้งในด้านการทดลองและในด้านอุตสาหกรรม

ประวัติของการศึกษาด้านซีโอไลต์สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5
 ตารางที่ 2.5 ประวัติของการศึกษาด้านซีโอไลต์ (Bhatia, 1990 อ้างถึงใน วีระพงษ์ นามโท, 2543)

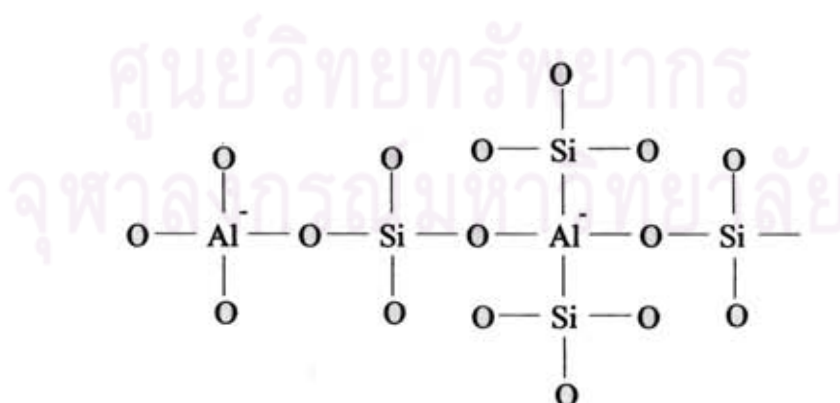
ค.ศ.	เหตุการณ์
1756	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นครั้งแรก โดยให้ชื่อว่า stibite
1825	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด levynite
1842	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด faujasite
1862	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด levynite เป็นครั้งแรก
1863	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด mordenite
1870-88	การศึกษาคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์เป็นครั้งแรก
1890	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด erionite
1929	การอธิบายถึงความเป็นกรดในซีโอไลต์
1930-34	การกำหนดโครงสร้างของซีโอไลต์เป็นครั้งแรก
1932	การอธิบายคุณสมบัติตะแกรงร่อน โมเลกุล (molecular sieve) ของซีโอไลต์
1942-45	การแยกเชิงปริมาณของสาร โดยใช้คุณสมบัติตะแกรงร่อน โมเลกุล
1948	สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์บริสุทธิ์ได้เป็นครั้งแรก
1948	สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด mordenite
1949	การเตรียมซีโอไลต์ในรูปกรด
1956-64	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A, X และ Y โดยบริษัท Union carbide
1962	การนำซีโอไลต์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว โดยบริษัท Mobile Oil
1971-72	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ ZSM-8 โดยบริษัท Mobile Oil
1975	การนำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลเบนซิน
1978	การนำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ไปใช้ในการกำจัดไขในน้ำมัน
1978	การศึกษาโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ชนิด ZSM-5 และ ZSM-8 และ ZSM-11
1979	การวิเคราะห์ซีโอไลต์โดยใช้เครื่อง Electron Microscopy ที่มีความละเอียดสูง และเครื่อง NMR
1985	การเริ่มนำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ไปใช้ในการผลิตก๊าซโซลีนจากเมทานอลในระดับอุตสาหกรรม
1986	การสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต (aluminophosphate) และซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาสูงชนิด NU-1 และ FU-1

2.3.2 นิยามของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งโดยมากจะเป็น โลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็น โครงสร้าง 3 มิติของ อะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) (ดังภาพ 2.2) ซึ่งสามารถประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุด คือ เป็น โคพอลิเมอร์ (copolymer) ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์ (Breck, 1974)



ภาพที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$ (สัญญาขนาด และสมชาย, 2540)

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ



- n คือ วาเลนซ์ของแคทไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ท
- x คือ จำนวน โมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2
- y คือ จำนวน โมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์



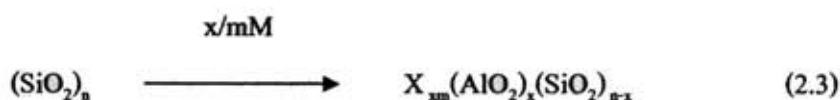
- n คือ วาเลนซ์ของแคทไอออน (M)
- w คือ จำนวน โมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์
- x+y คือ จำนวนรูปทรงเตตระฮีดรอลทั้งหมดของหน่วยเซลล์
- y/x มักจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

ซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) จะมีประจุลบสี่และอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) มีประจุเป็นลบห้า

การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็นโครงสร้างคาน้ำนั้นทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคทไอออนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ดังสมการ

(2.3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- M คือ แคทไอออนของโลหะที่มีประจุ +m
- x คือ จำนวนอะตอมของอะลูมิเนียม (Al)
- n คือ จำนวน โมลของ SiO_2

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ (Breck, 1974 และ Dyer, 1988)

1) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural zeolite)

เป็นซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยกระบวนการ hydrothermal ของสารละลายได้ผิวโลกที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (alumina), ซิลิกา (silica) และสภาวะเป็นเบสอย่างแรง (มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ที่เกิดจากการชะล้างของน้ำผ่านชั้นหินลงมา) ภายใต้อุณหภูมิ 70-350 องศาเซลเซียส และความดันค่อนข้างสูงเป็นเวลานานจนค่อยๆ ก่อตัวเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ส่วนมากซีโอไลต์ชนิดนี้จะพบในบริเวณที่เป็นหินภูเขาไฟ ได้ทั้งมหาสมุทร บริเวณน้ำพุร้อน ธารน้ำจากแหล่งภูเขาไฟ หรือพื้นผิวดินบางแห่ง ข้อมูลจาก ZEO (2003) ได้ทำการศึกษาซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) 24.9 ตารางเมตรต่อกรัม ความหนาแน่น (bulk density) 55 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และขนาดของรูพรุน (pore diameter) 1000 Å ตัวอย่างซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ faujasite, erionite, offertite, chabazite, mordenite และ heulandite เป็นต้น

เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตามอุทกศาสตร์ ได้ดังนี้ คือ

- Saline Alkaline Lakes แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ เขตแห้งแล้ง และเขตร้อนถึงแห้งแล้ง การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close resin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม lake chemistry

- Saline Alkaline soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ใน Saline Alkaline soils การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดินแล้วละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ทำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นและทำให้เกิดอะลูมิโนซิลิเกตในพื้นที่ดินชั้น

- Marine Sediment ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง

- Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

- Hydrothermal Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีอัลคาไลน์กับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หินและลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่เย็นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

- Burial Diagenetic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้อยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)
- Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนีและอาจพบบ้างใน interstitial และ globules
- เป็นซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน ช่องว่างภายในผลึกจะเต็มไปด้วย analcime, clinoptilolite, erionite, harmotome และ phillipsite

2) ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic Zeolites) ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำ เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึกและการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล (Gelation) เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

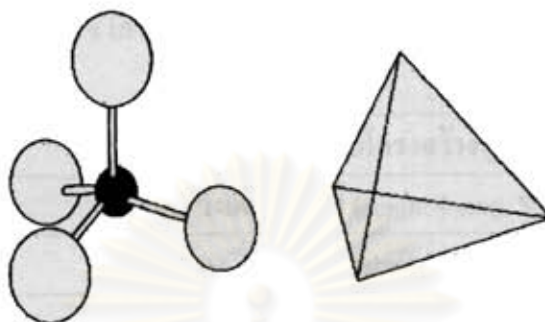
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่น วิธีเรียกชื่อคล้ายระบบของ IUPA โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

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

การเรียกชื่อดังกล่าวต้องมีความรู้เกี่ยวกับหน่วยเซลล์ สำหรับวิธีอื่นๆเช่นการใช้ตัวอักษรหรือกลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นที่นิยมมากกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่า และยังมีความบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมือนกันทุกครั้ง โดยเฉพาะสารเจือปนที่อยู่ในซีโอไลต์ธรรมชาติ เช่น ปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายในปฏิกิริยา heterogeneous catalyst

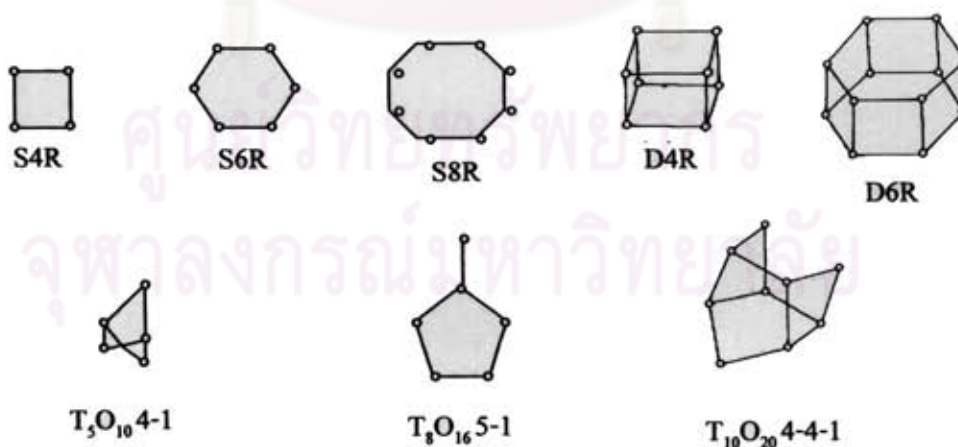
2.3.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง (Breck, 1974)

2.3.3.1 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building units) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุด มีรูปร่างเป็นเตตระฮีดรอลของซิลิกอนเตตระออกไซด์ (SiO_4)⁴⁻ หรืออะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ (AlO_4)⁵⁻ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซิลิกา (Breck, 1974)

2.3.3.2 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units) เกิดจากหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิเชื่อมต่อกันเป็นรูปร่างวงเหลี่ยมต่างๆ อาจเป็นวงเดี่ยว เช่น Single 4-Ring (S4R) Single 6-Ring (S6R) Single 8-Ring (S8R) หรือต่อกันเป็นวงคู่ เช่น Double 4-Ring (D4R) และ Double 6-Ring (D6R) ต่อเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อน เช่น Complex 4-1 Complex 5-1 และ Complex 4-4-1 แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกา (Breck, 1974)

แบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units: SBU) ได้ 8 ชนิด ดังตารางที่ 2.6 และ โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกรวบรวมตาม Secondary Building Units ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตาม โครงสร้างทุติยภูมิ (Breck, 1974)

ชนิด	ANA	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ
1	GS	วงเดี่ยว 4 มุม (single 4-ring, S4R)
2	GS	วงเดี่ยว 6 มุม (single 6-ring, S6R)
3	GS	วงเดี่ยว 8 มุม (single 8-ring, S8R)
4	GS	วงคู่ 4 มุม (double 4-ring (D4R))
5	GS	วงคู่ 6 มุม (double 6-ring (D6R))
6	FAU	วงเชิงซ้อน 4-1 (complex 4-1, $T_5O_{10}4-1$)
7	HEB	วงเชิงซ้อน 5-1 (complex 5-1, $T_5O_{10}5-1$)
8	FAU	วงเชิงซ้อน 4-4-1 (complex 4-4-1, $T_{10}O_{20}4-4-1$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจำแนกตาม Secondary Building Units (Dyer, 1988)

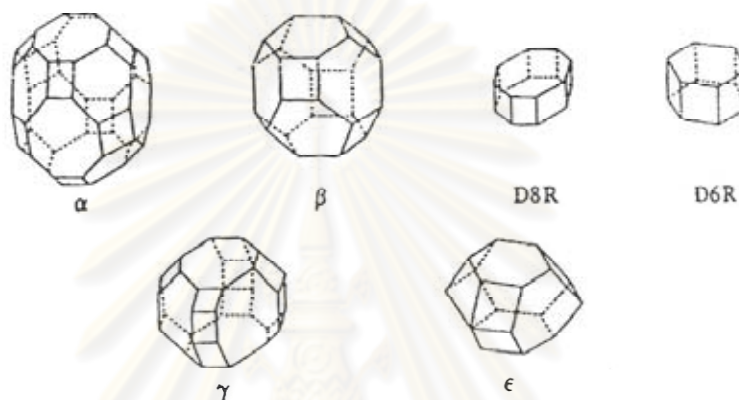
Secondary Building Units (SBUs)	Structure type	Name	Typical unit cell content	
S4R	ANA	Analcime	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	
	ANA	Wairakite	$\text{Ca}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$	
	GIS	Gismondine	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$	
	GIS	Amicite	$\text{K}_4\text{Na}_4\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	
	GIS	Garronite	$\text{NaCa}_{2.5}\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 14\text{H}_2\text{O}$	
	GIS	Gobbinsite	$\text{Na}_5\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}\cdot 11\text{H}_2\text{O}$	
	GIS	Zeolite NaP-1	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	
	LAU	Laumontite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{46}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$	
	MER	Merlionite	$\text{K}_5\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{23}\text{O}_{64}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$	
	PAU	Paulingite	$(\text{K}_2,\text{Na}_2,\text{Ca},\text{Ba})_{76}\text{Al}_{152}\text{Si}_{520}\text{O}_{1344}\cdot 700\text{H}_2\text{O}$	
	PHI	Phillipsite	$\text{K}_2\text{Ca}_{1.5}\text{NaAl}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	
	PHI	Harmotome	$\text{Ba}_2\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	
	YUG	Yugawaralite	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	
	S6R	CAN	Cancrinite hydrate	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
		ERI	Erionite	$\text{Na}_2\text{K}_2\text{Mg}_{0.5}\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$
LEV		Levynite (Levyne)	$\text{NaCa}_3\text{Al}_7\text{Si}_{11}\text{O}_{36}\cdot 18\text{H}_2\text{O}$	
LTL		Zeolite L	$\text{K}_6\text{Na}_3\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}\cdot 21\text{H}_2\text{O}$	
LOS		Zeolite Losod	$\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 19\text{H}_2\text{O}$	
MAZ		Mazzite (Zeolite Omega)	$\text{Mg}_2\text{K}_3\text{NaCa}_{1.5}\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$	
OFF		Offretite	$\text{K Ca}_2\text{Al}_5\text{Si}_{13}\text{O}_{36}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$	
SOD		Sodilite hydrate (HS)	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	
D4R	LTA	Zeolite A	$\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$	
D6R	CHA	Chabazite	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}\cdot 13\text{H}_2\text{O}$	
	CHA	Wilhendersonite	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	

ตารางที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจำแนกตาม Secondary Building Units (ต่อ)

Secondary Building Units (SBUs)	Structure type	Name	Typical unit cell content
5-1	FAU	Faujasite	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{1.2}\text{Mg}_{11}\text{Al}_{58}\text{Si}_{134}\text{O}_{384}235\text{H}_2\text{O}$
	FAU	Zeolite X	$\text{Na}_{88}\text{Al}_{88}\text{Si}_{104}\text{O}_{384}220\text{H}_2\text{O}$
	GME	Gmelinite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}24\text{H}_2\text{O}$
	KFI	Zeolite ZK-5	$\text{Na}_{30}\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}98\text{H}_2\text{O}$
	RHO	Zeolite Rho	$(\text{Na},\text{Cs})_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{36}\text{O}_{96}46\text{H}_2\text{O}$
	EDI	Edingtonite	$\text{Ba}_2\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}8\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Natrolite	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}16\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Tetranatrolite	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}16\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Paranatrolite	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}24\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Mesolite	$\text{Na}_{16}\text{Ca}_{16}\text{Al}_{48}\text{Si}_{72}\text{O}_{240}64\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Scolecite	$\text{Ca}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}24\text{H}_2\text{O}$
	THO	Thomsonite	$\text{Na}_4\text{Ca}_8\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}24\text{H}_2\text{O}$
	THO	Gonnardites	$\text{Na}_5\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{11}\text{O}_{40}14\text{H}_2\text{O}$
	BIK	Bikitaite	$\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}2\text{H}_2\text{O}$
	DAC	Dachiardite	$\text{Na}_5\text{Al}_5\text{Si}_{19}\text{O}_{48}12\text{H}_2\text{O}$
	4-4-1	EPI	Epistilbite
FER		Ferrierite	$\text{NaCa}_{0.5}\text{Mg}_2\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}20\text{H}_2\text{O}$
MFI		Zeolite ZSM-5	$\text{Na}_n\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}\sim 16\text{H}_2\text{O} (n\sim 3)$
MOR		Mordenite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}24\text{H}_2\text{O}$
BRE		Brewsterite	$\text{Sr}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}10\text{H}_2\text{O}$
HEU		Heulandite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}24\text{H}_2\text{O}$
HEU		Clinoptilolite	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}24\text{H}_2\text{O}$
STI		Stibite	$\text{Na}_2\text{Ca}_4\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}34\text{H}_2\text{O}$
STI	Stellerite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}28\text{H}_2\text{O}$	
STI	Barrerite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}26\text{H}_2\text{O}$	

2.3.3.3 หน่วยโครงสร้างหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงขนาดใหญ่ที่สมมาตรได้จากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น

- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้า หรือ β (truncated octahedral type)
- รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ α (truncated cubooctahedral)
- รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ γ (18-hedral)
- รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ ϵ (11-hedral) ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่ของซีโอไลต์ (Breck, 1974)

นอกจากนี้อาจแบ่งซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง 8 ชนิดข้างต้น ดังนี้

1) Analcite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring โดยจะมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumonite ดังภาพที่ 2.7

2) Natrolite Group มีลักษณะ โครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring จำนวน 4วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบ คือ Natrolite, Edingtonite และ Thosonite ซึ่งถ้ามองในสองมิติแล้ว โครงสร้างทั้ง 3 แบบจะเป็นระบบโพรงที่ประกอบด้วย 8 วง (8-ring channel system) ดังภาพที่ 2.8

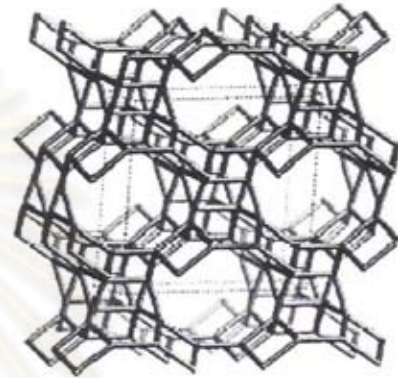
3) Chabazite Group โครงสร้างประกอบด้วย 6-ring ต่อขนานกันซึ่งมีการต่อเชื่อมกันมากหลายรูปแบบ ได้แก่ Offretite และ Erionite แสดงดังภาพที่ 2.9

4) Phillipsite Group โครงสร้างประกอบด้วย 4- ring ที่ต่อขนานกันแบบ U (up) และ D (down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ Phillipsite และ Gismondite ประกอบด้วย การเชื่อมโยงของโซ่แบบ UDD ในขณะที่ LiA(BW) และ Yagawaralite จะมีการเชื่อมต่อกันด้วย single 4- ring ดังภาพที่ 2.10

5) Heulandite Group โครงสร้างเกิดจาก 5-ring จำนวน 4 วง ต่อเชื่อมกับ 4-ring จำนวน 2 วงซึ่งจะเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ถ้าการเชื่อมโยงผ่านโครงสร้างตรงกลางรูปแบบพื้นฐานก็จะ เป็นแบบในภาพที่ 2.11 ซึ่งเมื่อเชื่อมโยงต่อกันจะทำให้เป็นแบบ Brewsterite การเชื่อมต่อของ บลอคโดยผ่านทางโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ Heulandite และ Stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-ring ในบางส่วนแสดงดังภาพที่ 2.11



Analcite

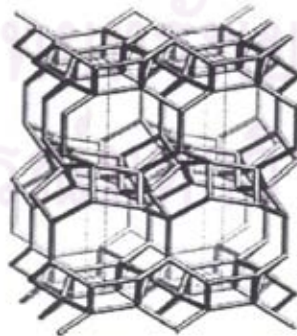


Laumonite

ภาพที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Analcite และ Laumonite (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ฉัตรรัตนนนท์, 2549)



Natrolite

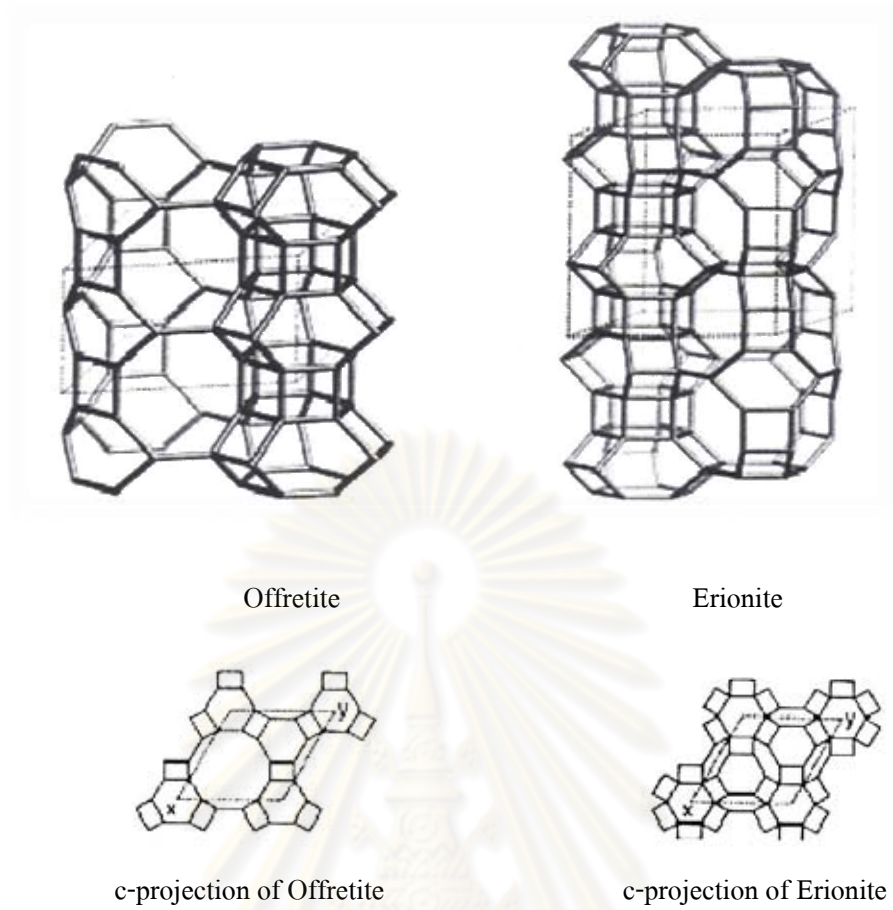


Brewsterite

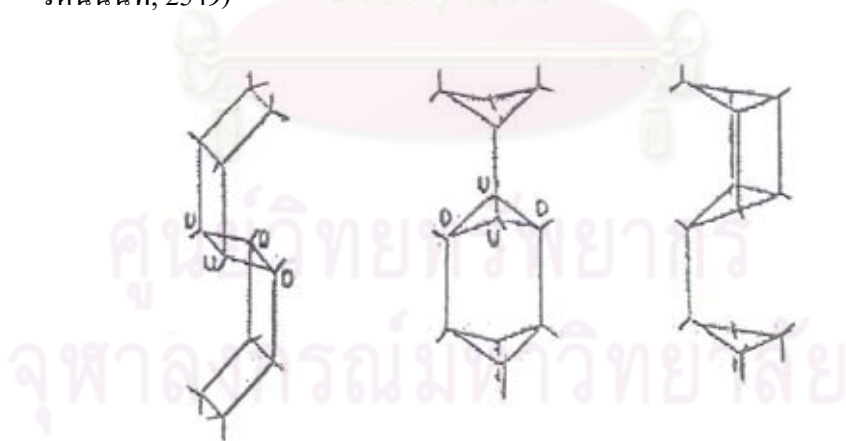


ZSM-5

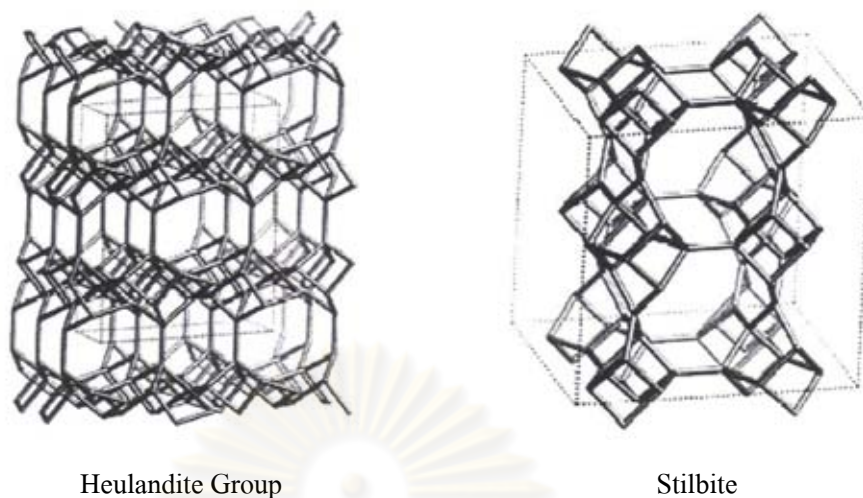
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Natrolite, Brewsterite และ ZSM-5 (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ฉัตรรัตนนนท์, 2549)



ภาพที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล นัครัตินนท์, 2549)



ภาพที่ 2.10 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UDD, UDUD และUDUU (Dyer, 1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ , 2542)



ภาพที่ 2.11 หน่วยทูลิชภูมิของ Heulandite Group และ Stilbite (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล นิตร์รัตนนท์, 2549)

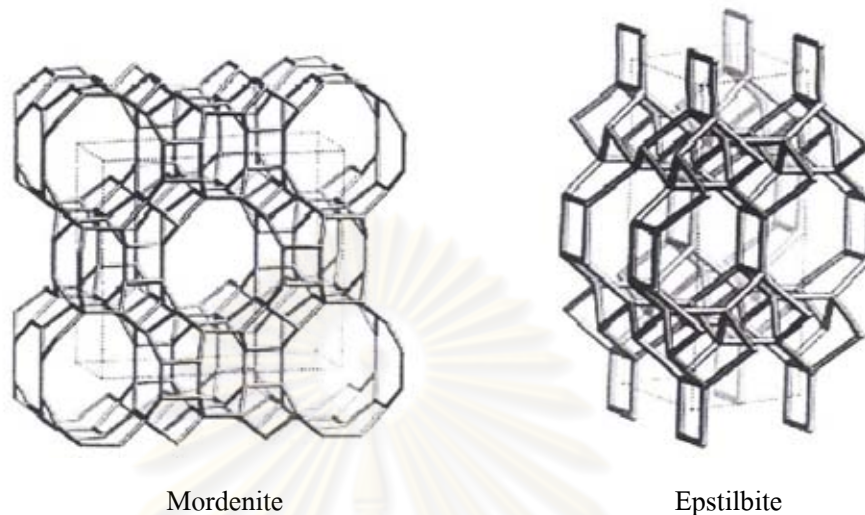
3) Mordenite Group โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วง ต่อเชื่อมกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม กลุ่มนี้จะมีทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ Mordenite, Epstilbite (ภาพที่ 2.12), Ferrierite, Bikitaite, Dachiardite ZEM-5 และ ZEM-11 ดังภาพที่ 2.13

4) Faujasite Group ซีโอไลต์กลุ่มนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ Sodalite, A และ ZK-5 ดังภาพที่ 2.14

5) Melanophlogite Group โครงสร้างประกอบด้วย Interwoven Layer 12 และ 14-Hedro โดยโครงสร้างจะมีลักษณะหนาแน่น และมีชั้นผิวหน้าเป็น 12-Hedral ซึ่งชั้นผิวเหล่านี้ได้มีการต่อกันขึ้นเป็นลำดับ ABC และช่องเปิดในโครงสร้างจะมีจำกัดเพียง 5 และ 6 วง เท่านั้นกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ZSM-39 และ Melanophlogite (ภาพที่ 2.15) ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น ZSM-39 และ Melanophlogite จะมีหลายรูปแบบเช่น 12- Hedron, 14- Hedron, 15-Hedron และ 16-Hedron

6) Lovdarite Group เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring และ 8-ring เชื่อมผ่านมุมของ 3-ring ซึ่งเป็นระบบที่ช่องว่างระหว่าง 2 มิติเชื่อมต่อกันโดย 9- ring ดังภาพที่ 2.16

ขนาดของโพรงและอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.8

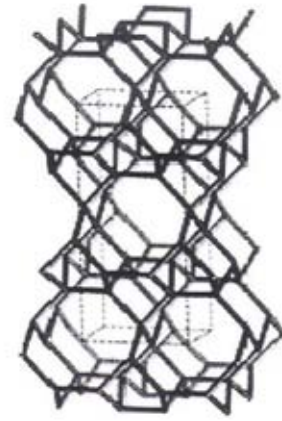


ภาพที่ 2.12 ลักษณะ โครงสร้างของ Mordenite และ Epstilbite (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล นัตรรัตนนท์, 2549)

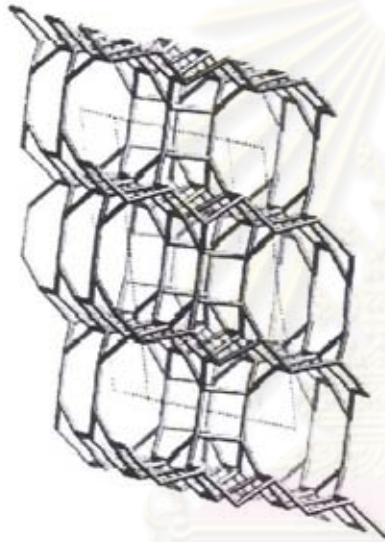
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Ferrierite



