



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและ
จากเถ้าลอยขานอ้อยเพื่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

อุตสาหกรรมจากโรงงานผลิตตะกั่วแห่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

ธเรศ ศรีสถิตย์

พฤศจิกายน 2549

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์ซีไอไลต์จากถ่านลอยถ่านหินและจากถ่านลอยชานอ้อย
เพื่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง

โดย

ธเรศ ศรีสถิตย์

สถาบันวิทยบริการ

พฤศจิกายน 2549

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้นับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณทุกๆ ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่กรุณามอบทุนสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท ปัญจพล เปเปอร์ จำกัด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกระดาษลอยถ่านหินเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงงานน้ำตาลสระบุรี จังหวัดสระบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกระดาษลอยชานอ้อยเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ จังหวัดนครราชสีมา ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์สารละลายด่างที่ใช้งานแล้ว (Spent alkaline) เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัทเบอกโซ่ เมทัลส์ จำกัด จังหวัดสระบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียตะกั่วเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการมูลฝอยในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ในการใช้เครื่องมือวิจัยสำหรับงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ท่านรองอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม (นายสมศักดิ์ สุวดีณะ) ที่ได้ให้ความกรุณาติดต่อประสานงานกับ โรงงานอุตสาหกรรมหลอมตะกั่วจนสามารถได้น้ำตัวอย่างจริงมาทดสอบ

ขอขอบคุณนางสาวอนรรฆอร พันธุ์ไพศาล และนางสาวสุนิษา คุ่ยเสงี่ยม ซึ่งเป็นคณะผู้ร่วมวิจัย

ชื่อโครงการ	การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอย ขานอ้อยเพื่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม จากโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง
ชื่อผู้วิจัย	รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ	กรกฎาคม 2549

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยด้วยสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมมด้าโลหะ (spent alkaline) เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยตรวจสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 418.36 cmol/kg และ 286.29 cmol/kg ตามลำดับ

การศึกษานี้้นำซีโอไลต์สังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์ เพื่อทดสอบไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว พบว่า ที่พีเอช 5 และความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วที่สภาวะดังกล่าว เป็นสมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ซึ่งพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 78.31 และ 65.23 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ตามลำดับ

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่าได้เท่ากับร้อยละ 92.86 และ 89.56 ตามลำดับ ดังนั้นสารละลายต่างเก่า สามารถนำมาใช้ทดแทนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมซีโอไลต์ได้

Project Title	SYNTHESIZED ZEOLITE FROM COAL FLY ASH AND BAGASSE FLY ASH FOR LEAD REMOVAL FROM WASTEWATER FROM LEAD INGOTS
Name of the Investigator	ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D.
Year	JULY 2006

Abstract

The objective of this research was to study the possibility and applicability in zeolite syntheses using coal fly ash and bagasse fly ash which have been activated by Spent alkaline from black oxide coating industry compared with sodium hydroxide solution. This study designedly ascertained the optimum condition of zeolite syntheses comparatively from coal fly ash and bagasse fly ash. The optimum condition was determined by evaluating a cation exchange capacity (CEC) of the synthesized zeolite. The result revealed that the optimum condition exhibiting the highest CEC for synthesized zeolite using coal fly ash and bagasse fly ash were 418.36 cmol/kg and 286.29 cmol/kg, characterized by reaction temperature of 90 °C, activation by Spent alkaline solution concentrated of 2.0 molar and reaction time of 5 days.

Lead removal by using these optimally synthesized zeolites was evaluated with batch test. The batch experiment was utilized to study the influential factors on lead removal from synthetic wastewater which are namely pH favorableness, concentration of the heavy metal, contact time and adsorption isotherm. The outcomes were that the best adsorption efficiency of lead were at pH 5 and concentration of 10 mg/l of lead. From Langmuir adsorption isotherm of synthetic wastewater, it was found that the lead adsorption capacities of zeolites synthesized from coal fly ash and bagasse fly ash, which have been activated by Spent alkaline, were 78.31 and 65.23 mg/g of zeolite respectively

Lead removal capacities of wastewater from Lead Ingots Factory using zeolites synthesized from coal fly ash and bagasse fly ash activation by Spent alkaline were 92.86% and 89.56% respectively. It can conclude that, Spent alkaline can be used to activated zeolites instead of sodium hydroxide solution (NaOH).

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	iii
กิตติกรรมประกาศ.....	iv
สารบัญ.....	v
สารบัญตาราง.....	ix
สารบัญรูป.....	xi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ซีโอดี.....	3
2.1.1 ประวัติซีโอดี.....	3
2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอดี.....	4
2.1.3 การแบ่งประเภทของซีโอดี.....	8
2.1.4 การสังเคราะห์ซีโอดี.....	16
2.1.5 ประโยชน์ของซีโอดี.....	17
2.2 ถ้ำลอยถ่านหิน.....	20
2.2.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	20
2.2.2 การจัดรูปของถ้ำลอยขณะทำการเผาไหม้.....	20
2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บถ้ำลอยถ่านหิน.....	21
2.2.4 ชนิดของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อแยกส่วนประกอบทางธรรมชาติ.....	22
2.2.5 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน.....	22
2.2.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยถ่านหิน.....	23
2.2.7 ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน.....	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	ถ้ำลอยซานอ้อย.....	26
2.3.1	กระบวนการผลิตน้ำตาล.....	27
2.3.2	วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์.....	28
2.3.3	การเผาซานอ้อยและการจัดการถ้ำลอยที่เกิดขึ้น.....	29
2.4	สมดุลการดูดคิดผิว.....	29
2.5	ตะกั่ว.....	33
2.5.1	สมบัติทางกายภาพ.....	33
2.5.2	สมบัติทางเคมี.....	33
2.5.3	ประโยชน์ของตะกั่ว.....	35
2.5.4	พิษของตะกั่ว.....	35
2.5.5	การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อมนุษย์ของตะกั่ว.....	37
2.6	การผลิตตะกั่วแท่งจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า.....	38
2.6.1	แบตเตอรี่ตะกั่ว.....	38
2.6.2	ส่วนประกอบของแบตเตอรี่รถยนต์.....	39
2.6.3	กรรมวิธีการถลุงหลอมตะกั่ว.....	40
2.6.4	น้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่งจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า.....	43
2.7	การรมดำโลหะ.....	44
2.7.1	กระบวนการรมดำโลหะ.....	44
2.7.2	น้ำเสียจากกระบวนการรมดำโลหะ.....	46
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3	แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	50
3.1	รูปแบบการศึกษา.....	50
3.2	แผนการทดลอง.....	50
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.4	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1	ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว จากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline).....	52
3.4.2	การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย.....	52
3.4.3	ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด.....	53
3.4.4	ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ของซีโอไลต์.....	53
3.4.4.1	ศึกษาผลของ pH.....	53
3.4.4.2	ศึกษาผลของเวลา.....	54
3.4.4.3	ศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนัก.....	54
3.4.4.4	ศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์.....	54
3.4.5	ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและ จากเถ้าลอยขานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง.....	55
3.4.6	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	56
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	57
4.1	ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะของน้ำค้างที่ผ่านการใช้แล้วจากกระบวนการรมดำ โลหะ (Spent alkaline).....	57
4.2	ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยและ การหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน(CEC).....	58
4.2.1	การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย.....	58
4.2.2	การทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) ของ ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่สภาวะต่าง ๆ.....	58
4.3	ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด.....	64
4.3.1	สมบัติของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 สมบัติทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	65
4.3.3 สมบัติทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	75
4.4 การศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยชานอ้อยแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test).....	78
4.4.1 การหา pH ที่เหมาะสม.....	78
4.4.2 การหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	83
4.4.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	88
4.4.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....	91
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ จากถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยกับน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่ว.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	105
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	107
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก.....	113
ภาคผนวก ข.....	116
ภาคผนวก ค.....	120
ภาคผนวก ง.....	124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ ตาม โครงสร้างทุติยภูมิ.....	9
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็น โครงสร้างของผลึกซีโอไลต์.....	17
ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของสารละลายต่างๆที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมค่าโลหะ.....	57
ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน ที่ผ่านการกระตุ้น.....	59
ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยชานอ้อย ที่ผ่านการกระตุ้น.....	60
ตารางที่ 4.4 สรุปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	62
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	73
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหิน.....	75
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยชานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยชานอ้อย.....	76
ตารางที่ 4.8 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....	77
ตารางที่ 4.9 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังปรับค่าความเป็นกรดต่าง ที่พีเอชต่างๆ.....	78
ตารางที่ 4.10 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังผ่านการดูดซับ ด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย.....	80
ตารางที่ 4.11 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....	83
ตารางที่ 4.12 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....	84
ตารางที่ 4.13 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.14 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน.....	86
ตารางที่ 4.15 ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย.....	89
ตารางที่ 4.16 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	91
ตารางที่ 4.17 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	92
ตารางที่ 4.18 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	92
ตารางที่ 4.19 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	93
ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย จากสมการของ Langmuir.....	100
ตารางที่ 4.21 ผลการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ของน้ำเสียจากโรงงาน.....	101

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม ในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	5
รูปที่ 2.2 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ.....	9
รูปที่ 2.4 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่.....	10
รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ analcite และ laumontite.....	11
รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ natrolite, Brewsterite และ ZSM-5.....	11
รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของ offretite และ Erionite.....	11
รูปที่ 2.8 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UDD, UDUD และ UDUU.....	12
รูปที่ 2.9 หน่วยทุติยภูมิ Heulandite Group และ Mordenite Group.....	12
รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ modenite, dachiardite, ferrierite, epstilbite และ bikitaite.....	13
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-5 และภาพร่างพื้นที่ผิวของ ZEM-5.....	13
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของ ZK-5.....	14
รูปที่ 2.13 หน่วยพอลิฮีดรอลต่าง ๆ ในโครงสร้างของ Melanophlogite และ ZEM-39.....	14
รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39.....	15
รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ Melanophlogite.....	15
รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite.....	16
รูปที่ 2.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir.....	31
รูปที่ 2.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich.....	32
รูปที่ 2.19 แบดเตอร์ี่สะสมตะกั่ว.....	38
รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิต โลหะตะกั่วแห้ง โดยใช้เตาหลอมแบบตั้ง และใช้ Na_2CO_3 เป็นฟลักซ์.....	42
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ.....	45
รูปที่ 4.1 ถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต.....	64
รูปที่ 4.2 ถ้ำลอยซานอ้อยที่มีลักษณะเป็นก้อนถ้ำที่เป็ยก มีสีดำ.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างถ้ำลอยถ่านหิน.....	65
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	65
รูปที่ 4.5 โครงสร้างและพื้นที่ผิวถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	66
รูปที่ 4.6 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	67
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างถ้ำลอยซานอ้อย.....	68
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย.....	68
รูปที่ 4.9 โครงสร้างและพื้นที่ผิวถ้ำลอยซานอ้อยเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	69
รูปที่ 4.10 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	70
รูปที่ 4.11 การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์.....	71
รูปที่ 4.12 การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์.....	72
รูปที่ 4.13 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็นกรดค่าที่พีเอชต่างๆ.....	79
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยซานอ้อยที่ pH ต่างๆ.....	81
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาสัมผัสของซีโอไลต์แต่ละชนิดกับ % removal ของตะกั่ว.....	87
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยซานอ้อยที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	90
รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบพรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	94
รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	94
รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบพรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	95

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	96
รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยซานฮวยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	97
รูปที่ 4.22 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยซานฮวยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	97
รูปที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยซานฮวยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	98
รูปที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยซานฮวยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline.....	99
รูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังผ่านการดูดติดผิว.....	103
รูปที่ 4.26 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังผ่านการดูดติดผิว.....	103
รูปที่ 4.27 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานฮวย ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังผ่านการดูดติดผิว.....	104
รูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานฮวย ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังผ่านการดูดติดผิว.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการก่อตั้งและขยายโรงงานอุตสาหกรรมมากมายทำให้เกิดปัญหาซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะปัญหาน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักปะปนออกมาด้วย โลหะหนักเหล่านี้ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม เป็นต้น ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีการถ่ายเทลงสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ปัญหาในเรื่องพิษของโลหะหนักเป็นปัญหาที่สำคัญเนื่องจากส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ หากไม่มีการบำบัดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดไว้อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อม ซึ่งกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการกรองผ่านแผ่นเยื่อ เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ผลดีแต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงและต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ หากสามารถนำวิธีการกำจัดโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีที่มีราคาแพง โดยการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ นอกจากจะสามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรมได้แล้วก็ยังเป็นการช่วยจัดการกับของเสียเหล่านั้นได้อีกทางหนึ่ง

จากปัญหาดังกล่าวได้มีการศึกษาสมบัติและความสามารถต่างๆ ของซีโอไลต์กันมากขึ้น ซึ่งลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของซีโอไลต์คือ โครงสร้างที่มีรูพรุนมากมายจึงมีพื้นที่ผิวมากมีความสามารถในการดูดซับได้ดี นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน จากสมบัติเหล่านี้ทำให้ซีโอไลต์มีประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นสารกรองแยกโมเลกุล ใช้ลดความกระด้างของน้ำ ใช้จับโลหะหนักหรือสารกัมมันตรังสีในน้ำทิ้ง ใช้เป็นสารดูดความชื้น และแก๊สพิษ รวมทั้งใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (hydrocracking) และไอโซเมโรเซชัน (isomerization) เป็นต้น จึงได้มีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาอย่างมากมาย แต่เนื่องจากต้นทุนในการสังเคราะห์สูงทำให้มีความพยายามที่จะหาวัสดุใหม่ๆ ที่จะช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ลง ถ้ำลอยถ่านหินที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าและถ้ำลอยซันอ้อยที่เกิดจากการเผาไหม้ในโรงงานน้ำตาลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงนับเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ที่น่าสนใจ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยซันอ้อยพบว่าประกอบด้วยสารประกอบหลักได้แก่ ซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) โดยถ้ำลอยถ่านหินประกอบด้วย SiO_2 เท่ากับ 43.07% (โดยน้ำหนัก) และ Al_2O_3 เท่ากับ 26.15% (โดยน้ำหนัก) ส่วนถ้ำลอยซันอ้อยประกอบด้วย SiO_2 เท่ากับ 80.74% (โดย

น้ำหนักร) และ Al_2O_3 เท่ากับ 5.01% (โดยน้ำหนักร) เมื่อนำเข้าลอยมาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะสามารถเกิดซีโอไลต์ขึ้นได้ (Queroi และคณะ, 1997) นอกจากนี้ยังนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้วหรือสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) จากโรงงานอุตสาหกรรมร่ด้าโลหะ มาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งในอนาคตวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้อาจนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์และช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ ตลอดจนไม่มีการทิ้งของเสียออกจากโรงงานอันจะช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเข้าลอยร่ด้าหินและเข้าลอยขานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ (ร่ด้าโลหะ)
- 2) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเข้าลอยร่ด้าหินและเข้าลอยขานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานผลิตตะกั่วแท่ง โดยการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเข้าลอยร่ด้าหินและเข้าลอยขานอ้อย
- 2) ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้
- 3) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนแคทไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ เวลาพีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (batch test)
- 4) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเข้าลอยร่ด้าหินและเข้าลอยขานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้ง คือเข้าลอยร่ด้าหินและเข้าลอยขานอ้อยมาสังเคราะห์ซีโอไลต์และนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วปนเปื้อน
- 2) เป็นการนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากกระบวนการร่ด้าโลหะ ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งในอนาคตวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ อาจนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์และช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้

บทที่ 2

บททวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.1.1 ประวัติซีโอไลต์

คำว่า “ซีโอไลต์” มาจากภาษากรีกสองคำคือ คำว่า ζεῖν แปลว่า ต้ม (to boil) และ คำว่า λίθος แปลว่า หิน (a stone) ซีโอไลต์ที่เกิดในธรรมชาติมีน้ำอยู่ในโพรงซึ่งสามารถแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกหรือโมเลกุลอื่น เมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกแล้วจะเกิดฟอง และไอน้ำออกมาจาก ก้อนผลึกเพราะน้ำที่อยู่ในโพรงหลุดออกมา แร่ซีโอไลต์นี้ประกอบไปด้วยอะลูมิโนซิลิเกตของอัลคาไลน์เอิร์ทที่มีน้ำอยู่ภายในโครงผลึก

มนตรี ทองคำ, 2542 ได้กล่าวถึงประวัติของซีโอไลต์ไว้ดังนี้

ปี ค.ศ. 1840 ได้ค้นพบว่าเมื่อผลึกซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก (hydrated zeolites) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (dehydration) แล้วทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดซัลไฟด์ และปรอทได้

ปี ค.ศ. 1845 ได้ทำการทดลองพบว่าดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ จะเห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดซีโอไลต์ขึ้น อันเป็นที่มาของการศึกษาซีโอไลต์ที่มีซิลิกาเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา

ปี ค.ศ. 1909 ได้ทำการทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง คือ chabazite พบว่าสามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดซัลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโบรมีนที่อุณหภูมิสูงได้แม้แต่ไอของปรอทที่อาจถูกดูดซับได้

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

ปี ค.ศ. 1933 ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ chabazite

ปี ค.ศ. 1948 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลต์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแรกและได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาโดย Reed และ Breck, 1956

ปี ค.ศ. 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ของ faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติ และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น

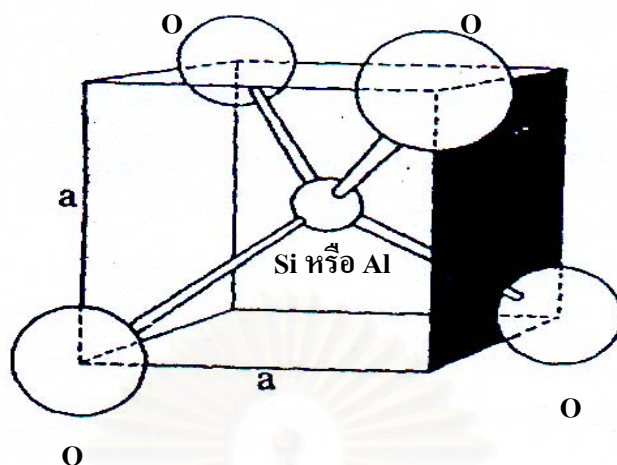
ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ทำภายใต้ภาวะที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้ได้ซีโอไลต์ชนิดเดียวกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมา Milton และคณะทำงาน (1959) ของบริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงทำปฏิกิริยาในภาชนะปิด หรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้พัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 จนถึงปี ค.ศ. 1972 นั้นพบว่ามีผลงานวิจัยเกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์เกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารสิทธิบัตรอีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ นอกจากนี้มีรายงานว่า การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1862 แต่ Breck (1862) ได้ให้ความเห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้ในขณะนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน และสารบางตัวยังไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime โดย Barret (1951)

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

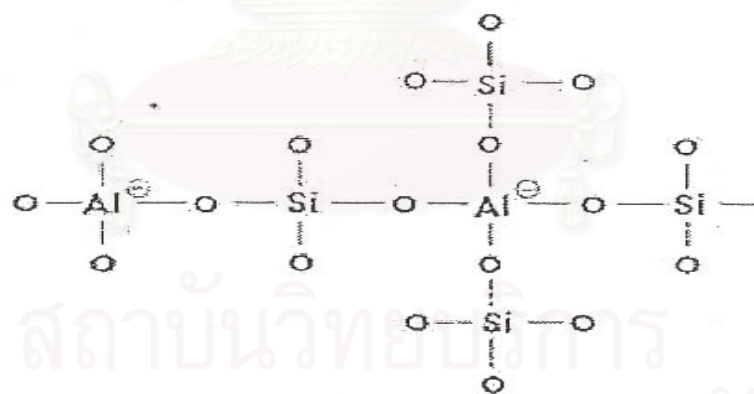
2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ ผลึกของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ทซึ่งส่วนใหญ่เป็น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติของอะลูมิเนียม – ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน – ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถประกอบกันเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็น โคพอลิเมอร์ (copolymer) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อย
ของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

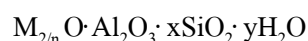
ที่มา : Breck , 1974



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

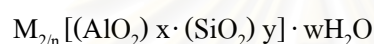
ที่มา : สัญชนาถ และ สมชาย, 2540

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ



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

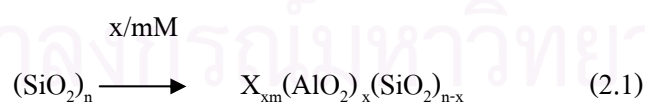
สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์



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

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

การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็นโครงสร้างตาข่ายนั้นทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคตไอออนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ทดังสมการที่ (2.1)



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

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

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

เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตาม Hydrological system ได้ดังนี้ คือ

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

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

1.3) Marine Sediments ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้ อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง

1.4) Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

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

1.6) Burial Diagenetic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)

1.7) Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน imerstirial และ globules

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

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

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่น วิธีการเรียกชื่อที่คล้ายระบบของ IUPAC โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

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

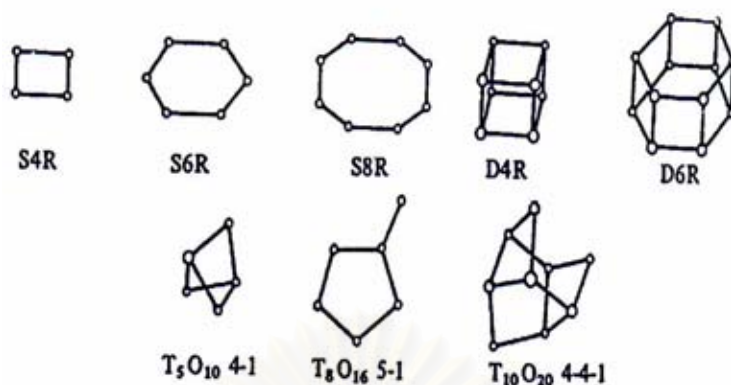
การเรียกชื่อดังกล่าวต้องมีความรู้เกี่ยวกับหน่วยเซลล์สำหรับวิธีอื่นๆ เช่นการใช้ตัวอักษรหรือ กลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นที่นิยมมากกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่า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

2.1.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์

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

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

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



รูปที่ 2.3 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ

ที่มา : Breck, 1974

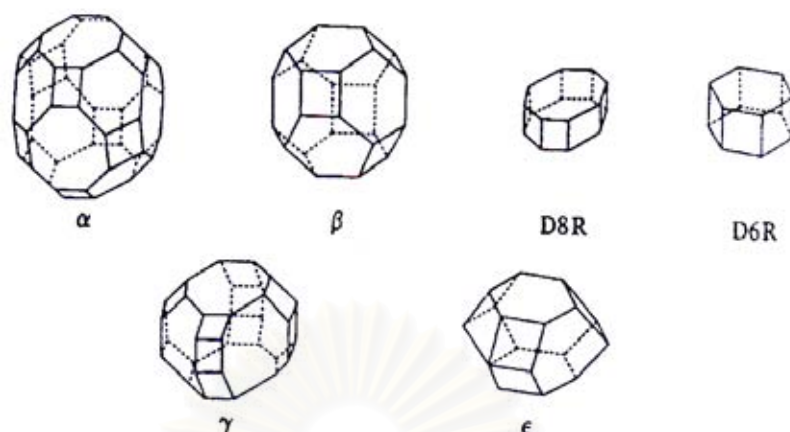
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ ตามโครงสร้างทุติยภูมิ

ชนิด	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ
1	วงเดี่ยว 4 มุม (single 4-ring, S ₄ R)
2	วงเดี่ยว 6 มุม (single 6-ring, S ₆ R)
3	วงเดี่ยว 8 มุม (single 8-ring, S ₈ R)
4	วงคู่ 4 มุม (Double 4-ring, D ₄ R)
5	วงคู่ 6 มุม (Double 6-ring, D ₆ R)
6	วงเชิงซ้อน 4-1 (complex 4-1, T ₅ O ₁₀ 4-1)
7	วงเชิงซ้อน 5-1 (complex 5-1, T ₈ O ₁₆ 5-1)
8	วงเชิงซ้อน 4-1-1 (complex 4-1-1, T ₁₀ O ₂₀ 4-1-1)

ที่มา : Breck, 1974

3) หน่วยโครงสร้างหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงขนาดใหญ่ที่สมมาตรได้จากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น

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



รูปที่ 2.4 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่

ที่มา : Breck, 1974

นอกจากนี้อาจแบ่งซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง 9 ชนิด ข้างต้นดังนี้

1) Analcite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring โดยจะมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumontite

2) Natrolite Group มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบคือ Natrolite, Edingtonite และ Thosonite

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

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

5) Heulandite Group โครงสร้างเกิดจาก 5-ring 4วงต่อเชื่อมกับ 4-ring 2 วง ซึ่งจะเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ซึ่งเมื่อเชื่อมโยงต่อกันจะทำให้เป็นแบบ Brewsterite การเชื่อมต่อของบล็อกโดยผ่านโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ heulandite และ stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-ring ในบางส่วน