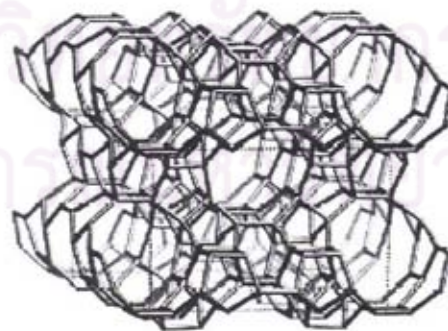
Bikitaite



Dachiardite

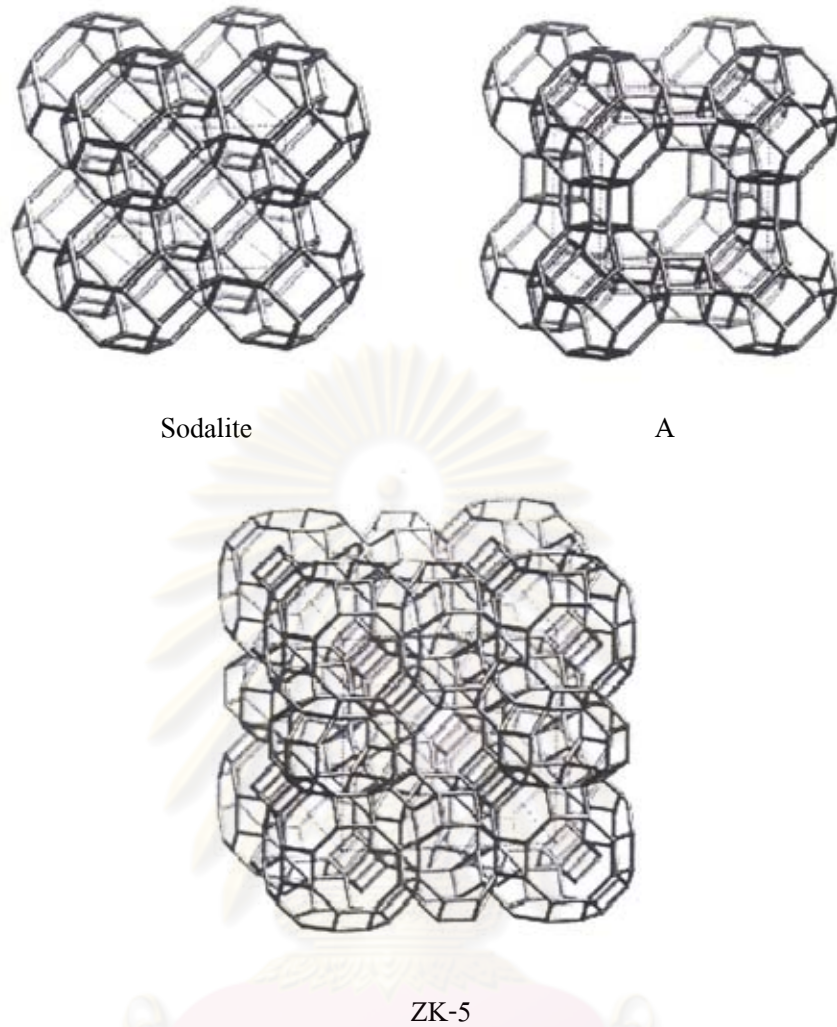


ZEM-5



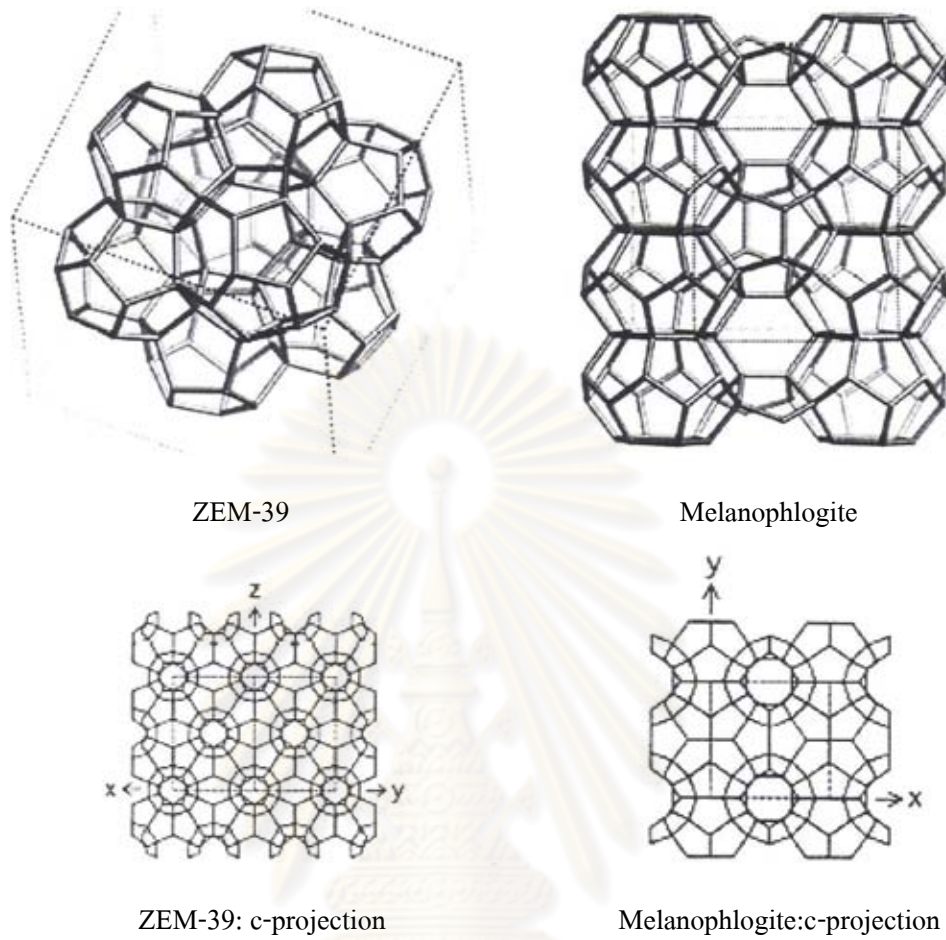
ZEM-11

ภาพที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของ Ferrierite, Bikitaite, Dachiardite, ZEM-5 และ ZEM-11
(Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ฉัตรรัตนนท์, 2549)



ภาพที่ 2.14 ลักษณะ โครงสร้างของ Sodalite, A, และ ZK-5 (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล
ฉัตรรัตนนท์, 2549)

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-39 และ Melanophlogite (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล นัตรรัตนนท์, 2549)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite (Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล นัทรรัตน์นท์, 2549)

ตารางที่ 2.8 คุณลักษณะของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ (จรัส ถิมตระกูล, 2540)

ชื่อ	ขนาดของโพรง (Å ³)	อัตราส่วน Si/Al
Faujasite	7.4	1.25-2.08
Erionite	3.6x5.2	3.5
Mordenite	6.5x7.0	5.0
Offretite	6.4	-
Omega	7.5	2.5-6.0
ZEM-5	5.3x5.6	22.0
	5.1x5.5	
Zeolite Beta	7.6x6.4	30.0
	5.5x5.5	
Zeolite A	4.2	1.0
Zeolite X	7.4	1.23
Zeolite Y	7.4	2.43
Zeolite L	7.1	3.0

2.3.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์, 2547)

องค์ประกอบหลักของการสังเคราะห์ซีโอไลต์

1) แหล่งของอะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลอง โดยทั่วไปจะใช้สารประกอบอะลูมิเนียม (Aluminium Compound) เป็นสารตั้งต้น เช่น สารประกอบโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium Aluminate Compound) อะลูมิเนียมอัลคอกไซด์ (Aluminium Alkoxide) เกลืออะลูมิเนียม (Aluminium Salt) และแหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว

2) แหล่งของซิลิกอน โดยทั่วไปจะใช้สารละลายของซิลิกา เช่น ซิลิกาโซล (Silica Sol) ซิลิกาเจล (Silica Gel) แร่ควอทซ์ (Quartz) เป็นต้น

3) แหล่งของไอออนบวก ได้แก่ ไอออนของโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA ที่อยู่ในรูปของไอออนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Ion) นอกจากนี้สามารถได้จากสารประกอบออกไซด์ (Oxide Compound) และเกลือของโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA ได้

4) สารเคมีอื่นๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) ที่แตกตัวไอออนบวกซึ่งเรียกว่าสารโครงสร้าง (Template) ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TEAOH) และเตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (TPABr) เป็นต้น การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปจะใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Treatment) และวิธีสังเคราะห์ซิลิเกต (silicate) ในช่วงเวลา 100 ปีที่ผ่านมา มีการค้นพบวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นได้หลายวิธี ดังตารางที่ 2.9 ซึ่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้น จะทำให้แหล่งของอะลูมินา ซิลิกา และอัลคาไลน์ รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน และก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า ที่ความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น บางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล องค์ประกอบของอะลูมินา ซิลิกา ประจุบวก สารอินทรีย์และน้ำ จะรวมตัวกันเป็นเจล ซึ่งอยู่ในสภาพสารละลายด่างอิ่มตัวยิ่งยวด (an alkaline super-saturated solution) แปลงสภาพเป็น โครงสร้างรูพรุนของผลึกอะลูมิโนซิลิเกต (microporous crystalline aluminosilicate) ซึ่งเรียกกระบวนการทางเคมีนี้ว่า กระบวนการซีโอไลทเซชัน (zeolitization) เป็นการกระตุ้น โดยความร้อนภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม อุณหภูมิที่ใช้โดยปกติจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเพื่อที่จะให้ได้ผลผลิตที่สูง

ตารางที่ 2.9 สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ (Breck, 1974)

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

ขั้นตอนสำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ได้แก่ (Weitkamp และคณะ, 1994)

1) ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก (The ageing period) หมายถึง ช่วงเวลาหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเจล โดยที่อุณหภูมิของเจลมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึก (crystallization temperature) สิ่งหนึ่งที่สำคัญในระหว่างระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก คือการละลายหรือดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ของซิลิกาโดยต่างซึ่งการละลายดังกล่าวเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกา ผลิตภัณฑ์เริ่มแรกอยู่ในรูปของโมโนเมอร์ ซิลิเกตแอนไอออน (monomeric silicate anions) หลังจากนั้นโมโนเมอร์ซิลิเกตแอนไอออน จะถูกเปลี่ยนไปเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomeric species) โดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation-polymerization) สารละลายต่างดังกล่าวข้างต้นประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมไอออนลบ ได้แก่ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (tetrahedral $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ species) ซึ่งโอลิโกเมอร์ซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ เกิดเป็นโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต

2) กลไกการเกิดผลึก (Mechanism of Crystallization) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- การอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงของการตกผลึก (ageing) และชัดเจนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกละลาย (dissolved components :aluminosilicate species) เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายจากสารละลายที่มีเสถียรภาพไปเป็นสารละลายที่ความเสถียรภาพไม่แน่นอน (metastable solution) และสุดท้ายอยู่ในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (labile solution)

- การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)

การเกิดนิวเคลียสขั้นปฐมภูมิ (primary nucleation) ของสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดสามารถแบ่งออกเป็น การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียว และแบบเนื้อผสม (homogeneous and heterogeneous nucleation) ซึ่งการเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อผสมเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในสารละลาย (impurities or foreign particles) ต่อมาการเกิดนิวเคลียสขั้นทุติยภูมิ (secondary nucleation) เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของผลึกที่เกิดขึ้น

- การก่อตัวผลึกซีโอไลต์ (Crystal Growth)

การเจริญผลึกซีโอไลต์เริ่มเกิดขึ้นหลังจากการเกิดนิวเคลียสโดยนิวเคลียสที่เกิดขึ้น จะเกิดการเจริญเติบโต โดยการเพิ่มหรือควบแน่นขององค์ประกอบข้างต้นกลายเป็นผลึกซีโอไลต์ที่สมบูรณ์ ลักษณะของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของไอออนบวกของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่ โดยปกติการก่อตัวของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักนั้นอยู่ที่ว่า ไอออนบวกที่มีอยู่นั้นจะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ

(templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบหรือแม่พิมพ์เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างเหมือนโครงสร้างของแม่แบบนั้นๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เรานำมาใช้เป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ 4 ชนิด ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ (Breck, 1974)

ZEM-5 type	Omega type	Femirite type	ALPO 4-5 type
Na	TMA	Na + K	TEAOH
TPA	Pyrolidine	Sr	TPAOH
TDA	DABCO	Li + Sr (Ba) + seed	Choline hydroxide
Propylamine		Choline	Et3N
EDA		Pyridine	Pr3N
Ethanolamine		Ethylenediamine	(CH ₂ CH ₂ OH) ₃ N
Methylquinuclidine		1,3-Diaminopropane	Cyhexylamine
NH ₃ + alcohol		1,4-Diaminobutane	N,N-Dimethylbenzylamine
Alcohol		2,4-Pentanedione	Diethylethanolamine
Glycerol		N-methylpyridimium	Amino Diethylethanolamine

2.3.5 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ (คงศักดิ์ วัฒนวงศ์พิทักษ์, 2543)

- 1) การแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวกนี้เป็นกระบวนการแบบผันกลับได้
- 2) การดูดซับน้ำ ซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำให้เข้าไปอยู่ในช่องว่างบริเวณผนังด้านในของโพรงชนิดต่างๆ ได้ และสามารถกำจัดน้ำออกได้ที่อุณหภูมิที่สูงพอ
- 3) การคัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่างๆ กัน มีทางให้โมเลกุลของสารอื่นผ่านเข้าออกได้ เรียกว่า “ปากโพรง (aperture)” โดยที่โมเลกุลที่มีรูปร่างและขนาดพอเหมาะสำหรับปากโพรง

เท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุลได้ (molecular sieve)

4) สมบัติที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่นของตำแหน่งที่เป็นกรด (acid site density) ความรุนแรงของกรด (acid strength) และขนาดของรูพรุน (pore size) ภายในผลึก ซึ่งรวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของทางเข้าออกของรูพรุน (pore entrance)

2.3.6 ประโยชน์ของซีโอไลต์

จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ มากมายซึ่งพอจะรวบรวมได้ดังนี้ คือ

1) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ปฏิกิริยาของเคลาส์ (Claus process) และปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermol cracking) เป็นต้น

2) ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorption) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และ โครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด

3) สารลดความกระด้าง (Water softener) ซีโอไลต์เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้ เนื่องจากในน้ำกระด้างมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงสร้างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออน

4) ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) จากสมบัติการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ทำให้สามารถใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมไอออนไดวาเลนต์ (Divalent) ได้การแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของแคลเซียมไอออน
- อุณหภูมิที่ใช้
- ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลาย
- ชนิดของแอนไอออนที่รวมตัวกับแคลเซียมไอออนในสารละลาย
- ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน aqueous solution)
- ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์

5) ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (Capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเกิดขึ้นได้มากและรวดเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ คือ ฟอสเฟตทำให้พืชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เจริญเติบโตรวดเร็ว และเมื่อทับถมกันมากเข้า

จะทำให้ให้น้ำเน่าเสีย ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัด นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้ เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

6) ใช้ในการเลี้ยงปลา (Aquaculture) การเลี้ยงปลาส่วนมากจะเลี้ยงในบ่อ จึงมีปัญหาการกำจัดของเสียที่ปลาล่อยออกมา เนื่องจากของเสียที่ปลาล่อยออกมามีปริมาณแอมโมเนียมาก แอมโมเนียเพียงปริมาณ 2-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในบ่อปลาก็สามารถทำให้ปลาเป็นโรคเหงือก หูด การเจริญเติบโต ทำลายสมอง เป็นหมันและตายในที่สุด การใช้ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite และ mordenite ลงในบ่อปลาเพียง 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตรของน้ำในบ่อปลา สามารถกำจัดแอมโมเนียได้ถึงร้อยละ 97-99

7) ใช้เป็นอาหารสัตว์ (Animal nutrition) ใช้ซีโอไลต์เป็นอาหารเสริมสัตว์ปีกและสัตว์ที่กินหญ้าเป็นอาหาร จะช่วยให้เนื้อสัตว์มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มปริมาณไข่ของสัตว์ปีก ปริมาณนม และยังช่วยลดอาการท้องร่วง ถ้าใส่อีกเสบ โรคทางเดินอาหารของสัตว์ได้

8) ใช้ในการปรับปรุงดิน (Soil amendment) ซีโอไลต์แลกเปลี่ยนไอออนและเก็บความชื้นได้ดี จึงนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite จะช่วยจับแอมโมเนียได้สูงและปล่อยออกมาอย่างช้าๆ จึงช่วยให้ดินยึดไนโตรเจนไว้ได้นาน

ตัวอย่างการนำซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ (Breck, 1974)

1) การกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียชุมชน

การศึกษาช่วงเริ่มต้นในการใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดแอมโมเนียในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย พบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับแอมโมเนียได้ต่ำ ทำให้กำจัดแอมโมเนียได้น้อยและเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำแ่ก้ตามมาด้วย

วิธีที่เหมาะสมที่คิดว่าถูกเสนอเป็นรายงาน โดย Ames (1967) ได้แสดงว่า มีการใช้ซีโอไลต์หลายชนิดที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ และให้ผลดีกว่าแบบดั้งเดิม ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite และ Union Carbide's 40 เป็นซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดหลังจากการทดสอบโดยใช้ในโรงงานต้นแบบ พบว่า แอมโมเนียมนั้นถูกกำจัดออกไปได้มากถึงร้อยละ 95

2) การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอก

หน้าที่หลักของฟอสเฟตที่ผสมอยู่ในผงซักฟอก คือ ลดแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง โดยใช้ซีโอไลต์ชนิดผงที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ไปทำการกำจัดแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม โดยที่ผงซักฟอกเหล่านี้จะรับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมจะลดปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ให้อยู่ในระดับต่ำหรือไม่มีอยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ใน

หลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรปและสถานที่อื่นๆ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบนี้มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ซีโอไลต์ในแต่ละปี พบว่ามีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้ในปริมาณหลายล้านปอนด์ทั่วโลก

การนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้แทนสารฟอสเฟตในผงซักฟอกนั้น ในช่วงแรกวิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้น โดยนักวิทยาศาสตร์ที่บริษัท เฮนเกล (Henkel) ในประเทศเยอรมัน และบริษัทพรอคเตอร์แอนด์แกมเบิล (Procter&Gamble) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งปัจจุบันนี้มีการพัฒนาในเรื่องนี้อยู่มากมาย

3) การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากได้มีการตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคตจึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่ไม่ใช่ปิโตรเลียม และมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งพลังงานในอนาคต

เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นจากถ่านหิน และก๊าซสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งโดยตรงหรือจะนำไปใช้เป็นแบบผสมกับน้ำมันเบนซินก่อนที่จะใช้กับเครื่องยนต์

กระบวนการแบบใหม่ที่ใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลให้ไปเป็นน้ำมันเบนซิน คือ การใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท โมบิลออยล์ ซึ่งได้ตั้งชื่อกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ MTG (Methanol To Gasoline)

บริษัท โมบิลออยล์ ได้สร้างโรงงานที่ใช้กระบวนการ MTG และใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นแห่งแรกที่โมทูเนีย ประเทศนิวซีแลนด์ และเริ่มต้นทำการผลิตในปี ค.ศ.1985 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่นิ่ง (fixed-bed) และที่ประเทศเยอรมันตะวันตกก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่ต่างกันที่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized-bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้าและสามารถประสบความสำเร็จ โดยได้มีการสร้างโรงงานต้นแบบไว้ที่เมืองเวสเซนลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึงร้อยละ 90 และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้ fluidized-bed ได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบชนิดอื่นๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติมาใช้แทนเมทานอลได้

4) การแยกและนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

ซีโอไลต์หลายชนิดมีความสามารถในการคัดเลือกโลหะหนัก ทำให้สามารถนำโลหะที่มีค่าเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ หรือเอาไว้ใช้กำจัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากเกิดความคุ้มทุนในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ได้ ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite และ mordenite ถูกศึกษาเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนัก โดยเฉพาะ Cd ,Cu, Pb ,

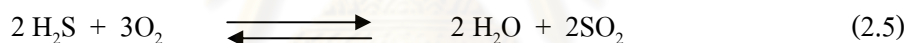
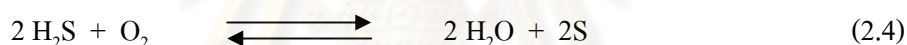
และ Zn ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการคัดเลือกโลหะได้จะทำการเปลี่ยนไอออนของโลหะเงิน (Ag) เพื่อดึงเอาโลหะเงินออกจากน้ำเสีย

จากการรายงานของ Breck (1974) แสดงให้เห็นว่า การใช้ซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยก Co และ Ni ได้โดยใช้ซีโอไลต์ linde แบบ A (linde A zeolite) นอกจากนี้ยังมีวิธีแยกโลหะเพื่อไม่ให้มีเหล็กอีกหลายวิธี วิธีที่สามารถนำมาใช้โดยการเลือกซีโอไลต์ชนิดที่เหมาะสม

5) การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากอากาศเสีย

กระบวนการหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกเรียกว่าเป็นกระบวนการของเคลาส์ (Claus process) เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ กับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกำมะถันผง ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส และจำกัดปริมาณของอากาศที่ป้อน ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกำมะถันและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามสมการ



- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เหลือ ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส บนตัวเร่งปฏิกิริยา bauxite หรือ alumina ได้กำมะถัน ตามสมการ



สมการ (2.4) ถูกเรียกว่าเป็นปฏิกิริยาของเคลาส์ (Claus reaction) โดยกระบวนการของเคลาส์นี้สามารถได้กำมะถันออกมาจากปฏิกิริยาถึง ร้อยละ 96

ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้ดี เนื่องจากโครงสร้างมีรูพรุนอยู่สูง และมีสภาพความเป็นกรด ซึ่งจะดูดซับโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างของตัวมันเองได้ดี ในช่วงปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา ได้มีการศึกษาสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเคลาส์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้แก่ ทำให้สมบัติในการเร่งทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ปรับปรุงความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยในด้านการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเกิดขึ้นมา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการเคลาส์ ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม (alumina) เนื่องจากมีสมบัติที่

เหมาะสมในการดูดซับและทำปฏิกิริยาได้ดี จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้สารดูดซับเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาหลายชนิด เช่น งานวิจัยของ Gasper-Galvin L. D. (1998) ทำการทดสอบสารดูดซับที่เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะหลายชนิดบนซีโอไลต์ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 650-870 องศาเซลเซียส งานวิจัยของ Young-Soo, L., Hee, T. K., and Kyong-Ok, Y. (1995) ใช้ Fe_2O_3 ในปฏิกิริยา sulfidation ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส งานวิจัยของ Lin S. Y. และ คณะ (1995) ใช้ CaO ในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส สารเหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับไฮโดรเจนซัลไฟด์มาก และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยที่มีผู้รายงานไว้ พบว่า มีองค์ประกอบหลายชนิดที่เหมาะสมสามารถทำหน้าที่เป็นสารดูดซับ ดังมีผู้วิจัยไว้แล้วข้างต้น อาทิเช่น SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นต้น จึงเป็นมูลเหตุที่จะเอาเถ้าลอยมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์จากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในอากาศเสียจากการเผาไหม้ได้

2.4 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash) (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538 และ อนิรุทธิ์ ชงไชย, 2528)

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการนำถ่านหินมาบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอยถ่านหินเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกมาจากปล่องควัน และถูกจับไว้โดยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) หรืออาจมาจากการดักจับด้วยถุงกรองฝุ่น (Bag Filter) ในแต่ละปีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ทำให้เกิดเถ้าลอยถ่านหินเป็นปริมาณมากถึงปีละ 10 ล้านตัน

2.4.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจะประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งจากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3-30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วนจะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆระหว่างการเผาไหม้ เช่น ดินเหนียวและหินดินดานจะสูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนเนตจากการสลายตัวซึ่งจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับรูปใหม่เกิดเป็นคาร์บอนเนต (CO_3^{2-}) ในถ่านหินจะมี

สารแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ส่วนในถ้ำลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ถ้ำลอยเหล่านี้ประกอบไปด้วย ซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบแอลคาไลน์ นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอเนตและซัลเฟต

ระดับปริมาณถ้ำลอยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ต่างๆ กันในโลก หรืออาจแตกต่างกันเนื่องจากระดับชั้นของพื้นผิวในพื้นที่เดียวกัน หรือมีความต่างกันในเมืองที่ต่างกัน

2.4.2 การจัดรูปของถ้ำลอยขณะทำการเผาไหม้

ขณะทำการเผาไหม้ ถ้ำลอยจะเกิดการจัดรูปออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) ถ้ำหนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของถ้ำหลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาไอน้ำ ซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าถ้ำลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีมุมหลายมุม เนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค ถ้ำหนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อให้เกิดสแลก (Slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุมและมีสมบัติของซิลิกาด้วย สำหรับขนาดของถ้ำหนักนั้นอยู่ระหว่าง 0.03-30 มิลลิเมตร แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร

2) ใส เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของไอนี้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของถ้ำลอยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับถ้ำลอย ปริมาณของไอนี้ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ ความเข้มข้นและสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3) ถ้ำลอย เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งลอยอยู่ในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้และลอยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับก๊าซอื่นๆ ถ้ำลอยส่วนใหญ่จะถูกเก็บโดยเครื่องดักทางกล (Mechanical collectors) หรือเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของถ้ำลอยจะผ่านเครื่องดักจับ และถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศไป ถ้ำลอยจะมีปริมาณร้อยละ 10-85 ของปริมาณถ้ำทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา พบว่า ถ้ำลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของถ้ำลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าถ้ำลอยที่มีผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ นั้น ได้แก่ อะลูมินา แมกเนไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มุลไลต์ และควอตซ์

สิ่งที่น่าสนใจของถ้ำลอย คือ ความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณกว่าร้อยละ 20 ของถ้ำลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีส่วนประกอบของ ซิลิเกต ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 20-200 ไมครอน ถ้ำเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัด

2.4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักเก็บถ้ำลอยถ่านหิน

1) เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitators) วิธีการควบคุมนี้ใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ระหว่างก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านอนุภาคของถ้ำลอยจะได้รับประจุไฟฟ้าลบ และจะถูกดึงดูดให้เกาะบนขั้วบวก ในทางปฏิบัติเครื่องนี้จะต้องทำความสะอาดอย่างต่อเนื่อง โดยการเคาะเพื่อไล่อนุภาคที่ดักเก็บได้

สำหรับการเก็บถ้ำลอย เครื่องมือที่ดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 เนื่องจากคุณภาพของถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าจะมีคุณภาพแย่ลงเนื่องจากมีปริมาณถ้ำมากขึ้น และถ้ำนี้จะมีส่วนประกอบเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะฉะนั้นความสามารถในการทำงานของเครื่องตกตะกอนจะต้องเหมาะสมกับถ้ำลอยที่ถูกดักเก็บ เช่น มีความต้านทานไฟฟ้า แต่สมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถ่านหินที่ใช้หรือการทำงานของหม้อไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

2) ถุงกรอง (Baghouse) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคถ้ำลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงในโครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีพอๆกับเครื่องตกตะกอน และถูกนำไปใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าบางแห่ง

3) ไซโคลน (Cyclone collector) เครื่องไซโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของแก๊สจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกของอนุภาคที่หนักออกจากก๊าซ เครื่องไซโคลนควรมีประสิทธิภาพร้อยละ 70-85 เมื่อใช้กับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง เครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์ (Cyclone-Fired Boiler) จะทำให้เกิดถ้ำที่มีขนาดเล็กจำนวนมากกว่าหน่วยที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องไซโคลนจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์

2.4.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ

เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ เถ้าลอยบิทูมินัสและเถ้าลอยลิกไนต์ ความแตกต่างของเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะหยาบกว่า คือ มีช่วงกว้างกว่า ค่าดัชนีหักเหของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า และเถ้าลอยลิกไนต์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มากกว่าเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ในทางตรงกันข้ามสำหรับเถ้าลอยบิทูมินัสจะมีปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มากกว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทบิทูมินัสจะเป็นถ่านหินยุคเก่าซึ่งอยู่ในช่วงอายุไทรแอสสิก ส่วนถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทลิกไนต์จะเป็นถ่านหินยุคใหม่จะอยู่ในช่วงอายุจูราสสิก

2.4.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

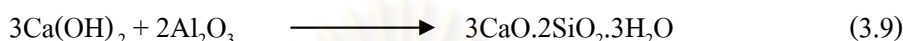
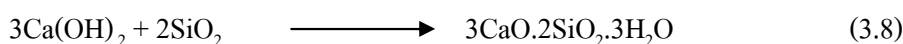
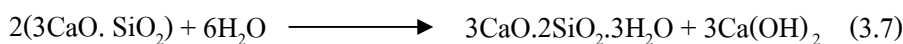
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินจะขึ้นกับปัจจัยทางด้านธรณีวิทยา และด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลัก แต่อาจขึ้นอยู่กับภาวะการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเถ้าลอยจะเป็นไปตามชนิดของหินและดิน คือ มีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (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 นอกจากนี้เถ้าลอยยังมีส่วนประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีปริมาณน้อยๆ (trace element) ประมาณ 20-50 ธาตุ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในประเทศต่างๆ ตามที่ได้รวบรวมและสรุปไว้พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่างถ่านหินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง โดยเฉลี่ยแล้วเถ้าลอยจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังต่อไปนี้

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

ที่เหลือเป็นออกไซด์ของแร่ชนิดต่างๆ ที่ผสมอยู่ในถ่านหิน เช่น MgO, SO₃, Na₂O และ K₂O เป็นต้น จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้นจะคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ทั้งนี้เพราะว่าทั้งเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

เนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าลอยเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เถ้าลอยจึงสามารถรวมตัวกับปูนขาว (Lime) ได้เมื่อมีน้ำอยู่ และทำให้เกิดสารเชื่อมประสาน (cementitious material) จึงถือได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolan) ชนิดหนึ่ง ปฏิกริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานที่แสดงโดย Mindess และ Young (วิชาญ, 2526) แสดงได้ดังนี้คือ



2.4.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยถ่านหิน (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526)

เถ้าลอยถ่านหินมีลักษณะพิเศษเฉพาะ คือ มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ มีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอและมีความชื้นเหนียว (plasticity) ต่ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของเถ้าลอยจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉลี่ยเถ้าลอยในประเทศญี่ปุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.14 ในประเทศอเมริกามีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 และในประเทศอังกฤษมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.10 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยนั้นต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินโดยทั่วไปที่ปรกติอยู่ในช่วง 2.60-2.80 จากการสังเกตโดยใช้กล้องขยาย พบว่าเม็ดเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีหลักฐานที่ทำให้เชื่อว่าเม็ดกลมเหล่านี้ด้านในจะกลวง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดดินโดยทั่วไป

เนื่องด้วยเถ้าลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกบด ขนาดของเม็ดเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่านหิน และอุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้ โดยทั่วไปพบว่าเม็ดเถ้าลอยมีขนาดอยู่ในช่วงขนาดกลางถึงหยาบ

ในสภาพปกติเถ้าลอยจะเป็นฝุ่นฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะแฉะเป็นเลนเมื่ออิมตัวด้วยไอน้ำ แต่ถ้าผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมและได้รับการบดอัดที่เพียงพอแล้วเถ้าลอยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (unconfined compressive strength) สูง

การจัดรูปของเถ้าถ่านหินระหว่างส่วนของเถ้าลอยกับเถ้าหนักจะขึ้นอยู่กับชนิดของเตาเผา ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิของการหลอมเถ้า และชนิดของหม้อต้ม เตาเผาเป็นปัจจัยแรกที่สำคัญในการเกิดการแยกส่วนของเถ้าลอยและเถ้าหนัก เช่น เตาเผาชนิดสโตเกอร์ (Stoker) จะมีการปล่อยเถ้าลอยออกมาน้อยที่สุด

ตารางที่ 2.11 สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526)

สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป	
Specific Gravity	1.901 - 2.690
Specific Surface Area (cm ² /g)	1220 - 8100
Optimum Water Content (% , standard compaction test)	18 - 45
Maximum Dry Unit Weight (kN/m ³)	9 - 16

ในหน่วยไซโคลนอุณหภูมิของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ้ำประมาณร้อยละ 80-85 ของถ้ำที่จะหลอม และรวมตัวกันเกิดเป็นสแลก ส่วนหนึ่งของถ้ำลอยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในหน่วยพัลเวอไรซ์ (Pulverized coal) มีถ้ำลอยเกิดขึ้นร้อยละ 65-80 และเกิดถ้ำหนักร้อยละ 20-35 สำหรับอุณหภูมิการหลอมของถ้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ถ้ำที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปของถ้ำหนักนั้นคือหม้อต้มไอน้ำที่กั้นเปียกจะก่อให้เกิดถ้ำหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่กั้นแห้ง

2.4.7 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบางประการที่เกิดจากถ้ำลอย

ผลกระทบต่อสุขภาพ สำหรับในเหมืองถ่านหินนั้น สารที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกต และซิลิกาไดออกไซด์ รวมถึงสารประกอบออกไซด์ของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และในถ่านหินนั้นยังมีซิลิกาอิสระที่เรียกว่า α -quartz จากส่วนประกอบนี้อาจจะเป็นอันตรายต่อระบบหายใจได้ หากมีการเข้าไปสะสมภายในร่างกายมากๆ โดยส่วนของ α -quartz อาจเป็นสาเหตุให้เกิดโรคปอดอักเสบ ถ้าหากอยู่ในภาวะที่เสี่ยงคือ การทำงานอยู่ภายใต้สภาวะที่มี α -quartz เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

2.4.8 ประโยชน์ของเถ้าลอยถ่านหิน (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526 และ วิชาญ ภูพัฒน์, 2526)

1) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุถม (Fill Material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสม และทำการบดอัดอย่างดีแล้ว เถ้าลอยจะเป็นวัสดุที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงและเกิดการยุบตัวน้อย ค่าสัดส่วนของน้ำหนักสูงสุดที่เถ้าลอยสามารถรับได้ในการบดอัดเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีบดอัดมาตรฐาน (standard compaction) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 18-45 และค่าความหนาแน่นสูงสุด (maximum dry unit weight) จะอยู่ในช่วง 9-16 kN/m³ แต่ในสนามเป็นการยากที่จะบดอัดเถ้าลอยให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด โดยปกติมักจะกำหนดให้บดอัดได้ที่มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของความหนาแน่นสูงสุด

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

2) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุโครงสร้างของถนน

ส่วนของถนนที่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ คือ ชั้นรองพื้นทาง (sub-base) และชั้นพื้นทาง (base) แม้ว่าเถ้าลอยที่บดอัดแล้วจะมีกำลังค่อนข้างสูงแต่คงยังมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในงาน โครงสร้างของถนนโดยลำพัง แต่จะสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาว บางครั้งอาจใช้เป็นสารสำหรับปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมือนกับปูนซีเมนต์หรือปูนขาวก็ได้

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เหมือนกับขอยแอกกรีเกต (soil aggregate) โดยมีซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious material) กำลังอัดของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสมบัติของเถ้าลอย ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มความหนาแน่นจากการบดอัด และประสิทธิภาพในการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับเถ้าลอย ในการออกแบบส่วนผสมมักใช้กำลังอัด (unconfined compressive strength) เป็นเกณฑ์กำหนด ในประเทศอังกฤษใช้กำลังอัด 2.8 MN/m² ที่อายุ 7 วัน เป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการปรับปรุงสมบัติขอยแอกกรีเกตต่างๆ ด้วยปูนซีเมนต์ พบว่า สำหรับเถ้าลอยต้องใช้ปูนซีเมนต์ผสมประมาณร้อยละ 5-15

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนขาว การผสมปูนขาว (lime) ในเถ้าลอยจะช่วยให้กำลังอัดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการเพิ่มกำลังอัดนั้นต่างจากการผสมปูนซีเมนต์คือ ในกรณีของปูนซีเมนต์นั้นจะมีสารเชื่อมประสานเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบของ

ซีเมนต์เอง ส่วนในกรณีของปูนขาวสารเชื่อมประสานจะเกิดจากปฏิกิริยาปัสโซซานิก (puzzolanic reaction) ระหว่างปูนขาวกับซิลิกาในเถ้าลอย ในเกณฑ์กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมักจะใช้ปูนขาวผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์

- การใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงสมบัติของดิน ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้กำลังอัดของซอยแอกกรีเกตเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่พบว่าจะต้องใช้ปูนขาวผสมกับเถ้าลอยในการใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติ ทั้งนี้เพื่อให้มีปฏิกิริยาปัสโซซานิกสร้างสารเชื่อมประสานได้มากขึ้น ซอยแอกกรีเกตที่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ดีโดยใช้เถ้าลอยปูนขาวได้แก่ พวกทรายที่มีมวลละเอียดน้อย

- การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีต (Asphaltic Concrete) แอสฟัลติกคอนกรีต คือ ส่วนผสมระหว่างหินย่อยและยางแอสฟัลต์ ซึ่งมักใช้ปูผิวถนน ในการออกแบบส่วนผสมจะต้องใช้หินย่อยที่มีขนาดละเอียดดีและมีมวลละเอียดที่เรียกว่า ฟิลเลอร์ (filler) ผสมอยู่ด้วยเพื่อแทรกภายในช่องว่างระหว่างเม็ดหินย่อยเพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ต้องใช้ และทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นสูงเมื่อได้รับการบดอัด ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ ฝุ่นที่เกิดจากการโม่หินปูน (lime stone dust) ผลงานวิจัยในหลายประเทศได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็นฟิลเลอร์แทนหินปูนได้

3) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตสามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เป็นสารเพิ่ม (Admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้งานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้ คือ

ข้อดี

- มีสภาพการใช้งานดี (Workability)
- มีความต้านทานต่อการแยกกลุ่ม (Segregation) ดี
- มีค่าความซึมได้ของน้ำ (Permeability) ดี
- มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต (Sulphate resistance) ดี
- เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ช้า ทำให้ปริมาณความร้อนที่ระบายออก

ในขณะที่คอนกรีตแข็งตัวมีค่าน้อย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในกรณีการเทคอนกรีต

ข้อเสีย

- อัตราการเพิ่มของกำลังอัดช้า
- สมบัติของเถ้าลอยแปรปรวนไม่แน่นอน ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก

การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุขีบในการผลิตซีเมนต์

วิชาญ ภูพัฒน์ (2526) กล่าวไว้ว่า การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุขีบผลิตซีเมนต์สามารถทำได้ เนื่องจากเถ้าลอยมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์คว่ำ จึงสามารถนำเถ้าลอยนี้ไปใช้เป็นวัสดุขีบในการผลิตซีเมนต์ได้ไม่เฉพาะแต่งานคอนกรีตเท่านั้นที่สามารถนำเถ้าลอยมาผสมทดแทนในบางส่วนของปูนซีเมนต์ได้ งานเกือบทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบก็สามารถนำเถ้าลอยไปใช้ด้วยได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การผลิตคอนกรีตบล็อก การใช้ในการผลิตซีเมนต์กราวด์ (cement groundting) เป็นต้น การนำไปใช้อีกอย่างหนึ่งที่แตกต่างจากแนวทางที่กล่าวมาในข้างต้นคือ ใช้ทำมวลรวมเบา (light weight aggregate) ในกรณีนี้เถ้าลอยจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เม็ดเถ้าลอยเกาะตัวเป็นก้อนที่แข็งมาก และสามารถใช้เป็นมวลรวมแทนหินย่อยได้ มวลรวมนี้จะเบากว่าหินย่อยธรรมดาซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตสำหรับงานอาคาร

2.5 การดูดติดผิว (Adsorbtion)

การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารที่บริเวณพื้นผิวกับพื้นผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ดูดติด เรียกว่า สารดูดติดผิว (adsorbent) สารที่มีอำนาจดูด โมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้ มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ (ประวัชรกรณ์ สาธิตคุณ, 2546)

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char) Activated Silica เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่มีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด

2) ถ่านกัมมันต์ อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่า สารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสารนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.5.1 กลไกการดูดซับ (ประวัชรกรณ์ สาริศจิต, 2546)

เนื่องจากการดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวและของแข็ง หรือก๊าซและของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีขั้นตอนการเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk solution transport สารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นโดยการแพร่

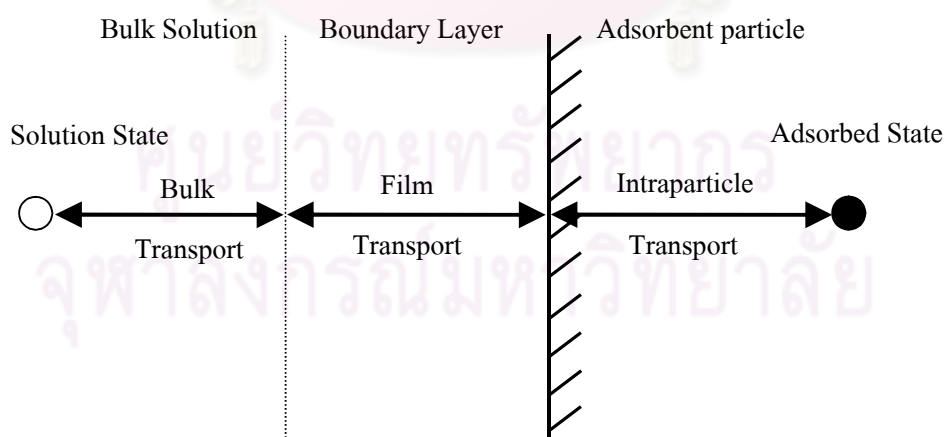
ขั้นตอนที่ 2 Film diffusion transport โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดซับ ระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราไหล ถ้าอัตราไหลสูง ระยะทางสั้น

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ สารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดซับไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้น และถูกดูดซับทางกายภาพ

ขั้นตอนที่ช้าที่สุด เรียกว่า rate-limiting step ซึ่งจะควบคุมอัตราการกำจัดในถึงปฏิกิริยาที่มีความปั่นป่วนสูง film diffusion และ pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด film diffusion จะควบคุมในขั้นต้น หลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารดูดซับในช่องภายในสารดูดซับ pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด

ขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมด (ดังภาพที่ 2.17)



ภาพที่ 2.17 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับ (Eckenfelder, 1966)

2.5.2 ประเภทของการดูดติดผิว

การดูดติดผิวแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่าง 2 โมเลกุล และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะทางเคมีระหว่าง 2 โมเลกุลของสารดูดติดผิวกับผิวหน้าของสารดูดติดผิว

ข้อแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพที่แตกต่างจากการดูดติดผิวทางเคมี มีดังต่อไปนี้

1) การดูดติดผิวทางกายภาพ ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน การดูดติดผิวทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ สารดูดซับสามารถเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับ (desorption) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผันกลับไม่ได้

2) การดูดติดผิวทางกายภาพ ไม่มีความจำเพาะกับบริเวณ โมเลกุลของสารดูดติดผิว สามารถดูดติดผิวได้ทั่วบริเวณผิวหน้าของสารดูดติดผิว ในทางตรงกันข้าม การดูดติดผิวทางเคมีมีความจำเพาะกับบริเวณที่สามารถดูดติดผิวได้

3) ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพน้อยกว่าการดูดติดผิวทางเคมี ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อ โมล สำหรับการดูดติดผิวที่มีโพรงภายในขนาดเล็ก ส่วนความร้อนของการดูดติดผิวทางเคมีอยู่ในช่วง 20-100 กิโลแคลอรีต่อ โมล

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนของระบบต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความปั่นป่วนในถังดูดติดผิว คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีแล้วถ้าเพิ่มความเร็วจึงจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูด โมเลกุล ได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอนผง มีอัตราเร็วในการดูดติดสูงกว่าคาร์บอนแบบเกล็ด

3) ขนาดและลักษณะของสารดูดซับมีความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ดี นอกจากนี้ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดซับซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมได้แล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาด โมเลกุลของตัวถูกละลาย นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

4) พิเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถจะเกาะติดผิวของสารดูดซับได้ดี

5) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบ Exothermic

6) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับและอายุการใช้งานของถังดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

2.5.4 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับในสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกสู่สารละลาย เมื่อปริมาณของการดูดซับและหลุดออกจากผิวมีจำนวนเท่ากัน อัตราการดูดซับและการหลุดออกจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibria) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ระบบการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และ

อธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับไว้หลายประการ แต่ที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ Freundlich Adsorption Isotherm และ Langmuir Adsorption Isotherm

1) Freundlich Adsorption Isotherm

Freundlich Adsorption Isotherm จัดเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมาก สมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว

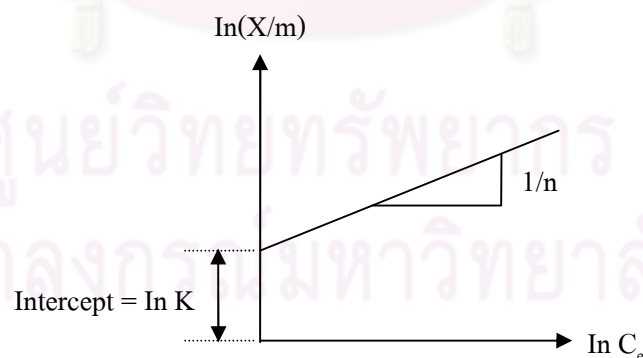
สำหรับสมการของ Freundlich สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\frac{x}{m} = KC_c^{1/n} \quad (2.10)$$

โดยที่

- X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก; มิลลิกรัมต่อกรัม
- C_c = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มิลลิกรัมต่อลิตร
- K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ; ลิตรต่อกรัม
- $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ (2.10) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(X/m)$ และ $\ln C_c$ จะได้กราฟเส้นตรงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich

จากภาพที่ 2.18 ค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln K$ สำหรับการดูดซับของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดซับส่วนใหญ่จะมีค่า $1/n$ ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่าความชัน

สูง คือ มีค่า $1/n$ เข้าใกล้ 1 นี้จะพบว่า ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีย่านมากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนี้มีค่าต่ำลง และในกรณีที่กราฟมีค่าความชันน้อยๆ ค่า $1/n$ จะน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะพบว่าความสามารถในการดูดซับนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลง จากสมการของ Freundlich นี้ได้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ หรือค่า (X/m) จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดซับจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้นด้วย

สมการของ Freundlich นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารดูดซับที่ต้องการใช้ในการลดค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลว แทนค่า X ในสมการ 2.10 ด้วยค่า $(C_0 - C_e)$ โดยที่ค่า C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในของเหลว จะได้ค่าดังสมการที่ 2.11

$$\ln(C_0 - C_e)/m = \ln K + 1/n \ln C_e \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) นี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดซับทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

2) Langmuir Adsorption Isotherm

Langmuir Adsorption Isotherm บางครั้งเรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model มีสมมติฐานที่สำคัญ ดังนี้

- มีพื้นที่สำหรับการดูดซับจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับจะอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน
 - แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับผิวจะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่ามีการดูดซับเพียงชั้นเดียว
 - ตรงบริเวณดูดซับผิวจะเกิดอัตราการดูดซับ และการคายสารออก ซึ่งอัตราการดูดซับมีมากกว่าอัตราการคายสารออกจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล (อัตราการดูดซับเท่ากับการคายสารออก) พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง
- นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้อย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้

สำหรับสมการ Langmuir สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.12)

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.12)$$

โดยที่

- X = X/m , ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วย
น้ำหนักของสารตัวกลาง; มิลลิกรัมต่อกรัม
- X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่น
ชั้นเดียว; มิลลิกรัมต่อกรัม
- C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล;
มิลลิกรัมต่อลิตร
- b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติด; ลิตรต่อมิลลิกรัม

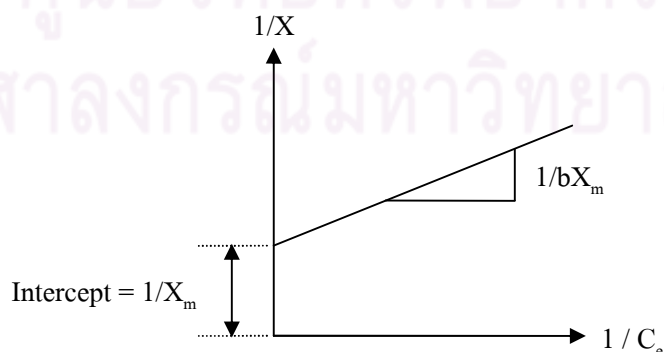
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ α จากสมการสามารถเขียนได้เป็น

$$C_e/X = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad (2.13)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/X_m$ และจุดตัด
แกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_m C_e} \quad (2.14)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/X$
และ $1/C_e$ ได้ดังภาพที่ 2.19

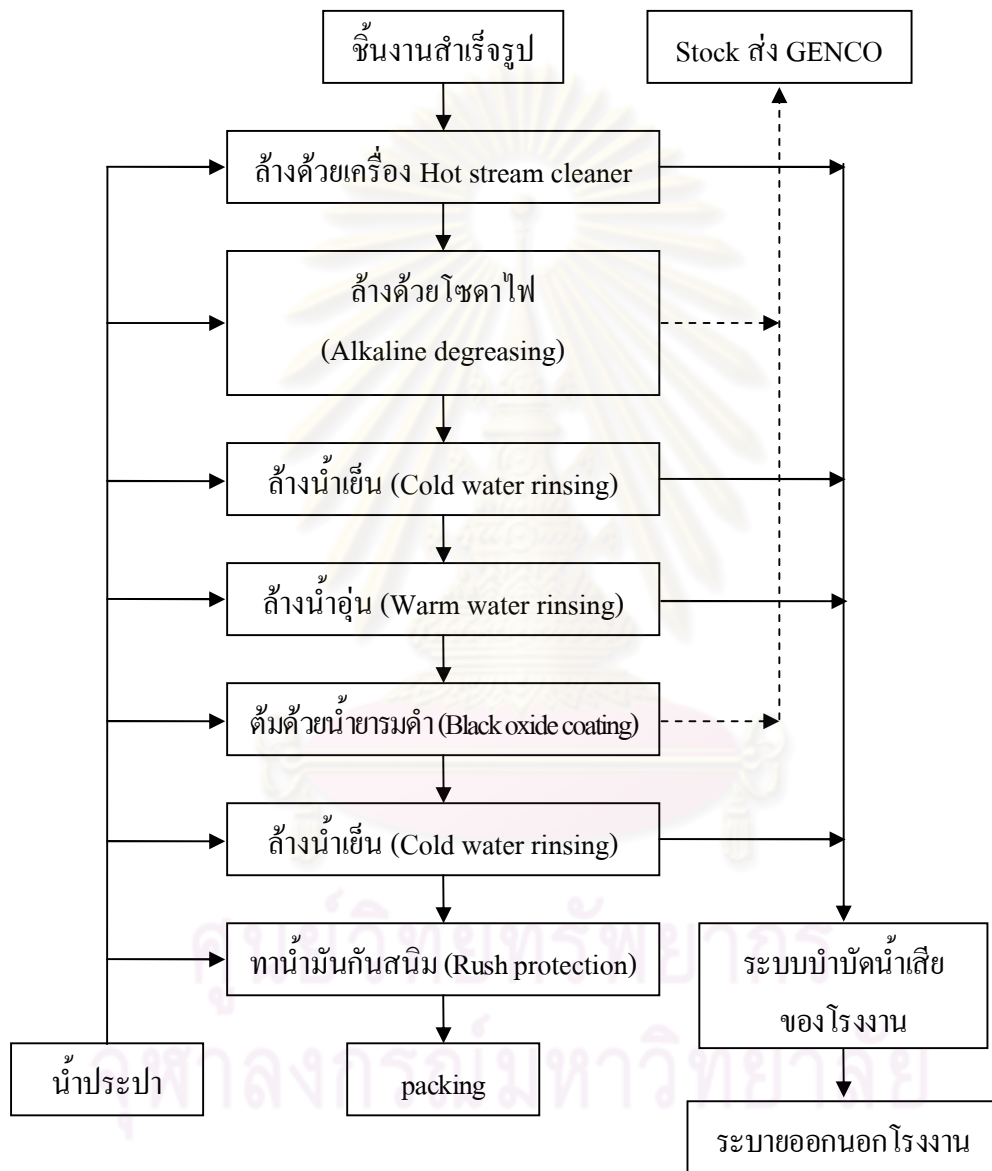


ภาพที่ 2.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir

2.6 การรมดำโลหะ

2.6.1 กระบวนการรมดำโลหะ

กระบวนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะมีขั้นตอนการทำงานดัง
ภาพที่ 2.20



หมายเหตุ

_____ หมายถึง น้ำประปาและน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต

----- หมายถึง น้ำค้างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline)

ภาพที่ 2.20 ขั้นตอนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ

Raw work pieces	คือชิ้นงานสำเร็จรูปที่ต้องการจะรมดำผิวซึ่งผ่านการกลึงไสขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว
Hot stream cleaner	คือ การล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยไอน้ำในเครื่อง Hot stream vapor
Alkaline degreasing	คือ ขั้นตอนการกำจัดความสกปรกในรูปฝุ่น ไขมัน หรือรอยขีดข่วนที่ผิวชิ้นงาน โดยการต้มชิ้นงานในสารละลายโซดาไฟเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และต้องคอยเติมน้ำแทนส่วนที่ระเหยไปเพื่อให้ชิ้นงานจมอยู่ใต้น้ำยาเคมีตลอดเวลา
Water rinsing	หลังจากจุ่มชิ้นงานในถังน้ำยาเคมีในเวลาที่เหมาะสมแล้วนำชิ้นงานขึ้นมาล้างทำความสะอาดโดยใช้น้ำสะอาด
Black oxide coating	คือ ขั้นตอนการรมดำผิวชิ้นงาน โดยการต้มชิ้นงานในน้ำยารมดำ SUGICUT™ CS-58Y ซึ่งเป็นด่างเข้มข้น ที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง และจะต้องคอยเติมน้ำแทนส่วนที่ระเหยไปเพื่อให้ชิ้นงานจมอยู่ใต้น้ำยาเคมีตลอดเวลา
Rust protection	การป้องกันผิวชิ้นงานก่อนการเกิดสนิมก่อนหีบห่อ โดยการชโลมน้ำมันกันสนิมที่ผิวชิ้นงาน
Packing	การบรรจุหีบห่อชิ้นงานที่ผ่านการรมดำเพื่อเตรียมส่งจำหน่าย

2.6.2 น้ำเสียจากกระบวนการรมดำผิวโลหะ

น้ำเสียจากการรมดำผิวโลหะโรงงานรมดำ มีน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1) น้ำเสียทั่วไปเป็นน้ำเสียที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดผิวชิ้นงานจากกระบวนการผลิตในขั้นตอน Hot stream cleaner และ Water rinsing มีลักษณะเป็นด่าง เนื่องจากการปนเปื้อนของน้ำด่าง มีไขมันจากน้ำมันหล่อลื่นบนผิวชิ้นงานปนอยู่เล็กน้อย น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยการปรับพีเอช ให้เป็นกลาง (Neutralization) แล้วจึงระบายออกนอกโรงงาน

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

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สัญญาชาติ สนิทวาร และ สมชาย พานิชสาส์น (2540) ศึกษาอิทธิพลของเวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการเตรียมซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 วัน มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุด ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถดูดซับสารได้ช่วงหนึ่ง

Lin และคณะ (1998) ศึกษาผลของซีโอไลต์สังเคราะห์ต่อการทำเสถียรแคะเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ทำการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการทดลองจะใช้ตัวอย่างดิน 2 กลุ่ม คือ (1) เติมแคะเมียมลงไปในดินตัวอย่างจาก Pinchen, Jente, Erlin และ Chengchung และ (2) ดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคะเมียมจาก Chungsing และ Tsasta ผลที่ได้จากการทดลองแบบที่ละเทแสดงให้เห็นว่า การเติมซีโอไลต์จะช่วยลดการชะละลายของแคะเมียมจากดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนทุกตัวอย่าง ในการทดลองแบบต่อเนื่องผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า แคะเมียมถูกทำให้เสถียรในดินที่มีซีโอไลต์ การวิเคราะห์การแพร่กระจายของแคะเมียมตามความลึกของคอลัมน์ที่บรรจุดิน พบว่า มีการแพร่กระจายของแคะเมียมเล็กน้อย ความเข้มข้นของแคะเมียมที่ยังตกค้างอยู่ในดินตัวอย่างจาก Pinchen และ Jente เป็น ร้อยละ 12 และ 35 ตามลำดับ ปัจจัยที่ทำให้แคะเมียมเสถียรอยู่ในดิน คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ต่อดิน การเจือจางดิน ค่าพีเอชที่สูงขึ้น และค่า hydraulic conductivity ในดิน โดยปริมาณของซีโอไลต์ที่แนะนำให้เติมคือ ประมาณ 0.1-0.2 กรัมต่อมิลลิกรัมแคะเมียม ต่อ 100 กรัมของดิน

Steenbruggen และ Hollman (1998) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยนำเถ้าลอยมาทำปฏิกิริยากับสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล พบว่า การสังเคราะห์เถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 90-150 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล เถ้าลอยถ่านหินจะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ ประมาณร้อยละ 45 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 2.4 มิลลิสมมูลต่อกรัม จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการกำจัดโลหะหนัก พบว่าลำดับความชอบไอออนของซีโอไลต์เป็นดังนี้ $Ba > Cu > Cd \sim Zn > Co > Ni$

มนตรี ทองคำ (2542) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง จากการสังเคราะห์ชนิดของซีโอไลต์ที่ได้ คือ Zeolite P, Chabazite, Nepheline, Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบชนิดอื่น เช่น Silimanile, Willhendersonite, Gehlenite โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 619.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมซีโอไลต์

วีระพงษ์ นามโท (2543) ศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา สาร โครงสร้าง (เตตระโทพริลแอมโมเนียมโบรไมด์) ความดันเริ่มต้น อุณหภูมิและระยะเวลาที่มีผลต่อการเกิดซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยใช้เถ้าลอยถ่านหิน 3 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีซิลิกาเข้มข้นร้อยละ 27 โดยน้ำหนัก และสารโครงสร้างนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน พบว่า ที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 20-100 อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ได้ ร้อยละ 23-43 ที่สภาวะเดียวกันเมื่อไม่ใส่สาร โครงสร้าง สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดพี ได้เพียงอย่างเดียว นำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ ได้ไปใช้เร่งปฏิกิริยาอีพอกซิฟอร์มมิงของกำมะถันไตรเอทิลเมทิล พบว่าไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เกษม ไตรหิรัญ (2544) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 MPa ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ได้ซีโอไลต์ชนิดพี และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 MPa ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ได้เป็นชาบาไซด์ นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการขจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทดสอบกับมันตาภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์กับปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของกำมะถันไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 200-600 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชาบาไซด์ให้ค่าการเปลี่ยนสูงสุด และศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกำมะถันไฮโดรเจนซัลไฟด์ อันดับปฏิกิริยาของไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่า 0.8 และอันดับปฏิกิริยาของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าพลังงานกระตุ้น 2.0 กิโลแคลอรีต่อโมล

วิทยา เทียมสุข (2544) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียในโตรเจนและเจดาคาล์ในโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ Clinoptilolite, Smectite และ Pumice พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจน 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ช่วงพีเอชที่เหมาะสม ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนโดยใช้ Clinoptilolite คือ 3-8 เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนของ Smectite และ Pumice จะแปรผันไปตามค่าพีเอช โดยที่พีเอช 9 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนเมื่อใช้ Clinoptilolite, Smectite และ Pumice ปริมาณสูงสุดที่ 120 กรัม ค่อน้ำเสีย 0.5 ลิตร คือร้อยละ 85.63 ร้อยละ 35.13 และร้อยละ 36.84 ตามลำดับ การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจริงจากฟาร์มเลี้ยงหมูที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจน และ ทีเคเอ็น เป็น 230.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 250.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณ Clinoptilolite สูงสุดที่ 120 กรัม ค่อน้ำเสีย 0.5 ลิตร ปรับพีเอชเป็น 6 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนและทีเคเอ็นเท่ากับร้อยละ 91.48 และ ร้อยละ 87.70 ตามลำดับ

เลิศ รักสันติชาติ (2545) ศึกษาหาวิธีการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ที่ผ่านการดูดซับเอทิลีนไกลคอลในขั้นตอนการอบแห้งของกระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ซึ่งมีวิธีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพดังนี้ คือ การให้ความร้อนในสภาพบรรยากาศที่มีแต่ไนโตรเจน การเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่ การล้างด้วยน้ำกลั่นและเผา วิธีสุดท้าย คือ การล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำกลั่นและเผา พบว่าการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์โดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่สามารถกำจัดโมเลกุลของคาร์บอนที่เหลืออยู่บนซีโอไลต์ได้สมบูรณ์ขึ้น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพโดยการเผาได้แก่ เผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์สามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 2 ครั้ง

Murayama, Yamamoto and Shibata (2002) ศึกษากลไกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยสังเคราะห์ใน autoclave ขนาด 800 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายใต้อุณหภูมิ 393 เคลวิน และอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อสารละลายต่างเป็น 100 กรัมต่อ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่า ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลด้วยสารละลายต่างแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนการละลายของ Si^{4+} และ Al^{3+} ในเถ้าลอยถ่านหิน เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์สูงประมาณ 298- 393 เคลวิน ไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายต่างเป็นตัวละลายที่สำคัญในขั้นตอนนี้ ขั้นตอนการควบแน่นของไอออนซิลิเกตและไอออนอะลูมิเนียมในสารละลายต่าง ผิวหน้าอนุภาคของเถ้าลอยถูกปกคลุมด้วยตะกอนของอะลูมิเนียมซิลิเกตเจล และขั้นตอนการสร้างผลึกของอะลูมิเนียมซิลิเกตเจล กลายเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดพิ อัตราการเกิดผลึกจะถูกควบคุมด้วยปริมาณโซเดียมไอออนในสารละลายต่าง

ประวัชรกรณ์ สาธิตคุณ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสี basic dye ในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ที่ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที เวลาในการสัมผัส 3 ชั่วโมง และปริมาณซีโอไลต์ธรรมชาติ 10 กรัมต่อลิตร สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานเยื่อกระดาษ ซีโอไลต์ชนิดผง ชนิดเม็ดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-3 มิลลิเมตร และชนิดเม็ดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 90.31 ร้อยละ 89.76 ร้อยละและร้อยละ 84.39 ตามลำดับ

สุชาดา ขางเอน (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลา โดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟโดยปรับพีเอช และชั้นความสูงของซีโอไลต์ให้เหมาะสม พบว่า ที่ระดับพีเอชช่วง 7 – 8 มีความเหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนีย และความสูงของหินภูเขาไฟที่สูงกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้มากขึ้น และในทุกๆ อัตราการกรองประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียได้มากกว่าร้อยละ 95

อารักษ์ คำรงค์ศักดิ์ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักยูเอเอสบี โดยซีโอไลต์และทรายไม่คัดขนาดชั้นตอนแรกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนของซีโอไลต์ดีที่สุด จากนั้นทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองแบบต่อเนื่อง พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในคอลัมน์ที่บรรจุ ซีโอไลต์ 80 เซนติเมตรสูงกว่าทุกคอลัมน์ คือร้อยละ 74.04 ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ช่วง 250 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนสูงกว่าทุกช่วงปริมาตร ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะต่ำลงเมื่อสัดส่วนของซีโอไลต์ลดลง และปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น

จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ (2547) ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน คือ ที่ พีเอช 5 เวลาสัมผัส 120 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 98.59 ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย คือ ที่พีเอช 5 เวลาสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 97.84 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียจริงโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 93.24 และร้อยละ 91.36 ตามลำดับ

สายฝน หาญโยธี (2547) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 บริสุทธิ์สูงจาก เถ้าลอยของถ่านหินและซิลิกาจากเถ้าแกลบ สกัดแยกเหล็กออกไซด์โดยใช้สารละลายกรด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก กรดไนตริก และกรดออกซาลิก ชะละลายซิลิกาและ อะลูมินาออกจากเถ้าลอยโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ศึกษาผลของเวลา ความเข้มข้นของกรดและค่าอุณหภูมิที่มีต่อการแยกเหล็กออกไซด์ หรือชะละลายซิลิกาและ อะลูมินาออกมา พบว่า สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากการปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอย ด้วยกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก กรดไนตริก และกรดออกซาลิก ร่วมกับการชะละลาย ซิลิกอนและอะลูมิเนียมโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 87.6, 86.1, 77.3, 96.1 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับ

Aiyuk และคณะ (2004) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเบ็ดเสร็จโดยรวมวิธีการบำบัด ทางเคมี กายภาพและชีวภาพเข้าด้วยกัน น้ำเสียชุมชนถูกบำบัดขั้นปฐมภูมิโดยใช้สารเคมีจะเติมโคแอก กูแลนต์ (FeCl₃) และฟล็อกคูแลนต์ไอออนลบ สามารถกำจัดซีโอดีทั้งหมด (total COD) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสเฟตไอออนในน้ำเสียได้ ร้อยละ 73 ร้อยละ 85 และร้อยละ 80 ตามลำดับ จากนั้นบำบัดต่อในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี น้ำเสียที่เข้ามามีซีโอดีทั้งหมดประมาณ 140 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีโอดีทั้งหมดได้ประมาณร้อยละ 55 น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีซีโอดี ทั้งหมดต่ำประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นซีโอไลต์ถูกนำมาใช้ในการกำจัดแอมโมเนียม ไอออนโดยสามารถกำจัดแอมโมเนียมไอออนได้เกือบร้อยละ 100 ประสิทธิภาพของระบบรวม แบบเบ็ดเสร็จในการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ซีโอดีทั้งหมด ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสใน น้ำเสียเท่ากับร้อยละ 88 ร้อยละ 90 ร้อยละ 99 และ ร้อยละ 94 ตามลำดับ

Otal และคณะ (2004) ศึกษาการลดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส บีโอดี และซีโอดีในของเหลว ผลชะละลายจากโรงบำบัดขยะมูลฝอยเทศบาลและน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงหมูโดยใช้ซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ซีโอไลต์ทางการค้าและซีโอไลต์สังเคราะห์อื่น ๆ พบว่าซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสใน ของเหลวผลชะละลายและน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงหมูได้ปริมาณมาก

ชัชวาล ฉัตรรัตนนันท (2549) ศึกษาการสังเคราะห์และลักษณะสมบัติของซีโอไลต์จาก เถ้าลอยถ่านหินสำหรับการขัดซัลเฟอร์ของเชื้อเพลิงเหลว จากผลของการสังเคราะห์ พบว่าชนิด ของ ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ คือ sodalite, gismondine และ cancrinite ชนิดของซิลิกาที่เติมเพื่อ ปรับอัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ ไม่มีผลต่อซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น เมื่ออัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ มีค่ามากกว่า 3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็น gismondine ถ้าอัตราส่วนนี้ต่ำกว่าจะเป็น sodalite และเมื่ออัตราส่วน