6) Mordenite Group โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring 4 วง ต่อเชื่อมกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม กลุ่มนี้จะมีทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ modenite, epstilbite, ferrierite, bikitaite, dachiardite, ZEM-5 และ ZEM-11

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

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

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

2.1.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปจะใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Treatment) และวิธีสังเคราะห์ซิลิเกต (silicate) ในช่วงเวลา 100 ปีที่ผ่านมา มีการค้นพบวิธีการสังเคราะห์ขึ้นได้หลายวิธี ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้นเราจะทำให้แหล่งของอะลูมินา ซิลิกา และอัลคาไลน์ รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน และจะก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิที่เกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 °C หรือสูงกว่านั้นที่ความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น ในบางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำยู่สุดขึ้นกับความสัมพันธ์หลายอย่างซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของไอออนบวกของทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่โดยปกติการก่อตัวขึ้นของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักนั้นอยู่ที่ว่าไอออนบวกที่มีอยู่นั้นจะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ (templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบ หรือแม่พิมพ์เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะ ทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างเหมือนโครงสร้างของแม่แบบนั้นๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เรานำมาเป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ 4 ชนิด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์

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

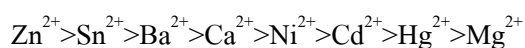
ที่มา : Breck, 1974

2.1.5 ประโยชน์ของซีโอไลต์

จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมายซึ่งพอจะรวบรวมได้ดังนี้คือ

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

สำหรับแคตไอออนที่เป็นไดวาเลนต์ (divalent) มีดังนี้



การแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของแคตไอออน
- อุณหภูมิที่ใช้
- ความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย
- ชนิดของแอนไอออนที่รวมตัวกับแคตไอออนในสารละลาย
- ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีในสารละลายเอควียส

(aqueous solution)

5) ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาตามมาได้ คือ ฟอสเฟตจะทำให้พืชน้ำ หรือสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดเมื่อมีการตาย และเมื่อทับถมกันมากเข้าจะทำให้เน่าเสีย นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

ตัวอย่างการนำสารซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ

(1) การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียของชุมชน

ในการศึกษาช่วงเริ่มต้นโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อกำจัดแอมโมเนียม ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียพบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนของแอมโมเนียมได้ต่ำ ทำให้กำจัดแอมโมเนียมได้น้อย และเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำเค็มตามมาด้วย

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

(2) การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกลอกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอก

หน้าที่หลักของฟอสเฟตที่ผสมอยู่ในผงซักฟอก คือ ลดแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่มีอยู่ในน้ำกระด้างโดยใช้ซีโอไลต์ชนิดที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ไปทำการกำจัดแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) จากสารละลายแล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม โดยที่ผงซักฟอกเหล่านั้นจะรับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมซึ่งลดปริมาณของฟอสเฟตที่มีอยู่ในห้อยู่ในระดับต่ำ หรือไม่มี

อยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ในหลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และในสถานที่อื่นๆ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบนี้มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ ซีโอไลต์ในแต่ละปีพบว่ามีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้กันอย่างมากมายแล้วทั่วโลก

(3) การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซิน โดยใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากได้มีการตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคต จึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่มีใช้ปิโตรเลียมและมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ในอนาคต

เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นกว่าถ่านหินและการสังเคราะห์ก็เกิดโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งโดยตรง หรือจะนำไปใช้เป็นแบบผสมกับน้ำมันเบนซินก่อนที่จะใช้กับเครื่องยนต์

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

บริษัท โมบิล ออยส์ ได้สร้างโรงงานที่ใช้กระบวนการ MTG และได้ใช้ซีโอไลต์ชนิด ZMS-5 เป็นแห่งแรกที่ โมทูเนีย ประเทศนิวซีแลนด์ และเริ่มต้นทำการผลิตในปี ค.ศ.1985 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่นิ่ง (fixed bed) และที่ประเทศเยอรมันก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้า และก็สามารถประสบความสำเร็จโดยได้มีการสร้างโรงงานต้นแบบไว้ที่เมืองเวสเซลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึง ร้อยละ 90 และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบดได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบอื่นๆ เช่น แก๊สธรรมชาติ มาใช้แทนเมทานอลได้

(4) การแยก กำจัด และนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

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

2.2 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash)

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินในที่ที่มีอากาศพอเพียง ลอยปะปนกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้และถูกจับไว้โดยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) หรืออาจจะมาจากการดักจับด้วยถุงกรองฝุ่นก่อนที่จะปล่อยหรือระบายอากาศร้อนออกจากปล่องควัน

2.2.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งจากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3-30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วนจะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ระหว่างการเผาไหม้เช่น ดินเหนียวและดินดานจะสูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนจากการสลายตัวซึ่งจะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับตัวใหม่เกิดเป็นคาร์บอนเนต (CO_3) ในถ่านหินจะมีสารแคลเซียมคาร์บอนเนต (CaCO_3) ส่วนในเถ้าลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เถ้าลอยเหล่านี้ประกอบไปด้วยซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบอัลคาไลน์ นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอนเนต และซัลเฟต

ระดับปริมาณเถ้าลอยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ต่างๆ กันในโลก หรืออาจต่างกันเนื่องจากระดับชั้นของพื้นผิวในพื้นที่เดียวกัน หรือมีความต่างกันในเมืองที่ต่างกัน

2.2.2 การจัดรูปของเถ้าลอยขณะทำการเผาไหม้

ขณะทำการเผาไหม้เถ้าลอยจะเกิดการจัดรูปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) ถ่านหนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของเถ้าหลอมรวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาเผา ซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีหลายมุมเนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค ถ่านหนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อให้เกิด สแลก (Slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุม

2) ไอ เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของไอนี้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของเถ้าลอยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับเถ้าลอย ปริมาณของไอที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ความเข้มข้นและสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

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

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา พบว่าเถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของเถ้าลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าเถ้าลอยที่มีผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ นั้นได้แก่ แมกเนไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มัลไลต์ และควอตซ์

สิ่งที่น่าสนใจของเถ้าลอย คือความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณกว่าร้อยละ 20 ของเถ้าลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลมมีส่วนประกอบของซิลิกา ในโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 20-200 ไมครอน เถ้าเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการจัด สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของเซโนสเฟียร์จะคล้ายกับเถ้าลอยดังที่จะกล่าวต่อไป

2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บเถ้าลอยถ่านหิน

1) เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitators) วิธีควบคุมนี้ใช้ใน โรงผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วระหว่างแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านอนุภาคของเถ้าลอยจะได้รับประจุไฟฟ้าลบ และจะถูกดึงดูดให้เกาะบนขั้วบวก ในทางปฏิบัติเครื่องนี้จะต้องทำความสะอาดอย่างต่อเนื่องโดยการเคาะเพื่อไล่อนุภาคที่ดักเก็บได้

สำหรับการเก็บเถ้าลอยนั้น เครื่องมือที่ใช้ดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 เนื่องจากคุณภาพของถ่านหินที่ใช้ใน โรงไฟฟ้าจะมีคุณภาพแย่งเพราะมีปริมาณเถ้ามากขึ้น และเถ้านี้ส่วนประกอบจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะฉะนั้นความสามารถในการทำงานของเครื่องตกตะกอนจะต้องเหมาะสมกับเถ้าลอยที่ถูกดักเก็บ เช่น มีความต้านทานไฟฟ้า แต่สมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถ่านหินที่ใช้ หรือการทำงานของหม้อไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

2) ถุงกรอง (bag filter house) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคเถ้าลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงในโครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องตกตะกอน

3) ไซโคลน (cyclone collector) เครื่องไซโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของแก๊สจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกของอนุภาคเถ้าลอยที่หนักออกจากแก๊ส เครื่องไซโคลนควรมีประสิทธิภาพร้อยละ 70-85 เมื่อใช้กับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง เครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์ (Cyclone-Fired Boiler) จะทำให้เกิดเถ้าที่มีขนาดเล็กจำนวนมากว่าหน่วยที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องไซโคลนจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าอุปกรณ์ดักเก็บจากที่กล่าวมาข้างต้น

2.2.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ

เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ เถ้าลอยบิโทมินัส และเถ้าลอยลิกไนต์ ความแตกต่างของเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์จะหยาบกว่า คือ มีช่วงกว้างกว่า ค่าดัชนีหักเหของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า และพวกเถ้าลอยลิกไนต์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มากกว่าเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ในทางตรงกันข้ามสำหรับเถ้าลอยบิโทมินัสนั้นจะมีปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์มากกว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทบิโทมินัสเป็นถ่านหินยุคเก่าซึ่งอยู่ในช่วงอายุไครแอสติก ส่วนถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทลิกไนต์เป็นถ่านหินยุคใหม่จะอยู่ในช่วงอายุจูราสสิก

2.2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

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

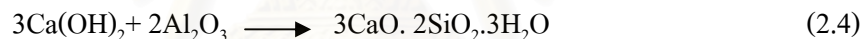
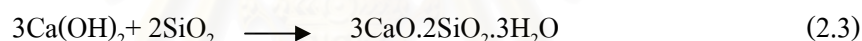
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในประเทศต่างๆ ตามที่รวบรวมและสรุปไว้พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่าง

ถ่านหินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง 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 ทั้งนี้เพราะว่าทั้งเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

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



2.2.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยถ่านหิน

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

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

เนื่องจากเถ้าลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกกด ขนาดของเม็ดเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่านหิน และอุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้ ในสภาพปกติเถ้าลอยจะ

เป็นฝุ่นฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะแฉะเป็นเลนเมื่ออ้อมตัวด้วยไอน้ำ แต่ถ้าผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม และได้รับการบดอัดที่เพียงพอแล้วถ้ำล่อยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (unconfined compressive strength) สูง

การจัดรูปของถ้ำถ่านหินระหว่างส่วนของถ้ำล่อยกับถ้ำหนักจะขึ้นอยู่กับชนิดของเตาเผาชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิของการหลอมถ้ำ และชนิดของหม้อต้ม เตาเผาเป็นปัจจัยแรกที่สำคัญในการเกิดการแยกส่วนของถ้ำล่อย และถ้ำหนัก เช่น เตาเผาชนิดสโตเกอร์ (stoker) จะมีการปล่อย ถ้ำล่อยออกมาน้อยที่สุด

สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำล่อยโดยทั่วไป

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

ในหน่วยไซโคลนอุณหภูมิของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ้ำประมาณร้อยละ 80 - 85 ของถ้ำที่จะหลอม และรวมตัวกันเกิดเป็นสแลก ส่วนหนึ่งของถ้ำล่อยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในหน่วยพุลเวไรซ์ (pulverized coal) มีถ้ำล่อยเกิดขึ้นร้อยละ 65 - 80 และเกิดเป็นถ้ำหนักร้อยละ 20 - 35 สำหรับอุณหภูมิการหลอมของถ้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ถ้ำที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปของถ้ำหนักนั้นคือ หม้อต้มไอน้ำที่กันเปียกจะก่อให้เกิดถ้ำหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่กันแห้ง

2.2.7 ประโยชน์ของถ้ำล่อยถ่านหิน

1) การใช้ถ้ำล่อยเป็นวัสดุถม (fill material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับถ้ำล่อยในอัตราส่วนที่เหมาะสมและทำการบดอัดอย่างดีแล้ว ถ้ำล่อยเป็นวัสดุถมที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูง และเกิดการยุบตัวน้อยค่าสัดส่วนของน้ำหนักสูงสุดที่ถ้ำล่อยสามารถรับได้ในการบดอัดถ้ำล่อยในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีบดอัดมาตรฐาน (standard compaction) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 18 - 45 และค่าความหนาแน่นสูงสุด (maximum dry unit weight) จะอยู่ในช่วง 9 - 16 (kN/m³) แต่ในสนามเป็นการยากที่จะบดอัดถ้ำล่อยให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด โดยปกติมักจะกำหนดให้บดอัดได้ที่ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของความหนาแน่นสูงสุด

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

2) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุในโครงสร้างของถนน

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

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

- การปรับปรุงสมบัติเถ้าลอยด้วยปูนขาว การผสมปูนขาว (lime) ในเถ้าลอยจะช่วยให้กำลังอัดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการเพิ่มกำลังอัดนั้นต่างจากการผสมปูนซีเมนต์คือในกรณีของปูนซีเมนต์นั้นจะมีสารเชื่อมประสานจะเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) ระหว่างปูนขาวกับซิลิกาในเถ้าลอยในเกณฑ์กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมักจะใช้ปูนขาวผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์

- การใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงสมบัติของดิน ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้กำลังอัดของซอยแอกกริเกตเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่พบว่าจะต้องใช้ปูนขาวผสมกับเถ้าลอยในการใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติ ทั้งนี้เพื่อให้มีปฏิกิริยาปอซโซลานิกสร้างสารเชื่อมประสานได้มากขึ้น ซอยแอกกริเกตที่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ดีโดยใช้เถ้าลอยผสมปูนขาวได้แก่พวกทรายที่มีมวลละเอียดน้อย

- การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีต (asphaltic concrete) แอสฟัลติกคอนกรีต คือ ส่วนผสมระหว่างหินย่อย และยางแอสฟัลต์ ซึ่งมักใช้ปูผิวถนน ในการออกแบบส่วนผสมจะต้องใช้หินย่อยที่มีขนาดละเอียดดี และมีมวลละเอียดที่เรียกว่า “ฟิลเลอร์

(filler)” ผสมอยู่ด้วยเพื่อแทรกภายในช่องว่างระหว่างเม็ดหินเพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณยางแอสฟัลต์ที่จะต้องใช้ และทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นสูงเมื่อได้รับการบดอัด ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ ฝุ่นที่เกิดจากการโม่หินปูน (lime stone dust) ผลงานวิจัยในหลายประเทศได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็นฟิลเลอร์แทนหินปูนได้

3) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เป็นสารเพิ่ม (admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้งานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้ คือ

- ข้อดี - สภาพการใช้งาน (workability) ดี
- มีความต้านทานต่อการแยกกลุ่ม (segregation) ดี
- มีค่าความซึมได้ของน้ำ (permeability) ดี
- มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต (sulphate resistance) ดี
- เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ช้าทำให้ปริมาณความร้อนที่

ระบายออกในขณะที่คอนกรีตแข็งตัวมีค่าน้อย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในกรณีการเทคอนกรีต

- ข้อเสีย - อัตราการเพิ่มของกำลังอัดช้า
- สมบัติของเถ้าลอยแปรปรวนไม่แน่นอน ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก

2.3 เถ้าลอยขานอ้อย (Bagasse fly ash)

ขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาล ในปีหนึ่งๆ มีขานอ้อยที่ผลิตได้ในประเทศไทยไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน ซึ่งร้อยละ 30 ของขานอ้อยเหล่านี้เป็นพลังงานความร้อนในโรงงานน้ำตาล ขานอ้อยที่เหลืออีกจำนวนมากเป็นแหล่งใหญ่ของไฟเบอร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เพื่อทดแทนไม้ใบกว้าง ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุได้หลายประเภท เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำขานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงานน้ำตาลอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่นิยมกันมาก โดยขานอ้อยได้กลายเป็นวัสดุที่มีค่าไม่ได้ทิ้งเป็นของเสียอีกต่อไป

2.3.1 กระบวนการผลิตน้ำตาล

มีขั้นตอนดังนี้

1) การเตรียมชิ้นอ้อย

อ้อยจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วเทลงบนสะพานลำเลียงอ้อยผ่านไปเข้ามีดตัด เพื่อตัดอ้อยออกเป็นท่อนเล็กๆ จากนั้นจะส่งต่อมายังเครื่องฉีกย่อยอ้อย (shredders) ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีกอ้อยออกเป็นฝอย โดยที่ไม่สกัดน้ำอ้อยออก

2) การหีบสกัดน้ำอ้อยจากอ้อย

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

สำหรับกากอ้อยที่ได้จากการหีบสกัดชุดสุดท้ายจะเหลือน้ำตาลน้อยมากและมีความชื้นประมาณร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 52 จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำและสามารถนำไปแปรรูปเป็น เชื้อกระดาษ บอร์ดชนิดต่างๆ ได้

3) การทำให้น้ำอ้อยใส

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

4) การต้มและการเคี่ยวให้น้ำตาลตกผลึก

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสจะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งจะต้องทำการต้มระเหยน้ำออกไปประมาณ 2 ใน 3 ส่วน โดยหม้อต้ม (evaporator) ที่มีการวางต่อกัน โดยปกติจะวางเรียงกัน 4 ใบ น้ำเชื่อม (syrup) ในหม้อสุดท้ายมีความเข้มข้นประมาณ 60 บริกซ์ น้ำเชื่อมหลังจากผ่านตะแกรงกรองแล้ว จะถูกส่งไปยังหม้อเคี่ยว (vacuum pan) เพื่อต้มเคี่ยวจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเกินกว่าสถานะอิ่มตัว น้ำตาลซูโครสจะแยกเป็นผลึกออกมาจากน้ำเชื่อม ในสภาพที่มีผลึกน้ำตาลซูโครสปนอยู่ในน้ำเชื่อมอิ่มตัว เรียกสารละลายผสมนี้ว่า แมสคิวท (massecuite) เมื่อทำให้แมสคิวทนี้เย็นตัวลงด้วยรางกวนแบบตั้งหรือแบบนอน ผลึกน้ำตาลซูโครสจะยิ่งเติบโตได้ดีและแข็ง พร้อมทั้งจะนำไปแยกผลึกต่อไป

5) การปั่นแยกผลึกและทำให้แห้ง

แมสคิวทิตที่เย็นตัวลงเป็นผลึกน้ำตาลซูโครสที่แข็งดีแล้ว จะถูกปล่อยลงในเครื่องปั่นแยกที่เรียกว่า centrifugal ภายในเป็นลักษณะคล้ายตะแกรงที่มีรูเล็กๆ ขนาด 400 - 600 ช่องต่อตารางนิ้ว หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1000 - 1800 รอบต่อนาที ซึ่งจะแยกกากน้ำตาลหรือที่เรียกว่า โมลาส (molasses) ออกไป ส่วนเมล็ดน้ำตาลจะนำไปผ่านการอบให้แห้ง เก็บเข้าโกดังเพื่อการจำหน่ายต่อไป

2.3.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำตาลและการนำไปใช้ประโยชน์

ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อย จะมีวัสดุเศษเหลือที่สำคัญ 4 อย่าง คือ กากน้ำตาล กากอ้อย กากตะกอน และเถ้าลอยขานอ้อย ซึ่งสามารถนำวัสดุเศษเหลือที่ได้เหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1) กากน้ำตาล (molasses)

เป็นของเหลวสีน้ำตาลที่เหนียวข้น ซึ่งไม่สามารถที่จะตกผลึกน้ำตาลได้อีกด้วยเครื่องจักรของโรงงานน้ำตาลธรรมดา โดยทั่วไปจะมีซูโครสปนอยู่ในกากน้ำตาลประมาณร้อยละ 7.5 กากน้ำตาลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ

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

2) กากอ้อยหรือขานอ้อย (bagasse)

เป็นวัสดุที่เหลือจากการหีบอ้อย มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยที่ขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ

- นำมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในการต้มเคี่ยวน้ำตาล
- ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- ใช้ทำเยื่อกระดาษ
- นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัด เพื่อใช้ในการก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ในประเทศไทยจะใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานเกือบทั้งสิ้น โดยปริมาณขานอ้อยที่เผาเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปริมาณขาน

อ้อยทั้งหมดที่เหลือก็ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ การใช้ชานอ้อยมาทำเยื่อกระดาษและอัดเป็นแผ่นยังมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงยังเหลือชานอ้อยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อีกมาก

3) กากตะกอนอ้อย (filter cake)

เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลหลังจากที่กรองเอาน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลไปแล้ว มีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายดินร่วนและมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและแคลเซียมอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการนำกากตะกอนอ้อยมาใช้เป็นปุ๋ย

4) เถ้าลอยชานอ้อย (bagasse fly ash)

เถ้าลอยนี้เกิดจากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจายจึงมีการฉีบน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับเถ้าลอยให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ จากนั้นจึงรวบรวมและนำไปทิ้งซึ่งยังไม่มีนำไปใช้ประโยชน์มากนัก

2.3.3 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยชานอ้อยที่เกิดขึ้น

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

2.4 การผลิตตะกั่วแท่งจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า

2.4.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่รถยนต์

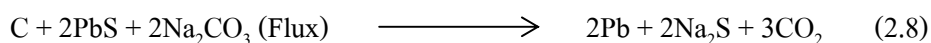
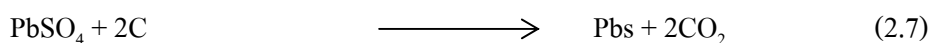
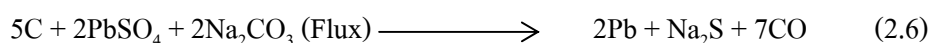
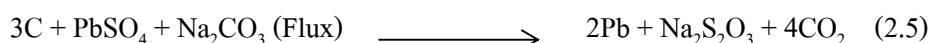
แบตเตอรี่ หมายถึงแหล่งที่สะสมพลังงานในรูปเคมีแล้วจ่ายเป็นพลังงานไฟฟ้าออกไปใช้งานเป็นกระแสตรง แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์ (SLI, starting and ignition battery) เป็นแบตเตอรี่น้ำชนิดกรด-ตะกั่ว ใช้งานเป็นต้นกำลังในการติดเครื่องยนต์ เรือยนต์จุดไฟแสงสว่างจุดหัวเทียน ฯลฯ (ไสว โลงณะศุภฤกษ์, 2539) แบตเตอรี่รถยนต์มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่

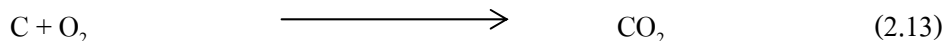
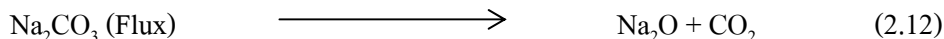
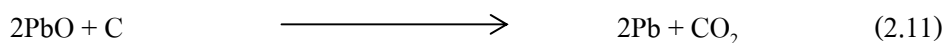
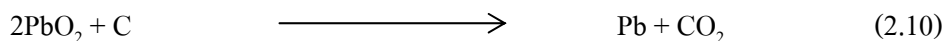
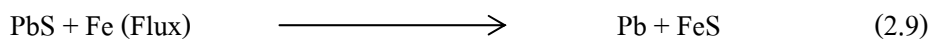
เปลือก (Case) เปลือกแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถยนต์แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ เปลือกพลาสติก ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิด polypropylene สามารถนำกลับมาใช้หมุนเวียนใหม่ได้เปลือกอีกชนิดได้แก่ เปลือกยางแข็งหรือเปลือกคำ

	(hard rubber) เปลือกชนิดนี้มีปัญหาในการกำจัดและยังมีปัญหาอันตรายจากสารที่ใช้เติมแต่งในเปลือกยาง (filler material) เช่น asbestos fibers
แผ่นธาตุ (Electrodes)	แผ่นธาตุบวก (positive electrodes) และแผ่นธาตุลบ (negative electrodes) มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ โกรง (grid) ทำด้วยอัลลอยด์โลหะตะกั่วผสมพลวง และเพสต์ (paste) ซึ่งเป็นส่วนผสมของตะกั่วออกไซด์ กรดกำมะถัน น้ำ และสารปรุงแต่งของแบตเตอรี่แต่ละชนิด แผ่นธาตุที่จุ่มในน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งเป็นกรดกำมะถัน เมื่อเกิดการถ่ายเทประจุ จะเปลี่ยนเป็นตะกั่วซัลเฟต (PbSO ₄)
แผ่นกั้น (Separator)	เพื่อที่จะกั้นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบออกจากกัน จำเป็นต้องมีแผ่นกั้นที่มีความพรุนที่ให้สาร Electrolyte ไหลผ่านได้ แผ่นกั้นที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ทั่วไป ได้แก่ PVC, cellulose, กระดาษใยแก้ว, micro porous polyethylene ส่วนประกอบของแผ่นกั้น เมื่อถูกเผาไหม้ในเตาหลอมจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสารพิษที่เป็นสารประกอบของคลอรีน เช่น ไดออกซิน และสารพิษอนินทรีย์ ปนอยู่ในก๊าซที่ออกจากเตาหลอม
น้ำยาอิเล็กโตรไลต์	เป็นกรดกำมะถันเข้มข้นประมาณ 10-15% ภายหลังจากฟอร์มมิ่ง (forming) และใช้งาน กรดกำมะถันทำปฏิกิริยากับตะกั่วออกไซด์เป็นตะกั่วซัลเฟต ความเข้มข้นลดลงเหลือประมาณ 3-5% นอกจากนี้ส่วนประกอบหลักดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นซึ่งอาจแตกต่างกันไปบ้าง เช่น ขั้วทองแดงสำหรับแบตเตอรี่บางยี่ห้อ จุกฝาพลาสติก เป็นต้น