$H_2O:SiO_2$ มีค่าตั้งแต่ 40-80 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีความเป็นผลึกสูงขึ้น ขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $NaOH:SiO_2$ มากกว่า 4 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีความเป็นผลึกน้อยลง จากผลของอุณหภูมิ พบว่าไม่สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เกิด gismondine และ sodalite ส่วน cancrinite เกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และพบว่า ภาวะที่ไม่กวนให้ซีโอไลต์ที่มีความเป็นผลึกดีกว่าภาวะที่มีการกวน การศึกษาการดูดซับกัมมันตอินทรีย์ด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ความสามารถในการดูดซับเป็นดังนี้ คือ $gismondine > sodalite \sim cancrinite > fly ash$

อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล (2549) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยด้วยสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากอุตสาหกรรมรมดำโลหะ (spent alkaline) พบว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย คือ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline 2 โมลาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 418.36 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และ 286.29 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่ว พบว่า ที่พีเอช 5 ความเข้มข้นตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วดีที่สุด ค่าความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วสูงสุดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย เท่ากับ 78.51 และ 63.23 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ

Penilla, Bustos and Elizalde (2006) ศึกษาการทำให้ Cs, Cd, Pb และ Cr ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำใช้ถ่านหิน class F ใส่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลชนิดของซีโอไลต์หลักที่เกิดเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 150 องศาเซลเซียส คือ gismondin-type P1-Na ($Na_6Al_6Si_{10}O_{32} \cdot 12H_2O$) ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 200 องศาเซลเซียส จะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime C ($Na(Si_2Al)O_6 \cdot H_2O$) ซึ่ง gismondin มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cd ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่า gismondin มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทำให้ออกของเสียกัมมันตภาพไม่เคลื่อนที่ ทั้ง gismondin และ analcime-C มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cd สูง อัตราการคงอยู่ของ Pb^{2+} และ Cr^{3+} ประมาณร้อยละ 99 จะตกตะกอนอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์

Querol และคณะ (2006) ศึกษาการทำให้โลหะหนักในดินที่ปนเปื้อน ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยการเติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ทดลองใน Guadimor Valley (ประเทศสเปน)

ซึ่งได้รับผลกระทบจากการรั่วไหลของ pyrite slurry ที่ยังคงค้างผสมอยู่กับดิน ใช้ถ้ำลอยถ่านหิน จากโรงไฟฟ้า Teruel เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ NaP1 นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ปริมาณ 1,100 กิโลกรัม ไปใส่ในพื้นที่ปริมาณต่างๆ กัน (10,000-25,000 กิโลกรัมต่อเฮกเตอร์) โดย ใส่เข้าไปในดินชั้นบนประมาณ 25 เซนติเมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หลังจากใส่ซีโอไลต์ในดินไปแล้ว 1-2 ปี ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์สามารถลดการชะละลายของแคดเมียม โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี สาเหตุหลักในการทำให้สารมลพิษไม่เคลื่อนที่ คือ มีการดูดซับโลหะในดินเหนียว (illite) การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชจาก 3.3 เป็น 7.6 เนื่องจากค่าสภาพความเป็นด่างของซีโอไลต์ที่เดิมเข้าไป รวมทั้งเกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะร่วมด้วย เมื่อเติมซีโอไลต์ปริมาณ 25,000 กิโลกรัมต่อเฮกเตอร์ เข้าไปในดิน ความสามารถในการชะละลายของโลหะส่วนใหญ่ลดลงประมาณร้อยละ 95-99

Wang และคณะ (2006) ศึกษาการใช้วิธีทางกายภาพและทางเคมีในการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสีย้อมในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 2.7×10^{-5} โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส MCM-22 มีสมมูลของการดูดซับเท่ากับ 1.7×10^{-4} โมลต่อกรัม การฟื้นฟูสภาพ MCM-22 โดยเผาที่อุณหภูมิสูงจะให้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการฟื้นฟูโดยวิธี Fenton oxidation อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเผา คือ เผาที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง MCM-22 ที่ฟื้นฟูสภาพมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 88 ในขณะที่วิธี Fenton oxidation ความสามารถในการดูดซับ ร้อยละ 60

Wu และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมและฟอสเฟตโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอย (Na-ZFA) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป Ca-, Mg-, Al- และ Fe-ZFA โดยใช้สารละลายเกลือ จากนั้นนำไปศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมและฟอสเฟต พบว่า Al^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมสูงสุด คือ ร้อยละ 80-98 ในขณะที่ Mg^{2+} -ZFA, Ca^{2+} -ZFA, Na^{+} -ZFA - และ Fe^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมเป็นร้อยละ 43-58, ร้อยละ 40-54, < ร้อยละ 20 และ < ร้อยละ 1 ตามลำดับ ในกรณีของ Na^{+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ค่าพีเอชที่ต่างกัน และในกรณีของ Fe^{3+} ค่าพีเอชที่เป็นกรดจะขัดขวางการกำจัดแอมโมเนียม ในส่วนของประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต Al^{3+} และ Fe^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 100 ขณะที่ Ca^{2+} , Na^{+} และ Mg^{2+} เป็นร้อยละ 60-85 น้อยกว่าร้อยละ 25 และน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามลำดับ

Luna และคณะ (2006) ศึกษาเบื้องต้นในการบำบัดน้ำชะขยะมูลฝอยโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำชะขยะมูลฝอย ซึ่งใช้การทดลอง 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการต่อเนื่องทางกายภาพ-เคมี และกระบวนการดูดซับ โดยตัวดูดซับที่ใช้ คือ

ซีไอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน พบว่า การบำบัดขั้นแรกสามารถกำจัดซีไอดี แอมโมเนียม ไนโตรเจน และของแข็งแขวนลอย ได้ร้อยละ 28 ร้อยละ 63 และร้อยละ 71 ตามลำดับ ในขณะที่ การบำบัดขั้นที่สองสามารถกำจัดซีไอดี แอมโมเนียมไนโตรเจน และของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 49 ร้อยละ 68 และร้อยละ 80 ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการและทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการขยะมูลฝอย หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 แผนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) จากกระบวนการรมดำโลหะเพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของแฉะลอยถ่านหิน โดยสมบัติทางกายภาพ จะทำการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตร โพร่ง และวิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึก ในขณะที่สมบัติทางเคมีจะทำการหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- 3) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์
- 4) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแฉะลอยถ่านหิน โดยจะหาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเช่นเดียวกับแฉะลอยถ่านหิน ทดสอบไอโซเทอม การดูดซับสี รวมถึงวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี
- 5) ศึกษาสมบัติของน้ำเสียจริงจากนาถุ้ง คือ ค่าพีเอช ปริมาณซีโอดี และแอมโมเนียไนโตรเจน
- 6) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากแฉะลอยถ่านหิน คือ ปริมาณซีโอไลต์ พีเอช และเวลาโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

7) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ กับประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน รวมถึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า ซีโอ ดี และพีเอชหลังจากน้ำเสียผ่านการเติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ โดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

8) ประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
- 3) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 4) ครุชีเบิลพอร์ซีเลน พร้อมฝาปิด
- 5) เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
- 6) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA
- 7) เครื่องซั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ AND รุ่น HM-300-Japan
- 8) เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ K รุ่น VRN-300
- 9) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ HACH รุ่น TJTTP JO 6749
- 10) ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ WTB Binding Germany
- 11) เตาเผา ยี่ห้อ Valeam box furnace รุ่น 3-1750.USA
- 12) ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด
- 13) ตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 100 และ 325 เมช
- 14) เครื่อง Heating Water bath ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น Model WB 7/14/22/29/45
- 15) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน: Scanning Electron Microscope (SEM)
- 16) X-rays Diffraction Spectroscopy JOEL รุ่น JDX-8030, JAPAN
- 17) X-rays Fluorescence Spectroscopy JOEL รุ่น PW 2400 PHILIPS, JAPAN
- 18) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) จากกระบวนการรมค่าโลหะหาค่าพารามิเตอร์ของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) ดังนี้

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

3.4.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของถ้ำลอยถ่านหิน

นำถ้ำลอยถ่านหินมาผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 100 เมช และขนาด 325 เมช ได้ ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 1) หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง โดยใช้เครื่อง Specific surface area analyzer ด้วยวิธี BET (Brunance-Emmett-teller) โดยวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถ้ำลอยถ่านหินดูดเก็บไว้
- 2) วิเคราะห์การเกิดรูปร่างผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer: XRF)
- 4) วิเคราะห์ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity: CEC)

3.4.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

3.4.3.1 การเตรียมถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

- 1) นำถ้ำลอยถ่านหินไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นปล่อยให้ถ้ำลอยทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 2) นำถ้ำลอยที่ผ่านการอบแล้วมาผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช และ 325 เมช ตามลำดับ
- 3) นำถ้ำลอยที่ผ่านการร่อนบรรจุลงในหม้อดินและปิดฝาทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ถ้ำลอยทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

3.4.3.2 การทำปฏิกิริยา

1) นำถ้ำลอยที่เผาแล้วซึ่งมาประมาณ 15 กรัม และนำสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาโลหะอุตสาหกรรม มาใช้ปริมาณ 120 มิลลิลิตร ใส่ในขวดที่ซึ่งถ้ำลอย แล้วนำไปเขย่าโดยใช้ Heating water bath ที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยแปรค่าปัจจัยต่างๆดังนี้

- สารละลายด่างที่ใช้แล้ว ความเข้มข้น 1.5, 2, 2.5 และ 3 โมลาร์
- อุณหภูมิที่ใช้ 80 และ 100 องศาเซลเซียส

- เวลาที่ใช้ 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

2) นำแฉ่ำลอยที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ มากรองแยกแฉ่ำลอยออกโดยล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยแฉ่ำลอยทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

3.4.4 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแฉ่ำลอยถ่านหินโดยทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับวิธีดำเนินการวิจัยในข้อที่ 2 ทดสอบไอโซเทอมการดูดคิดผิว และวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคซ์โตรมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)

3.4.5 ทำการศึกษาสมบัติของน้ำเสียจากนาุ้ง ดังนี้

- วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter
- วิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD: chemical oxygen demand) โดยใช้วิธีฟลักซ์แบบปิด
- วิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน โดยใช้วิธี phenol-hypochlorite

3.4.6. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ในน้ำเสียดังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแฉ่ำลอยถ่านหิน

3.4.6.1 การหาปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสม

- 1) นำน้ำเสียดังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ในช่วงน้ำหนักที่แน่นอนปริมาณ 0,2,4,6,8,10,15, 20,25 และ 50 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) รอให้ซีโอไลต์ตกตะกอน นำส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน

3.4.6.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

- 1) นำน้ำเสียดังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)
- 2) ปรับพีเอชน้ำเสียดังเคราะห์ เป็น 4,5, 6, 7, 8, 9, และ 10 ตามลำดับ ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่

3.4.6.1) ลงในขวดแต่ละใบ

- 4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที

5) รอให้ซีโอไลต์ตกตะกอน ดูคส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียในโตรเจน

3.4.6.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง) ทำการปรับค่าพีเอชน้ำเสียให้เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.2)

2) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.1) ลงในขวดแต่ละใบ

3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240 และ 300 นาที ตามลำดับ

4) รอให้ซีโอไลต์ตกตะกอน ดูคส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียในโตรเจน

3.4.7 ทำการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง) ทำการปรับค่าพีเอชน้ำเสียให้เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.2)

2) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 และ 50 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ

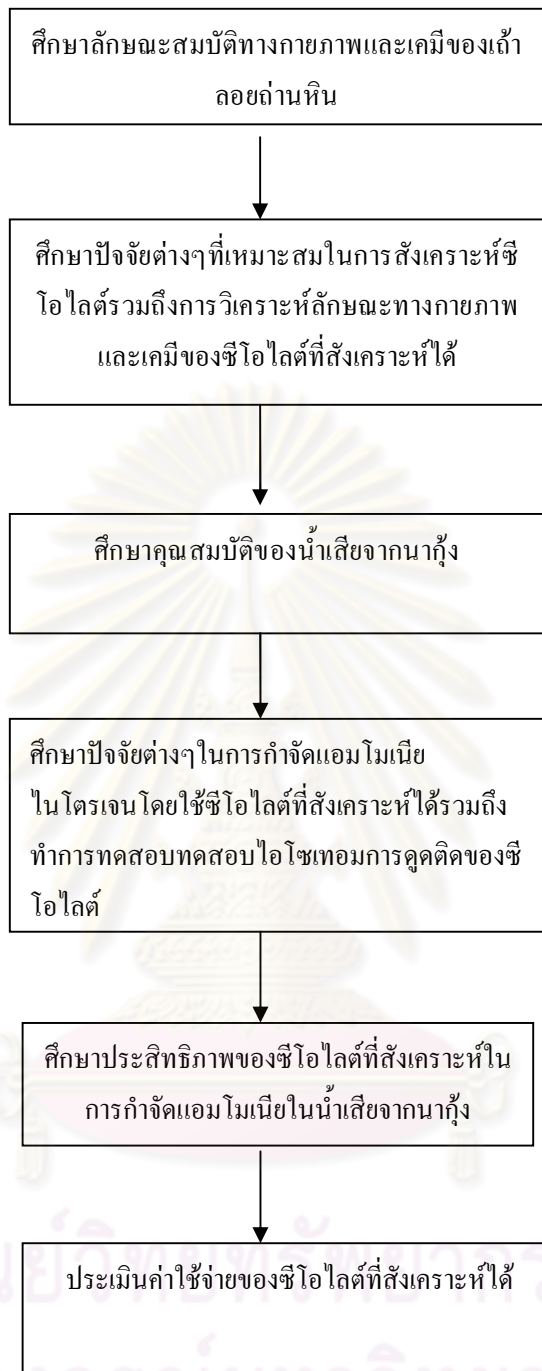
3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.3)

4) รอให้ซีโอไลต์ตกตะกอนดูคส่วนใสไปทำการวิเคราะห์แอมโมเนียในโตรเจน

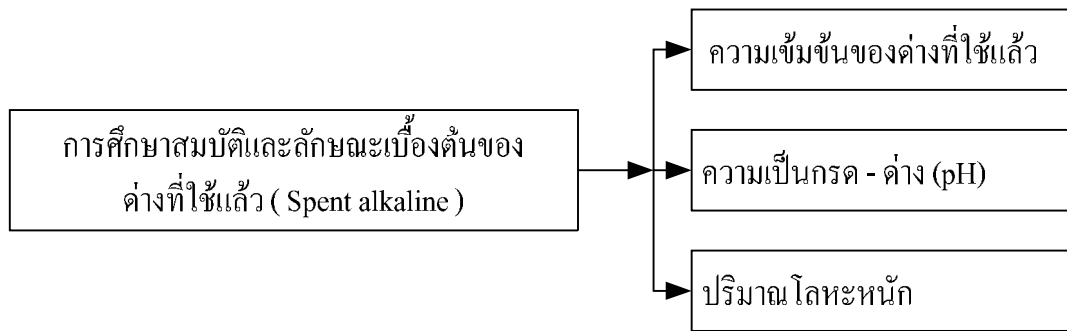
5) นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

3.4.8 ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ในน้ำเสียจากนา กุ้ง โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องโดยวัดค่าซีโอดี และพีเอช ก่อนและหลังการเติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3.4.6.1 – 3.4.6.3 ลงไปในน้ำเสียจากนา กุ้ง

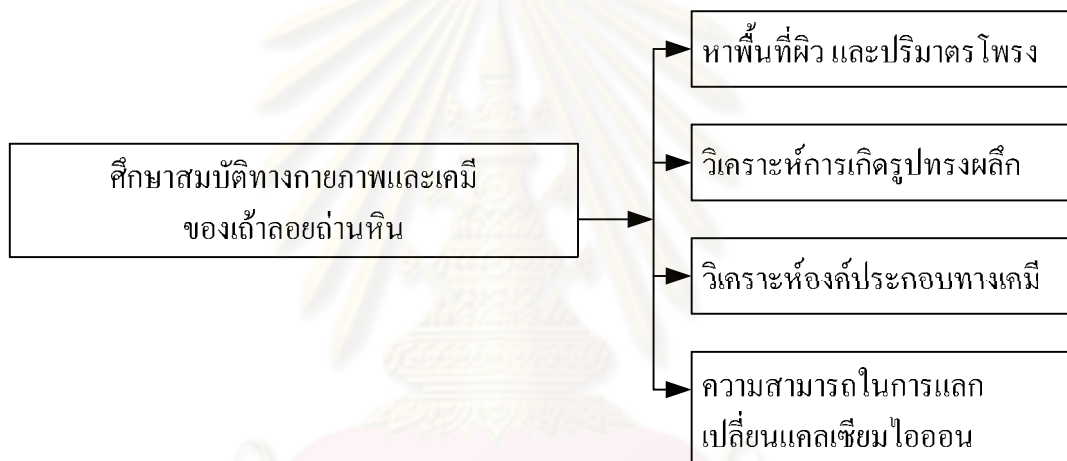
3.4.9 ประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้โดยคิดจากค่าวัตถุดิบ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า ค่าบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต และค่ากำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต (ไม่คิดค่าแรงและค่าสถานที่)



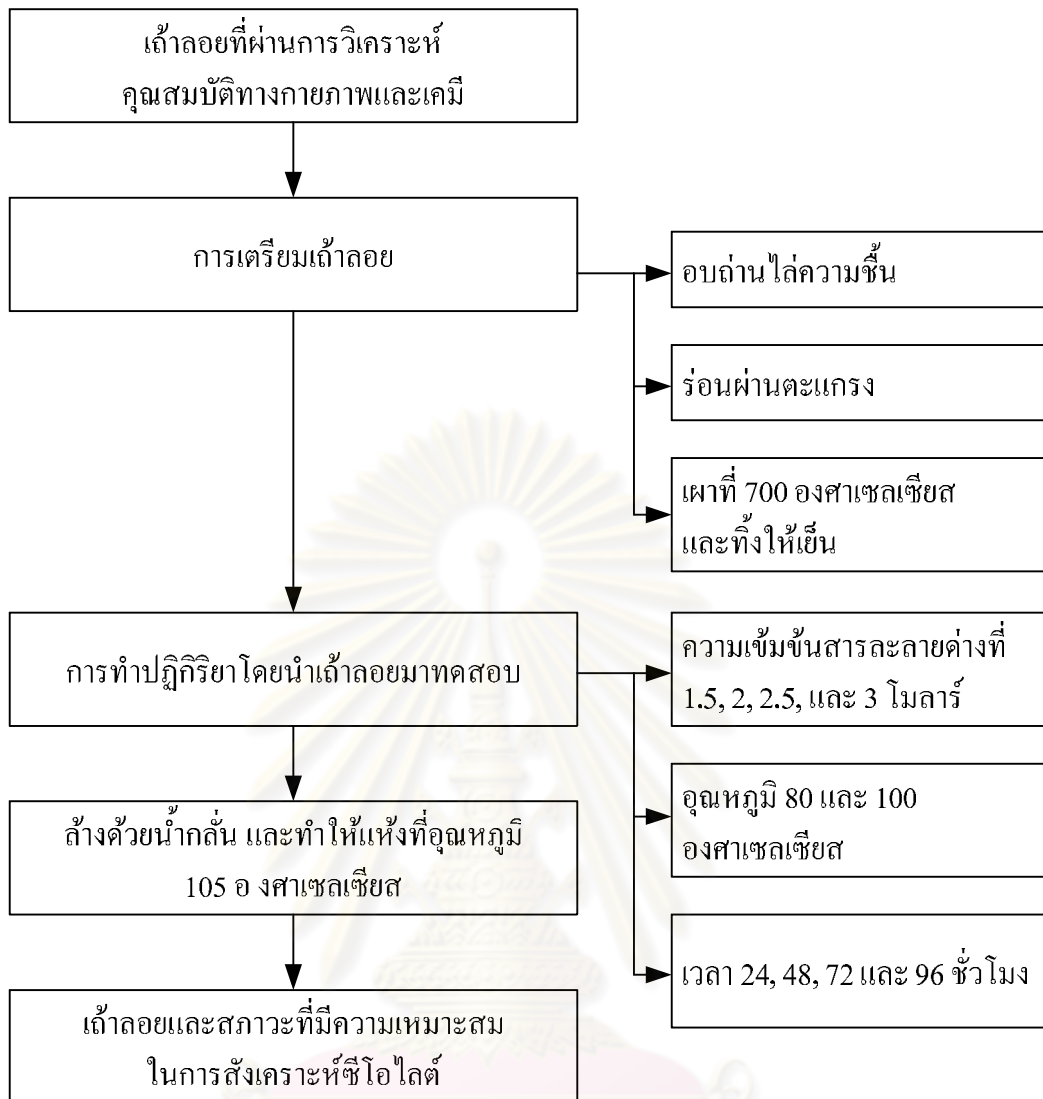
ภาพที่ 3.1 ฟังการทำวิจัย



ภาพที่ 3.2 ผังการวิจัยสมบัติของสารละลายด่าง

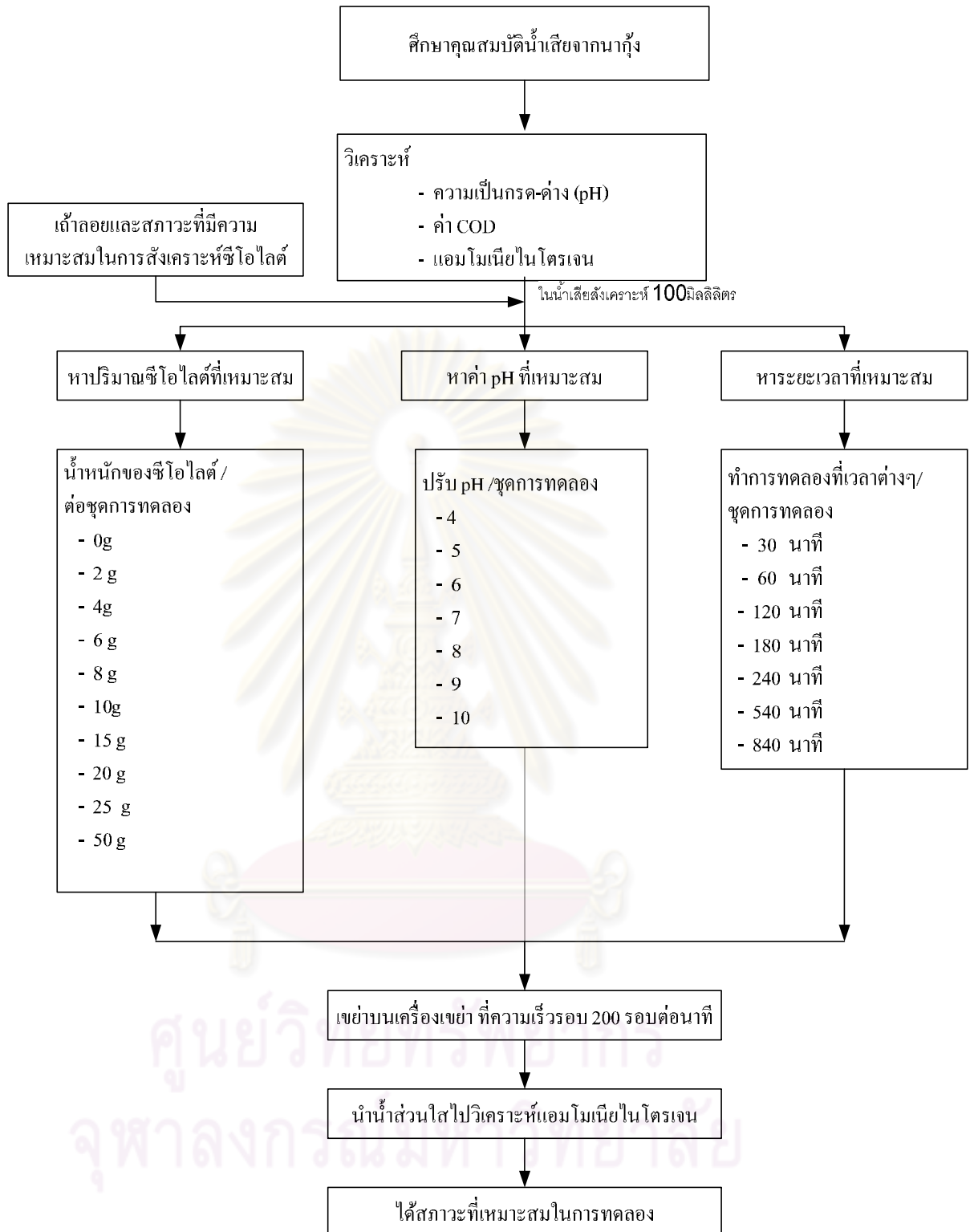


ภาพที่ 3.3 ผังการวิจัยสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน



ภาพที่ 3.4 ผังการวิจัยปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.5 ผังการวิจัย การหาสภาวะที่เหมาะสมของซีโอไลต์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในน้ำกุ้งโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน แบ่งเป็นส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลของการศึกษาลักษณะเบื้องต้นและสมบัติของสารละลายต่างที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline)

สารละลายต่างใช้แล้วที่ได้มาจากโรงงานรมดำโลหะอุตสาหกรรมนั้นเป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำยารมดำ SUGICUT CS-58 Y มีลักษณะเบื้องต้นจากการสังเกตเป็นดังนี้ คือ เป็นของเหลว สีเหลืองอ่อน หนืด มีกลิ่น มีเหล็กแขวนลอยและตกตะกอนผสมอยู่ ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งผลของการศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 ลักษณะของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline)

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนและค่าพีเอชของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว

วัน เดือน ปี	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (โมลาร์)	ค่าพีเอช
21 ต.ค. 2551	13.42	12.25
28 ต.ค. 2551	13.55	12.34
4 พ.ย. 2551	13.50	12.44
18พ.ย. 2551	13.52	12.46
23 ธ.ค. 2551	13.54	12.45
6 ม.ค. 2552	13.55	12.46
13 ม.ค 2552	13.55	12.46

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายต่างที่ใช้แล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.51 โมลาร์ ในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายต่างที่ใช้แล้วจะมีค่าเฉลี่ย 12.40

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักทั้งหมดของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้
ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณทั้งหมดเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
- As	0.02
- Cd	ND
- Cr	13.55
- Cu	0.56
- Fe	24.40
- Hg	ND
- Ni	0.51
- Pb	0.28

จากตารางที่ 4.2 สารละลายต่างที่ใช้แล้วมีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มากที่สุด คือ ปริมาณทั้งหมดเท่ากับ 24.40 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ โครเมียม มีปริมาณทั้งหมดเท่ากับ 13.55 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 ผลของการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash) เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาเผาให้ละเอียดและส่งเข้าเตาเผาที่มีอากาศเพียงพอโดยเถ้าลอยเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควันซึ่งอาจถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตหรืออาจมาจากการดักจับด้วยถุงฝุ่นกรองจะมีลักษณะเป็นผงละเอียด ร่วน เป็นสีเทาดำ ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ลักษณะของเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

1) ลักษณะรูปร่างของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ถ้ำลอยถ่านหินที่ออกจากเตาเผาใหม่ๆ จะมีสีน้ำตาลแดง แต่เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ จะมีสีน้ำตาลอ่อน ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4

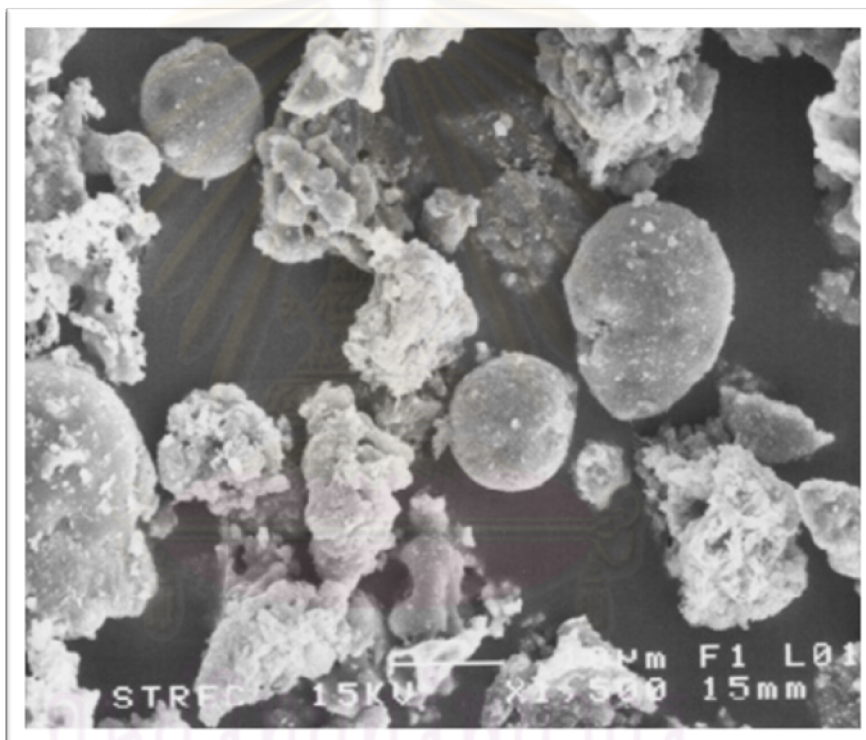


ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างถ้ำลอยถ่านหินเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

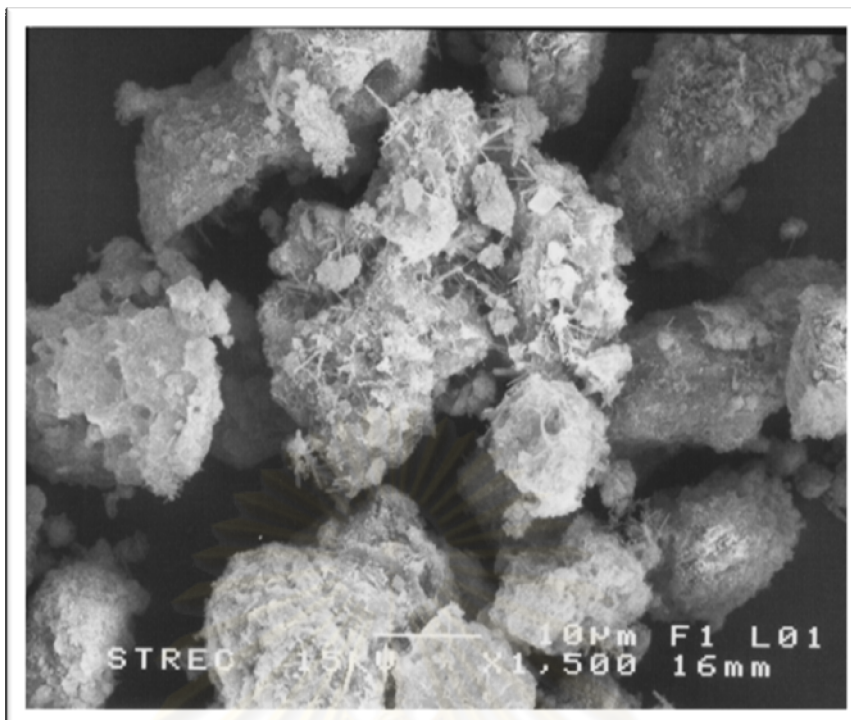


ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่า รูปร่างของถ่านหินมีลักษณะค่อนข้างกลมถึงกลม (Sub-round to round) ดังภาพที่ 4.5 ในขณะที่รูปร่างของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากถ่านหิน โดยรูปร่างมีลักษณะไม่เป็นทรงกลม พื้นที่ผิวมีความพรุนมากขึ้นและพบว่ามีผลึกของซีโอไลต์เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.6



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาพที่ 4.5 พื้นที่ผิวของถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500



ภาพที่ 4.6 พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า

4.2.2 ผลการหาพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของเถ้าลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Surface Area) และปริมาตรโพรง (Pore Volume) ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยเครื่อง Specific Surface Area Analysis ด้วยวิธี BET (Brunance-Emmett-Teller) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวและค่าเฉลี่ยปริมาตรโพรงของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ชนิดของตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ค่าเฉลี่ยปริมาตร โพรง (ลบ.ซม./ กรัม)
ถ้ำลอยถ่านหิน	16.94	0.0083
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน	56.67	0.0284

จากตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่สภาวะ เฝ้าอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยสารละลายด่างที่ ความเข้มข้น 3 โมลาร์เป็นระยะเวลา 3 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.94 และ 56.67 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

สำหรับปริมาตรโพรงของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 0.0083 และ 0.0284 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

พื้นที่ผิวและปริมาตร โพรงเป็นลักษณะทางกายภาพที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ โดยซีโอไลต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงมากจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับดีกว่า จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงมากกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ดังนั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ้ำลอยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

4.2.3 สมบัติทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ทำได้โดยนำถ้ำลอยถ่านหินประมาณ 1 กิโลกรัม มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้ำลอยที่ผ่านการอบแล้วไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช และขนาด 325 เมช ตามลำดับ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีเทา

ค่าเป็นสีน้ำตาลแดง จากนั้นนำเถ้าลอยที่ผ่านการเผาแล้วมาผสมกับสารละลายต่าง ๆ จากกระบวนการรมด้าโลหะ (Spent alkaline) ที่ความเข้มข้น 1.5, 2, 2.5 และ 3 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลาย Spent alkaline เท่ากับ 1:8 นำไปให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 80 และ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 1, 2, 3 และ 4 วัน โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีสีอ่อนลงกว่าเถ้าลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น เมื่อได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ทุกสภาวะแล้ว จึงนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) เพื่อเลือกสภาวะที่ดีที่สุดมาทำการทดลองในขั้นต่อไป

1) ผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ

ผลการหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่างๆที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมด้าโลหะ (Spent alkaline) ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC เฉลี่ยของเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline (cmol/kg zeolite)
ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	
1.5	80	1	425.91
		2	429.14
		3	439.34
		4	440.65

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC เหลือของถ้ำลอยถ่านหินที่ถูก กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline (cmol/kg zeolite)
ความเข้มข้น ของสารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	
2.0	80	1	424.78
		2	429.29
		3	438.60
		4	443.45
2.5	80	1	420.86
		2	427.88
		3	443.87
		4	445.08
3.0	80	1	421.63
		2	434.87
		3	450.20
		4	470.75
1.5	100	1	421.73
		2	423.35
		3	430.35
		4	437.76
2.0	100	1	426.63
		2	426.65
		3	435.70
		4	440.38

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC เหลือของถ้ำลอยถ่านหินที่ถูก กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline (cmol/kg zeolite)
ความเข้มข้น ของสารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	
2.5	100	1	426.63
		2	426.68
		3	430.15
		4	433.73
3.0	100	1	433.80
		2	439.43
		3	457.79
		4	427.67

จากตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบเวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายต่าง
 เก่าที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยาพบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซี
 โอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ซึ่ง
 เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุด คือ 4 วัน
 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถใน
 การแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
 ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างเก่าที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ พบว่า ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์
 ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสภาวะที่
 เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline
 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศา
 เซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะให้ค่า
 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุด คือ 470.75 cmol/kg

ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ คือ 3 โม
 ลาร์ เนื่องจากให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ซึ่งความเข้มข้นของสารละลาย spent

alkaline ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amrchein และคณะ (1996) และ Querol และคณะ (1997) กล่าวว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 0.5 โมลาร์ เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์มากที่สุด เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะไปย่อยสารประกอบควอตและมุลไลต์ในถ้ำลอยถ่านหินจนได้สารประกอบอะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ออกมา นอกจากนี้โซเดียมไอออน (Na^+) ยังทำให้โครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลของซิลิกาออกซิเจนเตตระไฮดรอล (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกซิเจน เตตระไฮดรอล (Al_2O_3) อยู่ในสภาพเสถียรยิ่งขึ้น

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากการนำถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่างเก่ามาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะทำให้สารละลายที่ใช้มีปริมาตรลดลงเนื่องจากกลายเป็นไอแล้วมีการระเหยออกจากขวดที่ใช้ทำปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ลดลง ซึ่งปริมาตรของสารละลายที่ใช้จะมีผลต่อซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ (Weitkamp และคณะ, 1994)

จากการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่า เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินจะเลือกเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 4 วัน เนื่องจากมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนตรี ทองคำ (2542) ที่กล่าวว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นการเกิดผลึกซีโอไลต์จะสูงตามไปด้วย เพราะโอกาสในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ้ำลอย (ควอตและมุลไลต์) ที่เป็นของแข็งอสังฐานไปเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกย่อมมีมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์สามารถสรุปได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน และ ซีโอไลต์สังเคราะห์

ชนิดของตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (cmol/kg)
ถ้ำลอยถ่านหิน	65.80
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย spent alkaline	470.75

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline ความเข้มข้น 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 470.75 cmol/kg ซึ่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินโดยกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมากกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 65.80 cmol/kg

2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

องค์ประกอบ	เถ้าลอยถ่านหิน(ร้อยละ)	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วย สารละลาย Spent alkaline (ร้อยละ)
SiO ₂	43.163	28.312
CaO	14.501	14.155
Fe ₂ O ₃	18.125	23.329
Al ₂ O ₃	13.925	12.427
Na ₂ O	1.635	16.301
K ₂ O	1.244	0.139
MgO	3.336	3.343
MnO ₂	0.28	0.303
TiO ₂	1.203	0.787
ZrO ₂	0.026	0.051
NiO	0.022	0.038
SrO	0.043	0.073
ZnO	0.026	0.058
BaO	0.123	0.113
SO ₃	2.11	0.422
P ₂ O ₅	0.239	0.150

จากตารางที่ 4.6 สารประกอบที่พบในเถ้าลอยถ่านหิน เป็นสารเริ่มต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินประกอบไปด้วย SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดเป็นซีโอไลต์ ในเถ้าลอยถ่านหินมี SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เท่ากับ ร้อยละ 43.163 ร้อยละ 13.925 ร้อยละ 18.125 และร้อยละ 14.501 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำเถ้าลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย spent alkaline ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่ผ่านการใช้งานจากกระบวนการรมดำโลหะอุตสาหกรรมจะสามารถทำให้เกิดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นมาได้

จากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline พบว่า SiO₂ และ Al₂O₃ ของเถ้าลอยถ่านหินจะลดลงเมื่อถูกสังเคราะห์เป็น

ซีโอไลต์ โดยเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ลดลง จากร้อยละ 43.163 เป็น ร้อยละ 28.312 และ จาก ร้อยละ 13.935 เป็นร้อยละ 12.427 ตามลำดับ ในขณะที่ Fe_2O_3 ของ เถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline จะเพิ่มขึ้นเมื่อเถ้าลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ จาก ร้อยละ 18.125 เป็นร้อยละ 23.329 นอกจากนี้ยังพบว่า Na_2O ของเถ้าลอยถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ทั้งที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline จาก ร้อยละ 1.635 เป็น ร้อยละ 16.301 ซึ่งเป็นผลมาจากการกระตุ้นเถ้าลอยด้วยสารละลาย spent alkaline ทำให้โซเดียมไอออน (Na^+) เข้าไปประกอบอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาออกซิเจนเตตระไฮดรอล และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระไฮดรอล ซึ่งทำให้อยู่ในสภาพที่เสถียรยิ่งขึ้น (มนตรี ทองคำ, 2542)

จากการที่อัตราส่วนของ Na_2O ในเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วย สารละลาย spent alkaline เพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline จะมีอัตราส่วนลดลงตามอัตราส่วนของ Na_2O ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของ Fe_2O_3 ใน เถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการที่สารละลาย spent alkaline มีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ปริมาณมากจึงทำให้อัตราส่วนของ Fe_2O_3 เพิ่มขึ้นเมื่อ เถ้าลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์

3) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

จากการนำเถ้าลอยถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน พบว่า ซีโอไลต์ที่สามารถตรวจพบเมื่อนำเถ้าลอยถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ Zeolite P1 ซึ่งสูตรทั่วไปของซีโอไลต์คือ $[\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}]12\text{H}_2\text{O}$ และพบสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันโตมิเตอร์ แสดงในภาคผนวก จ) และเมื่อนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP atomic emission spectrometry (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP atomic emission spectrometry แสดงในภาคผนวก จ) พบว่ามีปริมาณเหล็กมากที่สุด คือ ปริมาณ 2110 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ นิกเกิล คือ ปริมาณ 2.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณโลหะหนักที่พบในซีโอไลต์นั้น ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ที่กฎหมายได้กำหนดไว้ (รายละเอียด มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมแสดงในภาคผนวก ข) ปริมาณโลหะหนักที่พบ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยปริมาณ โลหะหนักทั้งหมดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้
ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณทั้งหมดเฉลี่ย(มิลลิกรัมต่อลิตร)
- As	< 0.05
- Cr	1.18
- Cu	0.84
- Fe	2110
- Ni	2.25
- Pb	0.23

4.3 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) ซึ่งจะพิจารณาการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจน 2 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นหลัก การทดลองจะแบ่งเป็น การหาปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสม การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม และการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

4.3.1 การหาปริมาณที่เหมาะสมของซีโอไลต์สังเคราะห์

จากการทดลองนำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0,2,4,6,8,10,15,20,25 และ 50 กรัม ตามลำดับ จากนั้นนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียในโตรเจนที่เหลือ

ผลการทดลองพบว่า ปริมาณซีโอไลต์ปริมาณต่างๆคือ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 และ 50 กรัม ตามลำดับ สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนมี

ประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนที่เฉลี่ยร้อยละ 0, 10.50, 20.45, 29.00, 37.95, 47.40, 53.50, 67.00, 82.00 และ 82.95 ตามลำดับ ดังในตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.7 โดยซีโอไลต์ที่มีปริมาณมากจะมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนดีกว่าซีโอไลต์ปริมาณน้อย และซีโอไลต์ปริมาณ 25 กรัม จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีที่สุด

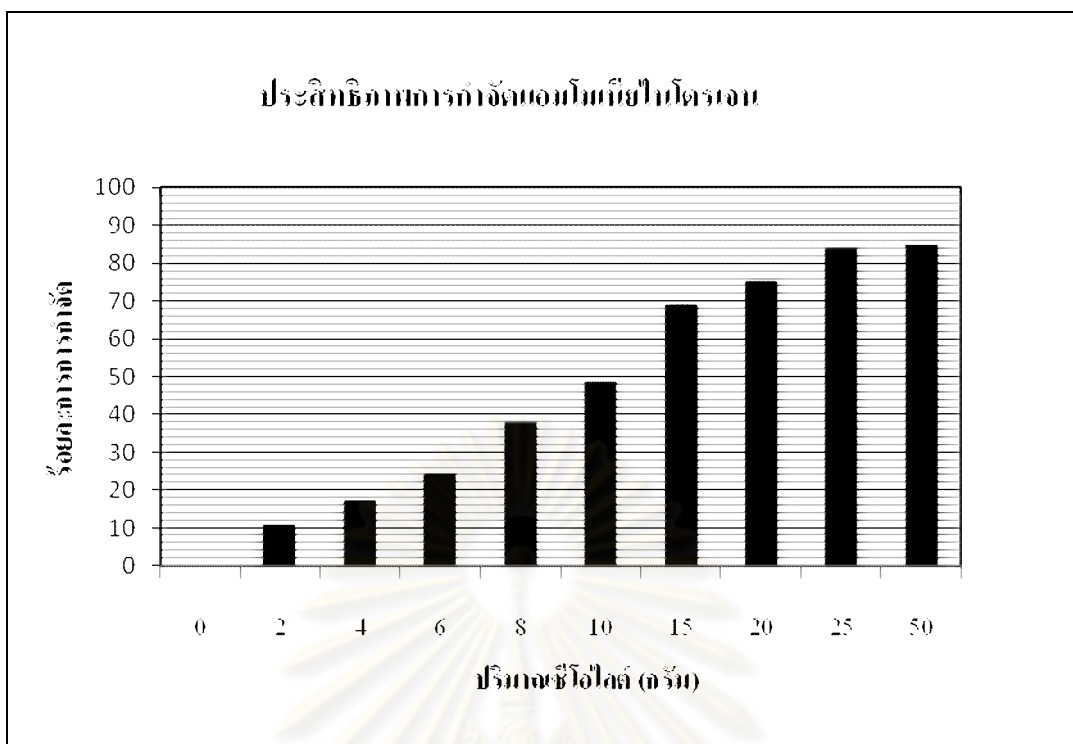
จากการทดลองชี้ให้เห็นว่า ซีโอไลต์ปริมาณมากมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนดีกว่า ซีโอไลต์ปริมาณน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ วิทยา (2544) ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติคือ clinoptilolite เพื่อการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุและกระบวนการดูดซับ ความเร็วรอบในการกวน 90 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้ 10 -150 กรัม และใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 300 มิลลิกรัมต่อลิตร. ผลการศึกษาพบว่าปริมาณ clinoptilolite 120 กรัม/ลิตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการลดแอมโมเนียในโตรเจนได้ร้อยละ 91.48 ทั้งนี้วิเคราะห์ว่า การใช้ซีโอไลต์ปริมาณมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนไอออนมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนได้ดี แต่ในการใช้งานจริงจำเป็นต้องใช้ซีโอไลต์ในปริมาณที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเสียเนื่องจาก ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้จะมีจุดสิ้นสุดที่ปริมาณซีโอไลต์ระดับหนึ่งและการใช้ซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นอีกต่อไป ดังนั้นถ้าหากมีการใช้ซีโอไลต์ในปริมาณที่เกินจำเป็น จะเป็นการสิ้นเปลืองสารแลกเปลี่ยนไอออน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละการกำจัดของแอมโมเนียไนโตรเจนหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไซด์ที่
สังเคราะห์ได้ที่ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณซีโอไซด์ (กรัม)	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่ เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ร้อยละการ กำจัด
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	6	6	2	2	2	2	0
2	6	7.70	1.787	1.792	1.793	1.790	10.50
4	6	7.73	1.592	1.588	1.594	1.591	20.45
6	6	7.75	1.419	1.423	1.420	1.420	29.00
8	6	7.87	1.241	1.239	1.243	1.241	37.95
10	6	7.90	1.052	1.050	1.055	1.052	47.40
15	6	8.04	0.930	0.927	0.933	0.930	53.50
20	6	8.21	0.657	0.664	0.661	0.660	67.00
25	6	8.24	0.361	0.358	0.362	0.360	82.00
50	6	8.99	0.339	0.343	0.343	0.341	82.95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้กับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

4.3.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

โดยการทดลองนี้จะนำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 4-10 เดิมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสมคือ 25 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่ 4.3.1 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลือ

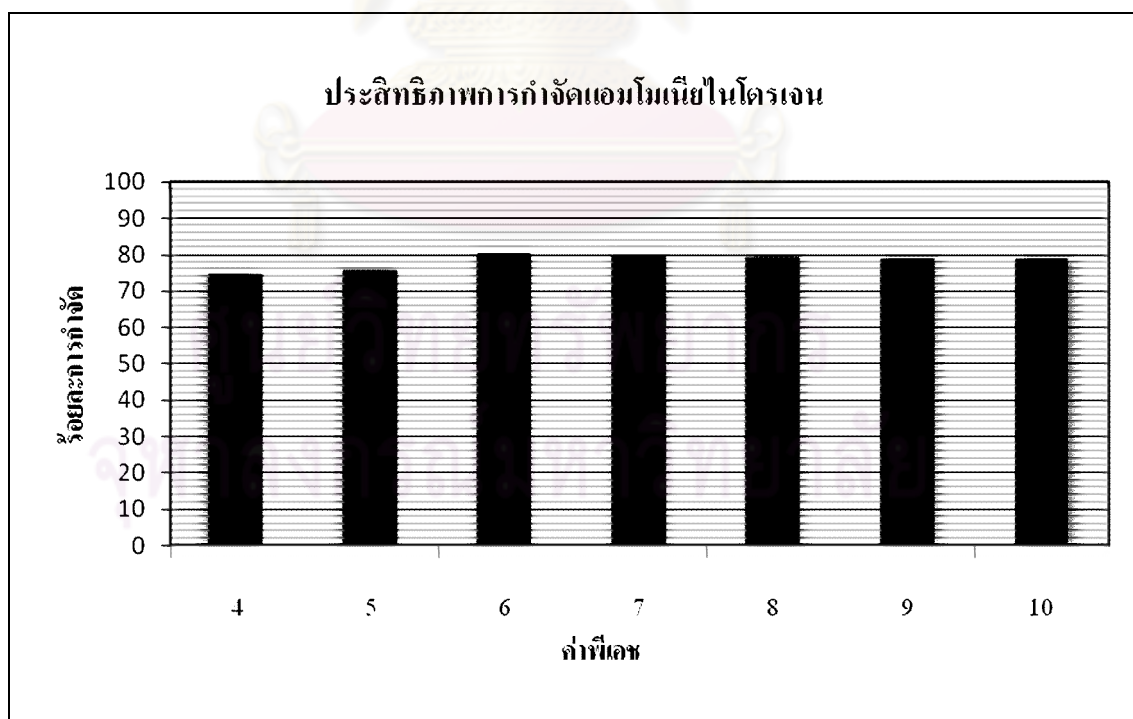
ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอช ที่ 4.0 ,5.0, 6.0, 7.0, 8.0 ,9.0 และ 10.0 สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนที่เฉลี่ยร้อยละ 74.30, 75.15, 79.90, 79.20, 78.75, 78.60 และ 78.30 ตามลำดับ ดังในตารางที่ 4.9 และ ภาพที่ 4.8 โดยน้ำเสียที่มีค่า พีเอช 6.0 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดีที่สุด ขณะที่น้ำเสียที่มีค่า พีเอช 4.0 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้น้อยที่สุด จากการทดลองชี้ให้เห็นว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 6.0 – 8.0 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่าพีเอชที่ 4.0 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Aiyuk.S และคณะ (2004) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจะ

ลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอช การแลกเปลี่ยนไอออนจะค่อยๆ หยุดเมื่อ พีเอชเป็นกรดอ่อนๆ คือต่ำกว่า 6 - 7 และผลการทดลองของสุชาติ (2546) พบว่า พีเอช อยู่ในช่วง 7 - 8 เป็นพีเอช ที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟ รวมทั้งผลการทดลองของวิทยา (2544) ได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติคือ clinoptilolite เพื่อการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุและกระบวนการดูดซับ ผลการศึกษาพบว่า พีเอช ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของ clinoptilolite คือ 3.0 - 8.0 โดยที่ พีเอช 6 และ 7 สามารถลดแอมโมเนียในโตรเจนได้ดีที่สุด คือเท่ากับร้อยละ 91.48 และร้อยละ 93.48 ตามลำดับโดยปกติ แอมโมเนียที่มีอยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ (NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เมื่อน้ำมี พีเอช เป็นกลาง แอมโมเนียจะอยู่ในรูปไอออน NH_4^+ มากกว่า NH_3 แต่ถ้า พีเอชสูงขึ้น NH_3 จะพบมากขึ้นขณะที่ NH_4^+ จะมีน้อยลง และถ้า พีเอช มีค่าต่ำลง ไฮโดรเจนในน้ำจะสามารถทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนได้มากขึ้น (มันสินและมันรักษ์, 2545) ดังนั้นประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียในโตรเจนจากการทดลองที่เกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 6.0 - 8.0 เพราะว่าน้ำเสียที่ระดับ พีเอชดังกล่าว ยังคงมีการแตกตัวของแอมโมเนียมไอออนดี ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนไอออนประจุระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียมไอออนในน้ำเสียเกิดขึ้นได้ดีกว่าพีเอชระดับต่ำ โดยที่พีเอช ต่ำ ประจุไฮโดรเจนไอออนจะเข้ามาแย่งที่แอมโมเนียมในปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนได้ ส่งผลให้ปฏิกิริยาการกำจัดแอมโมเนียของซีโอไลต์พีเอชต่ำ มีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้น การนำซีโอไลต์มาใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนกับแอมโมเนีย จึงไม่สามารถใช้งานได้ในสภาพที่มีความเป็นกรดหรือด่างสูงมากและในการพิจารณาเลือกกระดับ พีเอชสำหรับใช้งาน จึงควรเลือกที่ช่วงพีเอช 6.0 - 8.0 ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลทำให้ซีโอไลต์สามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้มากที่สุด และเป็นช่วงพีเอชที่ใกล้เคียงกับสภาวะน้ำเสียจริง ซึ่งจะช่วยลดการสิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับพีเอชของน้ำเสีย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ค่าร้อยละการกำจัดของแอมโมเนียไนโตรเจนหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ปริมาณซีโอไลต์ (กรัม)	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่ เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ร้อยละการ กำจัด
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
25	4	7.08	0.503	0.500	0.540	0.514	74.30
25	5	7.60	0.500	0.497	0.494	0.497	75.15
25	6	8.10	0.412	0.389	0.405	0.402	79.90
25	7	8.30	0.420	0.410	0.415	0.415	79.20
25	8	8.42	0.428	0.421	0.427	0.425	78.75
25	9	8.79	0.425	0.427	0.432	0.428	78.60
25	10	8.87	0.434	0.429	0.440	0.434	78.30



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

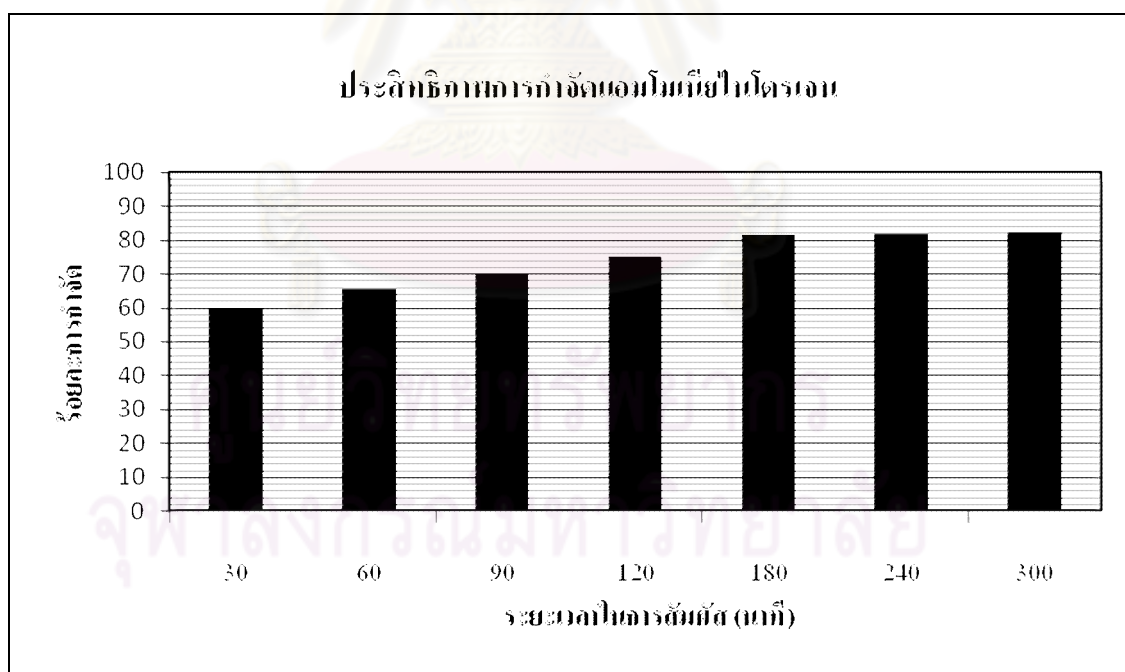
4.3.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม

โดยการทดลองนี้จะนำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอช 6.0 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.3.2 เดิมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสมคือ 25 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่ 4.3.1 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 60 90 120 180 240 และ 300 นาทีตามลำดับแล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลือ

ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาในการสัมผัส คือ 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาทีตามลำดับ สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนที่เฉลี่ยร้อยละ 59.30, 65.95, 69.80, 75.00, 81.45, 81.75 และ 82.20 ตามลำดับดังในตารางที่ 4.10 และในภาพที่ 4.9 โดยระยะเวลาในการสัมผัสนานมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนดีกว่าระยะเวลาในการสัมผัสสั้น โดยประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัส จากการทดลองชี้ให้เห็นว่า ระยะเวลาในการสัมผัสนานมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนดีกว่าระยะเวลาในการสัมผัสสั้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาที่เหมาะสม และเพียงพอขณะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารแลกเปลี่ยนไอออน (ซีโอไลต์) กับสารละลาย (น้ำเสีย) เนื่องจากในการแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นบริเวณโพรงของซีโอไลต์ การเพิ่มระยะเวลาสัมผัส เป็นการทำให้สารละลายสามารถผ่านเข้าไปยังบริเวณพื้นที่แลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างทั่วถึง และมีระยะเวลาเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่ระยะเวลาสัมผัสสั้นสารละลายไม่สามารถทำปฏิกิริยากับซีโอไลต์ได้อย่างทั่วถึง ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนจึงไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นสมบูรณ์แล้ว การเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ดังนั้น การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์กับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินวิเคราะห์ว่า จะเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ที่ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที โดยประมาณ

ตารางที่ 4.10 ค่าร้อยละการกำจัดของแอมโมเนียไนโตรเจนหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

ระยะเวลาสัมผัส	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสุดท้าย	ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ร้อยละการกำจัด
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30	6	8.17	0.810	0.815	0.817	0.814	59.30
60	6	8.20	0.680	0.683	0.680	0.681	65.95
90	6	8.22	0.604	0.600	0.610	0.604	69.80
120	6	8.21	0.505	0.497	0.499	0.500	75.00
180	6	8.20	0.374	0.370	0.370	0.371	81.45
240	6	8.23	0.368	0.365	0.363	0.365	81.75
300	6	8.27	0.353	0.357	0.356	0.356	82.20



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาในการสัมผัสกับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

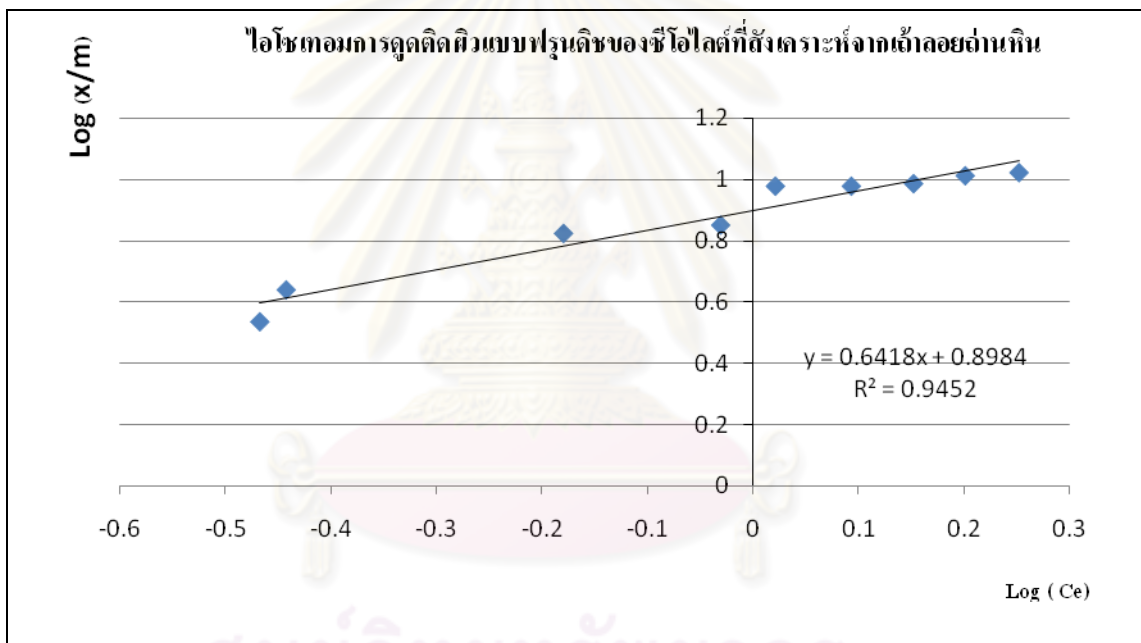
4.4 ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหิน น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใส่ที่ พีเอช เท่ากับ 6 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.3.2 ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์อยู่ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 และ 50 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 ต่อนาที เป็นเวลา 180 นาทีซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.3.3 จากนั้นนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนไปวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียในโตรเจน และทำการทดสอบไอโซเทอม ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.11

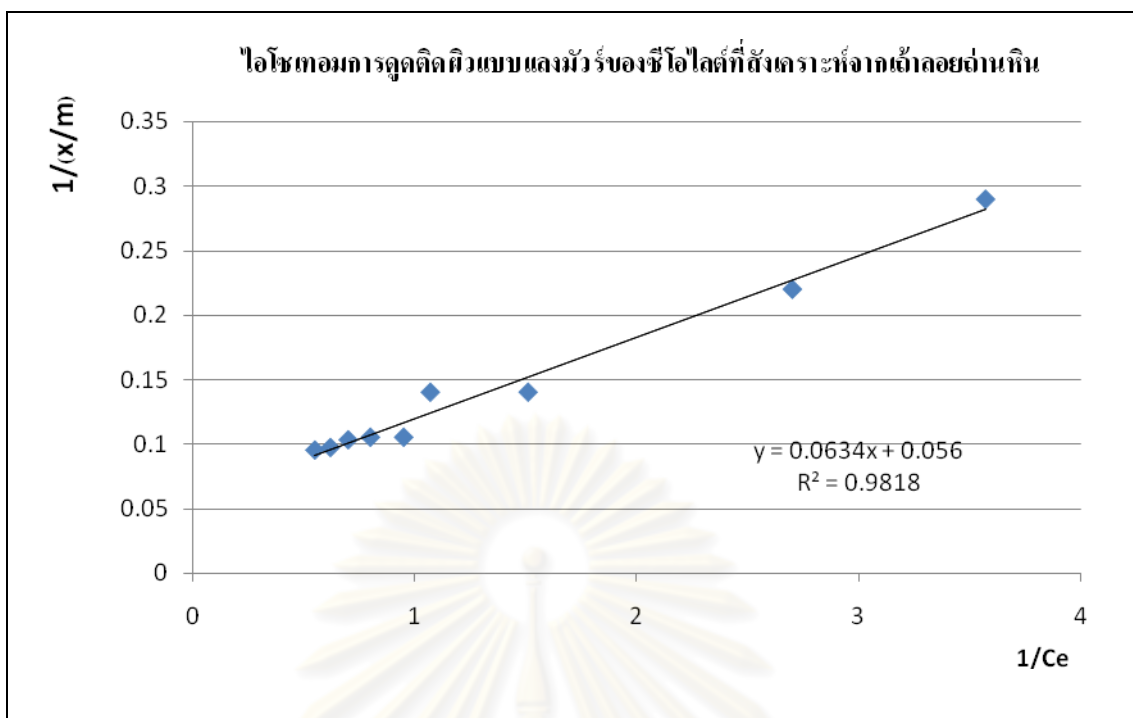
ตารางที่ 4.11 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

C_0	x	x/m	1/(x/m)	C_e	1/ C_e	Log(x/m)	Log (C_e)
2	0.21	10.52	0.095	1.79	0.55	1.022	0.252
2	0.41	10.30	0.097	1.59	0.62	1.012	0.201
2	0.58	9.70	0.103	1.42	0.7	0.986	0.152
2	0.76	9.52	0.105	1.24	0.8	0.978	0.093
2	0.95	9.51	0.105	1.05	0.95	0.978	0.021
2	1.07	7.14	0.140	0.93	1.07	0.851	-0.031
2	1.33	6.67	0.140	0.66	1.51	0.824	-0.180
2	1.64	4.37	0.228	0.36	2.78	0.640	-0.443
2	1.72	3.44	0.290	0.34	3.57	0.536	-0.468

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.11 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งสมการที่นิยมใช้ในการอธิบายไอโซเทอมการดูดซับมีอยู่หลายสมการ แต่ในการศึกษานี้จะใช้สมการของ ฟรอนดลิชและแลงมัวร์มาอธิบายการดูดซับ เป็นการทดสอบไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชและแลงมัวร์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถวิเคราะห์หาค่า R^2 (Coefficient of Determination) ของแต่ละไอโซเทอมสำหรับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้สำหรับสมการฟรอนดลิช คือ 0.9452 และสมการแลงมัวร์ คือ 0.9818 ค่า R^2 ของสมการแลงมัวร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ สอดคล้องกับสมการดูดซับแบบแลงมัวร์ มากกว่าฟรอนดลิช จึงเลือกสมการของแลงมัวร์มาอธิบาย ได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.10-4.11



ภาพที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้



ภาพที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

จากสมการของแลงมัวร์ $X = X_m b C_e / (1 + b C_e)$

จากภาพที่ 4.11 ความชันของเส้นตรงเท่ากับ $1/X_m = 0.0634$

จุดตัดแกน 1/X เท่ากับ $1/X_m b = 0.056$

$$b = 0.88$$

$$X = 15.71 C_e / (1 + 0.88 C_e)$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของ แอมโมเนียในโตรเจนเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความหนาแน่นการดูดติดผิวสูงสุด X_{max} ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินจากสมการของแลงมัวร์

ซีโอไลต์	$1/X_m$	b	X_m (mg/g)
ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน	0.056	0.88	11.38

จากตารางที่ 4.12 พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัมสามารถดูดซับแอมโมเนียในโตรเจนได้เท่ากับ 11.38 มิลลิกรัม

4.5 ผลการศึกษาสมบัติของน้ำเสียจากนาุ้งและผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจริงจากนาุ้ง

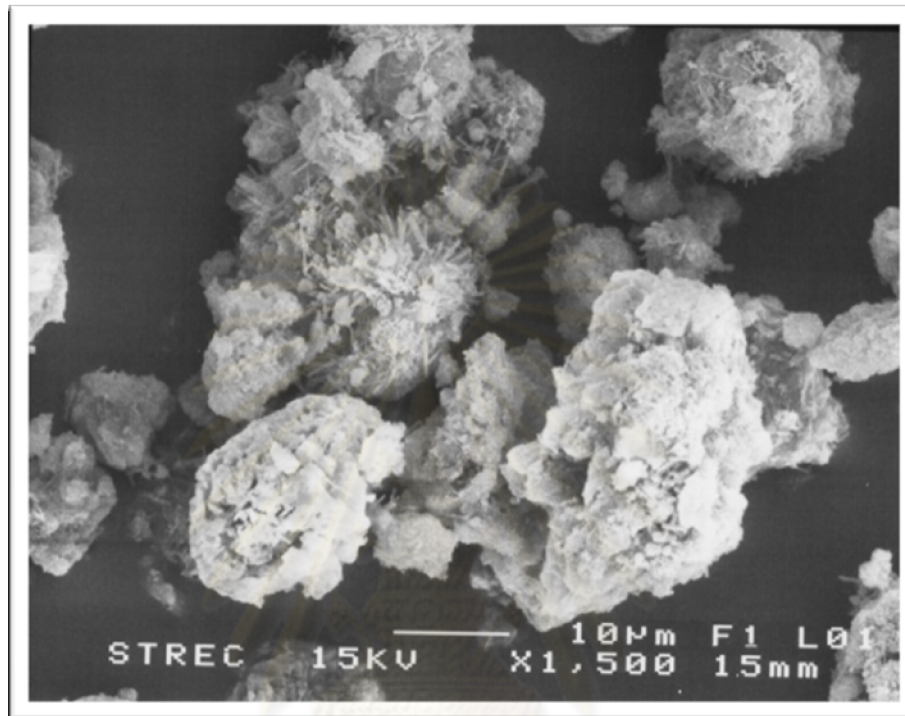
ตัวอย่างน้ำเสียจริงที่ใช้ในการศึกษา เป็นน้ำเสียจากนาุ้งแห่งหนึ่งในจังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งมีค่าพีเอช เท่ากับ 6.30 และค่าซีโอดี 112.80 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าแอมโมเนียในโตรเจน เท่ากับ 1.43 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสภาวะที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพจะใช้สภาวะต่างๆที่ได้ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

พีเอช ก่อน เขย่า	ค่าซีโอดี ก่อนบำบัด (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	พีเอช หลังเขย่า	ค่าซีโอดีหลัง บำบัด (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ในโตรเจนเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละ การกำจัด
				ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง	
6.30	112.80	8.20	58.38	1.43	0.361	74.87

จากการศึกษาที่ได้พบว่าการดูดซับแอมโมเนียในโตรเจนของน้ำเสียจริงจากนาุ้ง นั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินเท่ากับร้อยละ 74.87 ค่าซีโอดี หลังบำบัด เท่ากับ 58.38 ค่าพีเอช หลังบำบัดเท่ากับ 8.20 และเมื่อนำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการดูดซับผิวอนุภาคของแอมโมเนียในโตรเจนไปวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่า

พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการบำบัดน้ำเสียเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยพื้นที่ผิวที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์จะถูกปิดจากอนุภาคของแอมโมเนียในโตรเจนแสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการดูดซับน้ำเสีย เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า

4.6 ผลการประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยใช้สารละลาย spent alkaline

การผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 3,000 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เตาอบและเตาเผาสามารถรองรับได้ในการอบและการเผา

ค่าใช้จ่ายในการผลิตประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบ และค่าไฟฟ้า

1) ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

- เถ้าลอยถ่านหินที่นำมาใช้ในการผลิตไม่เสียค่าใช้จ่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า

- สารละลาย spent alkaline ที่นำมาใช้ในการผลิตไม่เสียค่าใช้จ่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะอุตสาหกรรม

- น้ำกลั่นที่ใช้ ราคาเฉลี่ย 2 บาท ใช้ในการเจือจางสารละลาย spent alkaline ในการผลิตซีโอไลต์ 3000 กรัม ใช้น้ำกลั่นประมาณ 40 ลิตร คิดเป็นราคาค่าใช้จ่าย 80 บาท
- น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตประมาณ 40 ลิตร ใช้กรด H_2SO_4 ปรับให้สภาพเป็นกลางก่อนนำไปทิ้ง โดยที่ ค่ากรด ที่ใช้ในการเจือจางน้ำที่ 40 ลิตร คิดเป็นเงิน 0.06 บาท และค่าธรรมเนียมในการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร ของสถานศึกษา (สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) มีค่าเท่ากับ 2 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าธรรมเนียมในการบำบัดน้ำเสีย 40 ลิตรคิดเป็น 0.08 บาท สรุปค่าบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดคิดเป็นค่าใช้จ่าย 0.14 บาท

2) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบถ้ำลอยถ่านหิน

การอบถ้ำลอยถ่านหิน จะทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้ตู้อบยี่ห้อ WTB Binding Germany ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าของตู้อบเป็น 2,200 วัตต์ หรือ 2.20 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.3576 คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร (การไฟฟ้านครหลวง, 2543) และจะทำการอบซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง รวมเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบ คือ 6 ชั่วโมง คำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

ค่าใช้จ่ายในการอบ

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW} \times \text{H} \times 1.3576 \\
 &= 2.2 \times 6 \times 1.3576 \\
 &= 17.92 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

3) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเผาถ้ำลอยถ่านหิน

การเผาถ้ำลอยถ่านหิน จะทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้เตาเผาชื่อ Valeam box furnace รุ่น 3-1750.USA ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าของเตาเผาเป็น 3,520 วัตต์ หรือ 3.52 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.3576 คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร (การไฟฟ้านครหลวง, 2543) คำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

ค่าใช้จ่ายในการเผา

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW} \times \text{H} \times 1.3576 \\
 &= 3.52 \times 3 \times 1.3576 \\
 &= 14.33 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

4) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline เพื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์

ใช้ Heating Water bath ยี่ห้อ Memmert รุ่น model WB 7/14/22/29/45 ซึ่งเครื่องมีกำลังไฟฟ้า 2,000 วัตต์ หรือ 2.0 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.3576 คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับส่วนราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร (การไฟฟ้านครหลวง, 2543) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน (96 ชั่วโมง) คำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

ค่าใช้จ่ายในการทำปฏิกิริยา

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW} \times \text{H} \times 1.3576 \\ &= 2.0 \times 96 \times 1.3576 \\ &= 260.65 \text{ บาท} \end{aligned}$$

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 3,000 กรัม ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีค่าเท่ากับ $80 + 0.14 + 17.92 + 14.33 + 260.65 = 373.04$ บาท

ดังนั้นการผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน 1,000 กรัม มีค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตเท่ากับ 124.35 บาท ซึ่งยังไม่รวมค่าแรง ค่าเดินทาง และจากราคาซีโอไลต์ เกรดการค้าที่ขายกันทั่วไปนั้น มีราคากิโลกรัมละ 70 บาท แต่การผลิตซีโอไลต์ครั้งนี้ ใช้ค่าใช้จ่ายถึง 124.35 บาท ซึ่งการผลิตซีโอไลต์เองจะมีค่าใช้จ่ายสูง เพราะการผลิตซีโอไลต์ในครั้งนี้ เป็นการผลิตในระดับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการจึงใช้ต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการกำจัดแอมโมเนียในน้ำกุ้งโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline คือ ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุด คือ 470.75 cmol/kg ซึ่งค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนซีเอ็มไอออนที่ได้ มีค่ามากกว่า ซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติคือ ซีโอไลต์ชนิด Clinoptiolite ถึง 3 เท่า (Clinoptiolite มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนประมาณ 150 cmol/kg) และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมากกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 65.80 cmol/kg และ ชนิดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline คือ Zeolite P1

5.1.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน ในน้ำเสียน้ำเสีย

โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

5.1.2.1 การหาปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสม

ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียน้ำเสียคือ 25 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ ร้อยละ 82.00

5.1.2.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ที่พีเอชน้ำเสียน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 6 เป็นพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจน โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ 25 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนได้ ร้อยละ 79.90

5.1.2.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม

ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียในนาุ้งที่ปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ 25 กรัม คือ 180 นาที ซึ่งสามารถกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนร้อยละ 81.45

5.1.3 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่สภาวะที่เหมาะสม คือ พีเอชน้ำเสียดังเคราะห์เริ่มต้นเท่ากับ 6 เวลาในการสัมผัส 180 นาที พบว่า ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์มีค่า R^2 มากกว่าสมการแบบฟรุนคลิช ดังนั้น ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์จึงเหมาะที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนมากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนคลิช โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน 1 กรัมสามารถดูดติดผิวแอมโมเนียในโตรเจนได้เท่ากับ 11.38 มิลลิกรัม

5.1.4 การศึกษาสมบัติของน้ำเสียดังเคราะห์จากนาุ้งและการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียดังเคราะห์จากนาุ้ง

จากการทดสอบคุณสมบัติของน้ำเสียดังเคราะห์จากนาุ้งพบว่า ค่า พีเอช เท่ากับ 6.3 และค่าซีโอดี เท่ากับ 112.80 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าแอมโมเนียในโตรเจน เท่ากับ 1.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินหลังการดูดซับ เท่ากับร้อยละ 74.87 ค่าซีโอดี หลังบำบัด เท่ากับ 58.38 มิลลิกรัมต่อลิตรและ ค่าพีเอชหลังบำบัด เท่ากับ 8.20

5.1.5 การประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 1,000 กรัม ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีค่าเท่ากับ 124.35 บาท ซึ่งเป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

5.2.1 ควรมีการศึกษาการนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาใช้กำจัด แอมโมเนียในน้ำเสียดังเคราะห์ในระบบต่อเนื่อง โดยซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วและตกเป็นเลนตะกอน สามารถนำไปทำเป็นปุ๋ยได้

5.2.2 ควรมีการศึกษาการนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบของเสียอันตรายและการลดค่าซีโอดีด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- การไฟฟ้านครหลวง. 2543. อัตราค่าไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท.).
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2538. ถ้ำลอยลิกไนต์. วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 47 (ตุลาคม): 224-236.
- เกษม ไตรหิรัญ. 2544. การขจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สถ่านหินโดยการออกซิไดส์เชิงเร่งปฏิกิริยาบนซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คงศักดิ์ วัฒนวงศ์พิทักษ์. 2543. การแยกไซลีนไอโซเมอร์ผสมโดยการดูดซับบนซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ควบคุมมลพิษ,กรม 2550. มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_soil01.html#s2 [2552,เมษายน25]
- จัดการคุณภาพน้ำ,สำนักงาน 2550. การจัดเก็บค่าธรรมเนียมบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://dds.bma.go.th/News_dds/information/Sum_charge.htm [2552, มีนาคม 10]
- จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. 2547. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยซันอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จำรัส ลิมตระกูล. 2540. เคมีของซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์ 51 (พฤศจิกายน-ธันวาคม): 420-423.
- ��ชวาล ฉัตรรัตนนันท. 2549. การสังเคราะห์และลักษณะสมบัติของซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินสำหรับการกำจัดซัลเฟอร์ของเชื้อเพลิงเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2526. จีถ้ำลอยกับงานอุตสาหกรรมในประโยชน์ของกากของเสียจากโรงงานไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- ประรัชกรณ สาทิตคุณ. 2546. การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสีอ็อกโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- พรเลิศ จันทร์รัชชกุล และ ชะลอ ลี้มสุวรรณ. 2549. การจัดการคุณภาพน้ำและบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ [ออนไลน์]. รายงานวิจัยสถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง แหล่งที่มา : http://www.thailandshrimp.com/op_doc.html [2551, สิงหาคม 9]
- มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศน์ และ มันรัช ตันกุลเวศน์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- เลิศ รักสันติชาติ. 2545. การฟื้นฟูซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ที่ใช้แล้วสำหรับการดูดซับเอทีลินไกลคอลล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชาญ ภูพัฒน์. 2526. การใช้เถ้าลอยในงานผลิตปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์. กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- วิทยา เทียมสุข. 2544. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วิภาณุ บุญเจริญสุข. 2537. รายงานปัญหาพิเศษเรื่องซีโอไลต์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีรพงษ์ นามโท. 2543. การผลิตซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเถ้าลอยของถ่านหินลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุชาดา ขางเอน. 2546. การกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัญญาถ สิทธารยัน และสมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สายฝน หาญโยธี. 2547. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 บริสุทธิ์สูงจากเถ้าลอยของลิกไนต์และชิลิกาจากเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล. 2549. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยเพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนิรุทธ์ ชงชัย. 2528. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยในงานวิศวกรรม. ใน เอกสารการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 3 เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบท. ขอนแก่น: (ม.ป.ท.).

อารักษ์ ดำรงสัตย์. 2546. การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยซีโอไลต์และทรายไม่ัดขนาด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาษาอังกฤษ

Ames, L.L. 1976. Zeolite removal of ammonium ions from agricultural and other wastewater Proc. Pacific Industrial Waste Conf Washington St. University: 159-163

Amrhein, C., Haghnia, G. H., Kim, T. S., Morher, P. A., Amanios T., and Delta, T. L. 1996. Synthesis and properties of zeolites from coal fly ash. Environmental Science & Technology 30: 735-742.

Aiyuk, S. H.XU, A.Van Haandel and W. Verstrate. 2004. Removal of Ammonium Nitrogen from Pretreated Domestic Sewage using A Natural Ion Exchanger. Environmental Technology. 25: 1321-1330.

Baerlocher, Ch., Meier, W. M., and Olson, D.H. 2001. Atlas of Zeolite Framework Types : Elsevier Science.

Boyd, C.E. 1982. Water Quality Management For Pond Fish Culture: Elsevier Science.

Breck, D. W. 1974. Zeolite molecular sieve : Structure, chemistry, and use: John Wiley & Sons.

Dyer, A. 1988. Introduction to zeolite molecular sieves : John Wiley & Sons.

Eckenfelder, W. W. 1966. Industrial water pollution control. New York: CBI Publishing.

Gaspar-Galvin, L. D. 1998. Zeolite-Supported metal oxide sorbents for hot-gas desulfurization. Ind. Eng. Chem. Res. 37: 4157-4166.

Hargreaves, J.A. 1998. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. Aquaculture. 166: 181-212.

Kikuchi, R. 1999. Application of coal ash to environmental improvement: Transformation into zeolite, potassium fertilizer, and FGD absorbent. Resources Conservation and Recycling 27: 333-346.

Lin, F. C., Lo, S. S., Lin, Y. H., and Lee, Y. 1998. Stabilization of cadmium contaminated soils using synthesized zeolite. Journal of Hazardous Materials 60: 217-226.

- Lin, S. Y., Al-Shawabkeh, A., Horio, M., Matsuda, H., and Hasatani, M. 1995. Reaction of hydrogen sulfide with limestone particle. Coal Science and Technology 24 : 1891-1894.
- Luna, Y., Otal, E., Vilches, L. F., Vale, J., Querol, X., and Fernandez Pereira, C. 2006. Use of zeolitised coal fly ash for landfill leachate treatment : A pilot plant study. Waste Management 27: 1877-1883.
- Murayama, N., Yamamoto, H., and Shibata, J. 2002. Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. International Journal Mineral Processing 64: 1-17.
- Otal, E., Vilches, F. L., Moreno, N., Querol, X., Vale, J., and Fernandez-Pereira, C. 2004. Application of zeolitised coal fly ashes to the depuration of liquid wastes. Fuel 84: 1440-1446.
- Penilla, P. R., Bustos, G. A., and Elizalde, G. S. 2006. Immobilization of Cs, Cd, Pb and Cr by synthetic zeolites from Spanish low-calcium coal fly ash. Fuel 85: 823-832.
- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, N., Alvarez-Ayuso, E., Garcia-Sanchez, A., Cama, J., Ayora, C., and Simon, M. 2006. Immobilization of heavy metal in polluted soils by the addition of zeolitic material synthesized from coal fly ash. Chemosphere 62: 171-180.
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., and Lopezsoles, A. 1997. Synthesis of Na-Zeolites From fly ash. Fuel 76: 793-799.
- Randall, D.J. and T.K.N. Tsui. Ammonia toxicity in fish. Marine Pollution Bulletin. 45: 17-23.
- Steenbruggen, G., and Hollman, G. G. 1998. The synthesis of zeolite from fry ash and the properties of the zeolite products. Journal of Geochemical Exploration 62: 305-309.
- Wang, S., Li, H., Xie, S., Liu, S., and Xu, L. 2006. Physical and chemical regeneration of zeolite absorbents for dye removal in wastewater treatment. Chemosphere 65: 82-87.
- Weitkamp, J., Karge, H. G., Pfeifer, H., and Holderich, W. 1994. Zeolites and related microporous materials: State of the art 1994. Studies in surface science and catalysis : Elsevier Science.
- Wu, D., Zhang, B., Li, C., Zhang, Z., and Kong, H. 2006. Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from fly ash as influenced by salt treatment. Journal of Colloid and Interface Science 304: 300-306.
- Young-Soo, L., Hee, T. K., and Kyong-Ok, Y. 1995. Effect of ferric oxide on the high temperature removal of hydrogen sulfide over ZnO-Fe₂O₃ mixed metal oxide sorbent. Ind. Eng. Chem. Res. 34: 1181-1188



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ร้อยละ ของแอมโมเนียที่พีเอช และอุณหภูมิของน้ำในระดับต่างๆ กัน
 ร้อยละ ของแอมโมเนียที่พีเอช และอุณหภูมิของน้ำในระดับต่างๆ กัน (Boyd (1982)
 อ้างถึงใน พรเลิศ และ ชะลอ, 2549)

พีเอช	อุณหภูมิ (°C)							
	18	20	22	24	26	28	30	32
7.0	0.34	0.40	0.46	0.52	0.60	0.70	0.81	0.95
7.2	0.54	0.63	0.72	0.82	0.95	1.10	1.27	1.51
7.4	0.86	0.99	1.14	1.30	1.50	1.73	2.00	2.36
7.6	1.35	1.56	1.79	2.05	2.35	2.72	3.13	3.69
7.8	2.12	2.45	2.80	3.21	3.68	4.24	4.88	5.72
8.0	3.32	3.83	4.37	4.99	5.71	6.55	7.52	8.77
8.2	5.16	5.94	6.76	7.68	8.75	10.00	11.41	13.22
8.4	7.94	9.09	10.30	11.65	13.20	14.98	16.96	19.46
8.6	12.03	13.68	15.40	17.28	19.42	21.83	24.45	27.68
8.8	17.82	20.08	22.38	24.88	27.64	30.68	33.90	37.76
9.0	25.57	28.47	31.37	34.42	37.71	41.23	44.84	49.02
9.2	35.25	38.69	42.01	45.41	48.96	52.65	56.30	60.38
9.4	46.32	50.00	53.45	56.86	60.33	63.79	67.12	70.72
9.6	57.77	61.31	64.54	67.63	70.67	73.63	76.39	79.29
9.8	68.43	71.53	74.25	75.81	79.25	81.57	83.68	85.85
10.0	77.46	79.92	82.05	84.00	85.82	87.52	89.05	90.58
10.2	84.48	86.32	87.87	89.27	90.56	91.75	92.80	93.84

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline โดยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (potassium hydrogen phthalate) ซึ่งเป็นสารมาตรฐานปฐมภูมิ (ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์, 2543)

วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (potassium hydrogen phthalate, KHP)

เตรียมโดยนำโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลตชนิดรีเอเจนต์เกรดไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งให้ได้น้ำหนักของสารที่แน่นอน และมีมวลอยู่ระหว่าง 2.0-2.4 กรัม นำมาละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต จากสูตร

$$\text{ความเข้มข้นของ KHP} = \frac{m}{204.23} \times \frac{1000}{100}$$

(โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)

เมื่อ m คือ มวลของ KHP เป็นกรัม

204.23 คือ มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต

2. สารละลายฟีนอล์ฟทาเลิน (phenolphthalein) เข้มข้น 0.5 กรัม ต่อ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3. เตรียมสารละลาย Spent alkaline โดยเจือจาง 1:100 ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline

1. บรรจุสารละลาย spent alkaline ที่เตรียมไว้ลงในบิวเรต บันทึกระดับของสารละลายบนสเกลก่อนการไทเทรต

2. ใช้ปิเปตขนาด 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดูดสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาเลินลงไป 2-3 หยด เขย่าสารละลายที่ได้ แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลาย spent alkaline จาก

บิวเรตจนได้สีชมพูอ่อนเกิดขึ้น บันทึกระดับของสารละลาย spent alkaline บนสเกลของบิวเรตอีกครั้ง และหาปริมาตรของสารละลาย spent alkaline ที่ใช้

3. ทำการไทเทรตซ้ำอีกครั้ง หาปริมาตรของสารละลาย spent alkaline ที่ใช้จะต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าเกินต้องทำการไทเทรตซ้ำอีกครั้ง นำปริมาตรของสารละลาย spent alkaline ที่ใกล้เคียงกันสองค่ามาหาค่าเฉลี่ย นำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline จากสูตร

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

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของ KHP (โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)
V คือ ปริมาตรของ spent alkaline ที่ใช้ในการไทเทรต (ลูกบาศก์เดซิเมตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม (มนตรี ทองคำ, 2542)

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

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

วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม (calcium exchange solution) 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์ไฮเดรต 2.938 กรัม ให้ทราบมวลที่แน่นอน ละลายด้วย
น้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเป็นกรด-เบสของ
สารละลายให้ได้ 10.0 ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก) และกรด
ไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่น
จนถึงขีดบอกระดับ
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด
1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับ
3. ไฮดรอกซีเนฟทอลลูอินดิเคเตอร์
4. สารละลายบัพเฟอร์
ละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 67.5 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติม
สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก) 570 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ่ายใส่ขวด
วัดปริมาตรขนาด 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับ
5. สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ 0.005 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ซังอดีทีเอไดโซเดียมไดไฮเดรต (disodium ethylenediaminetetraacetate dehydrate) 3.743 กรัม ให้ทราบมวลที่แน่นอน ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

สอบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอดีทีเอ โดย

ซังแคลเซียมคาร์บอเนต (ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์) ประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอนถึง 0.0001 กรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ปริมาตร 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร ใช้ปิเปตดูดสารละลายนี้ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ปริมาตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัฟเฟอร์ปริมาตร 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอดีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอดีทีเอ จากสูตร

$$\frac{\text{สารละลายมาตรฐานอดีทีเอ}}{(\text{โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร})} = \frac{m}{V \times 100.09 \times 50}$$

เมื่อ m คือ มวลของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นมิลลิกรัม
 V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. ซังตัวอย่าง 0.5 กรัม ใส่ลงในครุชชีเบลพร้อมฝา ให้ทราบมวลที่แน่นอน แล้วนำครุชชีเบลและฝาไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปิดฝาครุชชีเบล นำออกจากเตาเผา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์จนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วซัง คำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา จากสูตร

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

เมื่อ m_1 คือ มวลของตัวอย่างก่อนเผา เป็นกรัม

m2 คือ มวลของตัวอย่างหลังเผา เป็นกรัม

2. ถ่ายสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่แท่งแม่เหล็ก ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องกวนไฟฟ้า เปิดเครื่องกวนไฟฟ้าให้หมุนด้วยความเร็วเกิน 600 รอบต่อนาที เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 นาที

3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลที่แน่นอน แล้วถ่ายใส่ลงในสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม (ข้อ 2) อย่างรวดเร็วพร้อมกับจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาทันที เมื่อครบเวลา 15 นาที ใช้กระบอกฉีดยาคูดสารละลายแขวนลอย 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร กรองอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาไม่เกิน 15 วินาที ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศและกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 สารละลายที่กรองได้ต้องใส ถ้าไม่ใสให้ปฏิบัติใหม่ ตั้งแต่ ข้อ (1) จนถึงเมื่อสารละลายที่กรองได้ต้องใส

4. ใช้ปิเปตคูดสารละลายส่วนใสที่กรองได้ปริมาตร 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ปริมาตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัพเฟอร์ปริมาตร 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีเนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอิดีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน

5. ทำแบลนค์เปรียบเทียบ ถ้าปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอิดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 2 ครั้ง ต่างกันเกิน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ทำแบลนค์เปรียบเทียบใหม่

การคำนวณ

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

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอิดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอิดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลนค์ เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอิดีทีเอ เป็นโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

100.09 คือ มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต

m คือ มวลของตัวอย่าง เป็นกรัม

L คือ น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา เป็นร้อยละ

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่ใช้ก่อนนำมาวิเคราะห์ ต้องเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (ที่ปราศจากซิลิกาเจล) ที่มีภาชนะบรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปวิเคราะห์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง วิธีวิเคราะห์หาแอมโมเนียในโตรเจน

การวิเคราะห์หาแอมโมเนียในโตรเจน (สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, 2549)

1. การเก็บตัวอย่างและการรักษาตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำสำหรับนำไปวิเคราะห์หาแอมโมเนียสามารถเก็บในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก (polyethylene, polypropylene) ก็ได้ การวิเคราะห์ควรกระทำทันทีภายใน 2-3 ชั่วโมง หลังจากเก็บตัวอย่าง หรือกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วแช่เย็นไว้ซึ่งสามารถเก็บไว้ได้นาน 24 ชั่วโมง

2. น้ำยาเคมี และวิธีเตรียม

1. น้ำกลั่น de-ionized

น้ำกลั่น de-ionized ใช้สำหรับเตรียมสารละลายต่างๆ แบลงค์ และสารมาตรฐาน ควรเป็นน้ำกลั่นใหม่

2. สารละลายฟีนอล

ละลายฟีนอล (C_6H_5OH) 5 กรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % (V/V) 50 มิลลิลิตร

3. สารละลายโซเดียมไนโตรปริสไซค์

ละลายโซเดียมไนโตรปริสไซค์ ($Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$) 0.5 กรัม ในน้ำ de-ionized 100 มิลลิลิตร เก็บรักษาสารละลายนี้ในขวดแก้วสีน้ำตาล สารละลายนี้มีอายุ 1 เดือน

4. สารละลายออกซิไดซิ่ง

ละลายโซเดียมไดคโลโรไซยาเนตโรโซเดียม (sodium dichloroisocyanurate, $C_3Cl_2N_3NaO_3$) หรือโปแทสเซียมไดคโลโรไซยาเนตโรโซเดียม (potassium dichloroisocyanurate, $C_3Cl_2N_3KO_3$) ชนิดใดชนิดหนึ่ง จำนวน 1 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัม และไตรโซเดียมซิเตรทไดไฮเดรต ($Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$) 50 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 250 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีอายุ 2-3 สัปดาห์

5. น้ำทะเลเทียม

ละลายโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) เป็นกรัมตามความเค็มที่ต้องการในน้ำกลั่น 1 ลิตร

6. สารละลายมาตรฐานของแอมโมเนีย :

ละลายแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2 SO_4$) (analytical reagent grade) ที่อบแห้ง 105-110 องศาเซลเซียส นาน 1-24 ชั่วโมง 0.165 กรัม ด้วยน้ำกลั่น de-ionized แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายนี้มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 35 mg-N/L เรียกสารละลายนี้

ว่า stock standard solution เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา สารละลายนี้มีอายุการใช้งาน 6 เดือน ถึง 1 ปี

3. ขั้นตอนวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1) คุดสารละลายจาก stock standard solution มา 5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตร ด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 500 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีความเข้มข้น 0.35 mg-N/L

2) คุดสารละลายจากข้อ 1). 5, 10, 20 และ 40 มิลลิลิตร ด้วย volumetric pipette ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น หรือน้ำทะเลเทียม สารละลายนี้มีความเข้มข้น 0.035, 0.070, 0.140 และ 0.280 mg-N/L ตามลำดับ สำหรับแปลงค่าใช้น้ำกลั่นหรือน้ำทะเลเทียมให้สอดคล้องกับสารละลายมาตรฐาน

3) เติมสารละลายฟีนอล 2.5 มิลลิลิตร สารละลายออกซิไดซิง 5 มิลลิลิตร และ สารละลายโซเดียมไนโตรปริสไซค์ 2.5 มิลลิลิตร ตามลำดับ หลังจากเติมน้ำยาเคมีแต่ละชนิดเข้า ให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนานอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 24 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการ ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร จดบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ หากความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับความเข้มข้นด้วยวิธี Linear regression (ผู้วิเคราะห์อาจหา ความสัมพันธ์จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงโดยตรงก็ได้)

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ใ้ใช้ไปเปิดแบบกระเปาะคุดน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มี ฝาปิดเป็นเกลียวเพื่อป้องกันการระเหยของแอมโมเนีย

2) เติมสารละลายฟีนอล 0.5 มิลลิลิตร สารละลายออกซิไดซิง 1 มิลลิลิตร และ สารละลายโซเดียมไนโตรปริสไซค์ 0.5 มิลลิลิตร ตามลำดับ หลังจากเติมน้ำยาเคมีแต่ละชนิดเข้า ให้เข้ากัน ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 24 ชั่วโมง

3) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร

4) จดบันทึกค่าความเข้มข้นที่วัดได้ หรือนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหา ความเข้มข้นของแอมโมเนียในตัวอย่างจากกราฟมาตรฐานที่ได้เตรียมไว้ใน กรณีความเค็มของน้ำตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานแตกต่างกันเกิน 2 psu หรือส่วนในพัน ปรับแก้ค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากตัวอย่างด้วยสูตรดังต่อไปนี้