2.4.2 กรรมวิธีการหลอมตะกั่ว

เป็นการหลอมโดยใช้สารโซเดียมคาร์บอเนตเป็นฟลักซ์ ช่วยในการดึงซัลเฟอร์ออกจากตะกั่วและลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการหลอมโดยอาจมีการเติมเศษเหล็กลงไปด้วยสัดส่วนของโซดาแอช เหล็ก และถ่านโค้ก จะปรับให้เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ใช้หลอม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ (2.5) – (2.13)





จากปฏิกิริยาเห็นได้ว่า โซเดียมคาร์บอเนตจะรีดิวซ์ตะกั่วซัลไฟด์ให้เป็นตะกั่วและให้สารขึ้นกลาง (Intermediate compound) ของเกลือโซเดียมหลายชนิด ส่วนใหญ่จะเป็น Na_2S และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ โดยอาจมี Na_2SO_4 และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$ เจือปนอยู่ด้วย การเติมโซดาแอชอาจช่วยในการลดปริมาณกำมะถันเพื่อรีดออกไซด์ที่ออกจากเตาหลอม

ปฏิกิริยาของเหล็กที่เติมลงไปจะเป็นเช่นเดียวกับโซดาแอช โดยจะไปรีดิวซ์ตะกั่วซัลไฟด์ให้เป็นตะกั่วแท่ง กากตะกรันที่เกิดขึ้นในการหลอมด้วยโซดาแอช ประกอบด้วยเกลือซัลไฟด์และออกไซด์ของโซเดียมเหล็ก และตะกั่ว และอาจมีส่วนประกอบของ Silica, Alumina และออกไซด์ของโลหะอื่นๆ เจือปนอยู่ด้วย รวมทั้งถ่านคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดซึ่งอาจสูงถึง 20% กากตะกรันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเรียกว่า โซเดียมแมท (sodium sulphide containing matte) ประกอบด้วย Na_2S , FeS และ PbS อีกส่วนหนึ่งเป็นกากตะกรันของออกไซด์ (slag) ประกอบด้วย Na_2O และ SiO_2 (สุรพัทธ์ พันพานิชย์กุล, 2539) ทั้งโซเดียมแมทและกากตะกรันจะอยู่รวมกันเป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่แยกชั้น (phase) ให้เห็นอย่างชัดเจน สารประกอบทั้งหมดของกากตะกรันส่วนใหญ่เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีและมีคุณสมบัติเป็นสารดูดความชื้น (hygroscopic) ดังนั้นกากตะกรันที่ได้จึงไม่อยู่ตัวและทำปฏิกิริยากับความชื้นและออกซิเจนในอากาศเกิดเป็น NaOH และ SO_2 ขึ้นได้อีก ขั้นตอนการถลุงหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า

2.4.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่งจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่ง เกิดขึ้นในขั้นตอนการผ่าแยกชิ้นส่วน แบตเตอรี่เก่า (breaking and separation) มีการฉีดพ่นน้ำเพื่อหล่อเย็นใบเลื่อยที่ใช้ในการผ่าแยกชิ้นส่วนแบตเตอรี่ และเพื่อล้างคราบน้ำกรดและน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ที่ออกจากชิ้นส่วนก่อนเข้าสู่เตาหลอมลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียคือ มีค่า pH ต่ำ และมีตะกั่วละลายปนอยู่สูง การบำบัดในปัจจุบันคือ ใช้สารเคมีปรับค่า pH ของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 7-9 แล้วจึงตกตะกอนแยกตะกอนออกจากน้ำใส ส่วนบน ตะกอนที่เกิดขึ้นจะนำไปหลอมรวมในเตาหลอม น้ำใสส่วนบนที่ผ่านการปรับ pH แล้ว

จะถูกสูบเวียนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตโดยไม่มี การปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันสารเคมีที่ทางโรงงานใช้ในการปรับ pH ได้แก่ ปูนขาว และ โซเดียมไฮดรอกไซด์

2.5 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 ภายในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีแผ่เป็นแผ่นได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนักคือ มีค่าออกซิเดชัน (oxidation number) ได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้รูปที่เสถียรกว่า โลหะหนักอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (food chain) (ประภคต เลิศจร สอรัมย์ดี, 2539)

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งโลหะต่างๆ ออกตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น 4 ประเภท คือ

- 1) โลหะที่ให้คุณสมบัติประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นต้น
- 2) โลหะที่ไม่ก่อประโยชน์และโทษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อลูมิเนียม
- 3) โลหะที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่น ปรอท ตะกั่ว และสารหนู เป็นต้น
- 4) โลหะประเภทที่ก่อประโยชน์ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับเพียงเล็กน้อยแต่ให้โทษถ้าได้รับปริมาณ

ที่สูง

2.5.1 ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุหมู่ 4A ทุกธาตุในหมู่นี้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ตะกั่วมีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วย รัศมีอะตอม (โคเวเลนต์) 154 pm รัศมีไอออน M^{+2} เป็น 120 pm ความหนาแน่น 11.3 กรัม/ลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1744 องศาเซลเซียส พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนชั้นที่ 1+2 เป็น 2167 กิโลจูล/โมล ชั้นที่ 1+2+3+4 เป็น 9330 กิโลจูล/โมล สภาพไฟฟ้าลบ เท่ากับ 1.55 การนำไฟฟ้าคือออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป PbO , PbO_2 และ Pb_3O_4 ซึ่ง Pb^{2+} จะเสถียรกว่า Pb^{4+} เลดมอนออกไซด์หรือลิทาร์จได้จากการเผาตะกั่วในอากาศเป็นผงสีเหลือง ถ้าเผา PbO จะให้

$Pb_3O_4(2PbO.PbO_2)$ หรือตะกั่วแดงใช้เป็นสารสีทากันสนิม เลดไดออกไซด์สารสีน้ำตาลแก่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี สลายตัวความร้อนให้ PbO และ O_2 ใช้ PbO_2 ในการทำแบตเตอรี่และทำแก้วโดยใช้ PbO แทน CaO จะได้แก้วฟลินต์ มีดัชนีหักเหสูง ใช้ทำแก้วเจียรไน เกลือของตะกั่ว $2+$ โดยทั่วไปจะไม่ละลายน้ำ ยกเว้นอะซิเตด และไนเตรดเมื่อละลายน้ำก็จะให้อิออน Pb^{2+} Pb^{2+}_{aq} เกลือของตะกั่ว $2+$ ทุกชนิดละลายได้ในเบสจำนวนมากให้พอลิเมอร์ $Pb(OH)^{2-}_4$

แร่ตะกั่วเป็นแร่หนึ่งซึ่งได้มีการค้นพบ และนำมาใช้ประโยชน์ภายในประเทศตั้งแต่สมัยโบราณ แหล่งแร่ตะกั่วที่เป็นแหล่งใหญ่ มีคุณค่าทางเศรษฐกิจในปัจจุบันได้แก่ แหล่งแร่ตะกั่วในบริเวณอำเภอทองผาภูมิ สังขละบุรี และศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี ถือได้ว่าเป็นแหล่งแร่ตะกั่วที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ แร่ตะกั่วที่พบเป็นแหล่งแร่ใหญ่ คือ แร่กาลีน่า (galena, PbS) มีสีและสีผงละเอียดเป็นสีเทาตะกั่ว มีความวาวแบบโลหะ มักพบเป็นรูปลูกบาศก์หรือลูกเต๋า อาจพบเป็นเม็ดเล็กๆ เกาะกันเป็นก้อนๆ มีความแข็ง 2.5 มีความถ่วงจำเพาะ 7.5 (งามพิศ, 2525 อ้างถึงในประภคกุลเลิศจรัสอร่ามดี, 2539)

2.5.2 ประโยชน์ของตะกั่ว

1) ตะกั่วประมาณหนึ่งในสามของผลผลิตนำไปใช้ในรูปของตะกั่วออกไซด์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีแดง (red lead) สีเหลืองส้ม (litharge) และสีขาว (lead carbonate) ตะกั่วขาวและแดงใช้ในการทำสี ตะกั่วสีส้มเป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมกระจก เครื่องเคลือบบางชนิด

2) ใช้ทำหม้อแบตเตอรี่และโลหะหุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าต่างๆ ประมาณร้อยละ 25 ของผลผลิต

3) สารเตตะเอทิลเลด (tetraethyllead $Pb(C_2H_5)_4$) ซึ่งเป็นตัวเติมในน้ำมันเบนซินพลังสูงในอัตรา 3 กรัมต่อแกลลอนและเพื่อให้เครื่องยนต์เดินเรียบขึ้น (antiknock) ส่วนนี้ใช้ประมาณหนึ่งในสาม นอกจากนี้เป็นการใช้ที่สูญเสียไปเลยไม่สามารถกลับมาใช้ได้อีก เพราะเผาแล้วกลายเป็นไอ เป็นมลพิษ (Pollution) ต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันเลิกใช้แล้วในประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลก

4) ใช้เป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมทำท่อน้ำต่างๆ ตลอดจนทำพีวีซี

5) ใช้ในการผลิตกระสุนปืนชนิดต่างๆ

6) ใช้ในอุตสาหกรรมผสมต่างๆ เช่น

(6.1) ตะกั่วดีบุก เป็น โลหะบัดกรี (solder)

(6.2) ตะกั่วผสมพลวง เป็น โลหะตัวพิมพ์ (type metal)

(6.3) ตะกั่วผสมดีบุกและทองแดง เป็น โลหะพิวเตอร์ (pewter)

(6.4) ตะกั่วผสมบิวมัสและแคดเมียม เป็น โลหะที่เรียกว่า (wood's alloy)

(6.5) ใช้ในระบบสัญญาณไฟไหม้อัตโนมัติซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 70 องศา (สุจิตร์, 2530) อ้างถึงในประกาศ เลิศจรส์อร่ามดี, 2539)

2.5.3 พิษของตะกั่ว

อาการของพิษเมื่อได้รับตะกั่วอินทรีย์ การแสดงออกทางจิตจะเด่นชัดกว่าอาการเจ็บไข้ธรรมดา แต่ในรายรุนแรงจะมีอาการที่พบเห็นได้ทั่วไป คือ ความกระวนกระวาย ฝันร้าย จิตหลอนและหลงผิด อาการแทรกซ้อนหลายๆ อย่างจะเด่นชัด ได้แก่ อาการเพื่อเชื้อ คลุ้มคลั่ง สับสน และการเก็บตัวไม่สู้สิ่งกับใคร ถ้าหากได้รับสารตะกั่วมากมายอาจเกิดอาการชักกระตุกทันทีทันใด ในรายที่รุนแรงน้อยกว่าผู้ป่วยอาจเริ่มด้วยการนอนไม่หลับ นอนหลับยาก นอนหลับๆ ตื่นๆ และกระวนกระวาย บางครั้งจะฝืนอย่าง โลดโผนและน่ากลัว ตอนกลางวันอาจมีอาการตื่นเต้นตกใจให้เห็น อาการปวดศีรษะจะกลายเป็นเรื่องปกติและมักจะรุนแรง และอาการวิงเวียนศีรษะจะพบได้เสมอ ในรายที่รุนแรงจะต้องมีการควบคุมแนะนำอย่างเข้มงวด และต้องการพยาบาลที่เชี่ยวชาญ ทั้งนี้เนื่องจากอาการประสาทหลอนและแนวโน้มในการฆ่าตัวตายสูง

2.5.4 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและผลต่อมนุษย์ของตะกั่ว

ตะกั่วสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและมีผลต่อมนุษย์ได้หลายทางดังนี้

- 1) ในอดีตการผลิตสีจะผลิตจากสารประกอบตะกั่ว ดังนั้นที่สำคัญของโรคตะกั่วที่เป็นพิษน่าจะมาจากสีเก่าที่ผลิตไว้ เด็กรุ่นใหม่บางคนมีแนวโน้มที่จะกัดเคี้ยวสิ่งของ นิยชอบกินอาหารแปลกๆ ทำให้สีที่ประกอบด้วยตะกั่วถูกนำเข้าสู่ระบบย่อยอาหาร โดยบังเอิญ
- 2) ท่อน้ำประปาในบ้านส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของสารตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วเป็นโลหะที่หลอมง่ายทนต่อการกัดกร่อนสูง
- 3) ตะกั่วที่ใช้บัดกรี เช่น การใช้สารบัดกรีที่มีส่วนผสมของสารตะกั่ว ในกรณีที่น่าระบบทำน้ำร้อนมาใช้ในการบริโภคน้ำร้อนจะกัดเซาะตะกั่วจากสารบัดกรีท่อได้ง่ายกว่าน้ำเย็น นอกจากนี้ตะกั่วที่ใช้บัดกรีอาหารกระป๋อง โดยเฉพาะถ้าหากว่าอาหารถูกปล่อยไว้ในกระป๋องหลังจากเปิดกระป๋องแล้ว กระบวนการกัดเซาะจะละลายตะกั่วจากสารบัดกรีลงในอาหารได้
- 4) แบตเตอรี่รถยนต์ แบตเตอรี่รถยนต์เก็บไฟแบบกรดตะกั่ว
- 5) เครื่องสำอางบางประเภทที่มีปริมาณตะกั่วสูง
- 6) ตะกั่วถ่วงเบ็ดของนักตกปลา ในประเทศอังกฤษ ตะกั่วถ่วงเบ็ดประมาณ 250 ตัน ถูกนักตกปลาปล่อยทิ้งลงในแม่น้ำสายต่างๆ ทุกปี ซึ่งจะมีผลต่อห่วงโซ่กินกินตะกั่วเหล่านี้เข้าไป และตายเพราะตะกั่วเป็นพิษ ซึ่งเป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้หงส์ต้องตายไปเกือบ 3000 ตัวต่อปี เมื่อปี ค.ศ.1964 นายแพทย์มอนครีฟ (Moncrieff) และผู้เข้าร่วมงานประจำโรงพยาบาลเกรท ออร์มอนด์

สตรีท ได้ตรวจสอบตัวอย่างเล็กๆ จำนวน 122 รายที่เป็นโรคปัญญาอ่อนขั้นรุนแรงหรือมีอาการผิดปกติทางจิตพบว่าเกือบครึ่งหนึ่งของเด็กเหล่านี้มีระดับตะกั่วในเลือดค่าสูงกว่าปกติ หมายความว่าระดับตะกั่วอยู่เกิน 36 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ตัวเลขนี้เป็นขีดสูงสุดที่พวกเขาพบในกลุ่มเด็กปกติที่นำมาใช้เปรียบเทียบ 86 คน

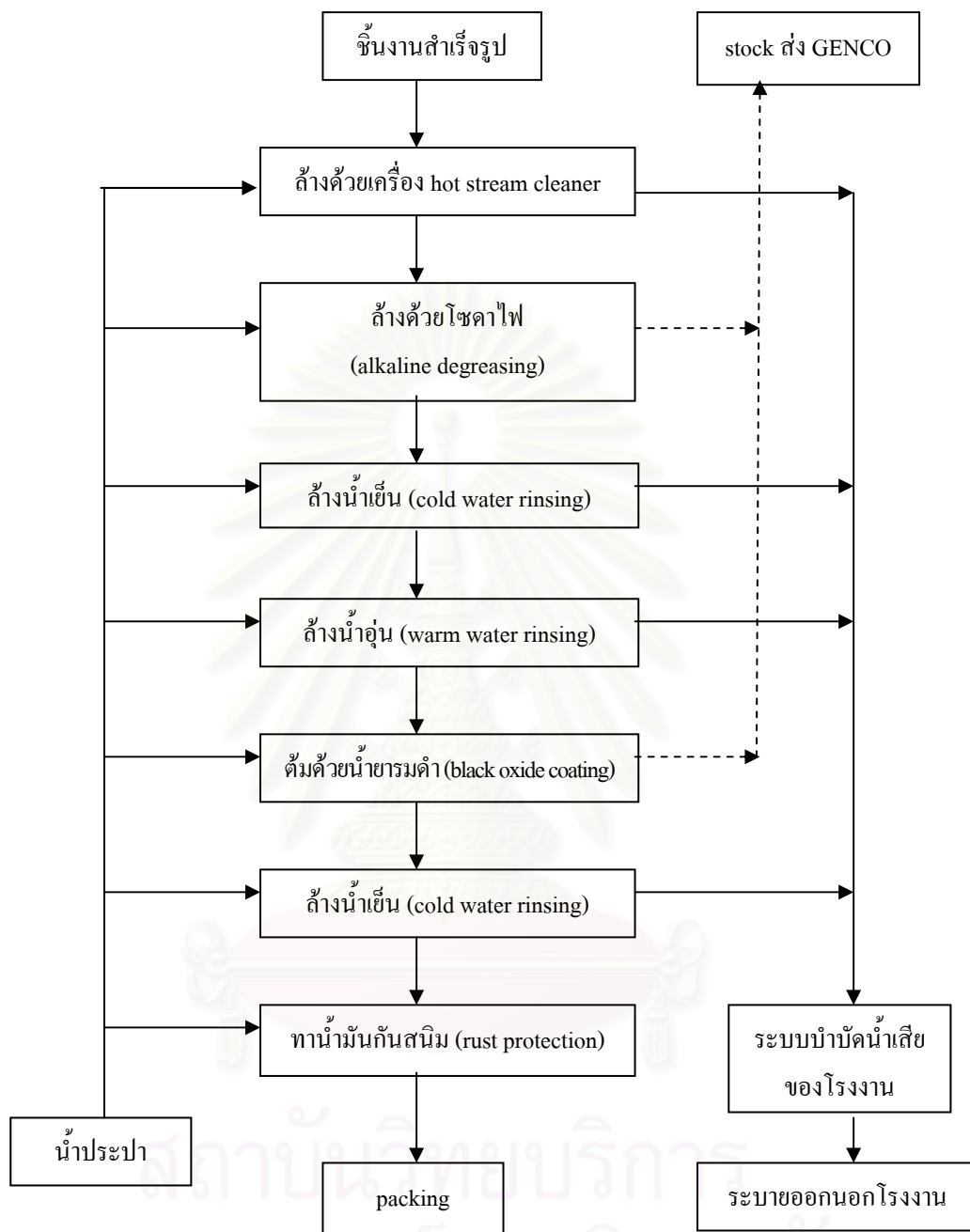
ผลกระทบของตะกั่วต่อทารกในครรภ์ได้ถูกชี้ให้เห็นชัดเจนจากรายงานการศึกษาตีพิมพ์เมื่อปี 1978 โดยแสดงให้เห็นว่าเด็กที่คลอดตายโดยเฉลี่ยจะมีปริมาณของตะกั่วในกระดูกสูงกว่าเด็กปกติ ตะกั่วมีผลต่อการทำให้แท้งบุตร ไบร-สมิทและผู้ร่วมงานในมหาวิทยาลัยริคคิงได้พบปริมาณสะสมของตะกั่วในเด็กที่คลอดตายมีค่าสูงกว่าในเด็กเกิดใหม่ที่มีชีวิตรอด 5-10 เท่า (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2530 อ้างถึงในประภต เลิศจรสร่วมตี, 2539)

2.6 การรมดำโลหะ

2.6.1 กระบวนการรมดำโลหะ

กระบวนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะมีขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 2.5

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



หมายเหตุ

- _____ หมายถึง น้ำประปา และน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต
- หมายถึง สารละลายต่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline)

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ (พรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ, 2547)

2.6.2 น้ำเสียจากกระบวนการรมดำผิวโลหะ

น้ำเสียจากการรมดำผิวโลหะโรงงานรมดำ มีน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

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

2) สารละลายด่างที่ใช้แล้ว เป็นส่วนผสมของน้ำค้างโซดาไฟจากขั้นตอน Alkaline degreasing และน้ำค้างจากน้ำยารมดำ SUGICUT™ CS-58Y ในขั้นตอน Black oxide coating มีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด มีความเป็นด่างสูง และถูกจำแนกเป็นของเสียอันตราย (Hazardous Waste) ปัจจุบันทางโรงงานได้ทำสัญญาจ้างบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) ให้เป็นผู้บำบัดและทำลายฤทธิ์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Amrhein และคณะ (1996) ได้ศึกษาสมบัติของแก๊สออกไซด์จากโรงไฟฟ้าในอเมริกา และทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากแก๊สออกไซด์โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือชนิดของสารละลายต่าง ความเข้มข้นของด่าง ความดัน และระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ความเสถียรของซีโอไลต์ ทดสอบการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย และวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโตรโฟโตเมทรี จากผลการวิเคราะห์พบว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล และซีโอไลต์โพแทสเซียมคาร์บาไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วันตามลำดับ ส่วน สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่เกิดซีโอไลต์ สำหรับที่ความดันสูงเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล ที่ 100 องศาเซลเซียส โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ และซีโอไลต์เอกซ์ไค้จากการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ที่ 250 องศาเซลเซียส

สัญญาภาณ สันธวาร และสมชาย พานิชศาสตร์ (2540) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการเตรียมซีโอไลต์จากแก๊

ลอยถ่านหินที่โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเกิดซีโอไลต์จากถ่านล่อย ซึ่งทำที่อุณหภูมิ 40, 60, และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 3, 6 และ 10 วัน และศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดซีโอไลต์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3, 3.5 และ 4 โมลาร์ และทำการทดสอบหาค่า Cation Exchange Capacity (CEC) พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.5 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 วัน มีค่า CEC สูงที่สุด ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลช่วงหนึ่งได้

Curkovic และคณะ (1997) ได้ทำการทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ตามธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านขบวนการพิเศษ และซีโอไลต์ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้จะนำมาทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะใช้ซีโอไลต์ 3 แบบคือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ 1 ตัวอย่าง และซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษอีก 2 ตัวอย่าง โดยซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษทำโดยนำซีโอไลต์ธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ผลของการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และประสิทธิภาพในการกำจัด เมื่อทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิจะพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากขึ้น

Querol และคณะ (1997) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ่านล่อย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทำปฏิกิริยาในระบบปิด มีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ (15-200 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (8-10 ชั่วโมง) และความเข้มข้นของด่างที่ใช้ (0.1-1 โมลาร์) ประมาณค่าความดันระหว่างการเกิดปฏิกิริยามีช่วงอยู่ระหว่าง 0.48 Mpa ที่ 150 องศาเซลเซียสถึง 1.55 Mpa ที่ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับ 0.055 กรัม/มิลลิกรัม ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่คือ ซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (Zeolite Na-Pl)

Steenbruggen and Hollman (1998) ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ่านล่อยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยนำเอาถ่านล่อยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่เกิดปฏิกิริยาในระบบปิด ตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา สัดส่วนของของเหลวต่อของแข็ง (L/S) ความเข้มข้นและชนิดของสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ และจากการทดลองสังเคราะห์ถ่านล่อยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่อุณหภูมิ 90-150

องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นคือ ซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (Zeolite Na-PI) ถ้าลอยถ่านหินจะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ประมาณ 45% และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 2.4 มิลลิสมมูลต่อกรัม จากนั้นได้นำเอาซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำ ปรากฏว่าลำดับความชอบของไอออนของซีโอไลต์คือ $Ba > Cu > Cd > Zn > Co > Ni$

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

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

มนตรี ทองคำ (2542) ได้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารตั้งต้นที่ใช้คือถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเครื่องกวนที่มีการกวนตลอดเวลาทำการทดลอง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) พบซีโอไลต์ดังนี้ Zeolite P, Chabazite, Nepheline, Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่นๆ เช่น Sillimanite, Willhendersonite, Gehlenite ภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2

ชั่วโมง โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 619.44 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์ ซึ่งให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้นจากถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 52.20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์

จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ (2547) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย โดยตรวจสอบคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ จากผลการทดลองพบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ถ้ำลอยถ่านหินคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 565.62 cmol/kg ส่วนสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ถ้ำลอยชานอ้อย คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 303.19 cmol/kg และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียได้เท่ากับร้อยละ 93.24% และ 91.36% ตามลำดับ

พรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ (2547) ได้ศึกษาแนวทางในการใช้สารละลายด่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) จากอุตสาหกรรมรมดำในกระบวนการตกตะกอนตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมการหลอมแบตเตอรี่เก่า โดยเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนอีก 2 ชนิด ได้แก่ NaOH และ Na_2CO_3 เมื่อตกตะกอนด้วยสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8.5 – 10.5 การใช้ร่วมกับโพลีเมอร์ ประจุลบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนได้ดีที่ความเข้มข้น 1.8 มก./ล. สามารถกำจัดตะกั่วในรูปตะกั่วละลายและตะกั่วทั้งหมด เท่ากับ 100 และ 99.22% ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การตกตะกอนด้วยสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) ให้ประสิทธิภาพดีในการบำบัดตะกั่วในรูปตะกั่วละลาย ตะกั่วทั้งหมดและความขุ่น ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะสามารถนำสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) จากอุตสาหกรรมรมดำมาใช้บำบัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมหลอมตะกั่วห่างจากแบตเตอรี่เก่าได้

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 แผนการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้จะแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน

1) ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากกระบวนการรมด้าโลหะ (spent alkaline) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

2) การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย และทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3) ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด

ทางกายภาพ

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

(2) วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

(3) การทดสอบหาการกระจายขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

ทางเคมี

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

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

4) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ คือ เวลาพีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

5) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงจากโรงงานหลอมตะกั่วโดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
- 3) หม้อดูดความชื้น (Desiccators)
- 4) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
- 5) ครุชีเบลพอร์ซเลน พร้อมฝาปิด
- 6) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
- 7) Heating Water bath : Model WB 7/14/22/29/45 ของ MEMMERT
- 8) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) PH 1-20,DKK Corporation.Japan
- 9) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง : AND HM-300-Japan
- 10) เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ K รุ่น VRN -360
- 11) ตู้อบความร้อน : WTB Binding Germany
- 12) เตาเผา : Valeam box furnace รุ่น 3-1750.USA
- 13) ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด
- 14) ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 100 และ 325 mesh
- 15) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด : Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL,Model
- 16) เครื่องวัดพื้นที่ผิว : Specific Surface Area Analyzer, ASAP2000.Germany
- 17) เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS). Perkin Elmer Instrument, Analyst 300 Atomic Adsorption Spectrophotometer. USA
- 18) Laser Particle Size Analyzer Malvern Instruments รุ่น Mastersizer 2000 Ver.Version 4.00
- 19) X-rays Diffraction Spectrophotometer JOEL รุ่น JDX-8030, JAPAN
- 20) X-rays Fluorescences Spectrophotometer JOEL รุ่น PW 2400 PHILIPS, JAPAN.

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียตะกั่วและสารละลายต่างที่ใช้แล้ว

ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียตะกั่วและสารละลายต่างที่ใช้แล้ว ดังนี้

- pH, ORP, ของแข็งแขวนลอย (SS)
- ปริมาณโลหะละลายและโลหะทั้งหมด ได้แก่ As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, และ Pb

3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย

1) การเตรียมเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา นำเถ้าลอยถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้า และเถ้าลอยขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากเถ้าลอยและทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น จากนั้นนำเถ้าลอยที่ผ่านการอบแล้วมาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 mesh และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh จากนั้นนำไปบรรจุในหม้อดินและปิดฝา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (สาเหตุที่ต้องเผาเพราะว่าต้องการกระตุ้นให้เถ้าลอยทั้งสองประเภทอยู่ในสภาพพร้อมคือเป็นสารประกอบของควอตซ์ และซิลิเกตที่จะทำปฏิกิริยา) หลังจากนั้นปล่อยให้เถ้าลอยทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้วหรือสารละลายต่างที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ยังไม่ผ่านการใช้ความเข้มข้น 2 โมลาร์และ 3.5 โมลาร์ นำเถ้าลอยที่ผ่านการเผามาชั่งประมาณ 10.00 กรัม และนำสารละลายที่เตรียมไว้มาเทลงในขวดที่ชั่งเถ้าลอยปริมาตร 80 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปเขย่าโดยใช้ Shaker water bath ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 และ 100 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะเก็บตัวอย่างที่ 3, 4 และ 5 วัน

3) เมื่อทำปฏิกิริยาตามภาวะต่าง ๆ เสร็จแล้ว นำเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ผ่านการทำปฏิกิริยามากรองแยกเถ้าลอยโดยล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง แล้วนำเถ้าลอยไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด

3.4.3 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิด

นำถ้ำลอยทั้งสองชนิด และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดมาบดให้ละเอียดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 mesh ได้ ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเก็บไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 1) การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว, ปริมาตรโพรง โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunance-Emmett-teller) โดยการวัดปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดเก็บไว้โดยถ้ำลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์
- 2) การทดสอบขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer
- 3) วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 4) วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD)
- 5) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยและซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

3.4.4 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์

3.4.4.1 ศึกษาผลของ pH

- (1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่า pH เท่ากับ 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ โดยการปรับ pH ด้วยสารละลายเบส 1 N NaOH หรือสารละลายกรด 1 N HNO₃
- (2) นำน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่า pH เท่ากับ 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับปริมาตร 100 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- (3) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย ปริมาณ 0.1 กรัมลงในขวด
- (4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- (5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42
- (6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.4.2 ศึกษาผลของเวลา

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

3.4.4.3 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนัก

- (1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้น 10, 15 และ 20 mg/l ปรับ pH ให้เท่ากับค่า pH ที่เหมาะสม (จากข้อ 3.4.4.1) ปริมาตร 100 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- (2) เติมซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ปริมาณ 0.1 กรัมลงในขวดแต่ละใบ
- (3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 3.4.4.2)
- (4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42
- (5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.4.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีโอไลต์

- (1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้น 10 mg/l ที่มีค่า pH ที่เหมาะสม (จากข้อ 3.4.4.1) ปริมาตร 100 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)
- (2) เติมซีโอไลต์ที่เตรียมไว้ในช่วงน้ำหนักที่แน่นอนปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.1 และ 0.2 กรัมลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ
- (3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 3.4.4.2)
- (4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42

(5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.5 ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยชานอ้อยในการกำจัดตะกั่วโดยนำการทดลองที่ดีที่สุดจากข้อ (3.4.4.1-3.4.4.4) มาทำการทดลองกับน้ำเสียจริง

1) ในการศึกษาได้ทดลองกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่วแห่งจากแบตเตอรี่เก่าโดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วเริ่มต้นดังนี้

(1.1) ปิเปตต์น้ำตัวอย่างที่กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 มา 50 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 5 มิลลิลิตร

(1.2) นำไปต้มในตู้คลื่น จนกระทั่งสารละลายในบีกเกอร์มีปริมาตรเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

(1.3) เติมกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ และนำไปต้มต่อจนน้ำในบีกเกอร์มีปริมาตรเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

(1.4) ทิ้งให้เย็น แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

(1.5) เจือจางให้ได้ปริมาตร 1 : 50 โดยการเติมน้ำกลั่นแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็น

(1.6) นำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว โดยใช้เครื่อง AAS

2) นำน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่วแห่งจากแบตเตอรี่เก่าที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 มาปรับ pH ให้ได้ตามการทดลองที่ 3.4.4.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

3) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ

4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา สัปดาห์ที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 3.4.4.2

5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่า pH ของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้

6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.4.6 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองทั้งหมดมาประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการเตรียมซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากอุตสาหกรรมรมดำโลหะรวมทั้งความแตกต่างของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยเป็นสำคัญ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การทดลองศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
เถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังมีผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากกระบวนการรมค่าโลหะ (Spent alkaline)

ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้ว ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากกระบวนการรมค่าโลหะ

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้	
1. pH	12.98	
2. ORP	-346 มิลลิโวลท์	
3. ความเข้มข้น	12.38 N	
4. ปริมาณโลหะหนัก	ทั้งหมด	ที่ละลายได้
As	0.02 มก./ล.	0.02 มก./ล.
Cd	ND	ND
Cr	13.55 มก./ล.	12.24 มก./ล.
Cu	0.56 มก./ล.	0.50 มก./ล.
Fe	24.4 มก./ล.	19.4 มก./ล.
Hg	ND	ND
Ni	0.51 มก./ล.	0.49 มก./ล.
Pb	0.28 มก./ล.	0.16 มก./ล.

สารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วเป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำยารมค่า
SUGICUT CS-58 Y มีลักษณะสมบัติเบื้องต้น คือ เป็นของเหลวขุ่นหนืด ความเป็นด่างสูง มีค่า pH
เริ่มต้น 12.98 มีความเข้มข้น 12.38 N (จากการไทเทรตด้วยกรด HCl รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)

4.2 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยและการหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC)

4.2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยขานอ้อยนั้นทำได้โดยการนำวัตถุดิบ คือ เถ้าลอยถ่านหินประมาณ 1 กิโลกรัมมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่มาจากโรงงานน้ำตาลมีลักษณะเป็นเถ้าเปียก จึงต้องตากแดดให้แห้งก่อนจากนั้นจึงนำเถ้าลอยขานอ้อยประมาณ 1 กิโลกรัมไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ผ่านการอบแล้ว มาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 mesh และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีน้ำตาลแดง ส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีเทาอ่อน จากนั้นนำเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ผ่านการเผามาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างจากกระบวนการรมดำโลหะที่ความเข้มข้น 2 และ 3.5 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างจากกระบวนการรมดำโลหะ เท่ากับ 1:8 และนำไปให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 90 และ 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3, 4 และ 5 วัน ซึ่งเถ้าลอยประมาณ 100 กรัมสามารถสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ได้ประมาณ 80 กรัม โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดมีสีอ่อนลงกว่าเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยที่ยังไม่ได้กระตุ้น เมื่อได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ทุกสภาวะแล้ว จึงนำซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดมาทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เพื่อเลือกสภาวะที่ดีที่สุดมาทำการทดลองขั้นต่อไป

4.2.2 การทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) ของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่สภาวะต่าง ๆ

1) การทดสอบค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

ผลการทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างจากกระบวนการรมดำโลหะ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้น

สถานะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC เฉลี่ย (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นโดยสารละลาย NaOH	ค่า CEC เฉลี่ย (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นโดยสารละลาย Spent alkaline
ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา (วัน)		
2	90	3	405.29	321.63
		4	417.24	343.19
		5	478.36	418.36
2	100	3	404.72	309.48
		4	427.38	357.11
		5	501.53	393.63
3.5	90	3	345.42	308.99
		4	379.25	332.50
		5	429.82	394.28
3.5	100	3	333.58	296.69
		4	357.46	322.68
		5	430.29	358.26

2) การทดสอบค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านอ้อย

ผลการทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านอ้อยที่กระตุ้นโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างจากกระบวนการรมดำโลหะ ดังตารางที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยชานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้น

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC เฉลี่ย (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นโดยสารละลาย NaOH	ค่า CEC เฉลี่ย (cmol/kg zeolite) ของถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นโดยสารละลาย Spent alkaline
ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา (วัน)		
2	90	3	202.84	190.74
		4	250.63	238.18
		5	296.99	286.29
2	100	3	202.72	190.69
		4	238.46	202.62
		5	285.63	238.28
3.5	90	3	203.48	190.94
		4	238.57	214.50
		5	274.18	262.50
3.5	100	3	202.43	190.65
		4	226.08	214.74
		5	274.33	250.77

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้เลือกสภาวะเหมาะสมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุด คือ 501.53 cmol/kg ส่วนสภาวะเหมาะสมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุด คือ 418.36 cmol/kg และสำหรับสภาวะเหมาะสมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90

องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุดคือ 296.99 cmol/kg ส่วนสภาวะเหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุดคือ 285.63 cmol/kg

ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทั้งสองชนิด คือ 2 โมลาร์ เนื่องจากให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงซึ่งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ที่เลือกใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amrchein et al.,1996 and Querol et al.,1997 ที่ว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 0.5 โมลาร์ เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์มากที่สุด เพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปย่อยสารประกอบควอตซ์และมัลไลต์ในเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยจนได้สารประกอบอะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ออกมา นอกจากนี้โซเดียมไอออน (Na^+) ยังทำให้โครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลของซิลิกาออกซิเจนเตตระไฮดรอล (SiO_4) และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระไฮดรอล (AlO_4) อยู่ในสภาพเสถียรยิ่งขึ้น ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่า 2 โมลาร์ขึ้นไปไม่เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะที่ความเข้มข้นสูงๆ นั้น สารประกอบควอตซ์ และมัลไลต์ในเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยจะถูกย่อยมากจนทำให้เกิดโครงสร้างของผลึกที่หนาแน่นมาก (Dense Material) เช่น Mulite และ Gehlenite ซึ่งเป็นสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ เพราะซีโอไลต์มีโครงสร้างที่อยู่กันอย่างหลวมๆ (Loose Material) (มนตรี ทองคำ, 2542)

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยจะเลือกระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 5 วัน เนื่องจากทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของมนตรี ทองคำ, 2542 ที่กล่าวว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเกิดผลึกซีโอไลต์ก็จะสูงตามไปด้วย เพราะโอกาสในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเถ้าลอย (ควอตซ์และมัลไลต์) ที่เป็นของแข็งออสัญฐานไปเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกย่อมมีมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ชนิดของถ้ำลอย และซีโอไลต์สังเคราะห์	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยน แคตไอออน (cmol/kg)
ถ้ำลอยถ่านหิน	56.76
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย NaOH	501.53
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	418.36
ถ้ำลอยชานอ้อย	34.18
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย NaOH	296.99
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	285.63

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 501.53 cmol/kg และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 418.36 cmol/kg โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ดีกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 56.76 cmol/kg

ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 296.99 cmol/kg และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 วัน ให้ค่าความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 285.63 cmol/kg โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้ดีกว่าถ้ำซานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 34.18 cmol/kg

และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) มากกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คิดเป็น 3.3 % ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) มากกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คิดเป็น 0.15 % จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ระหว่างถ้ำลอยทั้งสองชนิดที่กระตุ้นด้วยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย Spent alkaline มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้สารละลาย Spent alkaline สังเคราะห์ซีโอไลต์ทดแทนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และ ซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยทั้งสองชนิด

4.3.1 สมบัติของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และซีโอไลท์สังเคราะห์

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



รูปที่ 4.1 เถ้าลอยถ่านหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

เถ้าลอยชานอ้อย (Bagasse Fly ash) เกิดจากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และเพื่อไม่ให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นฟุ้งกระจายจึงมีการฉีบน้ำเป็นฝอยเพื่อสัมผัสกับเถ้าลอยให้เถ้าลอยตกลงมา เถ้าลอยจึงมีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียกมีสีดำ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เถ้าลอยชานอ้อยที่มีลักษณะเป็นก้อนเถ้าที่เปียก มีสีดำ

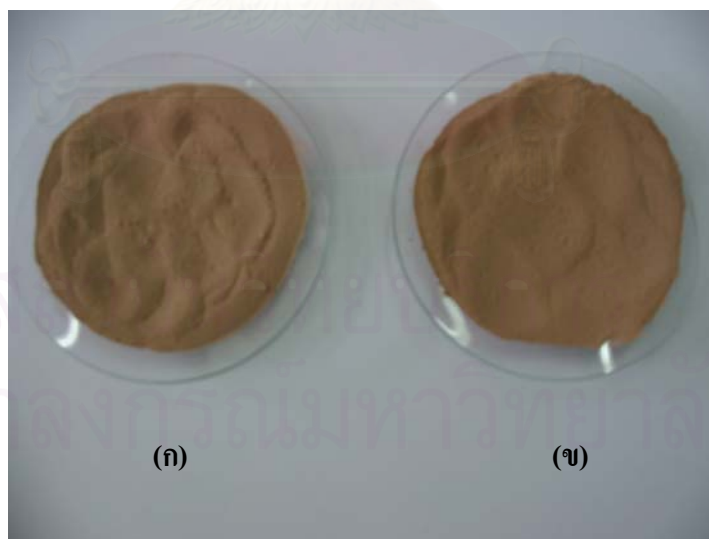
4.3.2 สมบัติทางกายภาพของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

1) ลักษณะรูปร่างของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ถ้ำลอยถ่านหินที่ออกจากเตาเผาใหม่ๆ จะมีสีน้ำตาลแดงเมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีสีน้ำตาลอ่อน ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างถ้ำลอยถ่านหิน

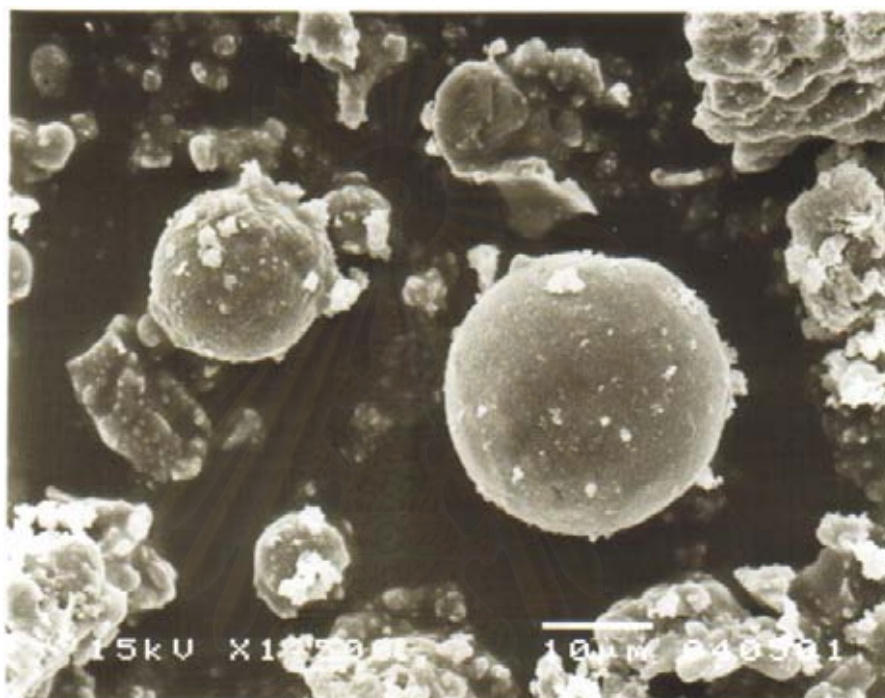


(ก) ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

(ข) ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

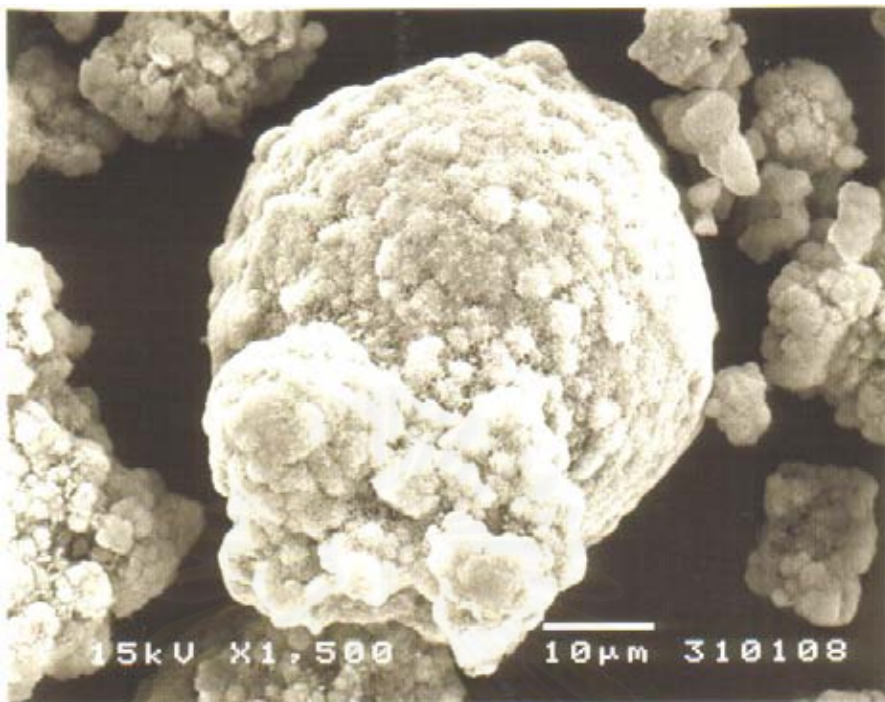
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

จากการวิเคราะห์เถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) เมื่อใช้กำลังขยายกำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่ารูปร่างของเถ้าลอยถ่านหินมีลักษณะค่อนข้างกลมและกลม (Sub-round to round) ดังรูปที่ 4.5 และพบว่ารูปร่างของซีโอไลต์สังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไปจากเถ้าลอยถ่านหิน คือ มีลักษณะไม่เป็นทรงกลม พื้นผิวมีความพรุนมากขึ้นและพบว่ามีผลึกซีโอไลต์เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

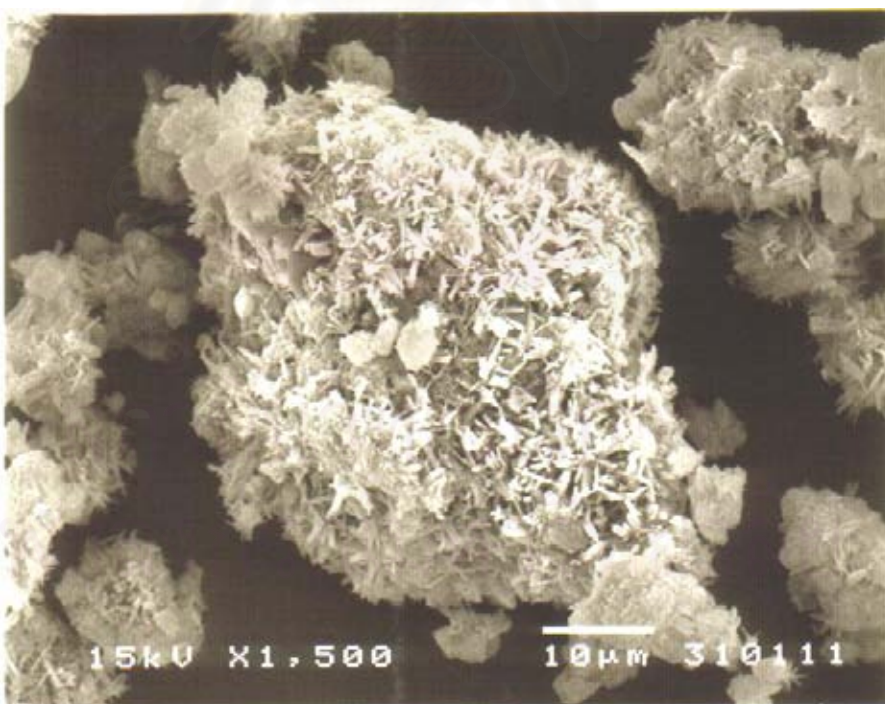


รูปที่ 4.5 โครงสร้างและพื้นที่ผิวเถ้าลอยถ่านหิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์



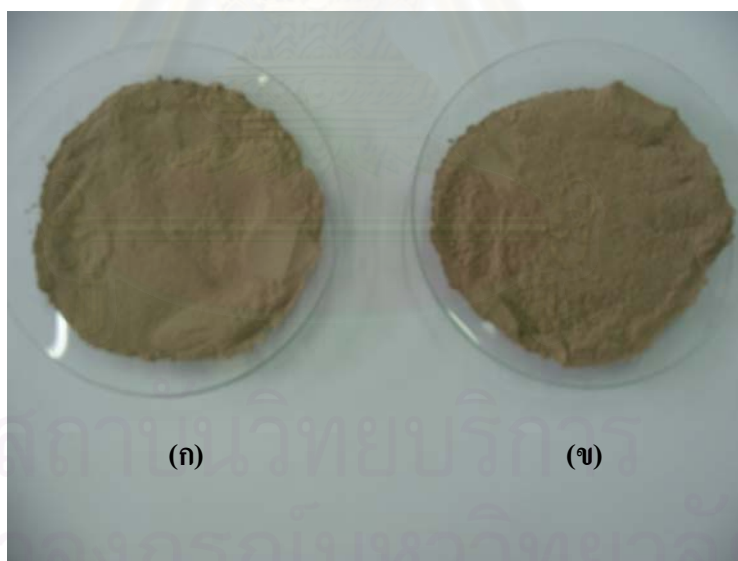
(ข) โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

รูปที่ 4.6 โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

ถ้ำลอลยขานอ้อยท้ออกจากเตาเผาจะมิลีเทา และซีโอไลต์สังเคราะห์ก็มิลีเทาอ่อน
ดั่งรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างถ้ำลอลยขานอ้อย

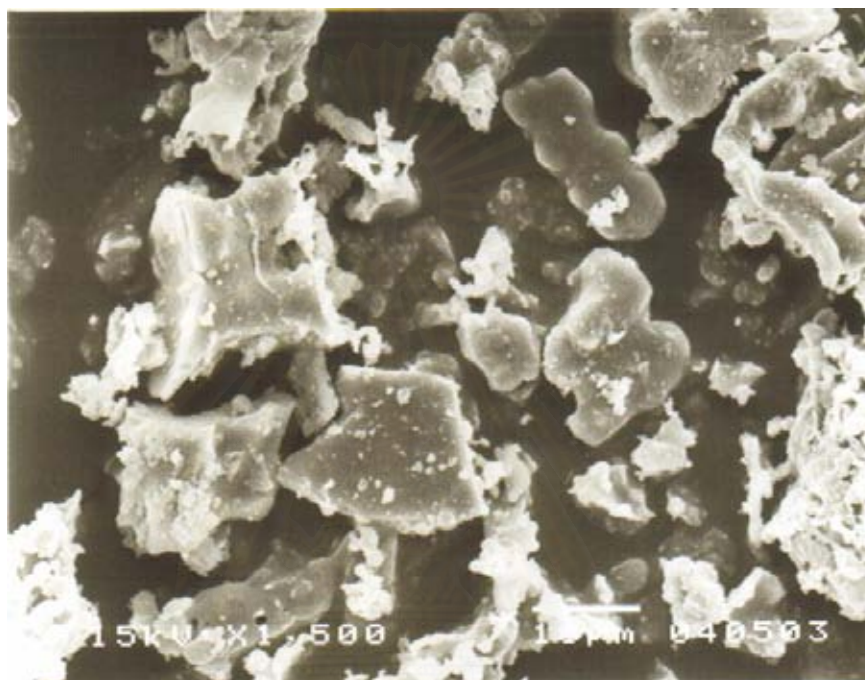


(ก) ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอลยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

(ข) ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอลยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

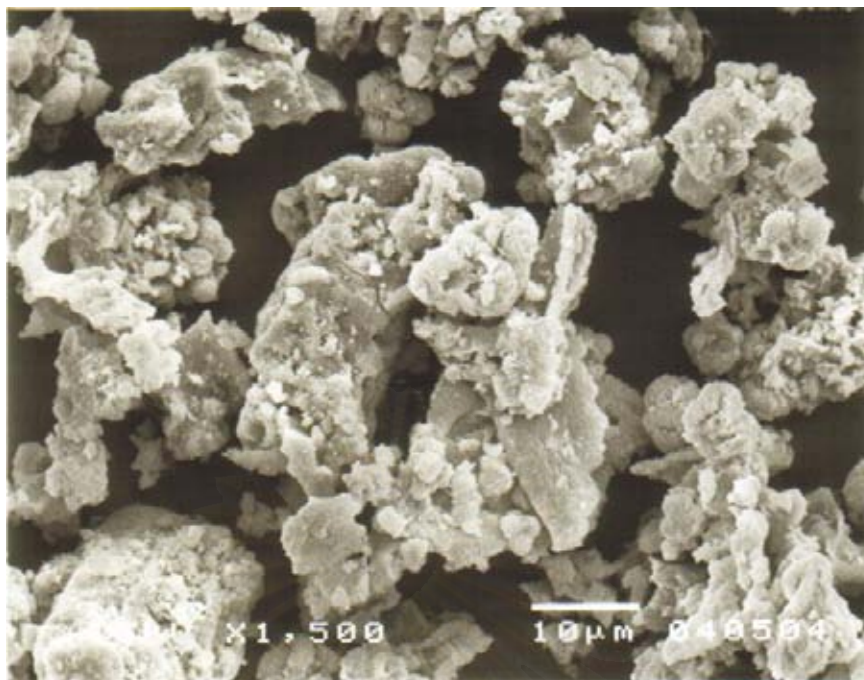
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอลยขานอ้อย

และจากการวิเคราะห์เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่ารูปร่างของเถ้าลอยขานอ้อยมีลักษณะเป็นรูปทรงที่แตกต่างกันออกไป ไม่แน่นอน มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบและแน่นไม่มีรูพรุน และพบว่ารูปร่างของซีโอไลต์สังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไปจากเถ้าลอยขานอ้อย คือ มีรูพรุนเป็นโพรงลึกเกิดขึ้นให้เห็นชัดเจน ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

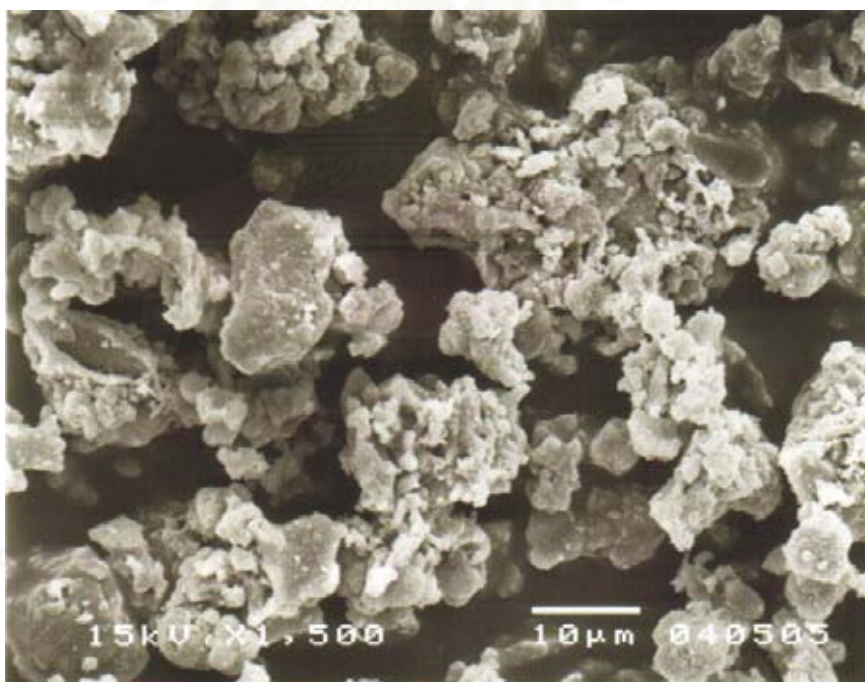


รูปที่ 4.9 โครงสร้างและพื้นที่ผิวเถ้าลอยขานอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์

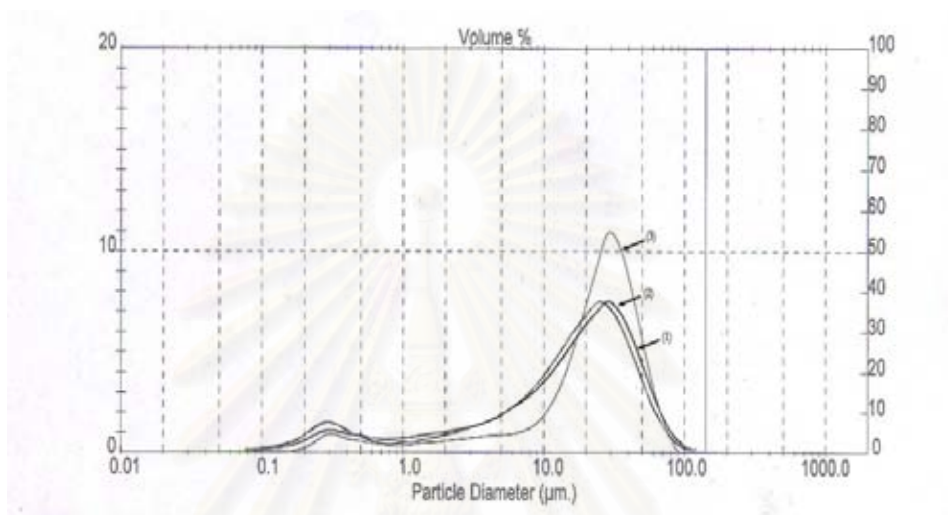


(ข) โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

รูปที่ 4.10 โครงสร้างและพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากแก้วลอยขานอ้อย

2) การหาการกระจายขนาดของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ก. จากการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองและการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.11



(1) เถ้าลอยถ่านหิน

(2) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

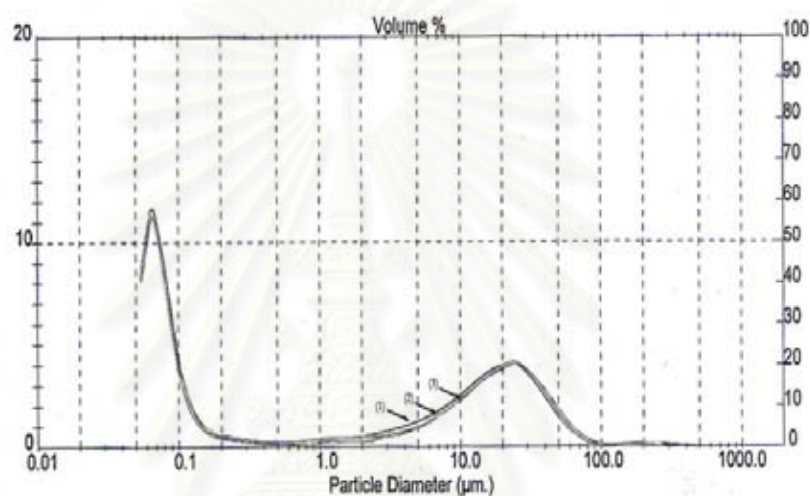
(3) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

รูปที่ 4.11 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์สังเคราะห์

จากรูปที่ 4.11 พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินอยู่ในช่วง 0.05-103.58 ไมโครเมตร เมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์โดยกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.05-88.91 ไมโครเมตรและเมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์โดยกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline แล้วการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.09-76.32 ไมโครเมตร นอกจากนี้การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหิน 90% อยู่ภายใต้อนุภาคขนาด 44.03 ไมโครเมตร ส่วนการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 90% อยู่ภายใต้อนุภาคขนาด 47.09 ไมโครเมตรและ การกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 90% อยู่ภายใต้อนุภาคขนาด 48.70 ไมโครเมตร โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีการกระจายขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline และ

ซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีการกระจายขนาดอนุภาคน้อยกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ไม่ผ่านการกระตุ้น เนื่องจากมีช่วงในการกระจายแคบลง

ข. จากการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยชานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยที่ใช้ในการทดลองและการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.12



- (1) ถ้ำลอยชานอ้อย
- (2) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- (3) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

รูปที่ 4.12 การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยชานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยชานอ้อยอยู่ในช่วง 0.05-190.80 ไมโครเมตร เมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์โดยกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.05-190.80 ไมโครเมตรและเมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์โดยกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline แล้วขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.05-163.77 ไมโครเมตร นอกจากนี้การกระจายขนาดอนุภาคของถ้ำลอยชานอ้อย 90% อยู่ภายใต้อนุภาคนขนาด 32.41 ไมโครเมตร ส่วนการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 90% อยู่ภายใต้อนุภาคนขนาด 35.32 ไมโครเมตรและ การกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 90% อยู่ภายใต้อนุภาคนขนาด 35.82 ไมโครเมตร โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้น

ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีการกระจายขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline และซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีการกระจายขนาดอนุภาคน้อยกว่าเถ้าลอยขานอ้อยที่ไม่ผ่านการกระตุ้น เนื่องจากมีช่วงในการกระจายแคบลง

3) การหาพื้นที่ผิวของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อยและซีโอไลต์สังเคราะห์

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

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

ลักษณะทางกายภาพ	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรโพรง (ลบ.ซม./กรัม)
เถ้าลอยถ่านหิน	3.37	0.0173
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย NaOH	23.61	0.1239
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	18.09	0.0995
เถ้าลอยขานอ้อย	2.55	0.0522
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย NaOH	20.16	0.1211
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	18.01	0.1047

จากตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวของเถ้าลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 3.37, 23.61 และ 18.09 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ผิวของเถ้าลอยขานอ้อย ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 2.55, 20.16 และ 18.01 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

สำหรับปริมาณโพรงของถ้ำลอยถ่านหิน ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 0.0137, 0.1239 และ 0.0995 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนปริมาณโพรงของถ้ำลอยชานอ้อย ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 0.0522, 0.1211 และ 0.1047 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ คือ พื้นที่ผิวและปริมาณโพรง โดยซีโอไลต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาณโพรงของถ้ำลอยถ่านหิน ถ้ำลอยชานอ้อย ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยพบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยมีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากกว่าถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ดังนั้นซีโอไลต์สังเคราะห์จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ้ำลอยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คิดเป็น 7.13% และ 4.83% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คิดเป็น 1.28% และ 2.12% ดังนั้น ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

4.3.3 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์สังเคราะห์

1) ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ผลวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

องค์ประกอบ	เถ้าลอย ถ่านหิน (%)	ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย NaOH (%)	ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย Spent alkaline (%)
SiO ₂	39.87	37.23	38.51
CaO	17.91	18.30	17.95
Fe ₂ O ₃	16.30	17.49	17.02
Al ₂ O ₃	11.11	10.18	9.83
K ₂ O	2.25	1.17	1.85
MgO	0.37	0.29	0.40
MnO	0.07	-	-
TiO ₂	4.44	4.40	4.18
ZrO ₂	0.37	2.25	1.82
NiO	0.10	0.10	0.09
SrO	0.74	0.80	0.74
ZnO	0.15	0.21	0.16
Rb ₂ O	0.02	0.01	0.02
BaO	0.97	0.95	0.95
SO ₂	2.56	0.64	0.25
Cl	-	0.94	1.23

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขานอ้อยและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย

องค์ประกอบ	เถ้าลอย ขานอ้อย (%)	ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยขานอ้อย กระตุ้นด้วย NaOH (%)	ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถ้าลอยขานอ้อย กระตุ้นด้วย Spent alkaline (%)
SiO ₂	60.21	58.73	59.31
CaO	9.16	9.24	8.19
Fe ₂ O ₃	7.42	9.37	9.98
Al ₂ O ₃	5.98	5.13	4.37
K ₂ O	1.00	0.39	0.66
MgO	0.01	0.01	0.05
MnO	0.04	0.02	0.06
TiO ₂	0.11	0.09	0.19
ZrO ₂	0.13	-	-
NiO	0.10	-	-
SrO	0.07	0.02	0.01
ZnO	0.16	0.09	0.09
Rb ₂ O	0.03	0.01	0.01
BaO	0.19	0.17	0.11
SO ₂	-	-	-
Cl	-	0.01	0.01

สารประกอบที่พบในเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อยเป็นสารประกอบเริ่มต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะว่าเถ้าลอยทั้งสองชนิดประกอบไปด้วย SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดซีโอไลต์ พบว่าในเถ้าลอยถ่านหินมี SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เท่ากับ 39.87% , 11.11% , 16.30% และ 17.91% ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยขานอ้อยมี SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เท่ากับ 60.21% , 5.98% , 7.42% และ 9.16% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยมาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย Spent alkaline ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่ผ่านการใช้งานจากกระบวนการรมดำโลหะ จะสามารถทำให้เกิดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นได้

2) ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

จากการนำเถ้าลอยถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ได้ผลดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งพบว่าเมื่อนำเถ้าลอยถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว สามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P1 และพบสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz-SiO₂ ส่วนเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline สามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P1 และ Unnamed zeolite (Sodium Aluminum Silicate Hydrate) และพบสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz-SiO₂ ดังตารางที่ 4.8

จากการนำเถ้าลอยขานอ้อยมาผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ได้ผลดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งพบว่าเมื่อนำเถ้าลอยขานอ้อยมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว สามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P1 และพบสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz-SiO₂ ส่วนเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline สามารถตรวจพบซีโอไลต์คือ Zeolite P1 และพบสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์คือ Quartz-SiO₂ ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย

ชนิดของเถ้าลอย	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้	สูตรทั่วไปของซีโอไลต์
เถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย NaOH	Zeolite P1	[Na ₆ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂]12H ₂ O
เถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	Zeolite P1 Unnamed zeolite	[Na ₆ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂]12H ₂ O [1.08(Na ₂ O)(Al ₂ O ₃)1.68(SiO ₂)]1.8H ₂ O
เถ้าลอยขานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย NaOH	Zeolite P1	[Na ₆ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂]12H ₂ O
เถ้าลอยขานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	Zeolite P1	[Na ₆ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂]12H ₂ O

4.4 การศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำลอยชานอ้อย แบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงความเหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) การทดลองแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

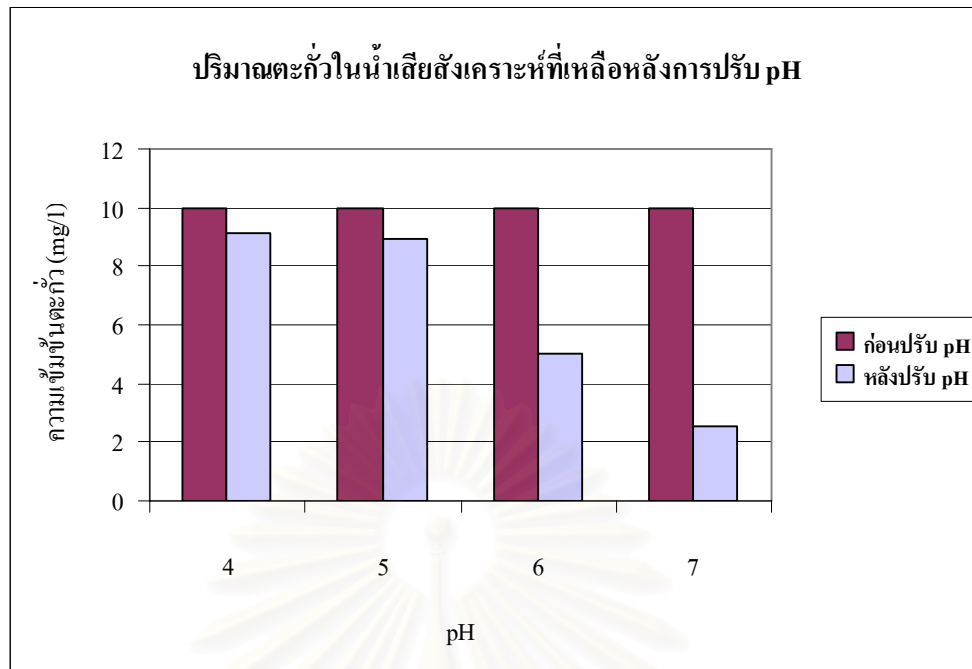
- การหา pH ที่เหมาะสม
- การหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม
- การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม
- การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์

4.4.1 การหา pH ที่เหมาะสม

จากการศึกษาของ Reed, Robertson และ Jamil (1995) พบว่า Pb จะมีการตกตะกอนในรูปของ $Pb(OH)_2$ ในช่วงพีเอช 5.5 และจะตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงพีเอช 12-12.5 แล้วจะกลับมามีความละลายใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงการดูดซับผู้วิจัยจึงทำการทดลองปรับค่าพีเอชต่างๆ ตั้งแต่ 4-7 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที แล้วทำการกรองตะกอนที่เกิดขึ้นออก หลังจากนั้นจึงนำไปวัดปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังการตกตะกอน เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมในการศึกษาถึงการดูดซับ ผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.9 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังปรับค่าความเป็นกรดด่างที่พีเอชต่างๆ

ค่า pH	ความเข้มข้นตะกั่ว ในน้ำเสียเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นตะกั่ว ในน้ำเสียหลังปรับ pH (mg/l)	% การตกตะกอน
4	10	9.142	8.58
5	10	8.996	10.04
6	10	5.010	49.90
7	10	2.547	74.53



รูปที่ 4.13 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็นกรดต่างที่ pH ต่างๆ

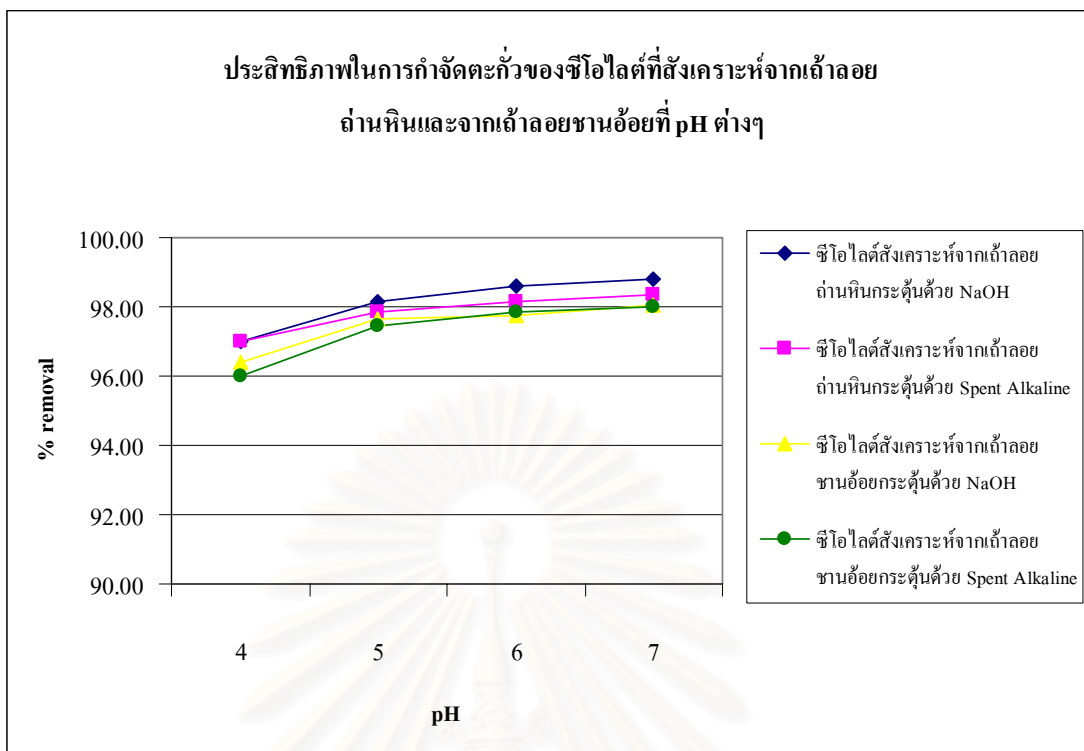
หลังจากนั้นจึงทำตามแผนการทดลองต่อไปโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 4-7 และทำการเติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินปริมาณ 0.1 กรัม และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 นาที แล้วกรองเอาผงซีโอไลต์ออก เพื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวัดปริมาณตะกั่วที่เหลือ ส่วนการทดลองของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยก็ทำเช่นเดียวกันกับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

ผลการทดลองการหา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งไม่ได้ทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ในการตกตะกอน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ที่พีเอชต่างๆ หลังผ่านการดูดซับด้วย ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อย

ประเภท ซีโอไลต์	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ			เฉลี่ย	% removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย NaOH	4	8.14	0.299	0.302	0.301	0.301	96.99
	5	8.64	0.184	0.188	0.181	0.184	98.16
	6	8.97	0.142	0.140	0.144	0.142	98.58
	7	9.01	0.122	0.121	0.124	0.122	98.78
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วย Spent alkaline	4	8.03	0.296	0.301	0.298	0.298	97.02
	5	8.20	0.216	0.211	0.214	0.214	97.86
	6	8.78	0.187	0.182	0.180	0.183	98.17
	7	8.97	0.162	0.167	0.160	0.163	98.37
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยชานอ้อย กระตุ้นด้วย NaOH	4	7.82	0.361	0.365	0.360	0.362	96.38
	5	8.21	0.239	0.234	0.237	0.237	97.63
	6	8.74	0.221	0.223	0.225	0.223	97.77
	7	8.93	0.197	0.194	0.199	0.197	98.03
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยชานอ้อย กระตุ้นด้วย Spent alkaline	4	7.72	0.401	0.397	0.396	0.398	96.02
	5	8.84	0.254	0.251	0.253	0.253	97.47
	6	8.97	0.217	0.211	0.214	0.214	97.86
	7	9.14	0.199	0.201	0.197	0.199	98.01



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอดีที่สังเคราะห์จากถั่วลันเตาถ่านหินและจากถั่วลันเตาขานอ้อยที่ pH ต่างๆ

จากผลการทดลองหา pH ที่เหมาะสมในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของซีโอดีที่สังเคราะห์จากถั่วลันเตาถ่านหินและจากถั่วลันเตาขานอ้อยที่ pH ต่างๆ มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับซีโอดีสังเคราะห์จากถั่วลันเตาถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ pH 4, 5, 6 และ 7 มีเปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 96.99%, 98.16%, 98.58% และ 98.78% ตามลำดับ ซีโอดีสังเคราะห์จากถั่วลันเตาถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ pH 4, 5, 6 และ 7 มีเปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 97.02%, 97.86%, 98.17% และ 98.37% ตามลำดับ ส่วนซีโอดีสังเคราะห์จากถั่วลันเตาขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ pH 4, 5, 6 และ 7 มีเปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 96.38%, 97.63%, 97.77% และ 98.03% ตามลำดับ และซีโอดีสังเคราะห์จากถั่วลันเตาขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ pH 4, 5, 6 และ 7 มีเปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 96.02%, 97.47%, 97.86% และ 98.01% ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์ removal ที่กล่าวมานั้นยังไม่ได้ทำการหักค่าเปอร์เซ็นต์ในการตกตะกอน

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่ pH 4, 5, 6 และ 7 ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยมีความสามารถในการดูดซับได้ไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาการตกตะกอนของตะกั่วพบว่า ตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนที่ pH ประมาณ 6-7 ดังนั้นในการเลือก pH เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไปจะใช้ pH เท่ากับ 5 ซึ่งจากผลการทดลองซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้เปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 98.16% ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะได้เปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 97.86% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้เปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 97.63% และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะได้เปอร์เซ็นต์ removal เท่ากับ 97.47% เนื่องจากเป็นช่วงที่ตะกั่วยังตกตะกอนไม่มากนัก ถ้าเลือก pH สูงกว่านี้จะเป็นการตกตะกอนของตะกั่วมากกว่าการดูดซับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 การหาช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ทำการทดลองตามหัวข้อที่ 3.4.4.2 ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.11-4.14 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.11 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

	เวลาสัมผัส (นาที)	pH น้ำเสีย ก่อนเขย่า	pH น้ำเสีย หลังเขย่า	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	% removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย NaOH	5	5	7.95	0.403	0.406	0.404	0.404	95.96
	10	5	8.05	0.364	0.344	0.343	0.344	96.56
	20	5	8.14	0.321	0.319	0.321	0.320	96.80
	30	5	8.42	0.290	0.298	0.299	0.296	97.04
	60	5	8.55	0.274	0.269	0.277	0.273	97.27
	90	5	8.73	0.231	0.229	0.234	0.231	97.69
	120	5	8.79	0.197	0.201	0.194	0.197	98.03
	150	5	8.63	0.208	0.211	0.210	0.210	97.90
	180	5	8.60	0.244	0.239	0.241	0.241	97.59
	240	5	8.57	0.245	0.249	0.250	0.248	97.52
	300	5	8.55	0.217	0.220	0.213	0.217	97.83
	900	5	8.47	0.260	0.254	0.261	0.258	97.42
1440	5	8.46	0.290	0.287	0.285	0.287	97.13	

ตารางที่ 4.12 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

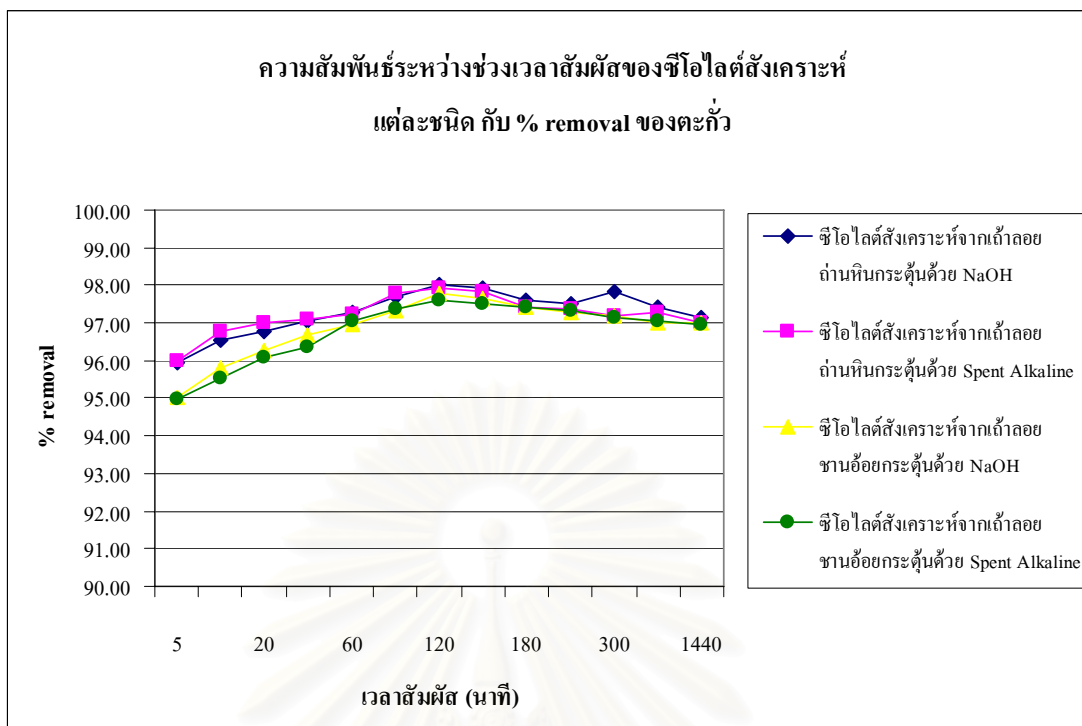
	เวลาสัมผัส (นาที)	pH น้ำเสีย ก่อนเขย่า	pH น้ำเสีย หลังเขย่า	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	% removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	5	5	8.11	0.399	0.398	0.405	0.401	95.99
	10	5	8.26	0.327	0.322	0.321	0.323	96.77
	20	5	8.24	0.297	0.304	0.301	0.301	96.99
	30	5	8.52	0.289	0.291	0.291	0.291	97.09
	60	5	8.79	0.274	0.277	0.280	0.277	97.23
	90	5	8.82	0.221	0.219	0.224	0.221	97.79
	120	5	8.84	0.207	0.211	0.206	0.208	97.92
	150	5	8.80	0.214	0.219	0.220	0.218	97.82
	180	5	8.79	0.256	0.259	0.261	0.259	97.41
	240	5	8.64	0.259	0.262	0.266	0.262	97.38
	300	5	8.60	0.279	0.284	0.281	0.281	97.19
	900	5	8.61	0.273	0.269	0.271	0.271	97.29
1440	5	8.54	0.299	0.303	0.301	0.301	96.99	

ตารางที่ 4.13 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

	เวลาสัมผัส (นาที)	pH น้ำเสีย ก่อนเขย่า	pH น้ำเสีย หลังเขย่า	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	% removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย NaOH	5	5	8.56	0.493	0.501	0.497	0.497	95.03
	10	5	8.63	0.421	0.424	0.419	0.421	95.79
	20	5	8.82	0.374	0.377	0.375	0.375	96.25
	30	5	8.94	0.322	0.330	0.337	0.333	96.67
	60	5	8.97	0.304	0.309	0.305	0.306	96.94
	90	5	9.01	0.271	0.268	0.267	0.269	97.31
	120	5	9.03	0.219	0.221	0.223	0.221	97.79
	150	5	8.83	0.231	0.234	0.235	0.233	97.67
	180	5	8.79	0.257	0.254	0.258	0.256	97.44
	240	5	8.74	0.269	0.272	0.271	0.271	97.29
	300	5	8.70	0.281	0.279	0.277	0.279	97.21
	900	5	8.72	0.299	0.294	0.300	0.298	97.02
	1440	5	8.71	0.301	0.299	0.302	0.301	96.99

ตารางที่ 4.14 การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่เวลาสัมผัสต่างๆ กัน

	เวลาสัมผัส (นาที)	pH น้ำเสีย ก่อนเขย่า	pH น้ำเสีย หลังเขย่า	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	% removal
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	5	5	8.60	0.498	0.501	0.504	0.501	94.99
	10	5	8.69	0.443	0.454	0.477	0.488	95.52
	20	5	8.79	0.391	0.392	0.395	0.393	96.07
	30	5	8.86	0.367	0.360	0.369	0.365	96.35
	60	5	8.94	0.299	0.294	0.297	0.297	97.03
	90	5	8.96	0.266	0.260	0.261	0.262	97.38
	120	5	8.99	0.237	0.235	0.240	0.237	97.63
	150	5	8.86	0.253	0.249	0.251	0.251	97.49
	180	5	8.84	0.257	0.254	0.259	0.257	97.43
	240	5	8.72	0.269	0.268	0.271	0.269	97.31
	300	5	8.71	0.288	0.284	0.287	0.286	97.14
	900	5	8.71	0.291	0.297	0.293	0.294	97.06
1440	5	8.69	0.306	0.304	0.301	0.304	96.96	



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาสัมผัสของซีโอดีแต่ละชนิดกับ %removal ของตะกั่ว

จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.15 พบว่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอดีสังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอดีสังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเขย่าที่ 5 นาทีจนถึง 120 นาทีพบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาการเขย่าเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการกำจัดตะกั่วมากที่สุดที่เวลาการเขย่า 120 นาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.03% และ 97.92% ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าลดลง โดยที่หลังจากช่วงเวลาการเขย่า 150 นาที ถึง 1440 นาที เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าค่อนข้างคงโดยที่ซีโอดีสังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 97.13-97.90% ส่วนซีโอดีสังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 96.99-97.82%

สำหรับเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอดีสังเคราะห์จากถ้ำลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอดีสังเคราะห์จากถ้ำลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline นั้น ก็จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการเขย่าที่ 5 นาทีจนถึง 120 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยในการ

กำจัดตะกั่วมากที่สุดที่เวลาในการเขย่า 120 นาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.79% และ 97.63% ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีความลดลง โดยที่หลังจากช่วงเวลาการเขย่า 150 นาที ถึง 1440 นาที เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าค่อนข้างคงโดยที่ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 96.99-97.67% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline จะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 96.96-97.49% ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อใส่ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน และจากถ้ำลอยซานอ้อยลงไป ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วละลายอยู่ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะที่อยู่ในน้ำเสียดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการสัมผัสกับซีโอไลต์สังเคราะห์ และค่อยๆ ซ้ำลงเมื่อเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในที่สุด จะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วจะมีความชันในช่วงแรกเป็นเวลาสัมผัสจะมากกว่าในช่วงหลัง และมีความชันลดลงเรื่อยๆ จนมีลักษณะเป็นเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอในที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุกันระหว่างประจุของโซเดียมกับประจุของตะกั่ว และอาจมีปริมาณสูงขึ้นในบางเวลา โดยอาจเกิดจากการผันกลับของการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการดูดติดทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Faust and Aly, 1987) ทำให้ง่ายที่จะเกิดการผันกลับของการดูดซับ

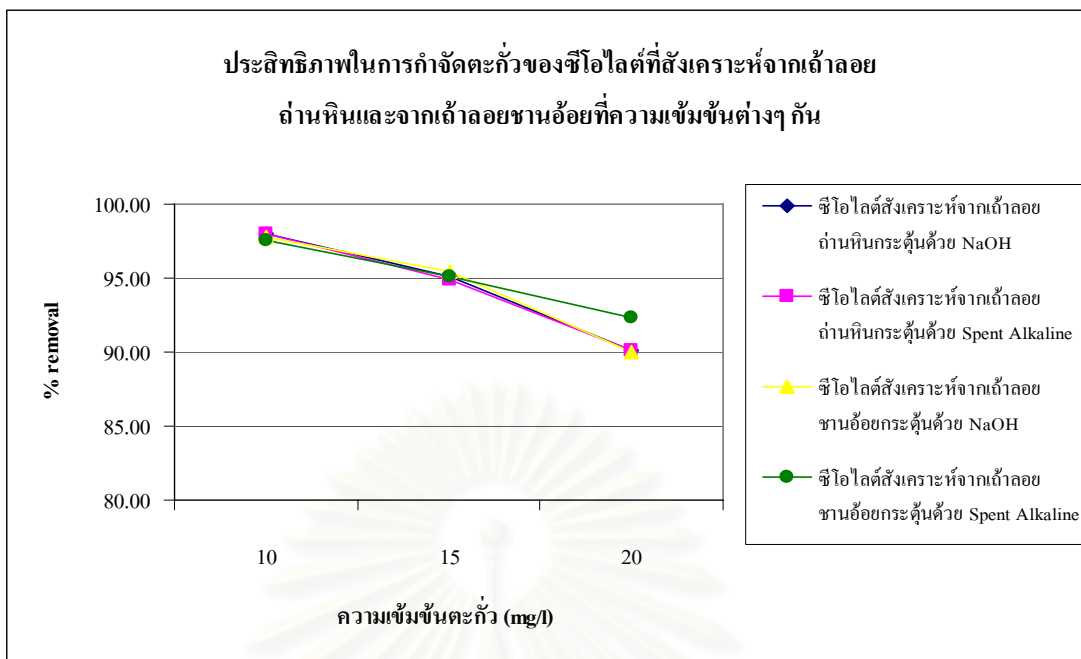
4.4.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม จะทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 10, 15 และ 20 mg/l โดยจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ pH เท่ากับ 5 และใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที

พบว่า การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.15 ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของซีโอไลต์
ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย

ประเภท ซีโอไลต์	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/l)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	% removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน	10	0.198	0.193	0.195	0.195	98.05
กระดุ้นค้าย NaOH	15	0.488	0.491	0.490	0.490	95.10
	20	0.995	0.990	0.991	0.992	90.08
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน	10	0.205	0.201	0.204	0.203	97.97
กระดุ้นค้าย Spent alkaline	15	0.519	0.511	0.517	0.516	94.84
	20	0.989	0.985	0.988	0.987	90.13
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยขานอ้อย	10	0.221	0.219	0.217	0.219	97.81
กระดุ้นค้าย NaOH	15	0.454	0.455	0.461	0.456	95.44
	20	0.991	1.001	0.998	0.997	90.03
ซีโอไลต์ สังเคราะห์จาก เถ้าลอยขานอ้อย	10	0.245	0.240	0.241	0.242	97.58
กระดุ้นค้าย Spent alkaline	15	0.484	0.490	0.481	0.485	95.15
	20	1.098	1.101	0.109	0.769	92.31



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วจาก 10 เป็น 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยมีค่าลดลง สำหรับซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วลดลงจาก 98.05% เหลือ 95.10% และ 90.08% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วลดลงจาก 97.97% เหลือ 94.84% และ 90.13% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วลดลงจาก 97.81% เหลือ 95.44% และ 90.03% ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอย ขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วลดลงจาก 97.58% เหลือ 95.14% และ 92.31% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งที่แต่ความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นทำให้โอกาสที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกลดลงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด ซึ่งจะพบว่าในระยะแรกโลหะหนักจะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณรูพรุน ซึ่งมีอยู่บริเวณผิวของซีโอไลต์ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โลหะหนักเหล่านั้นก็จะจับตัวอยู่ได้

เพียงแค่บริเวณผิวของซีโอไลต์เท่านั้น โดยมีลักษณะการจับตัวเป็นชั้นๆ ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งจับตัวกันไม่แน่นหรือไม่แข็งแรงมากนัก ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะหลุดออกจากผิวซีโอไลต์ได้ง่าย ดังนั้นที่ความเข้มข้นต่ำๆ ซีโอไลต์จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่า

4.4.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐาน $PbNO_3$ พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่ pH เท่ากับ 5 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์อยู่ 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.1 และ 0.2 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และใช้เวลาเขย่า 120 นาที จากนั้นแยกน้ำตัวอย่างออกโดยการกรอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังตารางที่ 4.16-4.19

ตารางที่ 4.16 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือเฉลี่ย (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/l)	lnC	Ln x/m	1/C	1/X	% removal
0.00	10	1	0	-	-	-	-	-	0
0.01	8.904	0.89	0.11	10.96	2.19	2.39	0.11	0.091	10.96
0.02	7.697	0.77	0.23	11.52	2.04	2.44	0.13	0.087	23.03
0.04	6.149	0.61	0.39	9.63	1.82	2.26	0.16	0.104	38.51
0.08	2.205	0.22	0.78	9.74	0.79	2.28	0.45	0.103	77.95
0.1	0.203	0.02	0.98	9.80	-1.60	2.28	4.93	0.102	97.97
0.2	0.031	0.00	1.00	4.98	-3.46	1.61	31.91	0.201	99.69

ตารางที่ 4.17 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอย
ถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

น้ำหนัก ซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้น ตะกั่วที่เหลือ เฉลี่ย (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/l)	lnC	Ln x/m	1/C	1/X	% removal
0.00	10	1	0	-	-	-	-	-	0
0.01	8.831	0.88	0.12	11.69	2.18	2.46	0.11	0.086	11.69
0.02	7.000	0.70	0.30	15.00	1.95	2.71	0.14	0.067	30.00
0.04	5.223	0.52	0.48	11.94	1.65	2.48	0.19	0.084	47.77
0.08	2.093	0.21	0.79	9.88	0.74	2.29	0.48	0.101	79.07
0.1	0.206	0.02	0.98	9.79	-1.58	2.28	4.85	0.102	97.94
0.2	0.038	0.00	1.00	4.98	-3.26	1.61	26.09	0.201	99.62

ตารางที่ 4.18 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอย
ชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

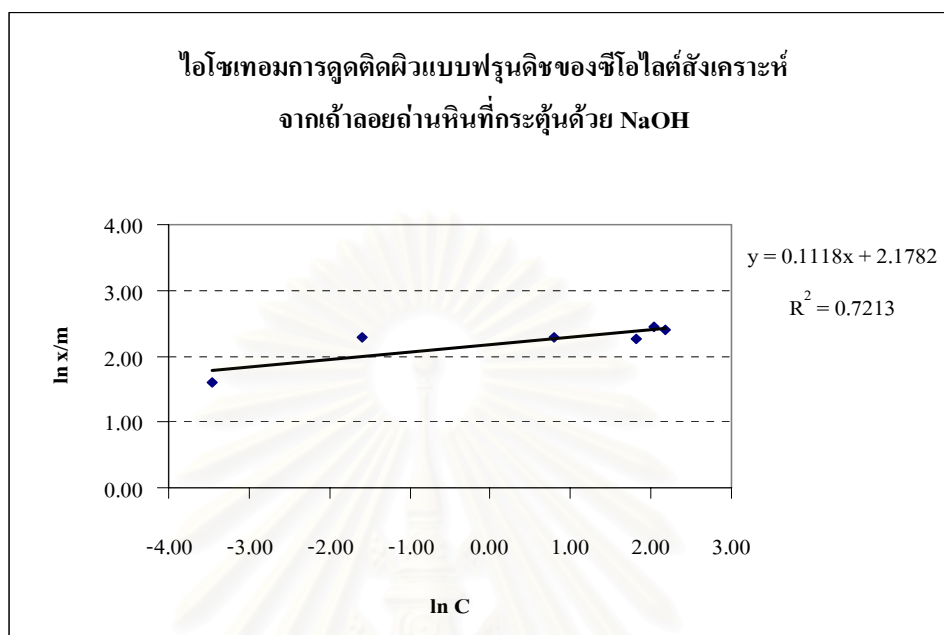
น้ำหนัก ซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้น ตะกั่วที่เหลือ เฉลี่ย (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/l)	lnC	Ln x/m	1/C	1/X	% removal
0.00	10	1	0	-	-	-	-	-	0
0.01	8.961	0.90	0.10	10.39	2.19	2.34	0.11	0.096	10.39
0.02	7.123	0.71	0.29	14.39	1.96	2.67	0.14	0.070	28.77
0.04	5.539	0.55	0.45	11.15	1.71	2.41	0.18	0.090	44.61
0.08	1.597	0.16	0.84	10.50	0.47	2.35	0.63	0.095	84.03
0.1	0.229	0.02	0.98	9.77	-1.47	2.28	4.37	0.102	97.71
0.2	0.053	0.01	0.99	4.97	-2.94	1.60	18.99	0.201	99.47

ตารางที่ 4.19 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอย
 ซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

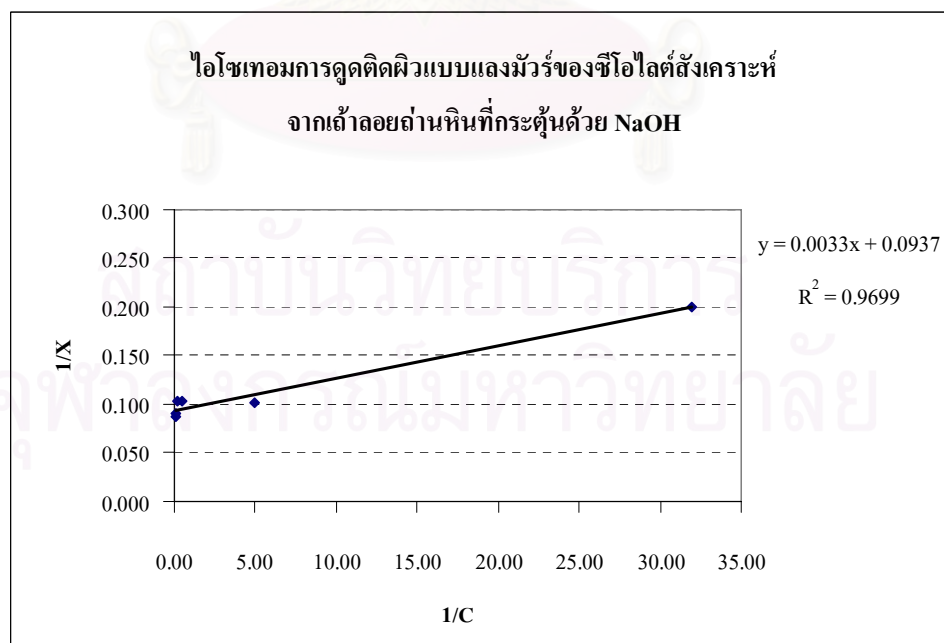
น้ำหนัก ซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้น ตะกั่วที่เหลือ เฉลี่ย (mg/l)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/l)	lnC	Ln x/m	1/C	1/X	% removal
0.00	10	1	0	-	-	-	-	-	0
0.01	9.001	0.90	0.10	9.99	2.20	2.30	0.11	0.100	9.99
0.02	7.989	0.80	0.20	10.06	2.08	2.31	0.13	0.099	20.11
0.04	6.212	0.62	0.38	9.47	1.83	2.25	0.16	0.106	37.88
0.08	1.897	0.19	0.81	10.13	0.64	2.32	0.53	0.099	81.03
0.1	0.239	0.02	0.98	9.76	-1.43	2.28	4.18	0.102	97.61
0.2	0.056	0.01	0.99	4.97	-2.88	1.60	17.75	0.201	99.44

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.16-4.19 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย ซึ่งสมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดติดผิวมีอยู่หลายสมการแต่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 3 สมการ คือ Langmuir, BET และ Freundlich แต่สำหรับการดูดซับไอออนในสารละลายนิยมใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich มาอธิบายการดูดติดผิวโดยในการทดลองนี้จะเลือกใช้สมการของ Langmuir หรือเรียกอีกอย่างว่า Ideal Localized Monolayer Model มาอธิบาย เนื่องจาก สมการของ Langmuir จะใช้ได้ดีกับ Monolayer absorption และซีโอไลต์สังเคราะห์มีลักษณะเป็น Monolayer มากกว่าที่จะเป็น Multiplelayer คือการที่มีการดูดติดเพียงชั้นเดียว นอกจากนี้ ผลการทดลองการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อยที่ค่าพีเอช 5 และความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 10 mg/l ซึ่งเป็นพีเอชและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดติดผิวตะกั่วของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหาค่า R^2 ของแต่ละสมการทั้ง Langmuir และ Freundlich แล้วพบว่าค่า R^2 ของสมการ Langmuir มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่า จึงเลือกสมการของ Langmuir มาอธิบายได้ผลดังรูปที่ 4.17-4.24

1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

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

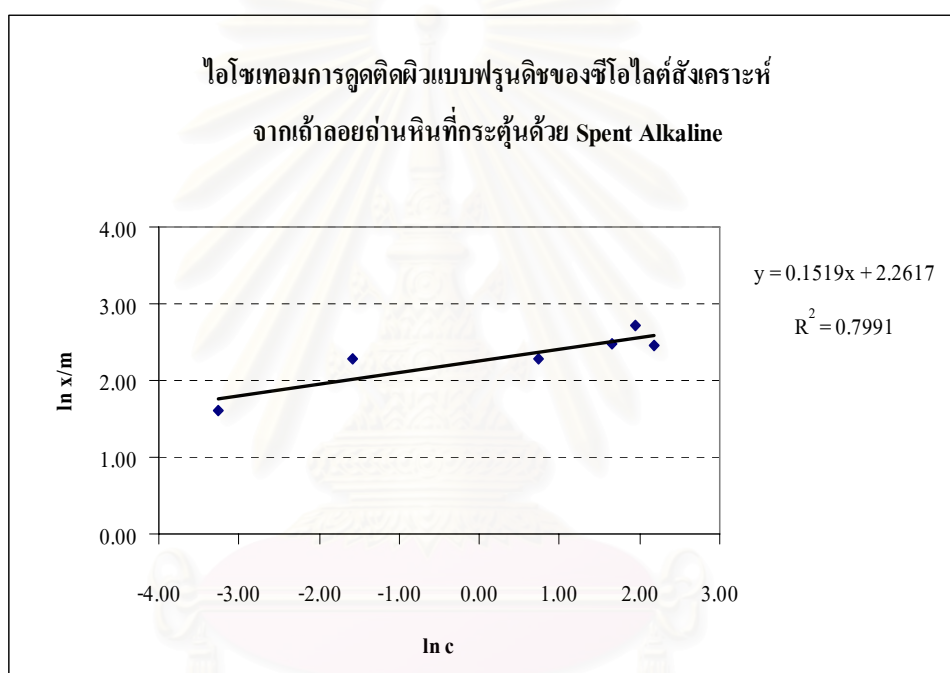
จากรูปที่ 4.22 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ $1/X_m = 0.0033$

จุดตัดแกน $1/X$ เท่ากับ $1/X_m b = 0.0937$

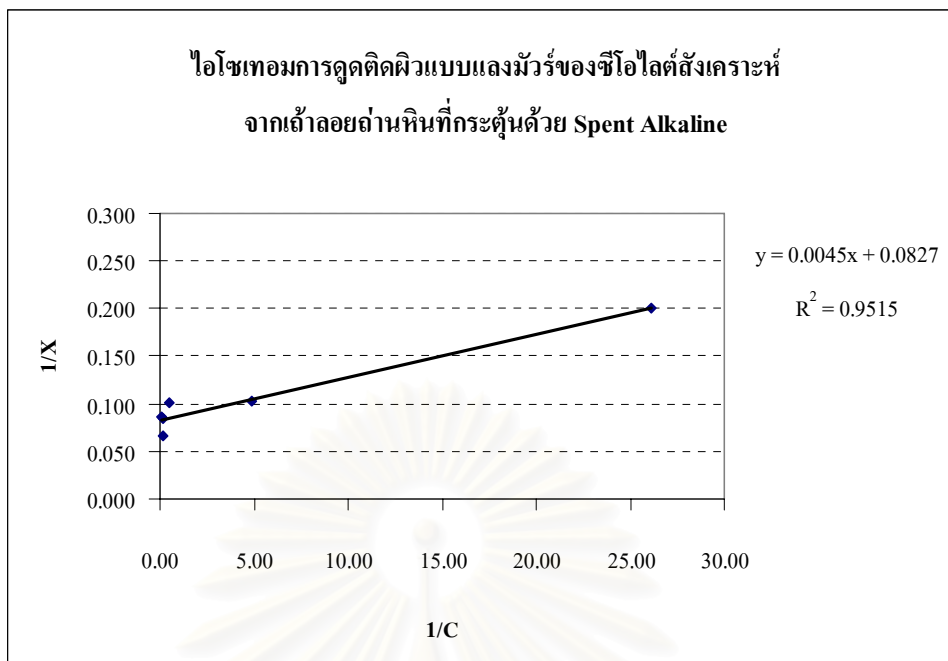
$$b = 0.0352$$

$$X = 10.67 C_e / (1 + 0.0352 C_e)$$

2) ไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพรุนดิของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

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

จากรูปที่ 4.24 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ $1/X_m = 0.0045$

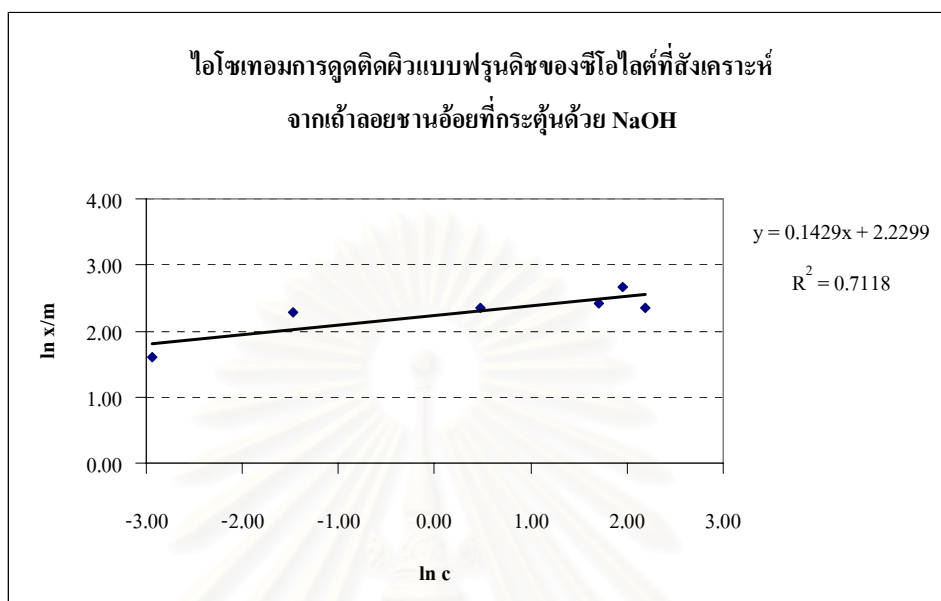
จุดตัดแกน 1/X เท่ากับ $1/X_m b = 0.0827$

$$b = 0.0544$$

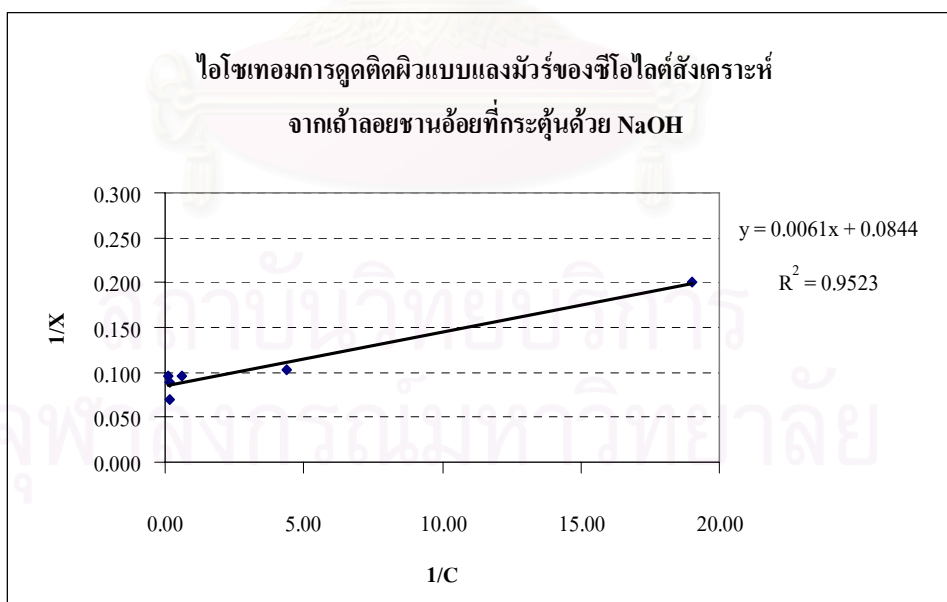
$$X = 12.09 C_e / (1 + 0.0544 C_e)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.22 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

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

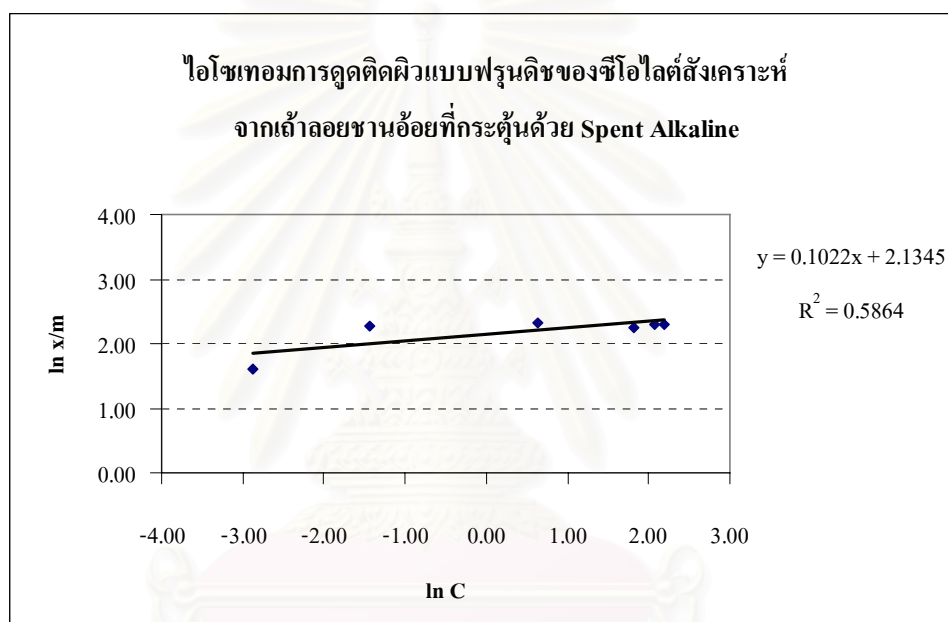
จากรูปที่ 4.26 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ $1/X_m = 0.0061$

จุดตัดแกน $1/X$ เท่ากับ $1/X_m b = 0.0844$

$$b = 0.0722$$

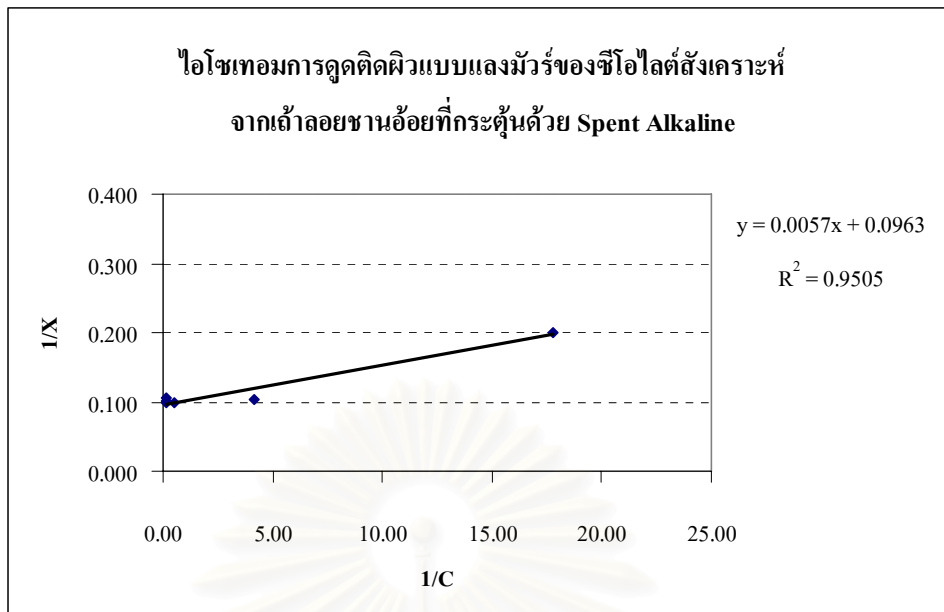
$$X = 11.85 C_e / (1 + 0.0722 C_e)$$

4) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline



รูปที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดติดผิวตะกั่วแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

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

จากรูปที่ 4.28 ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ $1/X_m = 0.0057$

จุดตัดแกน 1/X เท่ากับ $1/X_m b = 0.0963$

$$b = 0.0592$$

$$X = 10.38 C_e / (1 + 0.0592 C_e)$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 10 mg/l จะได้ค่าความหนาแน่นของการดูดติดผิวสูงสุด (X_{max}) ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยซานอ้อย ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่ของซีโอล์ต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยจากสมการของ Langmuir

ชนิดของซีโอล์ต์สังเคราะห์	$1/X_m$	b	X_{max} (mg/g)
ซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย NaOH	0.0033	0.0352	79.93
ซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	0.0045	0.0544	78.31
ซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย NaOH	0.0061	0.0722	68.78
ซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อย ที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	0.0057	0.0592	65.23

จากตารางที่ 4.20 พบว่าซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม สามารถดูดติดฟิวตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 79.93 มิลลิกรัม และซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดฟิวตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 78.31 มิลลิกรัม โดยซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าความสามารถดูดติดฟิวมากกว่าซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ค่าน้อยกว่า 0.1% ส่วนซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม สามารถดูดติดฟิวตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 68.78 มิลลิกรัม และซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดฟิวตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 65.23 มิลลิกรัม โดยซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าความสามารถดูดติดฟิวมากกว่าซีโอล์ต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ค่าน้อยกว่า 0.1% จะเห็นว่าซีโอล์ต์สังเคราะห์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีความสามารถในการดูดติดฟิวตะกั่วได้ใกล้เคียงกับซีโอล์ต์สังเคราะห์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงสามารถใช้ทดแทนกันได้

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยกับน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่ว

ตัวอย่างน้ำเสียจริงที่ใช้ทำการศึกษาจะเป็นน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่ว ซึ่งมี pH เท่ากับ 2.02 โดยสภาวะที่ใช้ในการบำบัดจะใช้จากสภาวะต่างๆ ที่ได้ในหัวข้อ 4.4 ใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 5 ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.1 กรัม ปริมาตรของน้ำเสีย 100 ml นำไปเขย่า 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาเขย่า 120 นาที แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วละลายของตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังการเขย่า ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ผลการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ของน้ำเสียจากโรงงาน

ชนิดของ ซีโอไลต์สังเคราะห์	pH ก่อนเขย่า	pH หลังเขย่า	ความเข้มข้นของ ตะกั่วเจลีย์ (mg/l)		% removal
			ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง	
ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วย NaOH	5	7.84	2.049	0.129	93.69
ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วย Spent alkaline	5	7.67	2.049	0.146	92.86
ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เถ้าลอยขานอ้อยกระตุ้นด้วย NaOH	5	7.98	2.049	0.209	89.82
ซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เถ้าลอยขานอ้อยกระตุ้นด้วย Spent alkaline	5	8.01	2.049	0.214	89.56

จากการศึกษาที่ได้พบว่าการดูดซับโลหะตะกั่วของน้ำเสียจริงจากโรงงานหลอมตะกั่ว แ่งจากแบตเตอรี่เก่าที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ จะมีประสิทธิภาพในการถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 93.69% และ 92.86%

ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 89.82% และ 89.56% ตามลำดับเมื่อพิจารณาการดูดซับโลหะตะกั่ว จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจริงจะลดปริมาณโลหะตะกั่วลงได้มากและมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นประสิทธิภาพของการตกตะกอนและการดูดซับร่วมกัน

การนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินไปใช้งานส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยอาศัยสมบัติของการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์

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

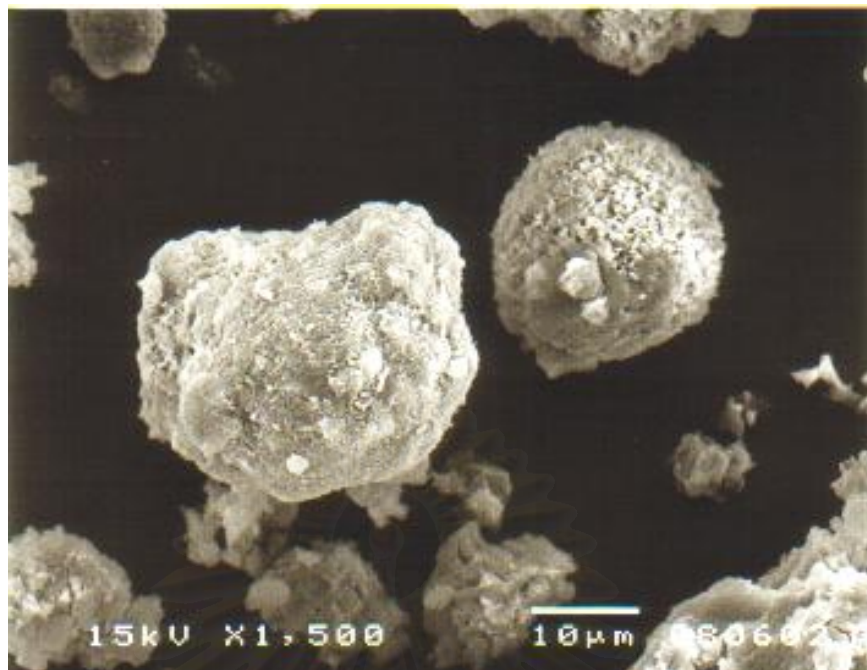
งานวิจัยของ Atkins et al. (1995) นำ Zeolite P ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมากำจัดทองแดง (Cu^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) ออกจากน้ำเสีย

งานวิจัยของ Singer and Berggaut (1995) นำ Zeolite P ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมากำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) ออกจากน้ำเสีย

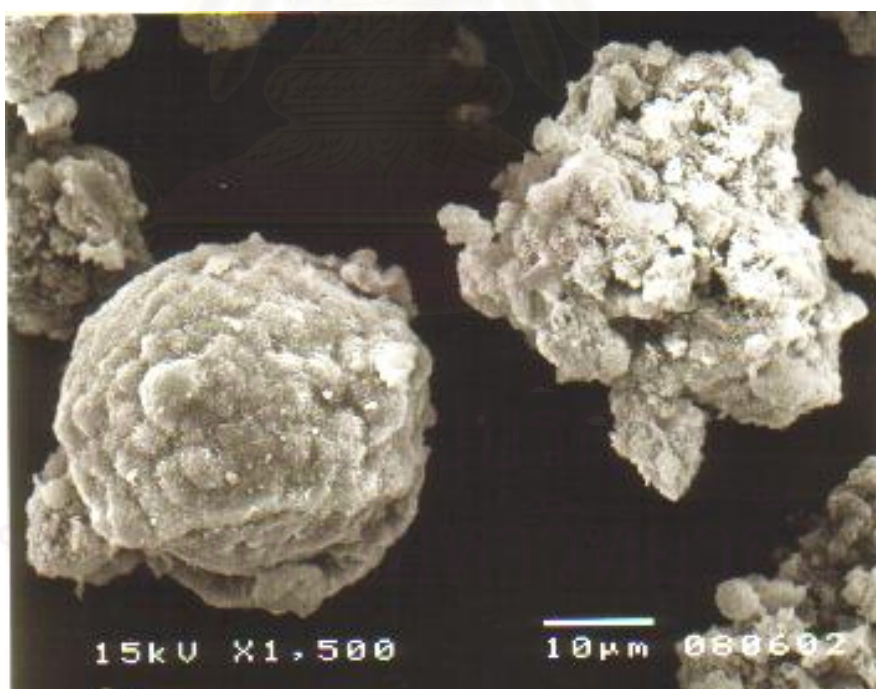
งานวิจัยของ LopezSalinas et al. (1997) นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมาลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เป็นต้น

เมื่อนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียไปวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope : SEM) โดยกำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าพื้นผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสภาวะต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยพื้นผิวที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์จะถูกปิดจากอนุภาคของตะกั่วที่ถูกดูดซับติดผิว ดังรูปที่ 4.25-4.28

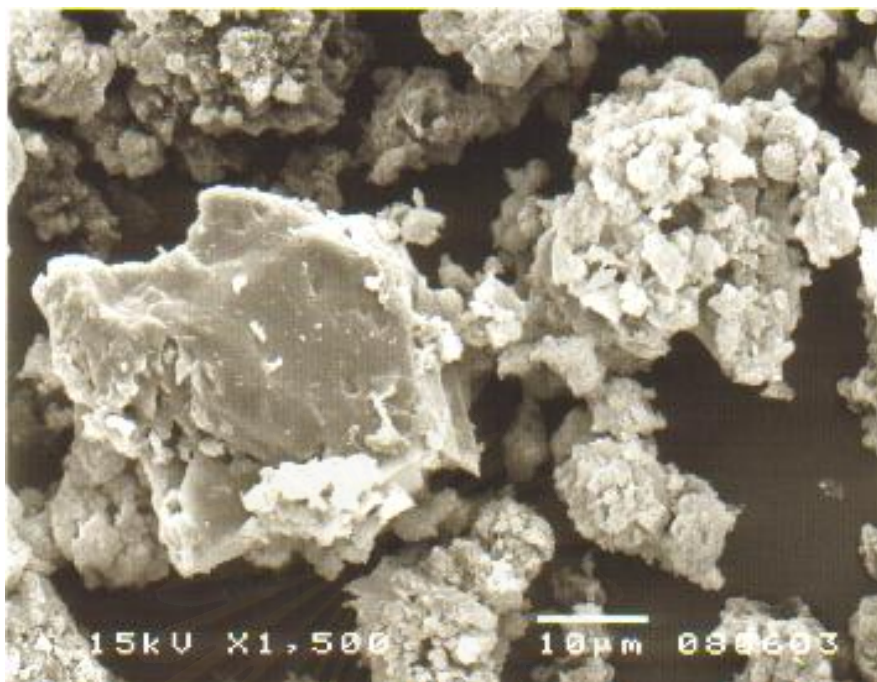
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



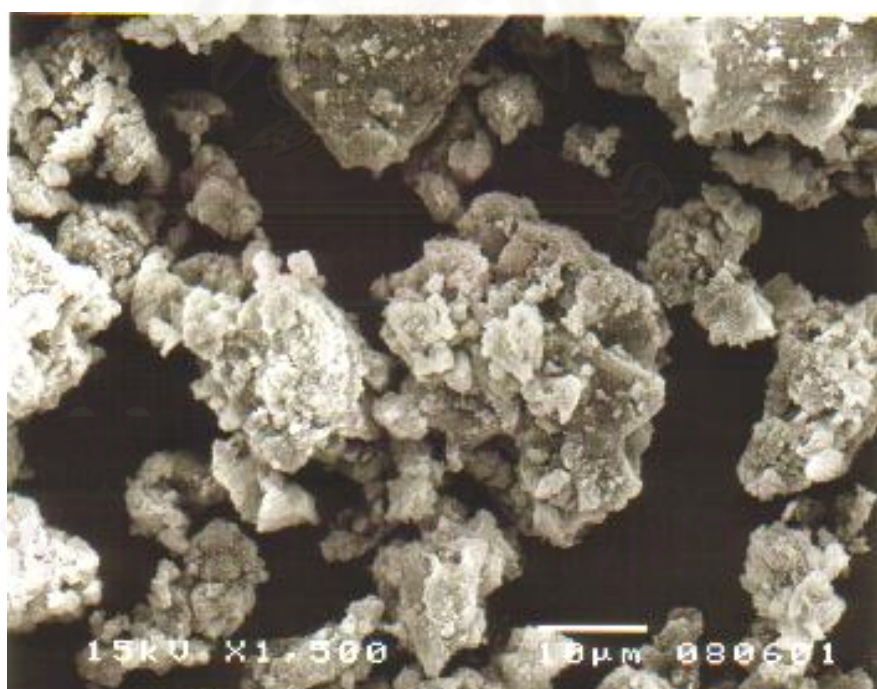
รูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซิลิกาที่ได้สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮโดรอกไซด์หลังจากการดูดซับด้วยสารละลายไฮโดรอกไซด์



รูปที่ 4.26 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซิลิกาที่ได้สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังจากการดูดซับด้วย



รูปที่ 4.27 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซิลิกาที่ได้สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังผ่านการดูดซับ



รูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างและพื้นที่ผิวของซิลิกาที่ได้สังเคราะห์จากถ้ำลอยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline หลังผ่านการดูดซับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การสังเคราะห์ซีโอไลต์

ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน และภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน ซึ่งให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 501.53 cmol/kg และ 418.36 cmol/kg ตามลำดับ

ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน ซึ่งให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 296.99 cmol/kg และ 286.29 cmol/kg ตามลำดับ

2) การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

- การหา pH ที่เหมาะสม

ที่ pH เท่ากับ 5 เป็นพีเอชที่เหมาะสมของการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากเป็นพีเอชที่ตะกั่วยังคงตกตะกอนไม่มากนัก ถ้าเลือก pH สูงกว่านี้จะเป็นการตกตะกอนของตะกั่วมากกว่าการดูดซับ เพราะตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนที่ pH ประมาณ 6 - 7

- การหาช่วงเวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอก

ไซค์ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือที่เวลาสัมผัส 120 นาที มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 98.03, 97.92, 97.79 และ 97.63 ตามลำดับ

- การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยถ่านหินมีค่าลดลงตามลำดับ ดังนั้นที่ความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยถ่านหิน

- การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่สารละลายต่างๆที่เหมาะสมในการดูดซับคือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 mg/l พีเอชเท่ากับ 5 พบว่าสอดคล้องกับสมการของ Langmuir โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม สามารถดูดซับตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 79.93 มิลลิกรัม และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดซับตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 78.31 มิลลิกรัม ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม สามารถดูดซับตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 68.78 มิลลิกรัม และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดซับตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 65.23 มิลลิกรัม ซึ่งจะเห็นว่าซีโอไลต์ในปริมาณที่เท่ากัน คือ 1 กรัม ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้มากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

3) การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตตะกั่วแท่ง

ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่างจากกระบวนการหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline เท่ากับ 93.69%,

92.86%, 89.82% และ 89.56% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของ ซีโอไลต์สังเคราะห์ทั้งสองชนิดกับน้ำเสียจริงสามารถลดปริมาณ โลหะตะกั่วลงได้มากพอสมควร

4) ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินและจากถ้ำลอยชานอ้อย ที่ผ่านกระตุ้นด้วย สารละลาย Spent alkaline และที่ผ่านกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำเสียจริง โดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน บวก และมีการตกตะกอนร่วมด้วย ซึ่งผลกระทบในเรื่องความไม่บริสุทธิ์ของสารละลาย Spent alkaline ที่ใช้ในการกระตุ้นมีน้อยมาก

5) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากชานอ้อยมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียใกล้เคียง กับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ดังนั้นจึงสามารถนำถ้ำลอยชานอ้อยมาสังเคราะห์เป็น ซีโอไลต์เพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำเสียทดแทนถ้ำลอยถ่านหินได้

6) การนำถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยมาผ่านกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่ผ่านการใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ สามารถเกิด ซีโอไลต์ ขึ้นได้เช่นเดียวกับการนำถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยชานอ้อยมาผ่านกระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีสามารถในการกำจัดตะกั่วได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และมีค่าต้นทุน น้อยกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้ง ดังนั้น จึงสามารถนำสารละลาย Spent alkaline มาสังเคราะห์ซีโอไลต์ทดแทนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ เช่น แกลบที่เหลือทิ้งจาก การสีข้าว กากตะกอนของระบบผลิตน้ำประปา ดินเบา เป็นต้น มาใช้เป็นวัตถุดิบ

2) ควรมีการศึกษาการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ในการดูดซับน้ำเสียที่มีโลหะหนักชนิดอื่นๆ เช่น แคดเมียม ปรอท สังกะสี เป็นต้น เพื่อดูผลของโลหะหนักแต่ละตัวว่ามีผลต่อการดูดซับติดต่อกัน อย่างไร

3) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมว่าการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถลด COD ในน้ำเสีย อุตสาหกรรมได้หรือไม่

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. 2547. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรรศินา จรัสรัตนมงคล. 2542. การผลิตซีโอไลต์ด้วยดินเบาให้เป็นสารดูดซับ และการทดลองบำบัดน้ำเสียในนาถุ้ง. งานค้นคว้าอิสระวิทยาศาตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2526. ซีเถ้าลอยกับงานอุตสาหกรรม. ประโยชน์ของกากของเสียจากโรงงานไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- ประกฤต เลิศจรัสอร่ามดี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีโอไลต์ผงข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ. 2547. การใช้น้ำค้างที่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมนมดำในกระบวนการตกตะกอนตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมการหลอมแบตเตอรี่เก่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิภายู บุญเจริญสุข. 2537. รายงานปัญหาพิเศษ เรื่อง ซีโอไลต์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัญญาต สันธวาร์ยัน. และ สมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรพัชร์ พันพานิชย์กุล. 2542 . การทำเสถียรกากตะกั่วจากโรงงานหลอมแบตเตอรี่เก่า . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไสว โลจนะศุกฤกษ์. 2539. ปัญหาและแนวทางการแก้ไขมลพิษในการหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ โรงงาน ฉับ ก.พ. – พ.ค. กระทรวงอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

- Alley, R. 2000. *Water Quality Control Handbook*. New York : McGraw-Hill.
- Amrhein, C., Haghnia, GH., Kim, TS., Morher, PA., Amanios and Delta, T.L. 1996. Synthesis and Properties of Zeolites from Coal Fly ash. *Environmental Science & Technology* 30: 735-742.
- Atkins, M., Glasser, FP. and JACK, JJ. 1995. Zeolite-P in Cements-its Potential for Immobilizing Toxic and radioactive-waste species. *Waste Management* 15:127-135.
- Ayers, D.M., Davis, A.P. and Gietka, P.M. 1994. Removing Heavy Metals from Wastewater. [Online].
Available from : <http://www.ercumd.edu/TES/techtips/PMG%20metal%20precip%20man.pdf> [2004, May 25].
- Biskup, B. and Subotic B. 1998. Removal of Heavy Metallons from Solution by Means of Zeolites.I. Thermodynamics of the Exchange Process between Cadmium Ions from Solution and Sodium Ions from Zeolit A. *Seperation Science and Technology*.33(4): 449-466.
- Breck, D.W. 1974. Zeoliet Molecular Sieve : Structure, Chemistry, and Use. New York : John Wiley & Sons.
- Curkovic, L., Cerjan-Stefanovic, S. and Filipan, T. 1996. Metal Ion Exchange and Modified Zeolites. *Wat. Res.* 31 (6): 1379-1382.
- Dyer, A. 1988. *Introduction to Zeolite Molecular Sieves*. New York : John Wiley & Sons : 69-97.
- Faust, S.D., and Aly O.M. 1987. Adsorption processe for water treatment. Boston : Butterworths Publisher.
- Hollman, G.G., Steenbruggen, G. and Janssen-Jurkovicova, M. 1999. A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. *Fuel* 78: 1225-1230.
- LopezSalins, E., Salas, P., Schifter, I., Moran, M., Castillo, S. and Mogica, E. 1997. Reduction of NO by CO using a zeolite catalyst obtained from fly ash. *Studies in Surface Science and Catalyst* 105: 1565-1570.
- Mavros, P., Zouboulis, A.I., and Lazaridis, N.K. 1993. Removal of Metal Ion from Wastewater The Case of Nickel. *Envi. Tech.* 14: 83-93.

- Mier, M.V., Callejas, R.L., Gehr, R., Blanca, E., Cisneros, J. and Alvarez, P.J.J. 2000. Heavy Metal Removal with Mexican Clinoptilolite: Multi-Component ionic Exchange. Wat. Res.35 (2): 373-378.
- Patane, G., DiPasquale, S., Corigliano, F. and Mavilia, L. 1996. Use of Zeolitised waste material in the removal of Copper (II) and Zinc (II) from waste water. Annali. Di. Chmica.86: 87-98.
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A. and Lopezsoyer, A. 1997. Synthesis of Na-Zeolites from fly ash. Fuel :793-799.
- Reed, B. E., Jamil, M. and Thomas, B. 1996. Effect of pH, empty bed contact time and hydraulic loading rate on leading rate on lead removal by granular activated carbon columns. Water Environmental Research 68(5): 877-882.
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L. and Parkin, G.F. 1994. Chemistry for environmental engineering 4th ed. New York : McGraw-Hill.
- Singer, A. and Berkgaut, V. 1995. Cation-Exchange properties of hydrothermally treated coal fly-ash. Environmental Science & Technology 29: 1748-1753.
- Steenbruggen, G. and Hollman, GG. 1998. The synthesis of zeolites from fly ash and the properties of the zeolite products. Journal of Geochemical exploration 62: 305-309.
- Virakornphanich, P. and Egashira, K. 1998. Synthesis of Zeolite from Waste Lignite Ash from Thailand. Soil Sci Plant Nutri. 44(4): 707-711.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

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

วิธีเตรียมสารละลาย

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

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

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

(โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)

เมื่อ m คือ มวลของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นมิลลิกรัม

V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีวิเคราะห์

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

จากสูตร

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

เมื่อ m_1 คือ มวลตัวอย่างก่อนเผา เป็นกรัม

m_2 คือ มวลตัวอย่างหลังเผา เป็นกรัม

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

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

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

5. ทำเบลงค์เปรียบเทียบ ถ้าปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 2 ครั้ง ต่างกันเกิน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ทำเบลงค์เปรียบเทียบใหม่

การคำนวณ

คำนวณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม จากสูตร

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

มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลาย ตัวอย่างเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ ที่ใช้ในการไทเทรตกับเบลงค์ เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอเป็นโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

100.09 คือ มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต

m คือ มวลของตัวอย่างเป็นกรัม

L คือ น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา เป็นร้อยละ

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



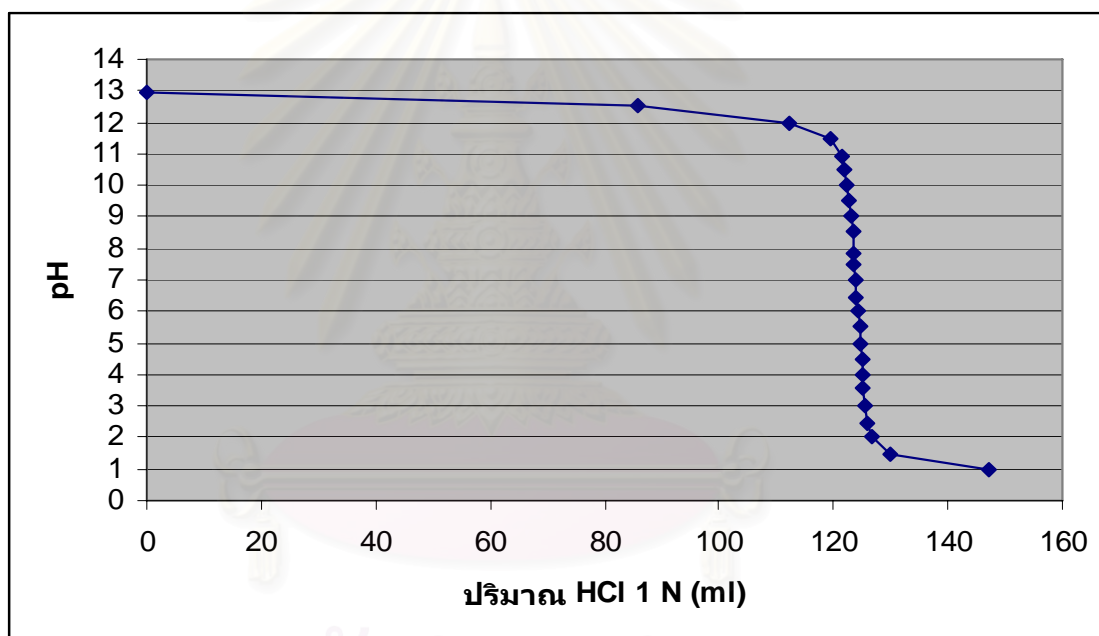
ภาคผนวก ข

วิธีหาความเข้มข้นของ Spent alkaline

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีหาความเข้มข้นของ Spent alkaline โดยการไตเตรตด้วยกรด HCl 1 N เมื่อใช้ Bromothymol blue เป็นอินดิเคเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียม Spent alkaline เจือจาง 1:10 ปริมาณ 100 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. ตั้งบนเครื่องกวนแม่เหล็ก
- 2) หยดสารละลาย Bromothymol blue ประมาณ 3 – 5 หยด ลงในสารละลาย Spent alkaline ซึ่งจะทำให้สารละลายมีสีน้ำเงิน
- 3) เตรียมกรด HCl 1 N ใส่ในบิวเรต ไตเตรตสารละลาย Spent alkaline จดบันทึกค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปและปริมาณ HCl ที่ใช้ในการไตเตรต ได้ผลดังแสดงในรูป ก. 1 และในตารางที่ ก.1



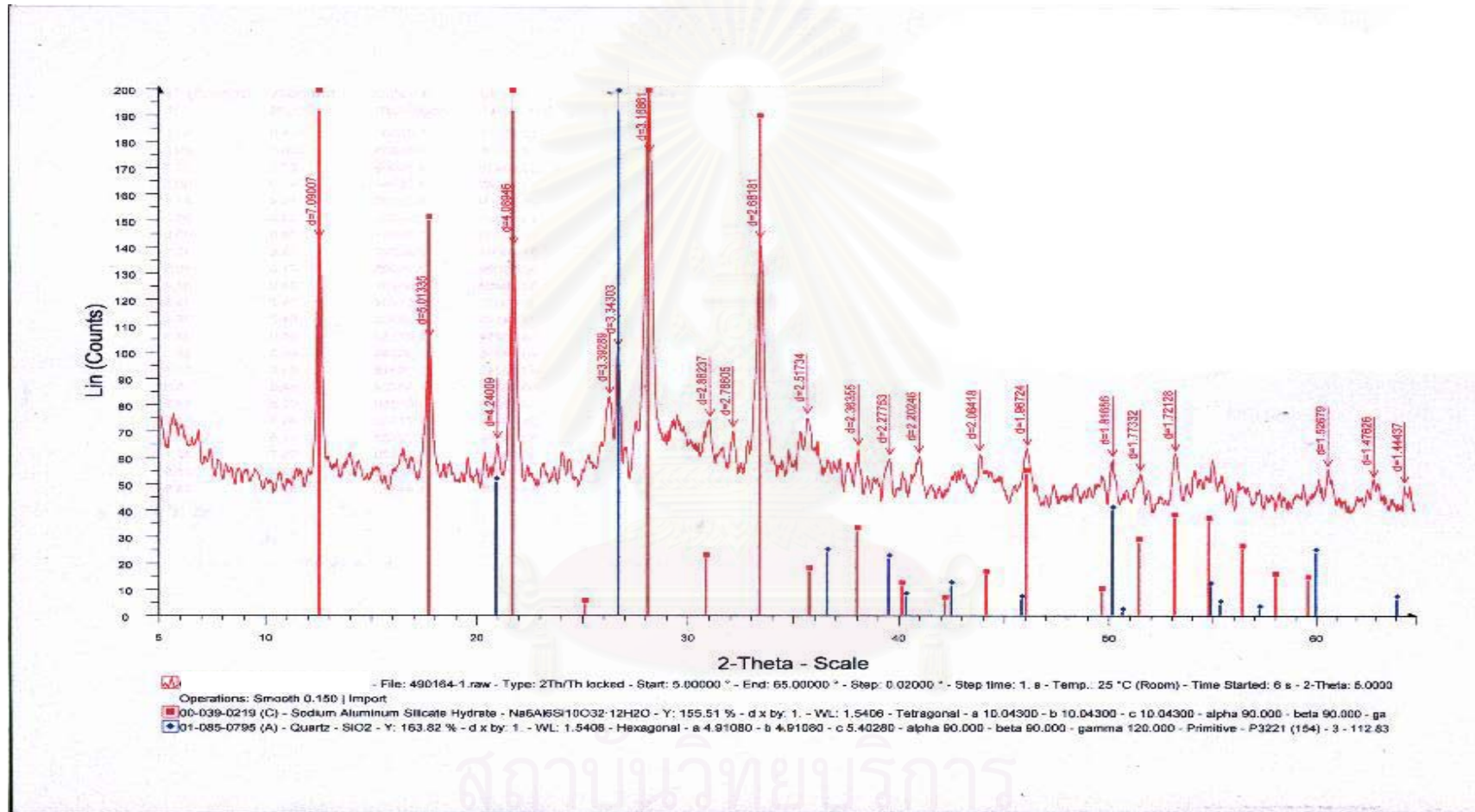
รูป ข.1 เส้นโค้งไตเตรชันของ HCl 1 N กับ Spent alkaline เจือจาง 1:10



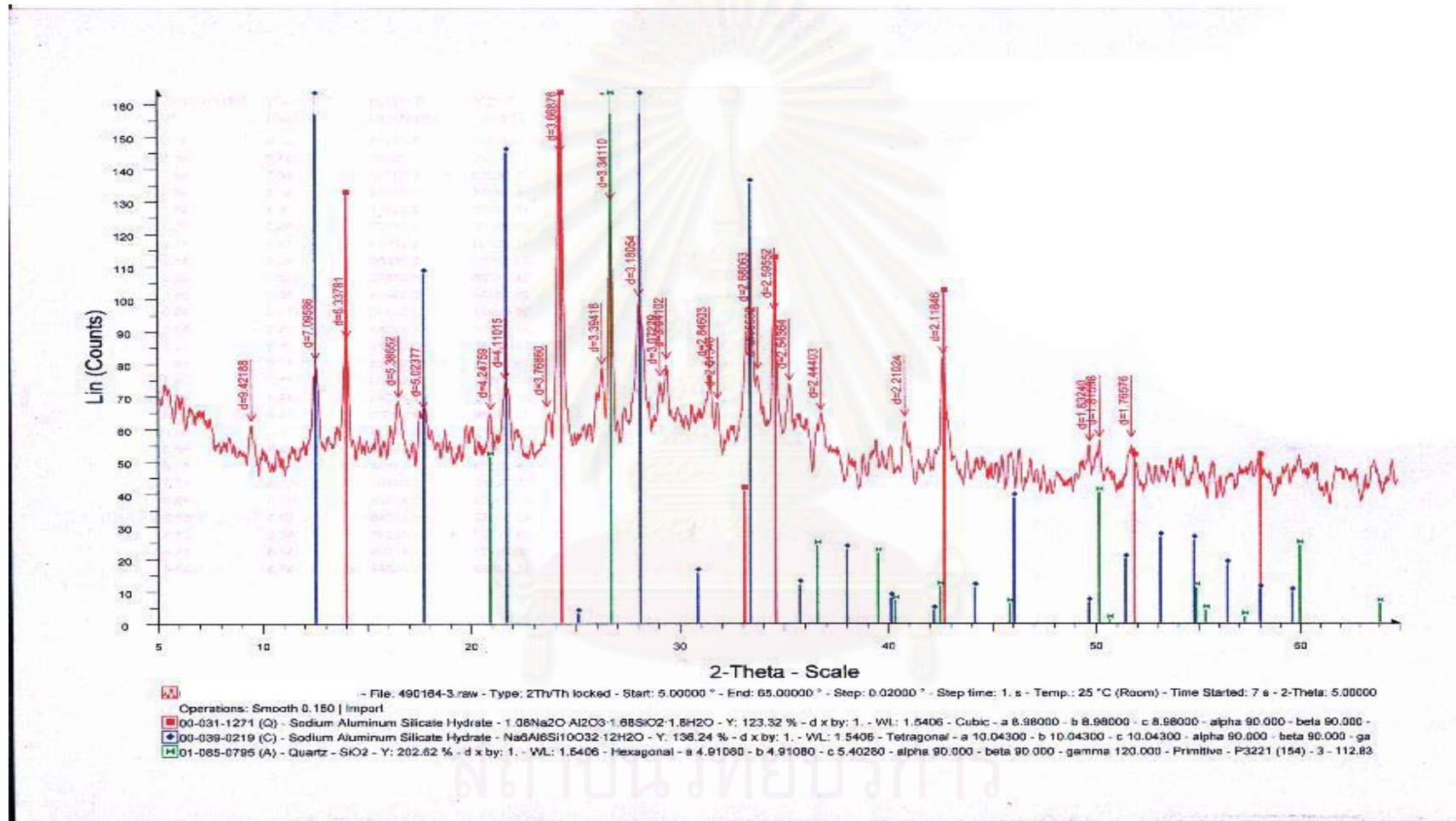
ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

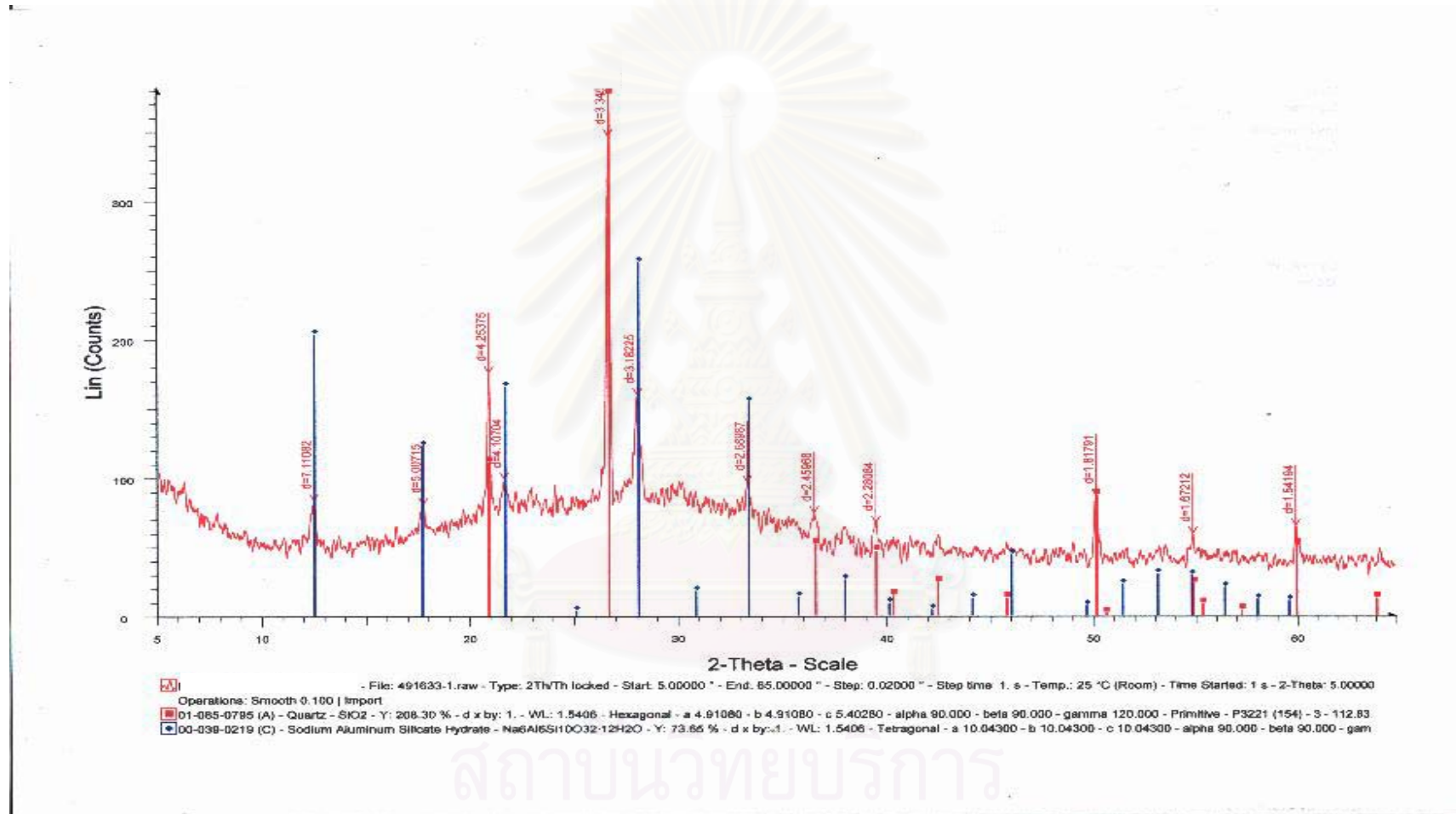
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



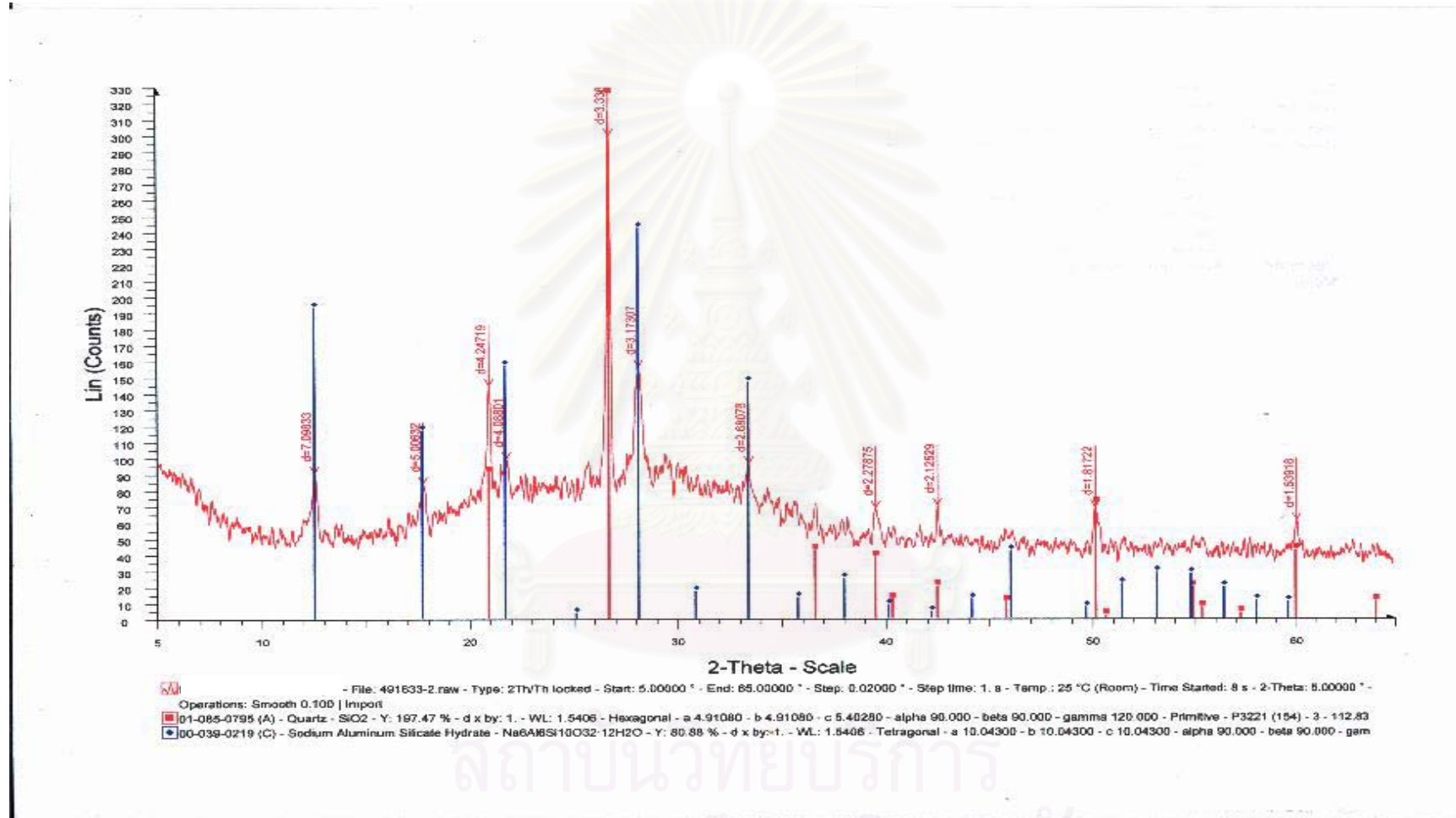
รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของเส้นลายนหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.0 M 100°C 5 วัน



รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟเฟรคชันของเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 2.0 M 90°C 5 วัน



รูปที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.0 M 90°C 5 วัน



รูปที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของเถ้าลอยขานอ้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 2.0 M 90°C 5 วัน