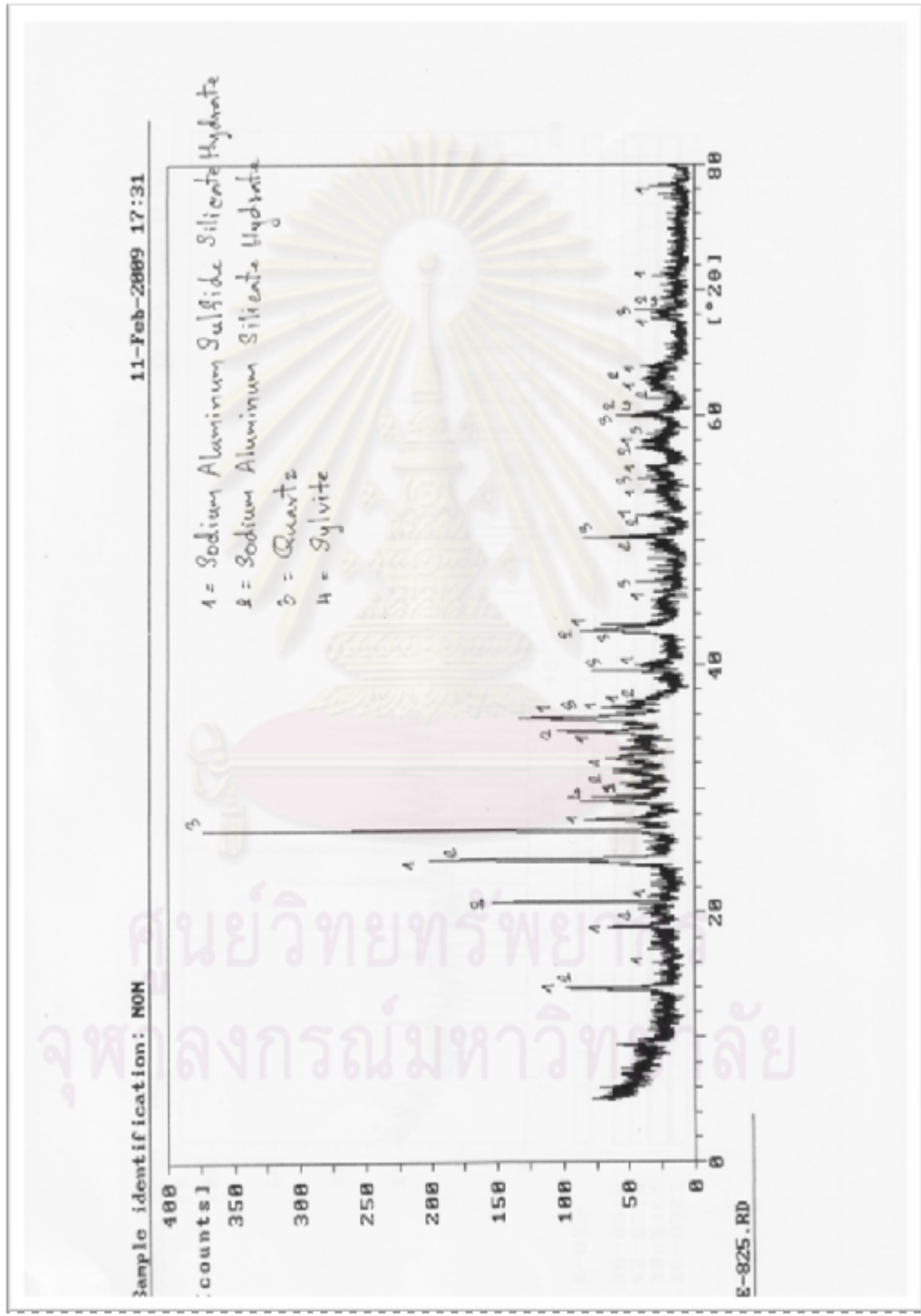
$$\text{NH}_{3(\text{corr})} = (1 + 0.0073 \times (S_s - S_0)) \times \text{NH}_{3(\text{unc})}$$

เมื่อ $NH_{3(\text{corr})}$, $NH_{3(\text{unc})}$ = ความเข้มข้นของแอมโมเนียในตัวอย่างที่ปรับแก้ผล
เนื่องจากความเค็มแล้ว และยังไม่ได้ปรับแก้ผลเนื่องจากความเค็มตามลำดับ และ S_0 และ S_s = ความ
เค็มของสารละลายมาตรฐานและน้ำตัวอย่างตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ X-rays Diffraction Spectroscopy (XRD)



ผลการวิเคราะห์ X-rays Fluorescence Spectroscopy (XRF)

ผลการวิเคราะห์ X-rays Fluorescence Spectroscopy (XRF) ของถ้ำลอย

2/16/09 09:35 Page 1

Chulalongkorn University
Quantified peaks in c:\superq\data\520462a_pks

Summary of results

Sample:	520462A
Measured:	2/16/09 09:15
Quantified:	2/16/09 09:35
Sum:	100 %
RMS:	0.000
Used lines:	16
Traces:	Cr Co Cu
Qual. program:	SemiQ2004

Concentrations

Analyte	Type	Calibration status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
	Binder	Not matched	H3BO3	14.457	Fixed
Na	Sample	Calibrated	Na2O	1.635	Calculate
Mg	Sample	Calibrated	MgO	3.336	Calculate
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	13.925	Calculate
Si	Sample	Calibrated	SiO2	43.163	Calculate
P	Sample	Calibrated	P2O5	0.239	Calculate
S	Sample	Calibrated	SO3	2.11	Calculate
K	Sample	Calibrated	K2O	1.244	Calculate
Ca	Sample	Calibrated	CaO	14.501	Calculate
Ti	Sample	Calibrated	TiO2	1.203	Calculate
Mn	Sample	Calibrated	MnO2	0.28	Calculate
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	18.125	Calculate
Ni	Sample	Calibrated	NiO	0.022	Calculate
Zn	Sample	Calibrated	ZnO	0.026	Calculate
Sr	Sample	Calibrated	SrO	0.043	Calculate
Zr	Sample	Calibrated	ZrO2	0.026	Calculate
Ba	Sample	Calibrated	BaO	0.123	Calculate

Sample preparation

Sample type:	Powder (binder: H3BO3)
Initial weight:	3.91 g
Final weight:	4.48 g
Area ratio:	1.3
Additive/sample:	0.14
Film:	None
Normalise:	to 100.0%
X-ray path:	Vacuum

Quantify parameters

Recipe:	c:\superq\data\new.rcp
Spectrometer resp. file:	c:\superq\data\semiq.atl
Use compound list:	c:\superq\example\semiq.epl
Apply drift corr.:	No
Disabl. chem. set:	None
Disabl. lines set:	None
Error weighting:	Root
Max. Flow detector intensity:	2000 kcps
Max. Scint detector intensity:	1000 kcps
Max. Scint detector intensity:	1000 kcps
Max. Duplex detector intensity:	3000 kcps

Disallowed elements

No elements disallowed

2/16/09 09:35

Page 2

Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\520462a_pks

Disallowed lines

No lines disallowed

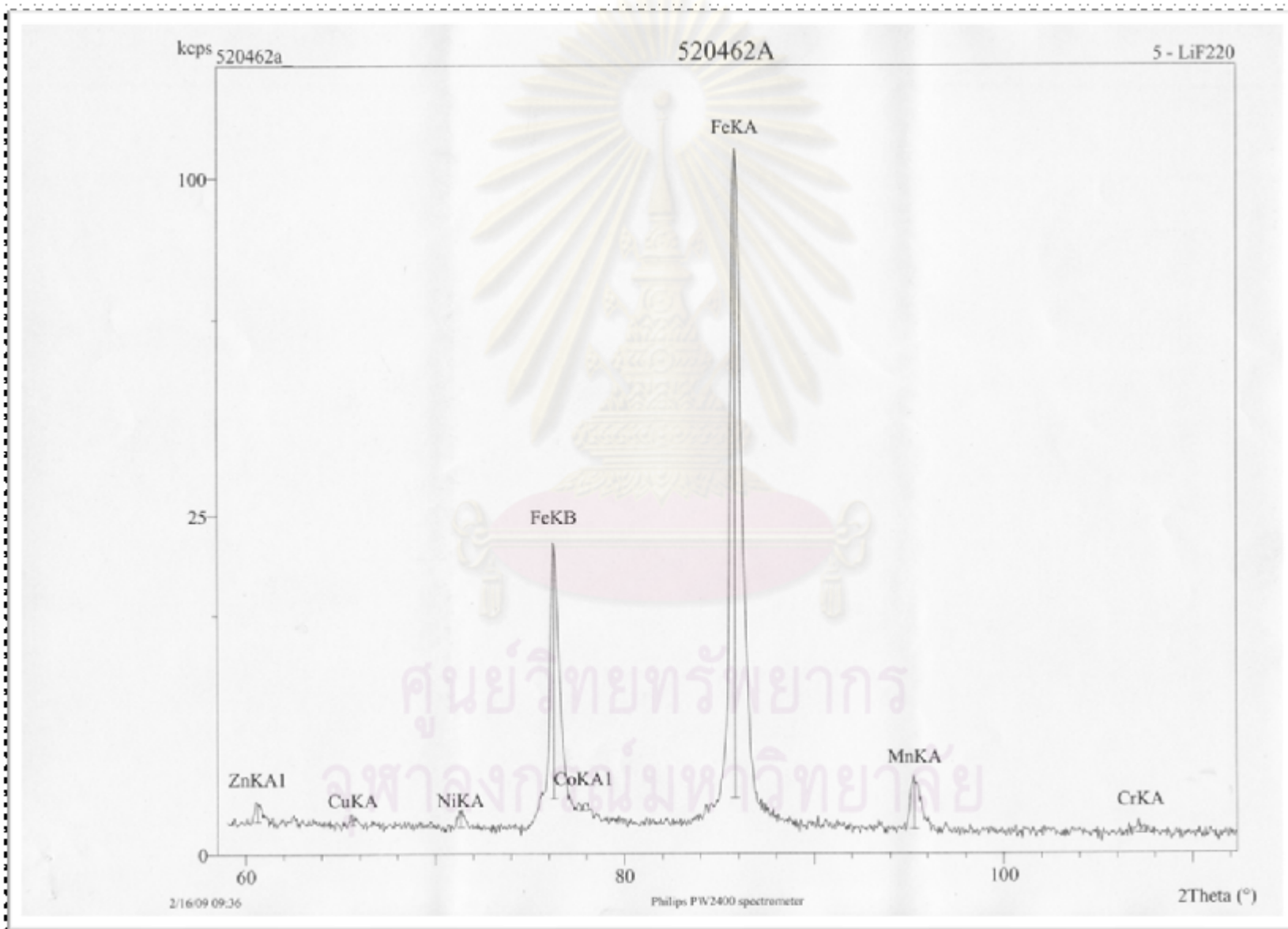
Parameters

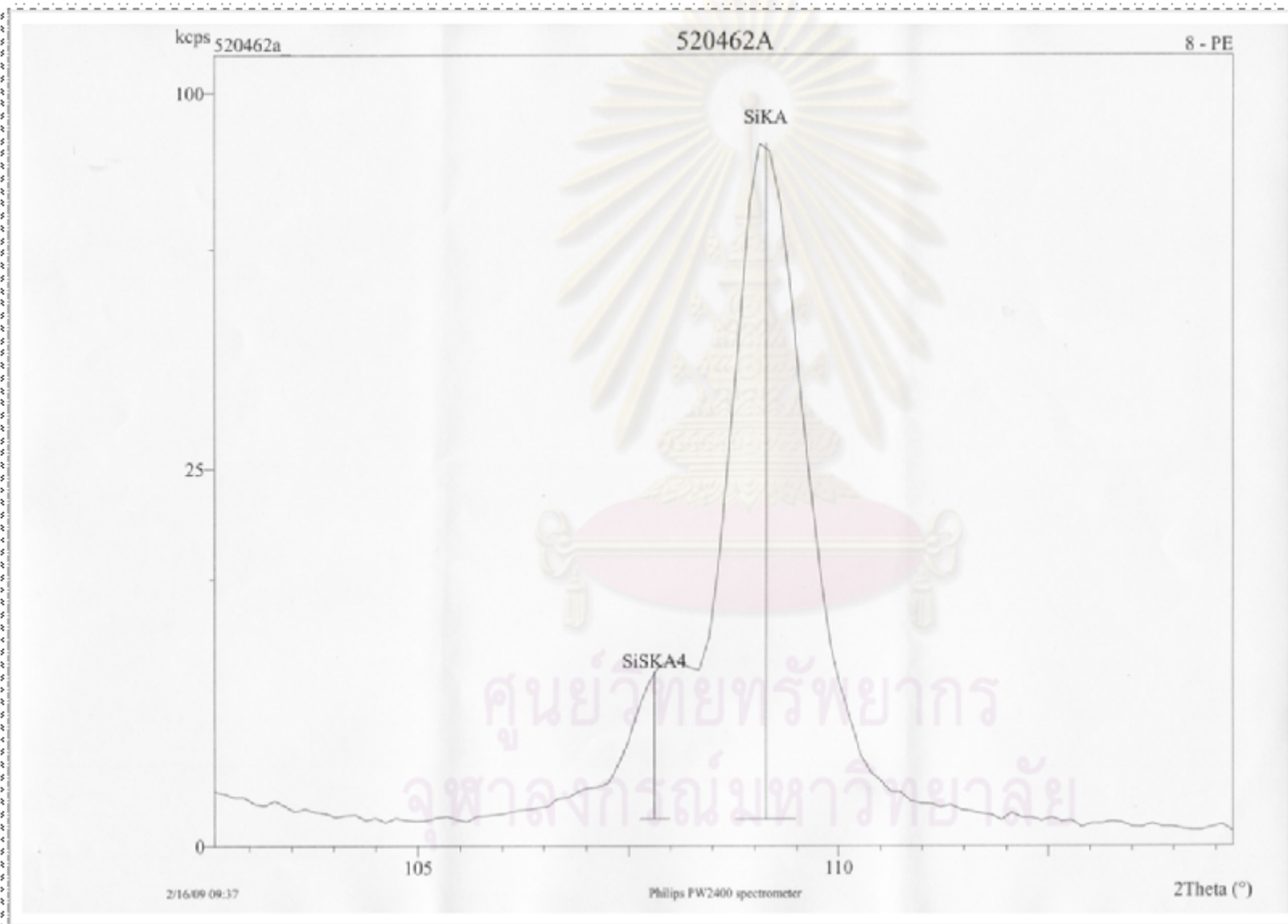
Sc #	X-tal	Filter # material μm	Collimator # / μm	Detector	kV	At. shift	Sign. level	Disall. elem. set	Disall. lines set	Used lines
1	LiF220	2 Brass 100	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
2	LiF200	5 Brass 300	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
3	LiF220	6 Al 750	1 / 150	Scint	55	3	4.0	None	None	2
4	LiF220	3 Al 200	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
5	LiF220	None	1 / 150	Duplex	55	3	4.0	None	None	4
6	LiF200	None	1 / 150	Flow	30	3	4.0	None	None	4
7	Ge	None	2 / 550	Flow	24	3	4.0	None	None	2
8	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
9	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
10	PX1	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	2

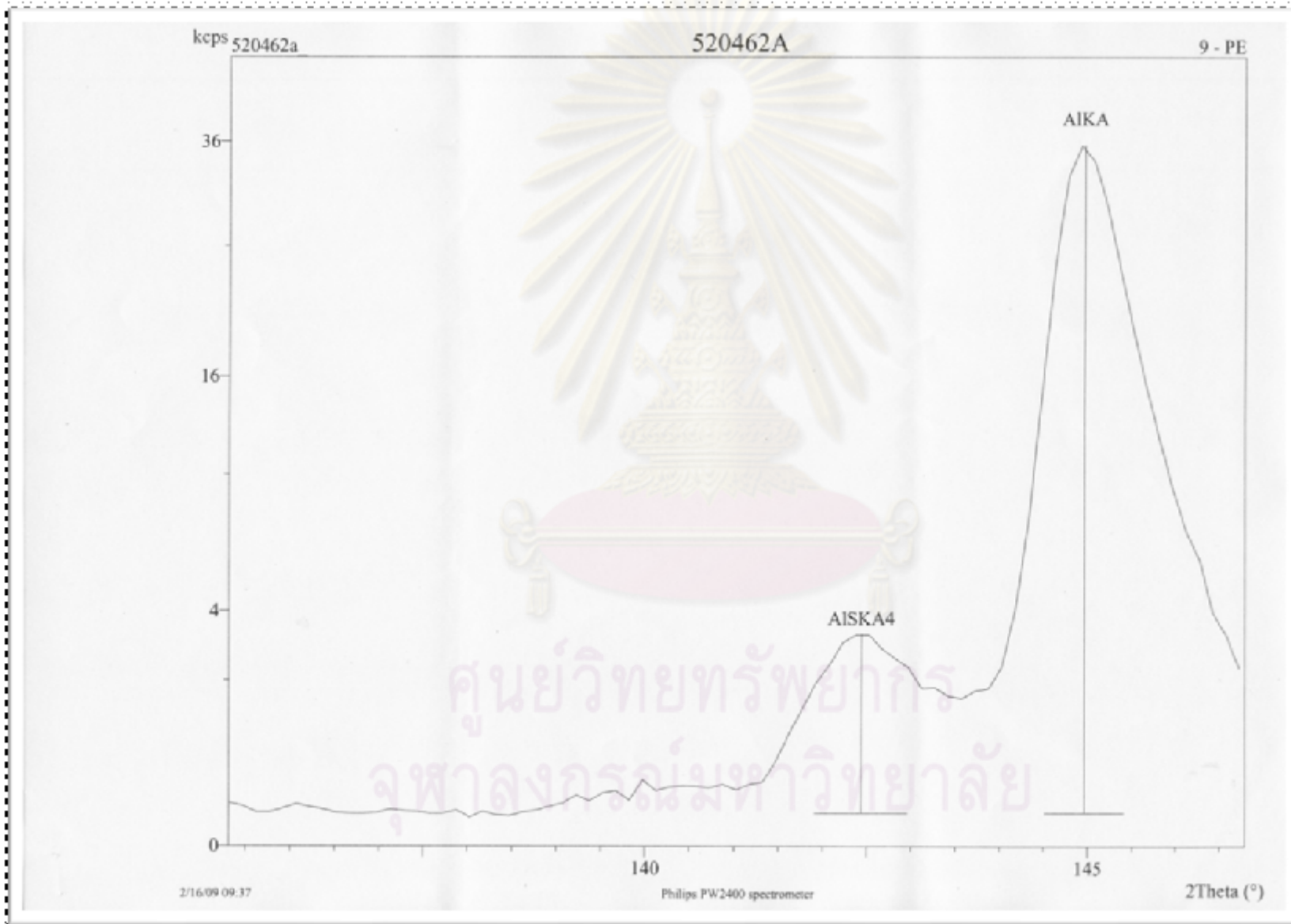
Lines

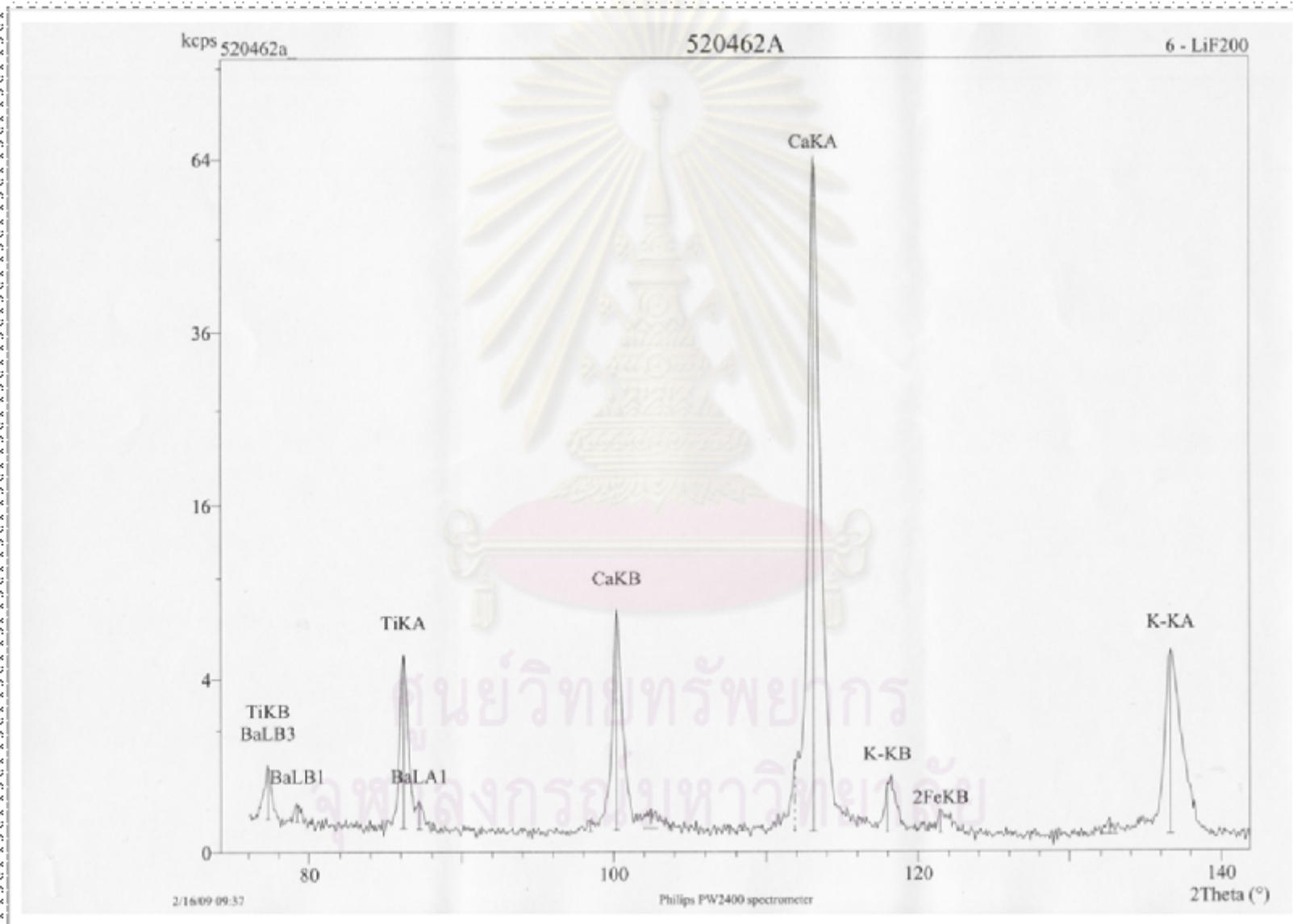
Line	Used	Measured (kcps)	Calcul. (kcps)	Diff. (kcps)	Scan #	X-tal	Detect.	Filter # material μm	kV	mA	Collim. # / μm
O _K A	No	1.278	0.000	1.278	10	PX1	Flow	None	24	100	2 / 550
Na _K A	Yes	2.249	2.249	0.000	10	PX1	Flow	None	24	100	2 / 550
Mg _K A	Yes	14.285	14.286	0.000	10	PX1	Flow	None	24	100	2 / 550
Al _K A	Yes	35.609	35.609	0.000	9	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
Si _K A	Yes	86.905	86.905	0.000	8	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
P _K A	Yes	1.421	1.421	0.000	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
S _K A	Yes	11.582	11.582	0.000	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
K _K A	Yes	5.364	5.363	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
Ca _K A	Yes	64.405	64.405	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
Ti _K A	Yes	5.162	5.162	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
Mn _K A	Yes	1.018	1.018	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
Fe _K A	Yes	106.658	106.659	0.002	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
Ni _K A	Yes	0.183	0.183	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
Zn _K A	Yes	0.347	0.347	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
Sr _K A	Yes	0.715	0.715	0.000	3	LiF220	Scint	6 Al 750	55	45	1 / 150
Zr _K A	Yes	0.670	0.670	0.000	3	LiF220	Scint	6 Al 750	55	45	1 / 150
Ba _L A	Yes	0.249	0.249	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150

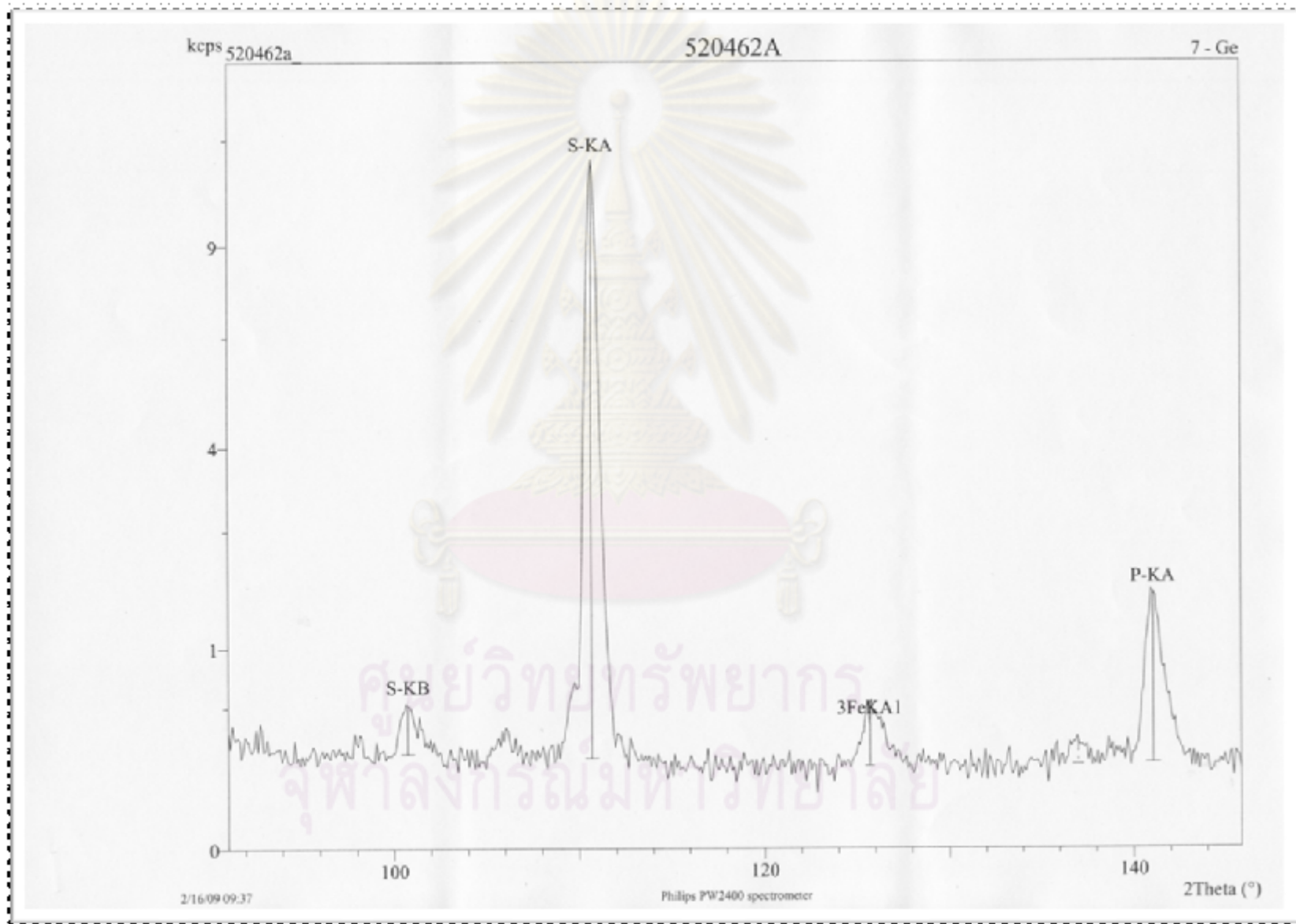
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

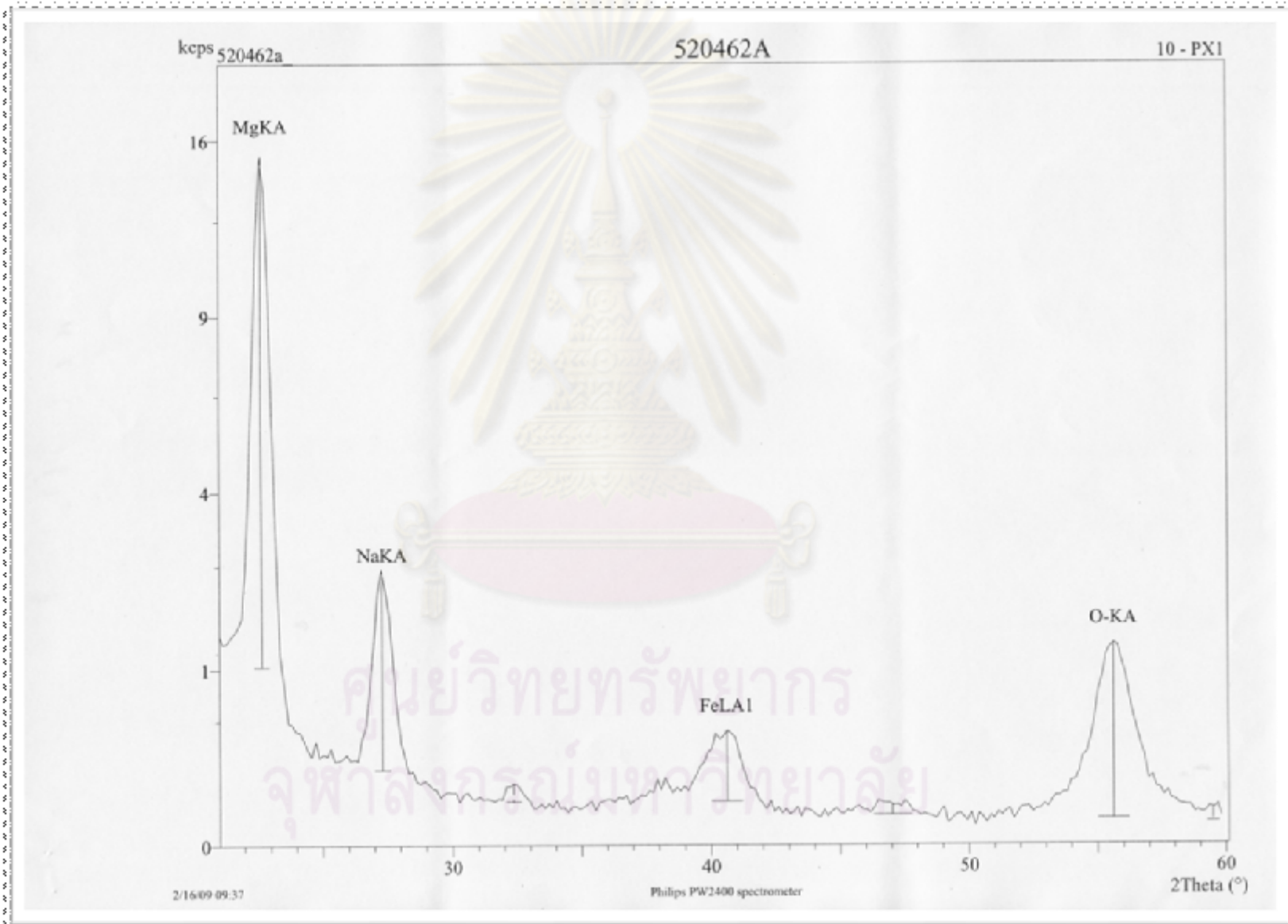




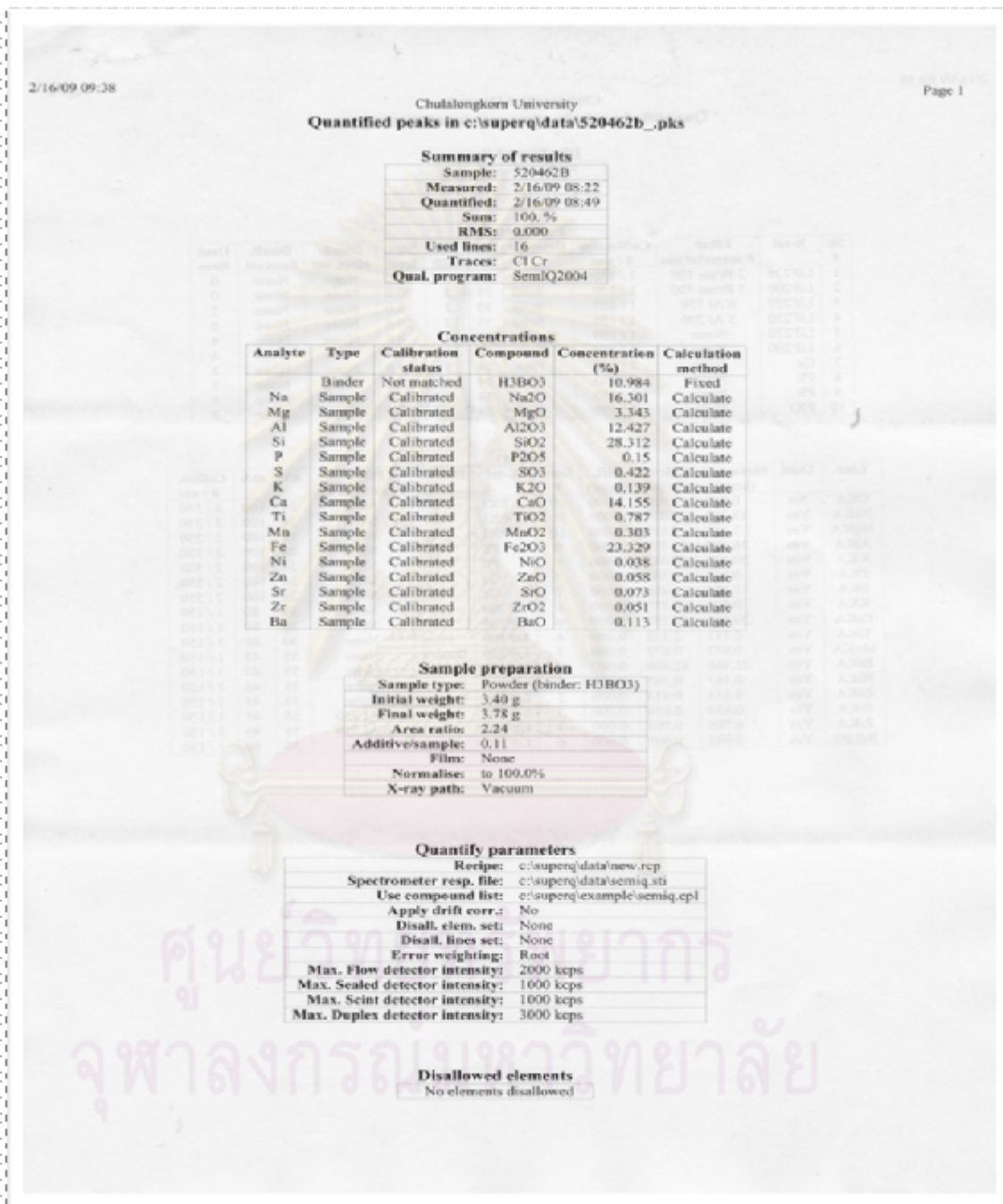








ผลการวิเคราะห์ X-rays Fluorescence Spectroscopy (XRF) ของซีโอไลต์



Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\S20462b .pks

Disallowed lines

No lines disallowed

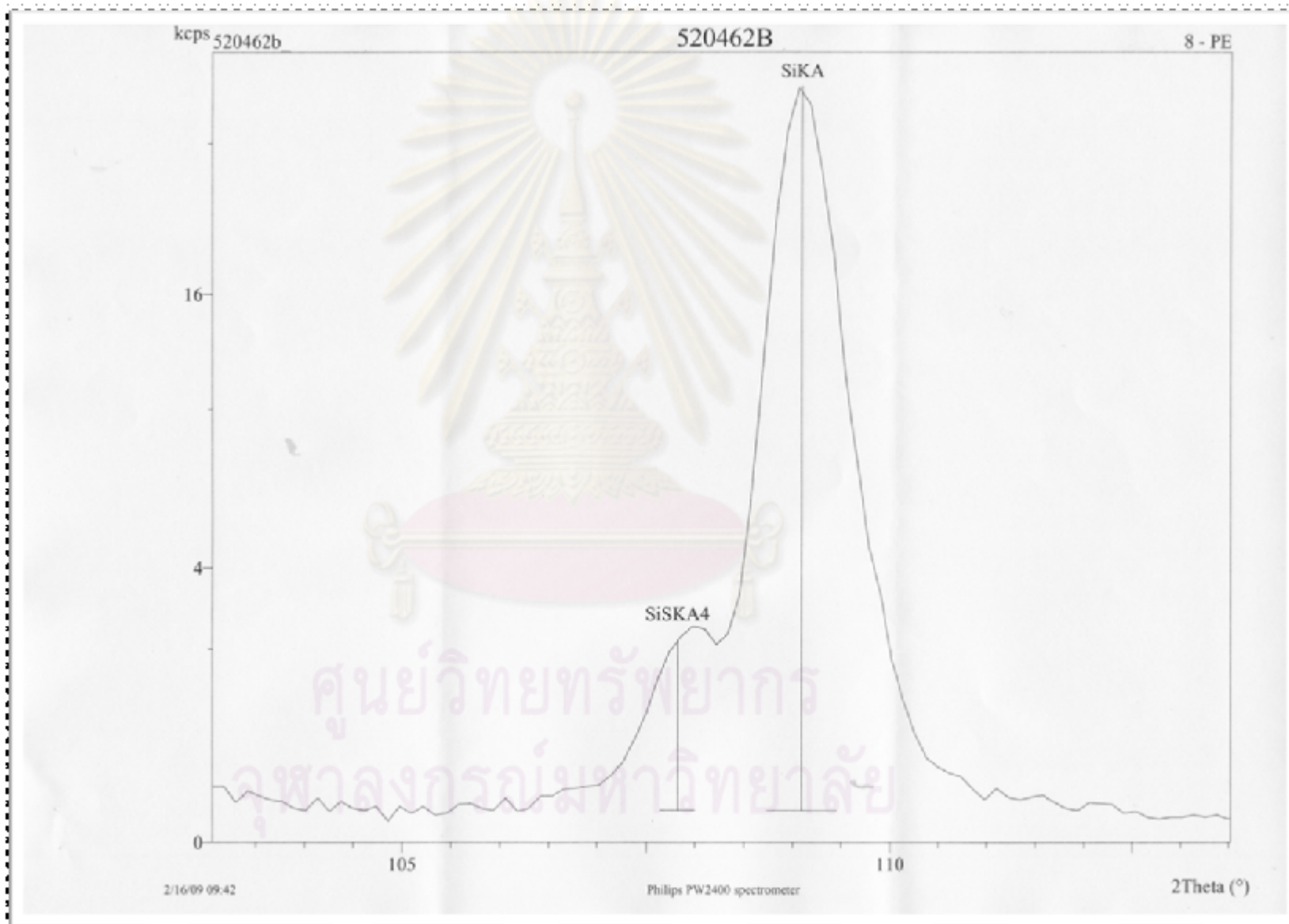
Parameters

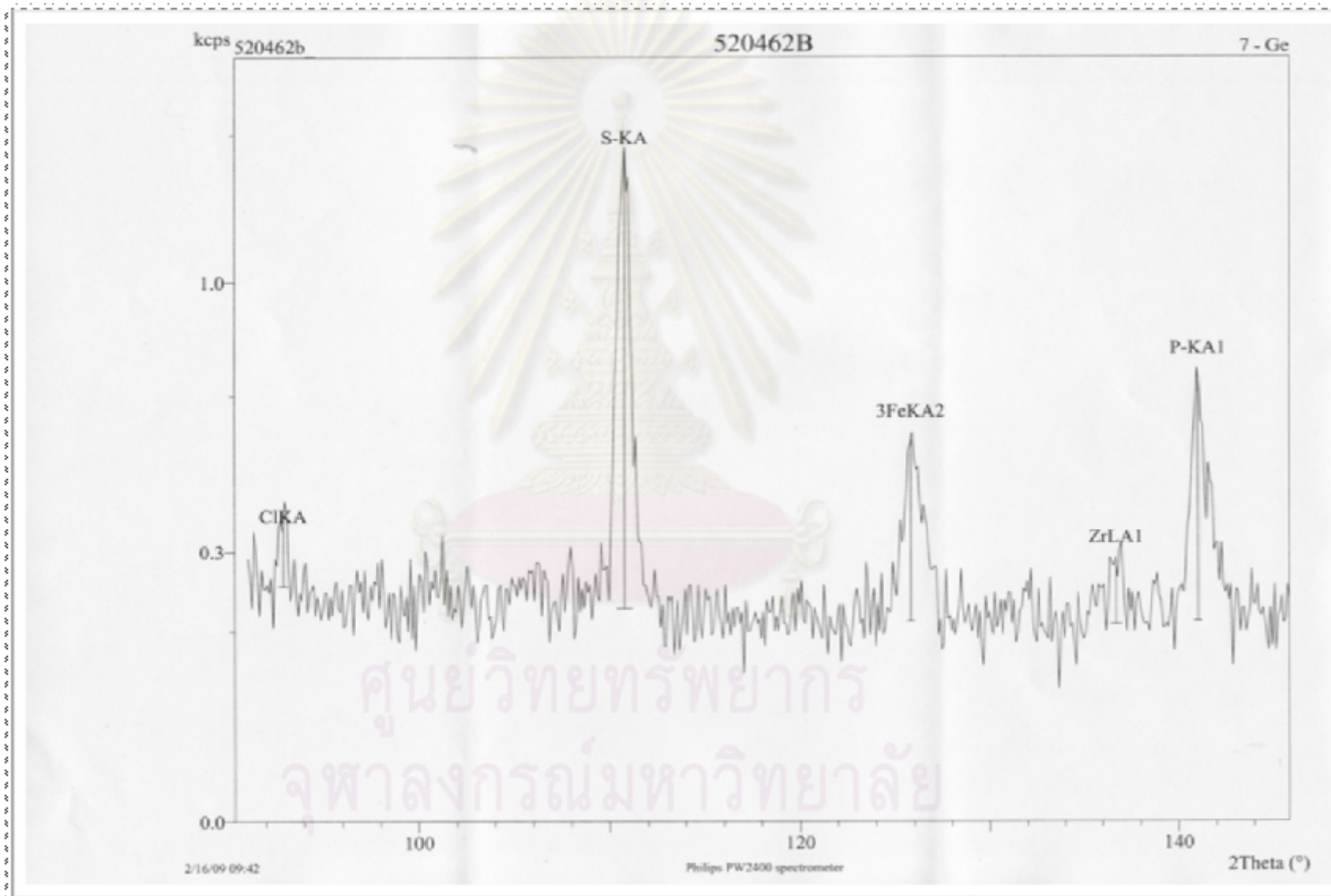
Sc #	X-tal	Filter # material um	Collimator # / um	Detector	kV	AL shift	Sign. level	Disall. elem. set	Disall. lines set	Used lines
1	LiF220	2 Brass 100	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
2	LiF200	5 Brass 300	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
3	LiF220	6 Al 750	1 / 150	Scint	55	3	4.0	None	None	2
4	LiF220	3 Al 200	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
5	LiF220	None	1 / 150	Duplex	55	3	4.0	None	None	4
6	LiF200	None	1 / 150	Flow	30	3	4.0	None	None	4
7	Ge	None	2 / 550	Flow	24	3	4.0	None	None	2
8	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
9	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
10	PXI	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	2

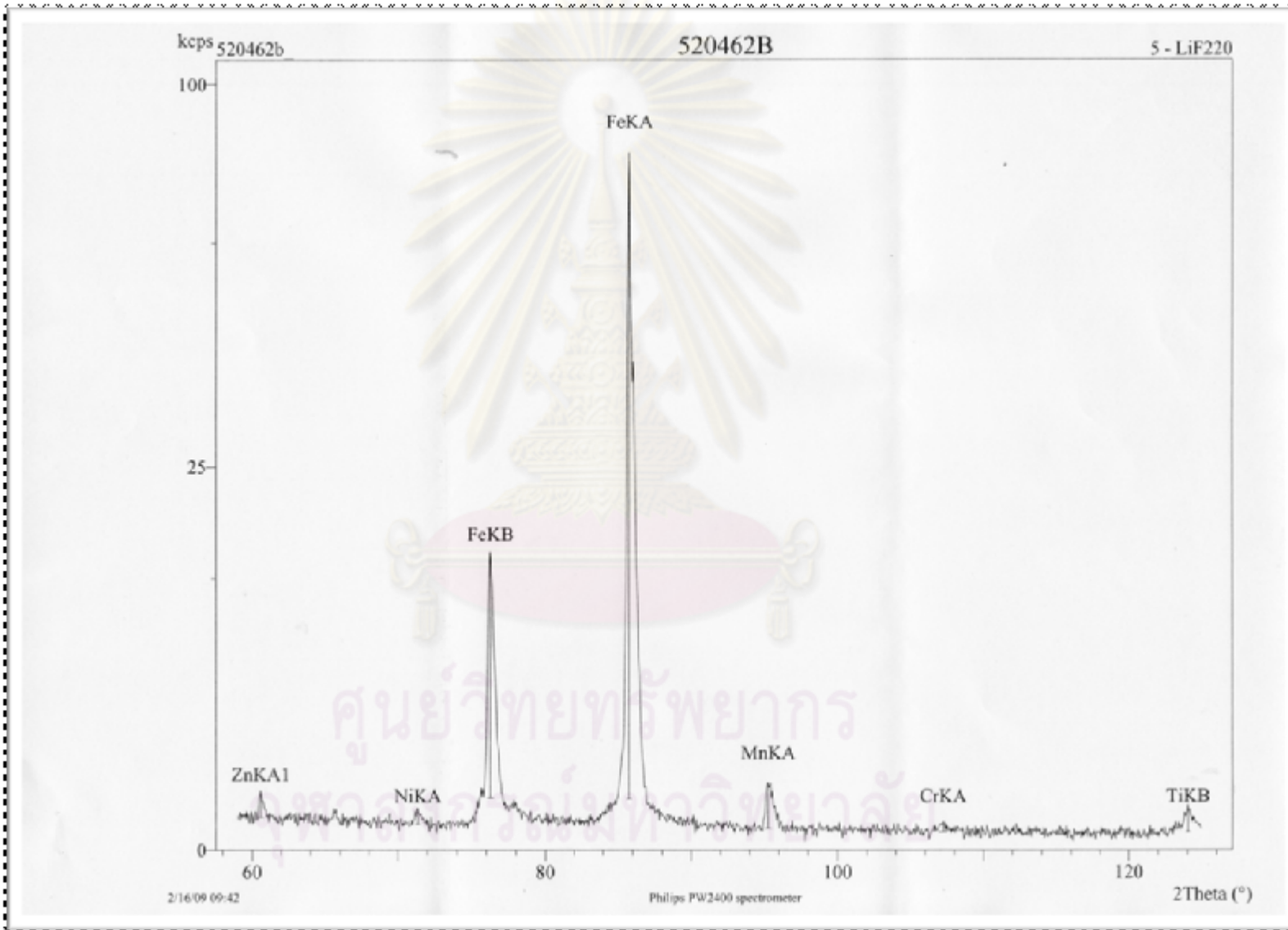
Lines

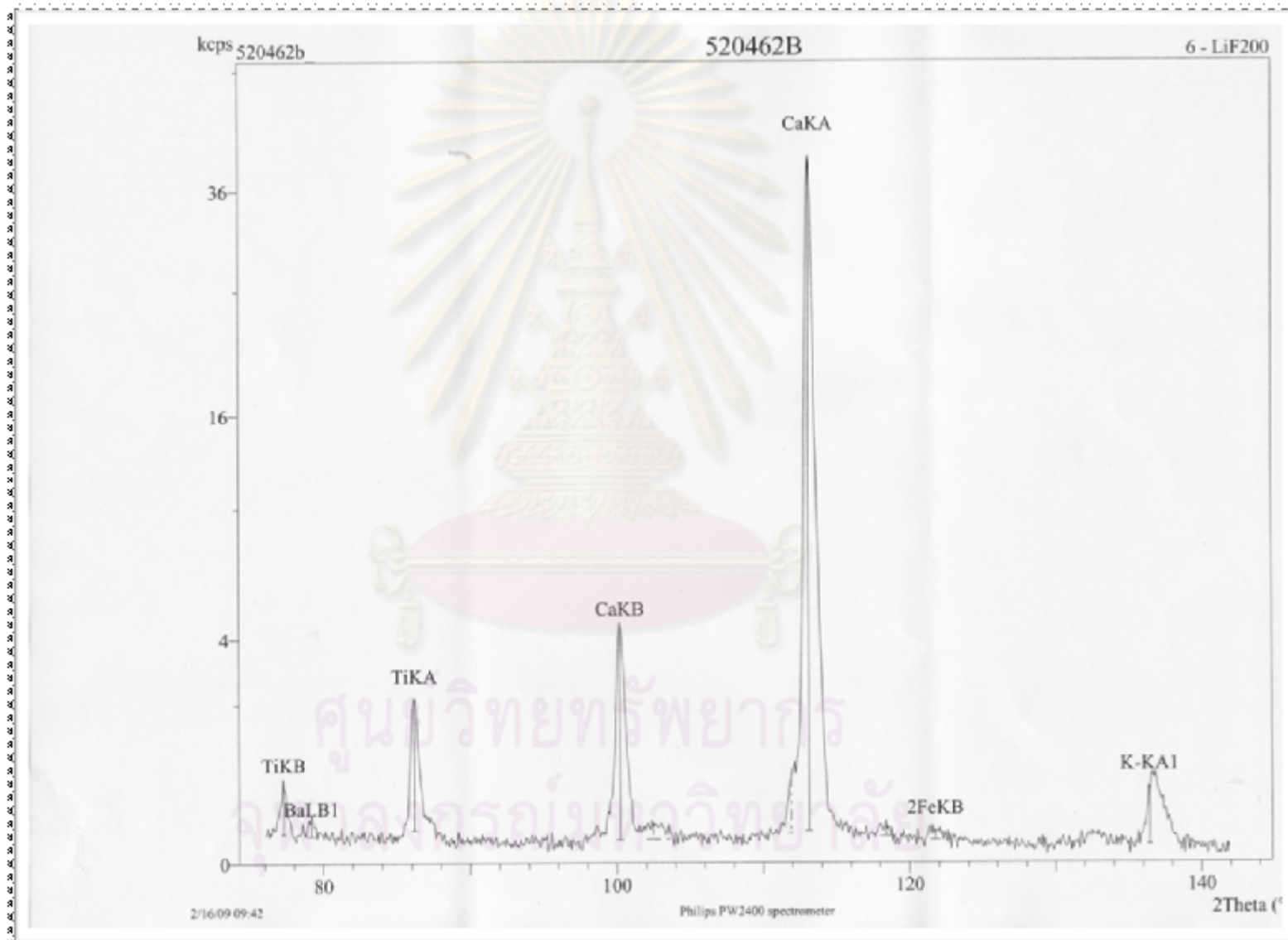
Line	Used	Measured (keps)	Calcul. (keps)	Diff. (keps)	Scan #	X-tal	Detect.	Filter # material um	kV	mA	Collim. # / um
OKA	No	0.980	0.000	0.980	10	PXI	Flow	None	24	100	2 / 550
NaKA	Yes	13.282	13.282	0.000	10	PXI	Flow	None	24	100	2 / 550
MgKA	Yes	7.157	7.157	0.000	10	PXI	Flow	None	24	100	2 / 550
AlKA	Yes	16.197	16.197	0.000	9	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
SiKA	Yes	30.487	30.487	0.000	8	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
PKA	Yes	0.543	0.543	0.000	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
SKA	Yes	1.406	1.406	0.000	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
KKA	Yes	0.371	0.371	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
CaKA	Yes	39.781	39.781	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
TiKA	Yes	2.112	2.112	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
MnKA	Yes	0.672	0.672	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
FeKA	Yes	82.466	82.466	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
NiKA	Yes	0.167	0.167	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
ZnKA	Yes	0.413	0.413	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
SrKA	Yes	0.654	0.654	0.000	3	LiF220	Scint	6 Al 750	55	45	1 / 150
ZrKA	Yes	0.705	0.705	0.000	3	LiF220	Scint	6 Al 750	55	45	1 / 150
BaLBI	Yes	0.095	0.095	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150

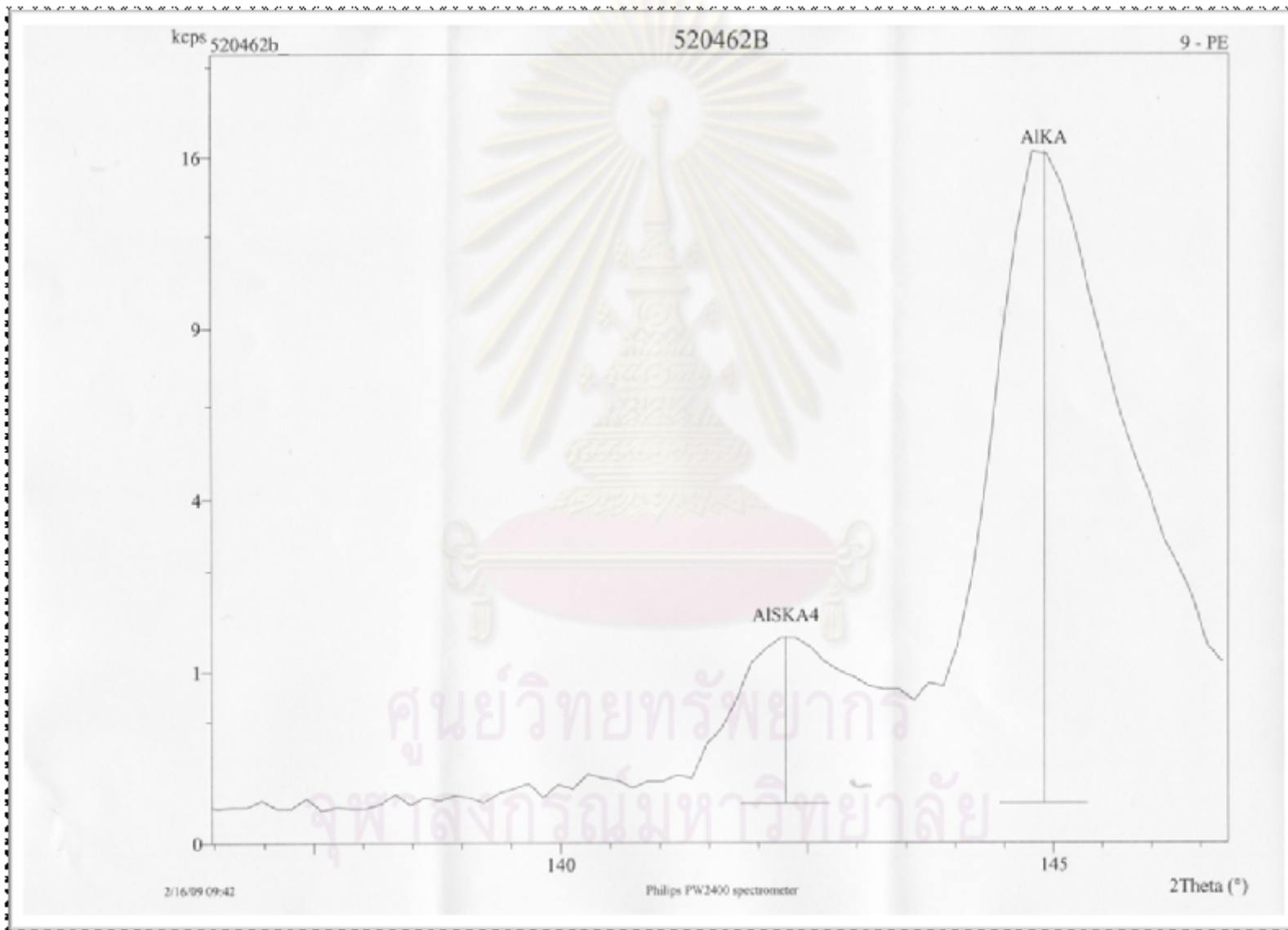
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

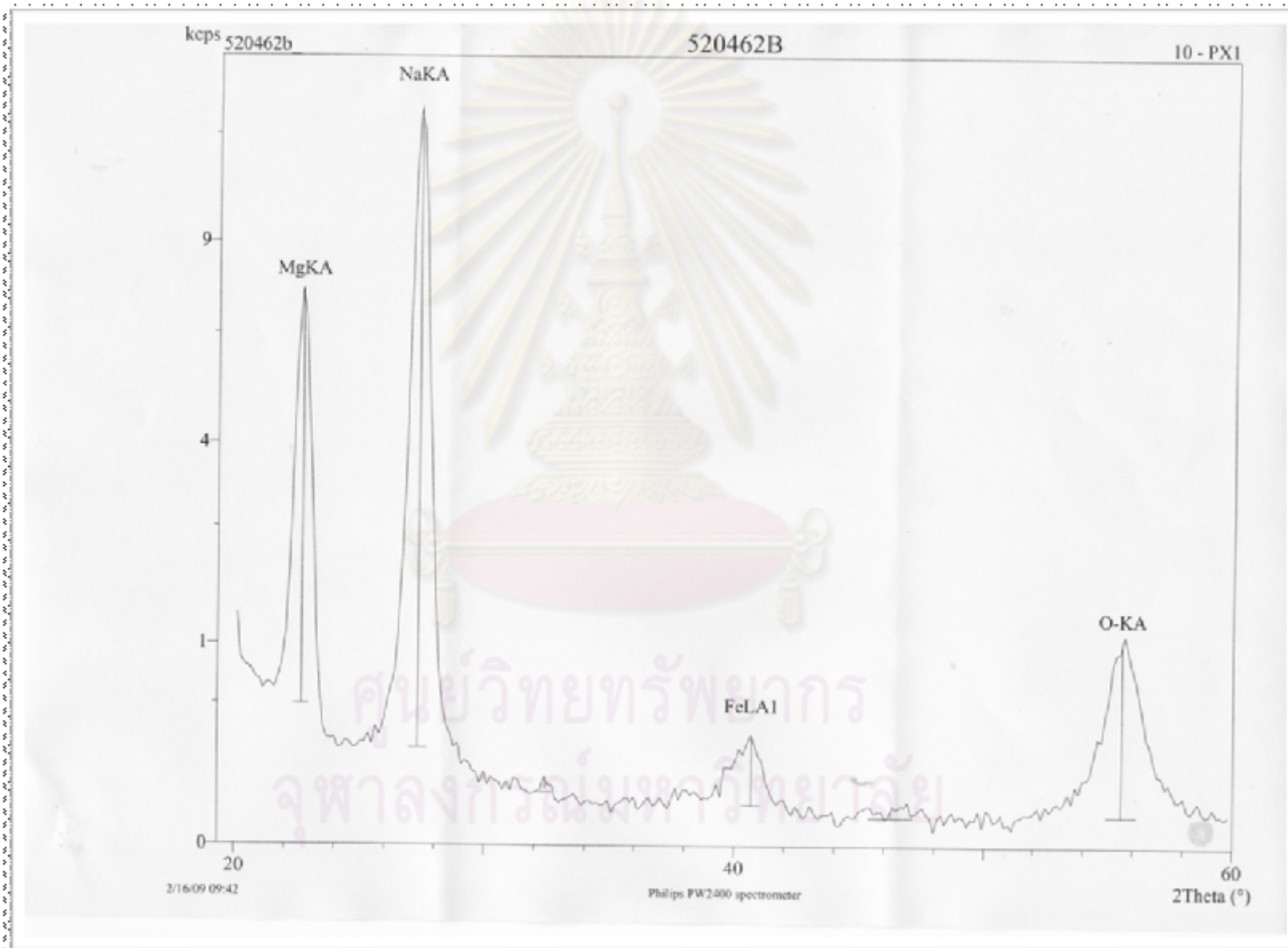












ผลการวิเคราะห์ค่า ICP atomic emission spectrometry

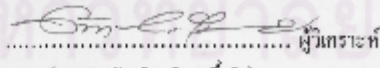
รายงานเลขที่ ICP-025 / 2552

หน้าที่ 1 / 1

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง สารละลาย รหัสใบส่งตัวอย่าง 521089
 เจ้าของตัวอย่าง นายปชาณิน แสงอรุณ
 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 จุดประสงค์ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ As Cr Cu Fe Ni และ Pb
 วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry
 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer;
 Perkin Elmer model PLASMA-1000
 วันที่วิเคราะห์ 9 เมษายน 2552
 ผลการวิเคราะห์

สารละลาย	ปริมาณธาตุ (mg/l)					
	As	Cr	Cu	Fe	NI	Pb
Z.1	< 0.05	1.11	0.75	1875	2.07	0.21
Z.2	< 0.05	1.18	0.87	2181	2.27	0.24
Z.3	< 0.05	1.27	0.90	2274	2.43	0.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

 (นายสุภัท สิวะวิสุทธีศรี)

หมายเหตุ ผลการทดสอบฉบับนี้ มีเป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ส่งทดสอบ
 ณ ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์สารสิ่งแวดล้อมเทคโนโลยี สถาบัน

ภาคผนวก ฉ ผลการศึกษาสมบัติของน้ำ เลาเสียจากนกกุ้ง



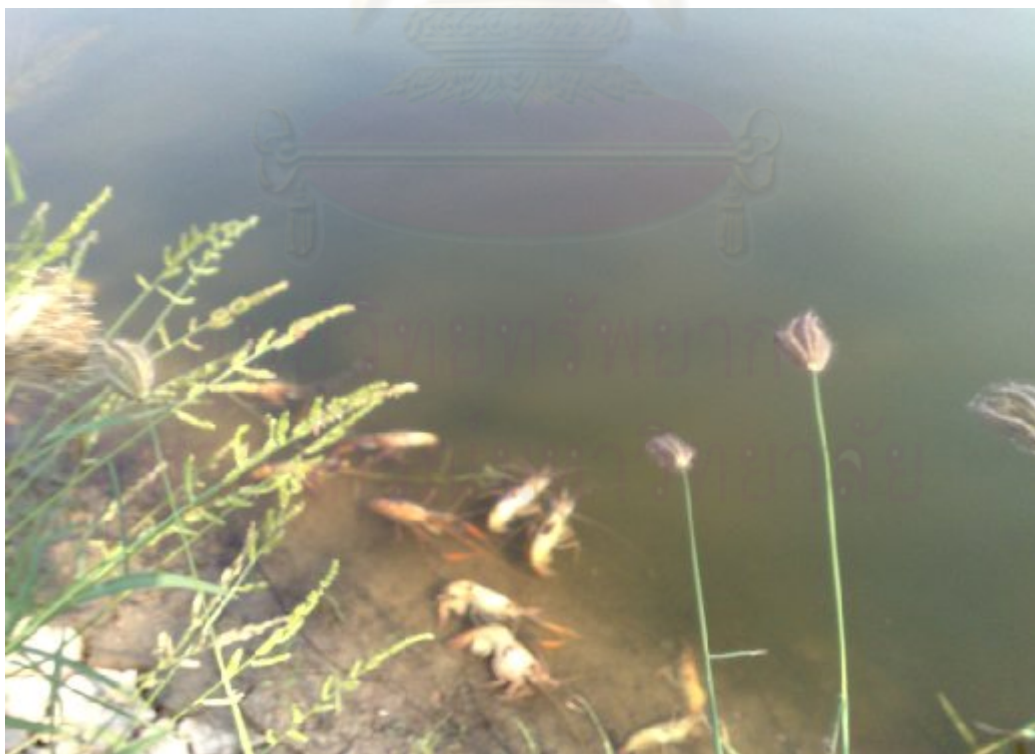
บ่อที่ 1



บ่อที่ 2



บ่อที่ 3



บ่อที่ 4

ผลการศึกษาลักษณะน้ำเสียจากนากุ้ง

หมายเลขบ่อ	ค่าพีเอช				ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	6.14	6.17	6.15	6.15	92.40	93.00	92.49	92.63	1.21	1.25	1.27	1.24
2	6.70	6.73	6.73	6.72	81.40	82.00	81.52	81.64	1.08	1.09	1.09	1.09
3	6.68	6.68	6.70	6.68	85.23	84.79	85.10	85.04	1.16	1.19	1.11	1.15
4	6.29	6.29	6.32	6.30	114.0	111.7	112.7	112.80	1.45	1.40	1.44	1.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข มาตรฐานคุณภาพดินที่ ใช้ประโยชน์เพื่ อกรู้อย่าตัดและเกษตรกรรม

มาตรฐานคุณภาพดินที่ ใช้ประโยชน์เพื่ อกรู้อย่าตัดและเกษตรกรรม			
ดัชนีคุณภาพดิน	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	วิธีการตรวจวัด
โลหะหนัก (Heavy metals)			
1) สารหนู (Arsenic)	มิลลิกรัม/ กิโลกรัม	ต้องไม่เกิน 3.9	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
2) แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 37	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
3) โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	"	ต้องไม่เกิน 300	ใช้วิธี Coprecipitation หรือวิธี Colorimetric หรือวิธี Chelation/Extraction หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
4) ตะกั่ว (Lead)	"	ต้องไม่เกิน 400	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
5) แมงกานีสและสารประกอบแมงกานีส (Manganese and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 1,800	"
6)ปรอทและสารประกอบปรอท (Mercury and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 23	ให้ใช้วิธี Cold-Vapor Technique หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
7) นิกเกิลในรูปของเกลือที่ ละลายน้ำได้ (Nickel, soluble salts)	"	ต้องไม่เกิน 1,600	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
8) ซีลีเนียม (Selenium)	"	ต้องไม่เกิน 390	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ

- หมายเหตุ** : 1 วิธี Test Methods of Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846) ขององค์การพิทักษ์
สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency)
2 วิธีการเก็บและรักษาตัวอย่างดินให้เป็นไปตามที่ กำหนดไว้ในภาคผนวกท้ายประกาศนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปธานิน แสงอรุณ เกิดวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2527 ที่จังหวัด มหาสารคาม สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนผดุงนารี และระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(อนามัยสิ่งแวดล้อม) จาก คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย