



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีสสิ่งแวดล้อม

สายวิชาวิทยาศาสตร์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

Removal of Heavy Metal from Electroplating Wastewater Using Granule of Zeolite Synthesis from Bagasse Residue

นามผู้วิจัย นางสาวสมเนตร จันทวิชชประภา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ประภา โഴ๊ะสลาม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์เรวดี อนุวัฒนา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนวรรณ พาณิชพัฒน์, ปร.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสินธุ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย
แบบเม็ด

Removal of Heavy Metal from Electroplating Wastewater Using Granule of Zeolite Synthesis
from Bagasse Residue

โดย

นางสาวสมเนตร จันทวิชชประภา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

สมเนตร จันทวิชชประภา 2554: การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดย
ซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์ประภา โഴ๊ะสลาม, Ph.D. 140 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะในการขึ้นรูปเม็ดซีโอไลท์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย โดย
ศึกษาปริมาณของสารช่วยพูน และสารยึดเกาะ ได้แก่ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเบนโทไนท์
โดยวิธีขึ้นรูปเม็ดแบบแกรนูลเปียก อัตราส่วนการผสมของ PVA และเบนโทไนท์ที่ร้อยละ 20 และ 15
โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด สามารถขึ้นรูปเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร
มีพื้นที่ผิว 7.71 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ
229.38 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลท์

ซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ
หนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) แบบไม่ต่อเนื่อง
พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร
ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที มวลซีโอไลท์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย
แบบเม็ด 1 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิลร้อยละ
99.00, 98.71, 96.89, 96.23 และ 93.66 ตามลำดับ สมดุลการดูดติดผิวเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดติด
ผิวแบบแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดติดผิวคือสังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม นิกเกิล
เท่ากับ 9.98, 6.27, 5.96, 3.80 และ 2.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบลำดับ
ความสามารถในการดูดติดผิวเป็นดังนี้ ซีโอไลท์เชิงการค้าแบบผง > ซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย
แบบผง > ซีโอไลท์เชิงการค้าแบบเม็ด > ซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด การดูดติดผิวของ
ซีโอไลท์ทั้ง 4 ชนิด มีลำดับความชอบในการดูดติดผิวเหมือนกันคือ สังกะสี > ทองแดง > โครเมียม >
แคดเมียม > นิกเกิล

จากผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ ด้วยระบบไม่ต่อเนื่อง
โดยใช้น้ำเสียจริง ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที มวลซีโอไลท์ที่สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด 1 กรัม พบว่ามีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักคือ สังกะสี ทองแดง
โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล ร้อยละ 85.25, 82.63, 79.71, 74.21 และ 71.51 ตามลำดับ

Somnate Chuntawitchaprapha 2011: Removal of Heavy Metal from Electroplating Wastewater Using Granule of Zeolite Synthesis from Bagasse Residue. Master of Science (Environmental Science and Technology), Major Field: Environmental Science and Technology, Division of Science. Thesis Advisor: Miss Prapa Sohsalam, Ph.D. 140 pages.

The granulation of zeolite synthesized from bagasses residue was studied. Granulation process was performed by wet-granulation with the mixture of polyvinyl alcohol and bentonite at 20 and 15% by wt. The diameter of zeolite granule is 2 mm . Surface area was $7.71 \text{ m}^2/\text{g}$ and calcium exchange capacity were $788.3 \text{ mg CaCO}_3/\text{g}$ zeolite

The granule of zeolite synthesis from bagasse residue was tested for mixed heavy metal (zinc, copper, chromium, cadmium and nickel) removal from the synthetic wastewater under batch condition. The highest removal efficiencies of zinc, copper, chromium, cadmium and nickel were 99.00, 98.71, 96.89, 96.23 and 93.66 % , respectively at pH 5, metal concentration of 6 mg/l, contact time at 120 min and 1 g of zeolite. It was described by Langmuir adsorption isotherm for synthetic wastewater which the adsorption capacities of granular zeolite for zinc, copper, chromium, cadmium and nickel were 9.98, 6.27, 5.96, 3.80 and 2.99 mg/g zeolite, respectively. The metal adsorption capacity of each type of zeolites were compared. These were ordered from best to fair efficiency as followed: powder of commercial zeolite, powder of zeolite synthesis from bagasses, granule of commercial zeolite, granule of zeolite synthesis from bagasses. The four types of zeolite showed the same metal adsorption affinity as zinc > copper > chromium > cadmium > nickel

The granule of zeolite was tested for heavy metal removal from the electroplating wastewater under batch condition. The removal efficiencies of zinc, copper, chromium, cadmium and nickel were 85.25, 82.63, 79.71, 74.21 and 71.51 % at pH 5, contact time at 120 min and 1 g of zeolite, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ดิฉันขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ประภา โഴ๊ะสลาม ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร. เรวดี อนุวัฒนา กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำอบรม สั่งสอน คำแนะนำ คำปรึกษา ความรู้ต่างๆ ทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินชีวิตปัจจุบันและในอนาคต ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอบพระคุณ ดร. ทศนิตันติ ผู้ทรงคุณวุฒิ และอาจารย์ ดร. จุติยา แซ่ปั้ง ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านทุนวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทดลองและวิเคราะห์ตัวอย่าง

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม และเพื่อนๆ ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปด้วยดี

คุณค่าและสิ่งที่เป็นประโยชน์ที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้พึงมี ขอมอบแต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมทั้งครูบาอาจารย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

สมเนตร จันทวิชชประภา

มีนาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	60
สรุปและข้อเสนอแนะ	109
สรุป	109
ข้อเสนอแนะ	111
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	112
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก ตารางปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วย ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ	117
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษ ชานอ้อยแบบผงและซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ปริมาณ PVA สูตรต่างๆ	128
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน	132
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอม การดูดติดผิวแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช	135
ภาคผนวก จ ค่ามาตรฐานการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจำพวกโลหะหนัก	138
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	140

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลของปริมาณ PVA และขนาดเม็ดต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยคงที่ปริมาณของเบนโทไนท์ที่ร้อยละ 15 (ค่าเฉลี่ย \pm SD)	61
2	เปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเม็ดซีโอไลต์ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ที่ผืนแปรปริมาณ PVA ที่ปริมาณต่างๆ (ค่าเฉลี่ย \pm SD)	62
3	ผลของปริมาณเบนโทไนท์และขนาดเม็ดต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน(ค่าเฉลี่ย \pm SD)	63
4	ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นและสุดท้ายหลังการดูดซับ และผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ค่าเฉลี่ย \pm SD)	66
5	แสดงผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ย \pm SD)	74
6	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ย \pm SD)	75
7	ผลของมวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ย \pm SD)	76
8	ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	83
9	ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	90
10	ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
11	ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	104
12	แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียจริง	107
13	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ยร้อยละการกำจัด \pm SD) ในน้ำเสียจริงโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	107
ตารางผนวกที่		
ก1	ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	118
ก2	ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	118
ก3	ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	119
ก4	ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	119
ก5	ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	120
ก6	ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	120
ก7	ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก8 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิง การค้าแบบเม็ด	121
ก9 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิง การค้าแบบเม็ด	122
ก10 ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้า แบบเม็ด	122
ก11 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเศษชานอ้อยแบบผง	123
ก12 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง	123
ก13 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง	124
ก14 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง	124
ก15 ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเศษชานอ้อยแบบผง	125
ก16 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	125
ก17 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	126
ก18 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	126
ก19 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์ สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	127

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก20	ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	127
จ1	ค่ามาตรฐานการควบคุมระบายนํ้าทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน อุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม	139

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงรูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออดิเนตกับซิลิกอนหรือ อลูมิเนียมในหน่วยเล็กๆ ของซีโอไลต์ (Subunit) ของซีโอไลต์ (หน่วย โครงสร้างปฐมภูมิ)	9
2	แสดงโครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต	9
3	แผนภาพการผลิตซีโอไลต์ด้วยกระบวนการ Hydrogel Process	11
4	แผนภาพการผลิตซีโอไลต์ด้วยกระบวนการ Clay Conversion	11
5	แสดงกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ A	12
6	แสดงความสามารถในการตกตะกอนของโลหะในช่วงค่าความเป็นกรด- ด่าง ต่างๆ	24
7	ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir	37
8	ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich	39
9	ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง ที่ กำลังขยาย 10,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning microscope ยี่ห้อ JEOL (เรวดี, 2551)	45
10	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น รุ่น XRD6000 ยี่ห้อ SHIMADZU (เรวดี, 2551) A) ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง B) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง (●แทน Na-A zeolite)	46
11	เครื่องกวนผสมแป้งแบบ Planetary Mixer Hobar	49
12	เครื่องอัดเม็ด	50
13	แผนภาพแสดงการทดลองในขั้นตอนที่ 1.1 และ 1.2	51
14	แผนภาพแสดงการทดลองในขั้นตอนที่ 2	58
15	แผนภาพแสดงการทดลองในขั้นตอนที่ 3	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ปริมาณเบนโทไนด์ของเม็ดซีโอไลต์ต่อน้ำหนักที่หายไป	64
17	ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 20 และเบนโทไนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ดที่ 1-2 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning microscope ยี่ห้อ JEOL	65
18	ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์	68
19	ผลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์	70
20	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ	71
21	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่มวลซีโอไลต์ต่างๆ	73
22	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	78
23	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	78
24	ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบแลงเมียร์ ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	79
25	ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบฟรุนดิช ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	79
26	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	80
27	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	80
28	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	81
30	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวนิกเกิดแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	82
31	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวนิกเกิดแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง	82
32	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	84
33	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวสังกะสีแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	85
34	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวทองแดงแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	85
35	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวทองแดงแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	86
36	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	86
37	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวโครเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	87
38	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวแคดเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	87
39	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวแคดเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	88
40	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวนิกเกิดแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	88
41	ไอโซเทอมการดูดติดฟิวนิกเกิดแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	91
43	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	92
44	ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	92
45	ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	93
46	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	93
47	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	94
48	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคลเซียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเศษชานอ้อยแบบผง	94
49	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคลเซียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	95
50	ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิลแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	95
51	ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิลแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบผง	96
52	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรูนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	99
54	ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	99
55	ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบฟรูนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	100
56	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	100
57	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรูนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	101
58	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด	101
59	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรูนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	102
60	ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิลแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	102
61	ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิลแบบฟรูนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก เศษชานอ้อยแบบเม็ด	103
62	ความสามารถในการตกตะกอนโลหะหนักในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ	106

ภาพผนวกที่

ข1	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME ของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก ชานอ้อยแบบผง	129
----	--	-----

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข2	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากชาน อ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร	129
ข3	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากชาน อ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร	130
ข4	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากชาน อ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร	130
ข5	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากชาน อ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร	131
ข6	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากชานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร	131

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

Removal of Heavy Metal from Electroplating Wastewater Using Granule of Zeolite Synthesis from Bagasse Residue

คำนำ

เศษชานอ้อยจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีปริมาณมากถึง 4 ตันต่อวัน หรือ 1,460 ตันต่อปี เศษชานอ้อยจัดเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการทำเยื่อกระดาษที่ยังคงได้รับความนิยมเนื่องจากการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล จึงส่งผลให้มีโรงงานผลิตเยื่อกระดาษจากเศษชานอ้อยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันโรงงานผลิตเยื่อกระดาษเหล่านี้ได้หาแนวทางในการนำเศษชานอ้อยมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำมาผลิตเป็นโพลีเมอร์ การผลิตเป็นฉนวนป้องกันเสียง และเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เป็นต้น แต่การใช้ประโยชน์เหล่านี้ยังมีอย่างจำกัด ส่งผลให้มีการกองเศษชานอ้อยบริเวณรอบๆ โรงงานในปริมาณมากประกอบกับเศษชานอ้อยมีปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 80 ส่งผลให้มีปริมาณเศษชานอ้อยและขุยมันมีกลิ่นเหม็นรบกวนสร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณชุมชนนั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาในการหาแหล่งกำจัดเศษชานอ้อยเหล่านี้ แนวทางหนึ่งได้มีการนำเศษชานอ้อยมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ผลิตเป็นสารดูดซับโลหะหนัก นอกจากเป็นการลดต้นทุนในการสังเคราะห์แล้ว ยังเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งอีกด้วย

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเศษชานอ้อย พบว่าส่วนใหญ่แล้วประกอบด้วยของแข็งที่มีน้ำหนักเบา และมีส่วนประกอบของซิลิกาสูงจึงมีความเหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการเตรียมเป็นสารประกอบออลูมิเนียมซิลิเกตประเภทซีโอไลต์ (Zeolite) ซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์และมีมูลค่าสูงในระดับอุตสาหกรรมเคมี โดยจุดเด่นของซีโอไลต์คือคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี มีความเป็นรูพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวมาก (มนตรี, 2542) คุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้จึงมีการนำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับโลหะหนัก ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ สารกรองแยกโมเลกุล ใช้เป็นสารดูดความชื้นและก๊าซพิษ ดูดซับก๊าซ ตลอดจนโมเลกุลสารอินทรีย์ ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา Hydrocracking และ Isomerization ใช้เป็นสารจับตะกอนอินทรีย์โลหะหนัก ใช้เป็นสารลดความหนืดเพื่อเพิ่มการละลายของออกซิเจนและรักษาความเป็น

กรด-ด่างของน้ำ เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีความพยายามในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากของเสียต่างๆ ได้แก่ ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเศษชานอ้อยด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (เรวดี, 2551) การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยชานอ้อยเพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย (อนรรฆอร, 2545) แต่เนื่องจากซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีลักษณะเป็นผง มีความหนาแน่นต่ำ จึงเกิดการลอยน้ำ อีกทั้งปัญหาเรื่องความขุ่นจากซีโอไลต์ทำให้เกิดปริมาณตะกอนสะสมในระบบบำบัด ดังนั้นซีโอไลต์ที่มีลักษณะผงจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำการคิดค้นการทำซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Pellet) เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานและยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

จากการสำรวจข้อมูลชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ พบว่ามีโลหะหนักจำพวก สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล ซึ่งจัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิต โดยกระบวนการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากน้ำเสียมียหลายวิธีและขั้นตอน ตัวอย่างวิธีการบำบัดที่ใช้โดยทั่วไป เช่น การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Precipitation) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (Membrane separation) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange) แต่วิธีการที่ใช้กันอยู่เหล่านี้เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง โดยทั่วไปแล้ววิธีการบำบัดเหล่านี้มักใช้วิธีการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างโดยสารเคมี ซึ่งส่งผลให้ระบบการบำบัดน้ำเสียมียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากการใช้สารเคมี และต้องนำตะกอนจากกระบวนการบำบัดไปฝังกลบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอัดเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเศษชานอ้อย และนำเม็ดซีโอไลต์ที่ได้มาศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด สังกะสี แคดเมียม นิกเกิล โครเมียม และทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อโรงงานชุบโลหะในการลดต้นทุนการซื้อโลหะหนักโดยการนำโลหะหนักเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ได้ และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะได้อีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดเม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ระยะเวลาสัมผัส (Contact Time) และปริมาณซีโอไลต์ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง
3. ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผงและแบบเม็ด ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงและแบบเม็ด ด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช
4. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

ตรวจเอกสาร

1. เศษชานอ้อย (Bagasse Residul)

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ มีการใช้วัตถุดิบหลายชนิด ซึ่งแบ่งเป็นประเภทหลักๆ คือ วัตถุดิบประเภทไม้ (wood) และวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (Non-Wood) สำหรับวัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยที่เป็นไม้ คือ ยูคาลิปตัส ส่วนวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ คือ ชานอ้อย ปอแก้ว ข้าวไม้ไผ่ เยื่อกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นเยื่อใยสั้นถึงเยื่อใยปานกลาง ยกเว้นเฉพาะเยื่อกระดาษสาที่ผลิตจากต้นปอสาเท่านั้นที่จัดเป็นเยื่อใยยาว จากผลการสำรวจโรงงานผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยในปัจจุบันพบว่ายูคาลิปตัสยังคงเป็นวัตถุดิบที่มีการใช้งานมากที่สุด แต่วัตถุดิบที่มีปริมาณการใช้งานรองลงมาคือชานอ้อย ซึ่งชานอ้อยที่ใช้นั้นเป็นผลพลอยได้จากการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาลและจะใช้ชานอ้อยส่วนหนึ่งเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำของโรงงานด้วย โดยชานอ้อยจะเป็นแหล่งไฟเบอร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนไม้ใบกว้างในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ชานอ้อยจะมีเส้นใยยาวประมาณ 0.8-2.8 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-34 ไมโครเมตร และมีส่วนประกอบทางเคมีคือ เซลลูโลสร้อยละ 26-39 ลิกนินร้อยละ 19-22 Hot water soluble ร้อยละ 3-11 Alcohol benzene soluble ร้อยละ 3-11 และเถ้าร้อยละ 1-5 สำหรับผลผลิตเยื่อฟอกขาวที่ใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบ จะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 40-45 ปัจจุบันมีความต้องการใช้ชานอ้อยประมาณปีละ 300,000 ตัน

1.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

มีขั้นตอนดังนี้

1.1.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation)

การจัดเตรียมวัตถุดิบมีจุดประสงค์ เพื่อที่จะเตรียมวัตถุดิบให้เหมาะสมสำหรับที่จะใช้ในการดำเนินการผลิตเยื่อขึ้นต่อไป โดยมีหลักการ คือ การแยกกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกและแปรรูปให้มีขนาดพอเหมาะ เริ่มด้วยการนำเอากากอ้อยจากกองเก็บกากอ้อยในบริเวณโรงงานมาทำการขจัดขุยอ้อยออกที่เครื่องแยกขุยชานอ้อย (Depither) ขุยชานอ้อยจะถูกแยกออกไป

จากนั้นจะส่งขานอ้อยเข้าเครื่องล้างขานอ้อย (Float washer) เพื่อล้างเอาสิ่งสกปรกหรือของหนักที่ไม่ต้องการออกจากขานอ้อย เช่น ทราย หิน

1.1.2 การแยกเส้นใย (Pulp Disintegration)

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษนั้น ภายหลังจากที่จัดเตรียมวัตถุดิบเรียบร้อยแล้ว จะนำวัตถุดิบเหล่านั้นมาผ่านขั้นตอนการย่อยแยกเส้นใยด้วยกระบวนการต่างๆ ดังนี้

1) กระบวนการกึ่งเคมี (Semicheical Process) เป็นการแยกโดยใช้กระบวนการเคมีและกระบวนการกลรวมกัน เยื่อที่ได้จากการเตรียมวิธีนี้มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างเยื่อไม้บดและเยื่อเคมี วิธีการแยกเส้นใยโดยวิธีกระบวนการกึ่งเคมีเป็นการนำขี้เถ้าไม้สับมาต้มกับน้ำยาต้มเยื่อในหม้อต้มเยื่อภายใต้เวลา อุณหภูมิ และปริมาณน้ำยาเคมีต่อปริมาณไม้ที่กำหนด เมื่อต้มได้สภาวะหนึ่งแล้วก็นำไปผ่านกระบวนการกลเพื่อแยกเส้นใยออกมา เรียกเยื่อที่ได้ว่าเยื่อกึ่งเคมี สำหรับประเทศไทย จะมีการผลิตเยื่อกึ่งเคมีจากขานอ้อย กระบวนการผลิตประกอบด้วยกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางกล ซึ่งจะมีขั้นตอนหลักๆ คือการแช่น้ำยา (Impregnation) การต้มเยื่อ (Cooking) และการบดเยื่อ

2) การแช่น้ำยา (Impregnation) วัตถุดิบจากระบบการจัดเตรียมวัตถุดิบจะถูกทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นเยื่อเส้นใย (Fiber) ในวัตถุดิบจะถูกแยกให้เป็นเส้นใยอิสระโดยจะเริ่มจากการแช่ให้ชุ่มด้วยโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่ใช้ในการต้มเยื่อ วัตถุดิบที่เป็นไม้จะถูกไล่อากาศที่แทรกอยู่ในเนื้อไม้ออกด้วยความร้อนจากไอน้ำก่อนจะนำไปแช่ในน้ำยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะช่วยให้วัตถุดิบอมน้ำยาได้มากขึ้น สำหรับขานอ้อยนั้นจะทำให้ชุ่มน้ำยาด้วยการพ่นน้ำยาไปที่ขานอ้อยโดยตรง

3) การต้มเยื่อ (Cooking) ในขั้นตอนการต้มเยื่อจะต้มในหม้อต้มเยื่อ (Digester) ซึ่งใช้ไอน้ำความดัน 10 บาร์ และควบคุมให้มีอุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส หลังจากการต้มร้อยละ 25 ของวัตถุดิบจะถูกละลายออกมา และเหลืออีกร้อยละ 75 ที่จะกลายเป็นเยื่อ การต้มด้วยเวลาที่นานขึ้นและใช้น้ำยามากขึ้นจะได้ปริมาณเยื่อน้อยลง แต่เยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรงขึ้น เวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อประมาณ 20 นาที

4) การบดเยื่อ เป็นกระบวนการแยกเส้นใยต่อจากกระบวนการทางเคมีเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเยื่อที่ได้ โดยเยื่อจะถูกบดในช่องแคบๆ ระหว่างจานหมุน 2 จานของเครื่องบด

1.1.3 การคัดขนาด (Screening)

เส้นใยที่แยกออกจากกันแล้วจะนำมาผ่านขั้นตอนการคัดขนาดของเยื่อเพื่อแยกเยื่อออกจากสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ได้แก่ เส้นใยที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับกระบวนการผลิตเยื่อซึ่งใช้ขานอ้อยเป็นวัตถุดิบนั้น เยื่อที่ไม่สามารถผ่านระบบการแยกเยื่อได้จะถูกทำให้เข้มข้นขึ้นเป็นร้อยละ 20 โดยเครื่อง Reject Thickener จากนั้นจะส่งเข้าเครื่องบดเยื่อ (Reject Refiner) อีกครั้ง ซึ่งจะเป็นการบดเยื่อที่ความดันบรรยากาศเยื่อที่ผ่านการบดแล้วจะส่งเข้าถังกักเก็บเพื่อผสมกับเยื่อที่ผ่านการบดในครั้งแรกแล้วนำเข้าสู่ขั้นตอนการล้างเยื่อต่อไป

1.1.4 การล้างเยื่อ (Washing)

ขั้นตอนนี้ของเหลวจากการต้มเยื่อจะถูกล้างแยกออกจากเยื่อ ของเหลวนั้นประกอบด้วย สารเคมี ลิกนิน และส่วนประกอบอื่นของเส้นใย ของเหลวที่ได้นี้เรียกว่าของเหลวดำ (Black Liquor) ซึ่งจุดประสงค์ในการล้างเยื่อ คือล้างของเหลวดำออกจากเยื่อ ลดการใช้สารเคมีในขั้นตอนการผลิตถัดไป และนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ในขั้นตอนการต้มเยื่ออีกครั้งสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษในโรงงานขนาดใหญ่ที่มีระบบนำสารเคมีกลับคืน (Chemical Recovery)

1.1.5 การฟอกเยื่อ (Bleaching)

ขั้นตอนการฟอกเยื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในด้านความขาว (Brightness) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษทิชชู กระดาษสา ฯลฯ กระบวนการฟอกเยื่อยังแบ่งเป็นแบบหลายขั้นตอนและขั้นตอนเดียว ทั้งนี้ขึ้นกับความขาวของเยื่อที่ต้องการ เช่นกระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษทิชชู ต้องการความขาวของเยื่อมาก จะใช้วิธีการฟอกหลายขั้นตอน

1.1.6 หน่วยทำความสะอาดเชื้อหลังการฟอก (Bleached Stock Screening)

เชื้อที่ฟอกแล้วจะผ่านเข้าสู่หน่วยร้อนทำความสะอาดเชื้อขั้นสุดท้ายก่อนทำ แผ่นเชื้อเพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งสกปรก (Dirt Material) ปะปนไปกับผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ เซนติคลินเนอร์

1.1.7 ขั้นตอนการเดินแผ่น (Sheet Forming) และอบแห้ง (Drying)

เชื้อจากหน่วยร้อนทำความสะอาดขั้นสุดท้ายจะเข้าสู่เครื่องเดินแผ่น และเมื่อเชื้อผ่านกระบวนการเดินแผ่นแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) เพื่อให้เหลือความชื้นประมาณร้อยละ 10 ก่อนส่งขายลูกค้า

1.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษและการนำไปใช้ประโยชน์

กระบวนการผลิตเชื้อกระดาษจากเศษชานอ้อยนั้นในขั้นตอนของการจัดเตรียมวัตถุดิบ จะมีการคัดขนาดชานอ้อยที่มีเส้นใยที่ได้ขนาดพอเหมาะประมาณร้อยละ 70 เพื่อนำเข้ากระบวนการผลิตเชื้อกระดาษต่อไป ในส่วนนี้จะเหลือเศษชานอ้อยที่ไม่ได้ขนาดประมาณร้อยละ 30 จะถูกคัดทิ้งจากกระบวนการผลิต ซึ่งเศษชานอ้อยจำนวนนี้จัดเป็นของเสียจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ โดยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้คือ

- 1) นำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการผลิตเชื้อกระดาษ
- 2) ใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก
- 3) นำไปอัดเป็นแผ่นคล้ายไม้อัดเพื่อให้ในการก่อสร้าง และเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ

ปัจจุบัน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษเหล่านี้ได้หาแนวทางในการนำเศษชานอ้อยมาใช้ประโยชน์อื่นๆ อีก เช่นการนำมาผลิตเป็น โฟม การผลิตเป็นฉนวนป้องกันเสียง และเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เป็นต้น แต่การใช้ประโยชน์เหล่านี้ยังมีอย่างจำกัดส่งผลให้มีการกองเศษชานอ้อยบริเวณรอบๆ โรงงานในปริมาณมาก ประกอบกับเศษชานอ้อยมีปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 80 ส่งผลให้มีปริมาณเศษชานอ้อยและขุขี้ที่มีกลิ่นเหม็นรบกวนสร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณชุมชนนั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาในการหาแหล่งกำจัดเศษชานอ้อยเหล่านี้ แนวทางหนึ่งได้มีการนำเศษชานอ้อยมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอโลต์ เพื่อใช้เป็นสาร

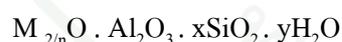
ดูดซับโลหะหนัก นอกจากเป็นการลดต้นทุนในการสังเคราะห์แล้วยังเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งอีกด้วย

2. ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก zein แปลว่า to boil และ lithos แปลว่า stone รวมความหมายแล้วก็คือ boiling stone หรือ หินเดือด (มนตรี, 2542)

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline Aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็น โครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้วในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้ทำให้เป็นที่มาของชื่อซีโอไลต์

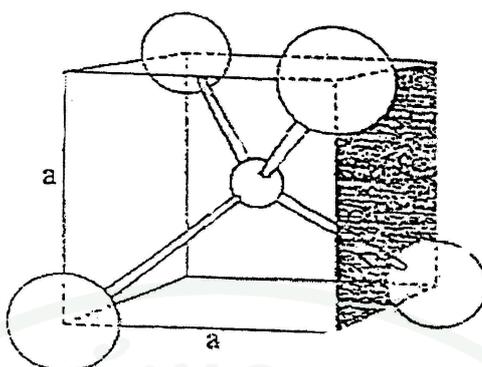
สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์คือ



n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลด์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท

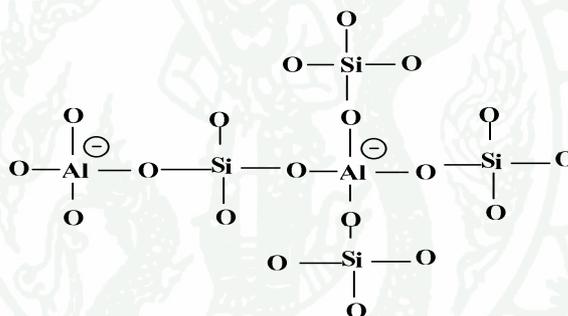
x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์



ภาพที่ 1 แสดงรูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออลูมิเนียมในหน่วยเล็กๆ ของซีโอไลต์ (Subunit) ของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ)

ที่มา: Breck, 1974



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต

ที่มา: สัญชนาถ และ สมชาติ, 2540

ซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) จะมีประจุลบสี่ และอลูมิเนียม-เตตระฮีดรอล (AlO_4) มีประจุเป็นลบห้า การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล เป็นโครงสร้างตาข่ายทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคตไอออนของโลหะแอลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี

ก. ซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติ (Mineral Zeolite or Naturally Occuring Zeolite) ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือ

ไดวาเลนต์เบส (Mono or Divalent Bases) อาจมีการสูญเสียในผลึกบางส่วน หรือทั้งหมดโดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์จากธรรมชาติได้แก่ Faujasite Chabazite Mordenite เป็นต้น

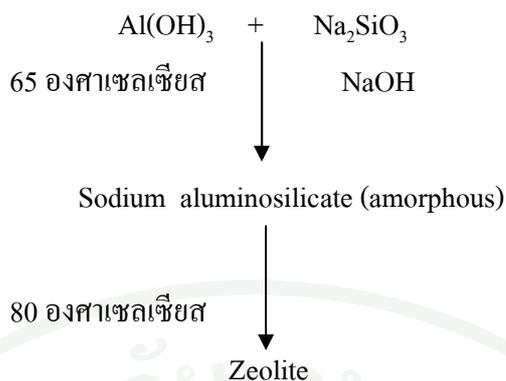
ข. ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthesis Zeolite) ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , Si_2O , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำ เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำในผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล (Gelation) เป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ซึ่งการควบคุมปัจจัยจะทำให้เกิดผลึกจำนวนมากอย่างสม่ำเสมอ ได้แก่ Zeolite A, X, และ Y ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่ได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยทั่วไปพบว่าซีโอไลต์จากการสังเคราะห์มีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่าและยังมีความบริสุทธิ์สูงกว่า

2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (D.W.Breck, 1974)

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นแบบไฮโดรเทอร์มอลมี 2 วิธีคือ

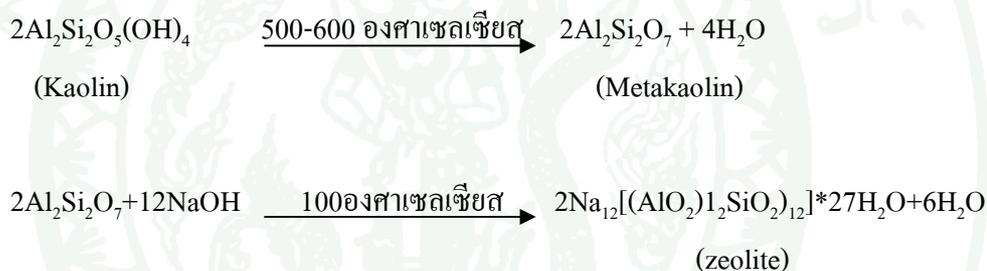
2.1.1 Hydrogel Process (Precipitation Process) เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงในระยะเวลาที่กำหนดไว้ โดยอาจเขียนขั้นตอนการสังเคราะห์ได้ดังภาพที่ 3

2.1.2 Clay Conversion (Digestion Process) เป็นการสังเคราะห์โดยการแปรสภาพวัตถุดิบโดยการเผาที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 3 แผนภาพการผลิตซีโอไลต์ด้วยกระบวนการ Hydrogel Process

ที่มา: Breck, 1974

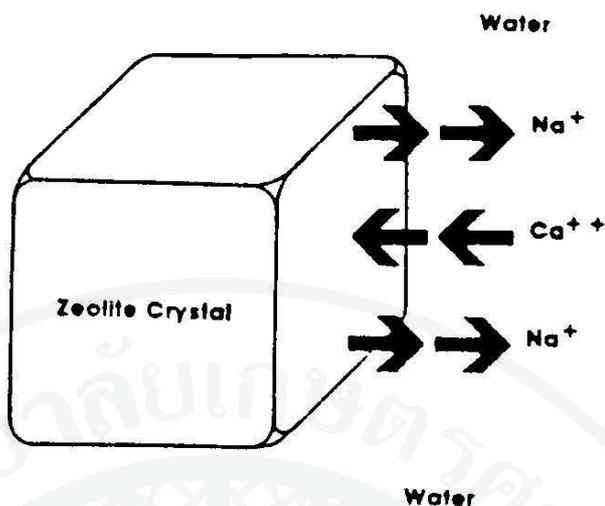


ภาพที่ 4 แผนภาพการผลิตซีโอไลต์ด้วยกระบวนการ Clay Conversion

ที่มา: Breck, 1974

2.2 สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของซีโอไลต์ (Cation Exchange Property)

ไอออนบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนของซีโอไลต์จะเกาะอยู่ที่โครงสร้างของรูปทรงสี่หน้า ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายด้วยสารละลายเข้มข้นของไอออนบวกตัวอื่นๆ ซีโอไลต์มีความจุสูง 3-4 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณอลูมินาในโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีก โดยค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวกนั้นบอกให้ทราบถึงจำนวนอลูมิเนียมที่แทนที่ซิลิกอนในโครงสร้างของรูปทรงสี่หน้า การแลกเปลี่ยนไอออนจะทำให้คุณสมบัติของซีโอไลต์เปลี่ยนไป จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงนำซีโอไลต์ A มาใช้ประโยชน์ในการกำจัดความกระด้างของน้ำ โดยมีกลไกดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5 แสดงกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ A

ที่มา: Breck, 1974

2.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์

จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมายดังนี้คือ

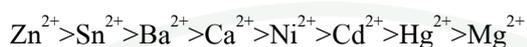
2.3.1 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation)

2.3.2 ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorption Agent) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด

2.3.3 สารลดความกระด้าง (Water Softner) ซีโอไลต์ใช้เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้ เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียม

2.3.4 ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) จากสมบัติการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์สามารถนำไปใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนของไดวาเลนต์ (divalent) ได้

สำหรับแคตไอออนที่เป็นไดวาเลนต์ (divalent) มีดังนี้



การแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับ

- 1) ธรรมชาติของแคตไอออน
- 2) อุณหภูมิที่ใช้
- 3) ความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย
- 4) ชนิดของแอนไอออนที่รวมกับแคตไอออนในสารละลาย
- 5) ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากจะเกิดได้ดีใน Aqueous Solution)

2.4 ตัวอย่างการนำซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ

2.4.1 การกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียชุมชน

โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อกำจัดแอมโมเนียโดยซีโอไลต์หลายชนิดที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ หลังจากการทดสอบโดยการใช้ในโรงงานต้นแบบพบว่า แอมโมเนียนั้นถูกกำจัดออกไปได้มากถึงร้อยละ 95

2.4.2 การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอก

หน้าที่หลักของฟอสเฟตที่ผสมลงในผงซักฟอก คือ การลดแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง การเลือกใช้ซีโอไลต์แทนฟอสเฟตนั้นซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ เป็นการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง โดยแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม เป็นการช่วยลดปริมาณฟอสเฟตให้อยู่ในระดับต่ำ

2.4.1 การเปลี่ยนเมธานอลไปเป็นน้ำมันเบนซิน โดยใช้ซีโอไลต์

โดยการใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท โมบิล ออยล์ ซึ่งได้ตั้งชื่อกระบวนการนี้ว่า MTG (Method To Gasoline) กระบวนการนี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึงร้อยละ 90 และมีค่าออกเทน 90.25

2.4.2 การแยก กำจัด และการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

ซีโอไลต์หลายตัวมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทำให้สามารถนำโลหะที่มีค่าเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ หรือเอาไว้ใช้กำจัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเพราะว่าเกิดการกักตุนในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ ซีโอไลต์ชนิด Clinoptililite และ Mordenite ถูกศึกษาเพื่อใช้กำจัดโลหะหนัก (โดยเฉพาะ แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี) ที่มีอยู่ในน้ำเสียโดยซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะจะทำการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะเพื่อดึงเอาโลหะออกจากน้ำเสีย

3. การขึ้นรูปด้วยวิธีแกรนูลเปียก (Forming by Wet Granulation)

ไชยวัฒน์(2548) กล่าวว่า การทำแกรนูลเปียก (Forming by Wet Granulation) เป็นกระบวนการที่ควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพหลายๆ อย่างของเม็ดซีโอไลต์ โดยมีวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

3.1 วัตถุประสงค์ของการทำแกรนูล

3.1.1 เพื่อผสมส่วนประกอบและสารช่วยต่างๆ เข้าด้วยกันให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสม

3.1.2 เพื่อให้ส่วนผสมก่อนทำการอัดเม็ดมีรูปแบบทางกายภาพที่เหมาะสม ได้แก่ มีสมบัติในการไหลที่ดีเพื่อทำให้ได้เม็ดซีโอไลต์ที่มีน้ำหนักคงที่ มีสมบัติที่สามารถยึดเกาะติดกันภายใต้แรงอัดได้ มีสมบัติในการหล่อลื่นที่ดีเพื่อช่วยให้เม็ดซีโอไลต์ถูกดันออกจากเบ้าได้ง่าย

3.2 การผลิตเมล็ดชีโலைต์โดยวิธีการทำแกรนูลเปียก

ส่วนใหญ่แล้วผงชีโலைต์จะไม่สามารถนำมาดอกโดยตรงให้เป็นเม็ดได้ ต้องอาศัยสารช่วยต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติในการไหลและการยึดเกาะกันของผงเหล่านั้นไม่ดีพอจึงต้องมีการพัฒนาแกรนูล เพื่อให้ส่วนผสมก่อนการอัดเม็ดมีสมบัติพื้นฐานดังนี้

- 3.2.1 มีการไหลที่เหมาะสมจากถังเก็บไปยังเข้าดอก
- 3.2.2 ยึดเกาะกันได้ดีภายใต้แรงอัด เกิดเป็นเม็ดชีโலைต์ที่มีความแข็งแรงเหมาะสม
- 3.2.3 มีสมบัติในการหล่อลื่นเพื่อป้องกันไม่ให้อัดแน่นติดเข้าและสากได้
- 3.2.4 มีการกระจายของส่วนประกอบในแต่ละเม็ดตามขนาดที่กำหนด
- 3.2.5 จะต้องใช้ได้กับเครื่องมือที่มีอัตราการผลิตสูง

3.3 การทำแกรนูลเปียก

การทำแกรนูลเปียก หมายถึงการทำแกรนูลโดยมีการเติมของเหลว เช่นน้ำ หรือสารละลายยึดเกาะลงในส่วนผสมเพื่อให้ได้ก้อนเปียก ซึ่งสามารถนำไปทำให้แห้งแล้วทำเป็นรูปแกรนูลต่อไป

3.4 ขั้นตอนการผลิตเมล็ดชีโலைต์โดยวิธีการทำแกรนูลเปียก

3.4.1 การผสมแห้ง

ผงชีโலைต์ที่นำมาผสมจะต้องมีการลดขนาดอนุภาคให้เท่าๆกัน ก่อนที่จะนำมาผสมกัน วัตถุประสงค์ของการผสมแห้งคือ ให้ได้ส่วนผสมที่มีการกระจายตัวของส่วนผสมต่างๆอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้ขนาดที่เท่ากันของแต่ละเม็ดที่ผลิต

3.4.2 การผสมเปียก

เติมน้ำ ตัวทำละลาย หรือสารละลายยึดเกาะอย่างช้าๆ เป็นช่วงๆ ลงในส่วนผสมแห้ง โดยมีการผสมอย่างสม่ำเสมอ และกำหนดระยะเวลาในการผสมอย่างเพียงพอก่อนที่จะมีการเติมครั้งต่อไป เพื่อให้มีการกระจายตัวของของเหลวอย่างทั่วถึงที่สุด โดยเฉพาะในระยะเวลาสุดท้ายก่อน

ถึงจุดสุดท้าย และต้องจดบันทึกปริมาณของของเหลวที่ใช้ไว้ด้วย เพื่อเป็นมาตรฐานในการทำครั้งต่อไป

3.4.3 การเร่งเป็ยก

สารผสมที่ผ่านการผสมเป็ยกมาแล้วจะถูกนำมาลดขนาดลงเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น จะได้สะดวกในการทำในขั้นต่อไป ถ้าผสมเป็ยกมาก การผลิตขั้นตอนนี้จะมีปัญหา

3.4.4 การทำให้แห้ง

เป็นการกำจัดเอาน้ำหรือตัวทำละลายออกจากแกรนูลที่เป็ยกโดยใช้ตู้อบแบบต่างๆ อุณหภูมิและอัตราของการทำให้แห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความคงตัว

3.4.5 การเร่งแห้ง

แกรนูลขนาดใหญ่ที่ผ่านการทำให้แห้งแล้วจะถูกนำมาลดขนาดอีกครั้ง เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่เหมาะสม โดยการบดหรือการเร่ง ปริมาณของผงละเอียดที่เกิดขึ้นจากการเร่งแห้งควรมีไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งการมีผงละเอียดนี้จะมีข้อดีที่ช่วยทำให้การไหลของผงซีโอไลต์ลงเข้าได้สม่ำเสมอ

3.4.6 การผสมแห้งขั้นสุดท้าย

จะมีการเติมสารช่วยชนิดต่างๆ ในขั้นตอนนี้คือสารช่วยหล่อลื่น สารช่วยในการไหลลงไปผสมกับแกรนูลแห้งที่ผ่านการเร่งแล้ว ก่อนที่จะนำไปตอกเป็นเม็ด

3.5 ข้อดีของการผลิตเม็ดซีโอไลต์โดยการทำแกรนูลเป็ยก

- 3.5.1 ไม่มีข้อจำกัดของลักษณะทางกายภาพของส่วนผสมหรือสารช่วยต่าง ๆ
- 3.5.2 สามารถใช้ได้กับผงชนิดต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง
- 3.5.3 ใช้ได้ดีกับผงละเอียด
- 3.5.4 ควบคุมให้ส่วนผสมปริมาณน้อยกระจายตัวในส่วนผสมรวมอย่างทั่วถึง

3.6 ข้อเสียของการผลิตเม็ดซีเมนต์โดยการทำแกรนูลเปียก

- 3.6.1 มีขั้นตอนในการผลิตมาก
- 3.6.2 มีกระบวนการผลิตที่ใช้เวลานาน โดยเฉพาะการทำแห้ง
- 3.6.3 มีการสูญเสียของสารในระหว่างกระบวนการผลิตมาก
- 3.6.4 มีโอกาสของการปนเปื้อนมาก

4. โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 4 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอท เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีลักษณะมัน วาว สะท้อนแสง เหนียว และนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition Metals โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ และสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกว่าโลหะอิสระได้หลายรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งเป็นพิษหากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม สามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ ประกอบกับความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อสะสมในร่างกายมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิตได้ U.S.EPA จึงได้กำหนดโลหะหนักที่มีต้องกำจัดออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง 13 ชนิด ได้แก่ แบริลเลียม แคลเซียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนี เซเลเนียม เทลลูเรียม และปรอท และเมื่อทำการตรวจสอบน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะพบว่ามีการปนเปื้อนของแคลเซียม โครเมียม นิกเกิล สังกะสี และทองแดง ในปริมาณที่สูง จึงจำเป็นต้องทำการกำจัดออกจากน้ำเสีย ของเสียรวมถึงกากตะกอนก่อนทิ้ง เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม

4.1 สังกะสี (Zinc, Zn) (วัตนชัย, 2546)

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สังกะสีเป็นโลหะที่แข็งสีขาวเงิน อมฟ้า น้ำหนักอะตอม 65.38 เลขอะตอม 30 จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.133 กรัม ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชันสามัญ +2 สังกะสีเป็นโลหะที่มีความสำคัญเป็น

ลำดับ 4 รองจากเหล็กกล้า อะลูมิเนียม และทองแดง เนื่องจากสังกะสีมีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียวคือ +2 และขาดคุณสมบัติทั่วไปของธาตุทรานซิชัน จึงไม่จัดโลหะสังกะสีอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน แต่เรียกว่าเป็นธาตุหลังทรานซิชัน (Post Transition Element) ละลายได้ดีในกรดแก่ และด่างแก่ เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก คือไฮดรอกไซด์ของโลหะประเภทนี้ หากละลายในกรดจะเกิดแคทไอออน Zn^{2+} หากละลายในเบสจะทำให้เกิด $Zn(OH)_2$ จะละลายน้ำได้น้อยลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น จนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้การละลายน้ำมีค่าต่ำสุด และเมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงขึ้นกว่าจุดต่ำสุดนี้แล้ว โลหะแอมโฟเทอริกจะละลายน้ำได้มากขึ้น

ความเป็นพิษของสังกะสี

สังกะสีเป็นกลุ่มโลหะหนักที่มีแนวโน้มจะเป็นพิษ ปกติสังกะสีจะมีประโยชน์ต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งมีชีวิต แต่หากได้รับมากเกินไปจะทำให้เกิดอันตราย สังกะสีสามารถที่จะรวมตัวกับสารประกอบอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex-Compound) เมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) เข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดยผ่านทางโซ่อาหาร รวมทั้งการสัมผัสกับโลหะโดยตรงจากการประกอบกิจกรรมในการดำรงชีวิตประจำวัน ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีปริมาณวันละ 2 กรัมขึ้นไป (ประมาณ 133 เท่าของขนาดปกติ) ทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหารแบบเฉียบพลัน ทำให้ปวดท้อง และอาเจียน

4.2 แคดเมียม (Cadmium, Cd)

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดโค้งได้ง่ายและทนต่อการกัดกร่อน ซึ่งมีน้ำหนักอะตอม 112.40 มีความถ่วงจำเพาะ 8.65 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก และละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกอย่างช้าๆ แต่สารประกอบแคดเมียมบางตัวสามารถละลายน้ำได้ เช่นแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) แคดเมียมไนเตรท ($CdNO_3$) แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และแคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ โดยเฉพาะเมื่อรวมกับไซยาไนด์และเอมีน

แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และสินค้าอุปโภคบริโภคดังนี้

4.2.1 ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมอัลลอยด์ (alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน เช่น

1) อัลลอยด์ของทองแดงที่มีแคดเมียมร้อยละ 1 (cadmium bronze) ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลขและโทรศัพท์

2) อัลลอยด์ของทองแดงและตะกั่ว ซึ่งมีแคดเมียมผสมอยู่ร้อยละ 20 ใช้ในการผลิตแบบพิมพ์ (Printing Plates)

3) อัลลอยด์ของทองแดง แคดเมียม และเซอร์โคเนียม ใช้ในอุปกรณ์การสื่อสารต่างๆ ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ทั้งนี้เพราะโลหะผสมประเภทนี้จะมีความแข็งและมีแรงดึงได้สูงกว่าโลหะผสมของทองแดงกับแคดเมียม

4.2.2 ใช้ในการชุบโลหะ โดยใช้แคดเมียมเคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โดยการชุบด้วยไฟฟ้า โลหะที่ได้จากการชุบนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วิทยุ เป็นต้น

4.2.3 ใช้เป็นเม็ดสีในอุตสาหกรรม สารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลโฟไซด์ใช้ในการให้สีในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สีอีนามัล เซรามิก ยาง แก้ว ผ้า เส้นใย หนัง หมึกพิมพ์ และพลาสติก

4.2.4 ใช้ผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ร่วมกับโลหะนิกเกิลเป็น Cd – Ni battery ซึ่งนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข แฟลชถ่ายรูป เครื่องโกนหนวด นาฬิกา และวิทยุเล็กๆ เป็นต้น

ความเป็นพิษของแคดเมียม

โดยทั่วไปมนุษย์จะได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากอาหารที่บริโภคเข้าไปเป็นหลัก โดยอาจติดปะปนมากับพืชผัก ผลไม้ หรือผลิตภัณฑ์จากสัตว์ที่นำมาปรุงเป็นอาหาร แคดเมียมอาจละลายอยู่ในน้ำที่ดื่มและได้รับจากอากาศโดยการหายใจเอาอากาศที่มีฝุ่นแคดเมียมฟุ้งกระจายอยู่

โดยเฉพาะในแหล่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้แคดเมียมเป็นวัตถุดิบ เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่ หรือ บริเวณที่เป็นเหมืองทำแร่ สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ที่มักมีแคดเมียมปนอยู่ด้วย การสัมผัสกับสิ่งของที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบและการอยู่ในแหล่งที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในอากาศนานๆ จะทำให้แคดเมียมซึมผ่านผิวหนังเข้าสู่ร่างกายเราได้อีกด้วย สำหรับผู้ที่สูบบุหรี่จัดจะทำให้ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายเพิ่มขึ้น ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในร่างกายครั้งหนึ่งจะไปสะสมอยู่ที่ตับและไต ทำให้เกิดพิษสะสมได้ในคน การจับแคดเมียมที่ร่างกายดูดซึมเข้าไปแล้วออกจากร่างกายเป็นไปค่อนข้างช้ามาก เพราะวงจรครึ่งชีวิตของแคดเมียมในคนค่อนข้างยาว 16-33 ปี

4.3 ทองแดง (Copper, Cu)

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ทองแดงเป็นโลหะสีน้ำตาลแดงค่อนข้างอ่อนสามารถตีแผ่เป็นแผ่นบางๆ หรือดึงเป็นเส้นได้ นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีรองจากทองคำและเงิน จุดหลอมเหลว 1,084 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2562 องศาเซลเซียส สามารถพบได้ทั้งในรูปอิสระ และในรูปสารประกอบ ซึ่งสามารถถลุงออกมาเป็นโลหะได้ง่าย การถลุงทองแดงปัจจุบันจะนำสินแร่ทองแดงเช่น แร่ชาลโคไซต์ (Chalcocite, Cu_2S) แร่ชาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite, CuFeS_2) เป็นต้น เมื่อเผาในอากาศจะได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 97-99 จากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อให้ได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99 ทองแดงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และสินค้าอุปโภคดังนี้

4.3.1 การนำมาใช้ทำลวดส่งกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับสองรองจากเงิน แต่ราคาถูกกว่าเงินมาก การที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้ดี ช่วยลดพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อน ขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายไฟ และยังช่วยป้องกันอันตรายจากการไหม้ของสายไฟอีกด้วย

4.3.2 ทองแดงยังเป็นส่วนผสมสำคัญของโลหะผสมหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (ทองแดงผสมกับสังกะสี) สำริด (ทองแดงผสมกับดีบุก) โมเนล (ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และแมงกานีส) รวมทั้งยังใช้ผสมในเงินและทอง เพื่อเพิ่มความแข็งของโลหะมีค่าเหล่านั้น สำหรับใช้ทำเครื่องประดับและเหรียญตราต่างๆ

ความเป็นพิษของทองแดง

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับ และสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ร้อยละ 30 โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับสมองการสะสมจะมากที่ตับและสมอง เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ ภาวะบกพร่องภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสันเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูก น้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก

4.4 โครเมียม(Chromium, Cr)

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

โครเมียมเป็นโลหะสีขาวยเงินเป็นมันวาว และแข็งมาก ในธรรมชาติไม่พบธาตุโครเมียมในรูปธาตุอิสระแต่จะพบในรูปของแร่ต่างๆ ที่พบมากที่สุดคือ แร่โครไลต์ ($\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$) สารประกอบหรือไอออนต่าง ๆ ของธาตุโครเมียมมีสี่ เช่น K_2CrO_4 หรือ CrO_4^{2-} มีสีเหลือง $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ หรือ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ มีสีส้ม $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ มีสีม่วงแดง โครเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และสินค้าอุปโภคดังนี้

4.4.1 ใช้เป็นส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ประกอบด้วยเหล็กร้อยละ 73 โครเมียมร้อยละ 18 นิกเกิลร้อยละ 8 และคาร์บอนร้อยละ 0.4

4.4.2 ใช้ทำเครื่องมือผ่าตัด ตัวเรือนนาฬิกา ซ้อน และภาชนะต่างๆ ใช้เคลือบบนผิวเหล็กเพื่อความสวยงามและป้องกันการผุกร่อนของเหล็ก

4.4.3 ใช้เป็นส่วนประกอบในเหล็กกล้าที่ใช้ทำตู้নিরภัยเครื่องยนต์ เกราะกันกระสุน

4.4.4 ใช้ทำโลหะเจือโคบอลต์ซึ่งใช้ทำกระดูกเทียม Cr_2O_3 เป็นของแข็งสีเขียวแก่ใช้ทำสีเพื่อเขียนลวดลายเครื่องเคลือบดินเผา $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

4.4.5 ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง

4.4.6 สารละลายผสมของ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ กับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นใช้ทำความสะอาดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการเคมี

ความเป็นพิษของโครเมียม

โครเมียมนั้นความเป็นพิษขึ้นกับ Species หรือ Valency โดย Chromium (III) จะมีการละลายน้ำได้น้อยมากมักจะตกตะกอนในแหล่งน้ำและมีพิษน้อยกว่า Chromium (VI) ซึ่งละลายน้ำได้ดีกว่าพิษของโครเมียมที่สำคัญคือก่อมะเร็งได้หลายจุดโดยเฉพาะมะเร็งปอดซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อสูดฝุ่นของโครเมียมเข้าไปโดยตรง พิษเฉพาะที่อย่างหนึ่งคือเกิดเป็นแผลลึกบริเวณที่สัมผัสโครเมียม โดยเฉพาะที่มือ เข่า และขา

4.5 นิกเกิล (Nickel, Ni)

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 28 อยู่ในตารางธาตุหมู่ 28 นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมันวาวสีขาวยเงิน มันอยู่กลุ่มเดียวกับเหล็กมีความแข็งแต่ตีเป็นแผ่นได้ ในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันเกิดเป็นแร่มิลเลอร์ไรต์ (millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหนู (arsenic) จะเกิดเป็นแร่ นิกกอลไลท์ (niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารหนูและกำมะถันจะเป็นก้อนนิกเกิลกลาน (nickel glance)

นิกเกิลถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และสินค้าอุปโภคดังนี้

4.5.1 สแตนเลสสตีล และอัลลอยด์กันสนิมชนิดต่างๆ กว่าร้อยละ 65 ของการใช้นิกเกิลในโลกตะวันตกนั้นเป็นการใช้ทำสแตนเลสสตีลร้อยละ 12 ใช้ในการทำซูเปอร์อัลลอยด์ และอีกร้อยละ 23 เป็นการใช้ทำโลหะอัลลอยด์ และใช้ประโยชน์อื่น

4.5.2 ทำเกราะ และ burglar-proof vaults

4.5.3 เป็นส่วนผสมของโลหะ Alnico เพื่อใช้ในการทำแม่เหล็ก

4.5.4 Monel metal ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล มีคุณสมบัติป้องกันการผุกร่อนได้ดีเยี่ยม นำไปใช้ในการผลิตใบพัดเรือ เครื่องจักร และท่อในอุตสาหกรรมเคมี

4.5.5 ผลิต shape memory alloys ซึ่งใช้ในการหุ่นยนต์บางชนิด

4.5.6 ถ่านชาร์จ เช่นถ่านนิกเกิลเมทัลไฮไดรยด์ (nickel metal hydride) และถ่านแบบนิกเกิลแคดเมียม (nickel cadmium)

4.5.7 เคลือบโลหะ (electroplating) เพื่อป้องกันสนิม

ความเป็นพิษของนิกเกิล

นิกเกิลสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยทางการหายใจและทางปาก เมื่อนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ มักพบนิกเกิลสะสมอยู่ที่ปอดมากที่สุด และกระจายไปสะสมที่กระดูก ต่อมธัยรอยด์ ต่อมหมวกไต ไต หัวใจ ตับ ม้าม และตับอ่อน รวมทั้งสามารถผ่านรกจากมารดาไปยังทารกในครรภ์ได้ ส่วนกรณีที่ได้รับนิกเกิลทางการกิน ประมาณร้อยละ 1-5 ของนิกเกิลถูกดูดซึมผ่านลำไส้เข้าสู่กระแสเลือดแล้วจับกับอัลบูมินในพลาสมาเป็น nickel plasmin นิกเกิลมีค่าครึ่งชีวิตในซีรัม 11 ชั่วโมงหลังจากกินเข้าไป และ 20 – 30 ชั่วโมงภายหลังจากการหายใจเข้าไป ส่วนใหญ่นิกเกิลถูกกำจัดออกจากร่างกายทางปัสสาวะภายใน 17 – 30 ชั่วโมง นิกเกิลบางส่วนถูกขับออกจากร่างกายทางน้ำย่อยจากตับอ่อน น้ำดี และเหงื่อ

5. วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณโลหะหนัก ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมออกจากน้ำเสีย โดยวิธีการกำจัดสามารถทำได้หลายวิธี สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีทางเคมีและวิธีทางฟิสิกส์

5.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี (สันทัด, 2549)

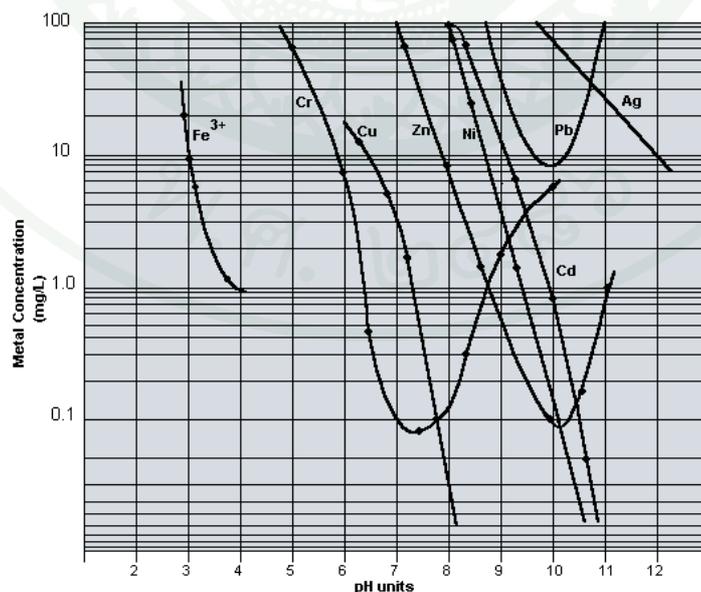
เป็นวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในน้ำเสียโดยเติมสารเคมีลงไป มักใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดโดยวิธีอื่นได้ เช่น

5.1.1 การปรับสภาพกรด-ด่าง (pH Adjustment)

เป็นการปรับสภาพกรด-ด่างของน้ำเสียให้ได้มาตรฐาน (ค่าความเป็นกรด-ด่างของมาตรฐานน้ำทิ้ง ไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0) (สันทัด, 2549) หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนในการบำบัดต่อไป หลักการทั่วไปถ้าน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นกรดก็จะปรับสารเคมีประเภทด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (Lime, CaOH_2) เป็นต้น ถ้าน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นด่างก็จะปรับด้วยสารเคมีประเภทกรด เช่น กรดเกลือ (HCl) กรดกำมะถัน (H_2SO_4) เป็นต้น

5.1.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นกระบวนการเติมสารเคมีลงในน้ำเสียเพื่อให้สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำและตกตะกอนได้ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ ดังภาพที่ 6 กระบวนการตกตะกอนทางเคมีแบ่งเป็นวิธีต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 6 แสดงความสามารถในการตกตะกอนของโลหะในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่างๆ

1) Hydroxide precipitation

คือการทำให้สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำอยู่ซึ่งจะอยู่ในสภาวะอนุภาคบวก ตกตะกอนออกมาในรูปของเกลือไฮดรอกไซด์ โดยวิธีการง่ายๆ คือการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียให้สูงขึ้นโดยให้เป็นด่างสูง (คือมีความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7) สารเคมีที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาว ดังสมการเคมีดังนี้

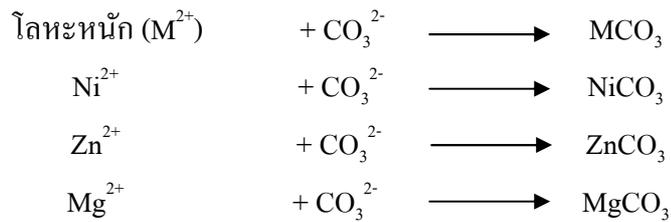


ส่วนใหญ่แล้วกระบวนการ Hydroxide precipitation มักนิยมใช้กับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในรูปของไอออนหรือประจุ แต่สิ่งที่ควรพิจารณาเพิ่มเติม คือ สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียมักจะประกอบด้วยสิ่งสกปรกหลายชนิด และในแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะสมบัติในการตกตะกอนที่สภาพความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันออกไป ในกรณีของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากโรงงานชุบโลหะมักจะประกอบด้วยสังกะสี โครเมียม ตะกั่ว เป็นต้น ดังนั้น อาจจะต้องมีการตกตะกอนโลหะหนักเหล่านั้นออกมาที่สภาพความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียเป็น 8.5 ในช่วงแรกเพื่อให้สังกะสี และโครเมียมตกตะกอนมาอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ก่อน แล้วจึงค่อยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียเป็น 10 เพื่อให้ทองแดงและโครเมียมตกตะกอนลงมาเป็นขั้นที่ 2 เป็นต้น

2) Carbonate precipitation

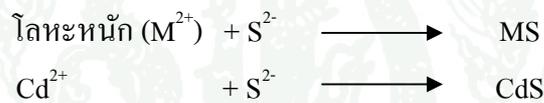
เป็นการตกตะกอนอนุภาคบวก หรืออนุภาลบวก (Cation) หรือโลหะหนัก ออกจากน้ำเสียในรูปของคาร์บอเนต ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไอออนของโลหะ โดยโลหะคาร์บอเนตเกือบทุกตัวจะมีค่าการละลายน้ำต่ำ อย่างไรก็ตามการตกตะกอนโลหะในรูปของคาร์บอเนตจำเป็นต้องปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมด้วยเพื่อที่จะได้เกิดการตกตะกอนที่สมบูรณ์ ซึ่งสภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของการตกตะกอนโลหะมักจะอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างสูงๆ

ข้อดีของการตกตะกอนในรูปของคาร์บอเนตเมื่อเทียบกับการตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์ พบว่าจะมีประสิทธิภาพของการตกตะกอนในรูปของคาร์บอเนตสูงกว่าการตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์ และขนาดของตะกอนในรูปของคาร์บอเนตก็จะใหญ่กว่าด้วย



3) Sulfide precipitation

การตกตะกอนด้วยอนุมูลซัลไฟด์เป็นการตกตะกอนโลหะหนักในรูปของเกลือซัลไฟด์ โดยสมการเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนได้แก่ Na_2S , H_2S หรือ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ซึ่งมักนิยมใช้ตกตะกอนโลหะหนักพวก อาร์เซนิก แคดเมียม เหล็ก อะลูมิเนียม และปรอท เป็นต้น โลหะหนักซัลไฟด์ดังกล่าวจะมีค่าการละลายต่ำมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนโลหะดังกล่าวด้วยซัลไฟด์ไอออนมีค่าสูง แต่โลหะซัลไฟด์ที่ตกตะกอนออกมาจากน้ำเสียจะมีสีดำและมักจะมึนกลื่นเหนียว จึงเป็นข้อเสียในการบำบัดน้ำเสียตามวิธีนี้



4) Sulfate precipitation

การตกตะกอนด้วยอนุมูลซัลเฟตเป็นการตกตะกอนอนุภาคบวก หรือ โลหะหนัก (Cation) ออกจากน้ำเสียในรูปของโลหะซัลเฟต ตัวอย่างเช่น การตกตะกอนแบเรียมออกจากน้ำเสียในรูปของแบเรียมซัลเฟตหรือเกลือซัลเฟต เป็นต้น ดังสมการ



5.1.3 การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Chemical Oxidation)

เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม โดยการใช้สารออกซิแดนท์ (Oxidant) ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำเสีย สารออกซิแดนท์มีหลายชนิด เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด่างทับทิม และคลอรีน เป็นต้น

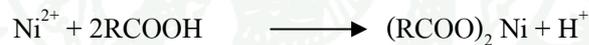
5.1.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

การบำบัดน้ำเสียโดยการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนต่างๆ ในน้ำเสียดกับไอออนของเรซิน ซึ่งจะส่งผลให้ไอออนของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสียถูกดูดซับลงบนผิวของเรซิน เพราะไอออนแต่ละชนิดจะถูกดูดซับหรือจับบนผิวของเรซินได้ไม่เท่ากันจึงทำให้ต้องมีการศึกษาถึงชนิดและสมบัติของเรซิน รวมทั้งการทดสอบประสิทธิภาพของเรซินในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียชนิดต่างๆ ในสถานะที่แตกต่างกัน

ประเภทของเรซินการแบ่งประเภทของเรซินสามารถแบ่งตามคุณสมบัติของเรซินในการจับหรือดูดซับสิ่งสกปรก ดังนั้น เรซินที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

1) Weak acid cation resin

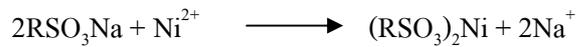
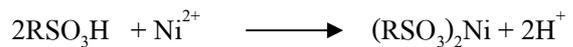
เป็นเรซินที่สามารถจับไอออนบวก โดยเรซินมีอนุมูล Carboxyl ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนเป็นดังนี้



สถานะควบคุมที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7 เพื่อให้ปฏิกริยาไปทางขวา หากค่าความเป็นกรด-ด่างของปฏิกริยาค่าลงหรือมีสภาพเป็นกรด ปฏิกริยาจะย้อนกลับ กล่าวคือ โลหะหนักที่เกาะติดกับเรซินจะหลุดออกจากเรซิน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเป็นการฟื้นฟูสภาพเรซินได้ ดังนั้นการนำเรซินที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่จะต้องนำไปล้างด้วยกรดหรือเกลือของกรดนั้นๆ เช่น ไฮโดรคลอริก ซัลฟูริก โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

2) Strong acid cation resin

เป็นเรซินที่สามารถจับไอออนบวก เรซินประเภทนี้มีอนุมูล Sulfonic (SO_3H) สามารถแตกตัวได้ดีกว่า Weak acid cation resin จึงสามารถทำงานได้ที่ช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างกว้างกว่าชนิด Weak acid cation resin ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนเป็นดังนี้



การใช้เรซินประเภทนี้จะควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7 และการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่จะต้องล้างด้วยกรดหรือเกลือแกง ดังสมการ



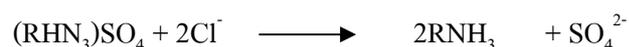
โดยปริมาณกรดหรือเกลือแกงที่ใช้จะสูงกว่า Weak acid cation resin

3) Weak base anion resin

เป็นเรซินที่มีอนุมูลของ Secondary anion หรือ Tertiary anion สามารถจับไอออนลบที่สามารถเกิดเป็นอนินทรีย์ที่รุนแรง (Strong mineral acid) ได้แก่ ซัลเฟต ไอออน และ คลอไรด์ เป็นต้น แต่ไม่สามารถเป็นกรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ ซิลิกอนออกไซด์ เป็นต้น ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนเป็นดังนี้

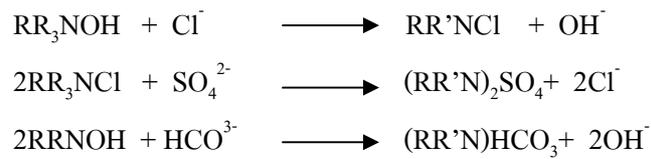


การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างควรควบคุมให้ต่ำกว่า 7 และการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่จะต้องล้างด้วยด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเกลือแกง ดังสมการ



4) Strong base anion resin

เป็นเรซินที่มีอนุมูลของ Quaternary anion สามารถจับไอออนลบทุกชนิดทั้งที่มาจากกรดแก่หรือกรดอ่อน ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนเป็นดังนี้



การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างควรควบคุมให้ต่ำกว่า 7 และการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่จะต้องล้างด้วยด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเกลือแอง แต่ต้องให้ได้ปริมาณมากกว่าปริมาณของ Weak base anion resin

นอกจากเรซินชนิดต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนี้สามารถใช้ในการดูดซับสิ่งสกปรกในน้ำเสีย การแลกเปลี่ยนไอออนยังมีซีโอไลต์ที่มีการนิยมนำมาใช้ในการดูดซับไอออน โดยเฉพาะไอออนโลหะหนักในน้ำหรือน้ำเสีย ตลอดจนในวัตถุประสงค์ต่างๆ มากมายได้เช่นกัน โดยซีโอไลต์จะมีอนุภาคโมเลกุลคือ Sodium aluminosilicates ที่จะทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนักหรืออนุภาคต่างๆ ไว้ได้ การถูกจับไอออนบวกของซีโอไลต์เป็นดังนี้



นอกจากนี้ ประโยชน์หรือข้อดีของซีโอไลต์ที่นำมาใช้ในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียหรืออื่นๆ ก็คือไอไลต์ที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่หลังจากมีการปรับสภาพ เช่นการนำไปปรับสภาพในสารละลายเกลือแอง ดังสมการ



อย่างไรก็ตามซีโอไลต์มักจะไม่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากปริมาณที่ใช้จะต้องใช้ในปริมาณสูง รวมทั้งผลข้างเคียงที่อาจจะเกิดขึ้น เช่น ความขุ่นจากตัวซีโอไลต์ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นและสะสมในระบบบำบัด แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขด้วยการนำซีโอไลต์ผงมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปเม็ด

5.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางฟิสิกส์

5.2.1 การกรอง (Filtration)

การกรองน้ำอาศัยหลักการอัดน้ำเสียที่มีความดันสูงผ่านวัสดุกรอง ของแข็งที่ไม่สามารถเล็ดลอดช่องกรองได้ จะถูกดักไว้ การกรองมีหลายแบบ เช่น การกรองที่มีช่องกรองละเอียด (Microfiltration) การกรองที่มีช่องกรองละเอียดมาก (Ultrafiltration)

5.2.2 การทำให้แห้ง (Drying)

การทำให้น้ำเสียแห้งนี้อาจใช้แสงแดด หรือให้ความร้อนโดยตรง เพื่อระเหยน้ำออกไปจะได้ของแข็งเหลืออยู่ เช่น การตากตะกอนให้แห้งโดยใช้แสงแดด เป็นต้น

5.2.3 การกลั่น (Distillation)

เป็นการแยกสารที่มีจุดเดือดไม่เท่ากันของสารที่รวมกันอยู่

5.2.4 การดูดซับหรือการดูดติด (Adsorption)

เป็นปรากฏการณ์โมเลกุลของไหล หรือคอลลอยด์ (Adsorbate) เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของแข็งโดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของไหลนั้น โดยสารดูดซับ (Adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และยังสารดูดซับหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) เบนโทไนท์ (Bentonite) และดินเหนียวกัมมันต์ (Activated Clay) แต่มักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์มากกว่าสารดูดซับอื่นๆ เพราะกำจัดกลิ่น สี และโลหะหนักในน้ำได้ดี

5.2.5 การหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

โดยอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง น้ำเสียจะถูกเหวี่ยงโดยหมุนด้วยความเร็วสูงของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะสูง จะถูกเหวี่ยงออกไปรอบนอก วิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง

5.2.6 การแยกตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

หลักการโดยใช้สารสกัด (Extractant) ซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายสารที่อยู่ในน้ำเสียได้ จากนั้นจึงแยกสารสกัดที่มีสารถูกสกัดละลายอยู่ออกไป เช่น โดยวิธีกลั่น เป็นต้น วิธีนี้อาจได้สารละลายอยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

6. การดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption)

การดูดซับเป็นขบวนการที่โมเลกุลของสารที่เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งอยู่ในตัวกลางใดไปเกาะบนผิวของสารอีกชนิดซึ่งถูกนำไปอยู่ในตัวกลางนั้น เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent)

6.1 ชนิดของตัวดูดซับ การดูดซับมี 2 ชนิดคือ

6.1.1 Physical Adsorption เป็นการดูดซับที่สารถูกดูดซับเกาะที่ผิวของตัวดูดซับด้วยแรงวันเดอวาล์ ใช้พลังงานในการดูดซับน้อย

6.1.2 Chemical Adsorption เป็นการดูดซับทางเคมีที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวตัวดูดซับ โดยสร้างพันธะเคมีทำให้เกิดสารประกอบใหม่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พลังงานที่ทำให้เกิดการดูดซับทางเคมีมีค่าสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ คือมีประมาณ -200 กิโลจูลต่อโมล

6.2 องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับสารดูดซับ

6.2.1 พื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่ง ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เพราะถ้าขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง

6.2.2 ขนาดของวัตถุในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเล็กลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ

6.2.3 สารดูดซับต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการจับ

6.2.4 ความจุของสารดูดซับควรมีค่าสูงกว่าปริมาณสารที่ต้องการจับ หลังจากดูดซับเต็มแล้วสารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้บางส่วนจนอิ่มตัวและไม่ดูดซับอีก

6.3 ประจุบนผิวแร่และการดูดติดไอออนของแร่ (Surface Charge and Ion Adsorption)

แหล่งกำเนิดประจุบนผิวแร่ (Surface Charge)

แหล่งกำเนิดประจุบนผิวแร่สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะของวิธีการเกิดคือ ประจุถาวร (Permanent Charge) และประจุผันแปร (Variable Charge)

ก. ประจุถาวร (Permanent Charge)

ประจุถาวรของแร่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากไอออนในโครงสร้างของแร่ถูกแทนที่โดยไอออนอีกชนิดหนึ่ง (Ionic Substitution) ซึ่งมีประจุต่างกัน การแทนที่นี้มักเกิดได้ง่ายระหว่างไอออนที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (Isomorphic Substitution) ถ้าไอออนที่เข้าไปแทนมีประจุน้อยกว่า ก็จะทำให้โครงสร้างของแร่มีประจุบวกลดลงหรือมีผลลัพท์ของประจุลบเพิ่มขึ้น เช่นการที่ Si^{4+} ในโครงสร้างเตตระอีดรอลถูกแทนที่ด้วย Al^{3+} ในซีโอไลต์ เป็นต้น

ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยวิธีการดังกล่าว มักกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอในโครงสร้างหรือบนพื้นผิวของแร่ และเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะมีสภาพค่อนข้างคงตัวหรือถาวรโดยไม่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมหรือสารละลายตัวกลาง

ข. ประจุผันแปร (Variable Charge)

ประจุผันแปรเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคของแข็งหรือแร่ที่สัมผัสกับสารละลาย (Solid-Liquid Interface) โดยเป็นผลสืบเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันนัลที่พื้นผิวของอนุภาคกับสารละลายดังกล่าว ดังนั้นประจุผันแปรจึงเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามองค์ประกอบของสารละลายตัวกลาง เช่นความเข้มข้นของ H^+ หรือ OH^- ชนิดและความเข้มข้นหรือความแรงของไอออน (Ionic Strength) ในสารละลาย

หมู่ฟังก์ชันนัลที่สำคัญบนผิวอนุภาคของแข็งหรือแร่ส่วนใหญ่ประกอบด้วย หมู่ซิลานอล (Silanol Group, Si-OH) อะลูมินอล (Aluminol, Al-OH) และเฟอร์รอล (Ferrol, Fe-OH) เป็นที่น่าสังเกตว่า ถึงแม้องค์ประกอบของแร่จะเป็นสารประเภทออกไซด์ก็ตาม แต่เมื่ออยู่ในสภาพแขวนลอยหรือสัมผัสกับน้ำ ผิวออกไซด์ที่สัมผัสกับตัวกลางดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับ H^+ , OH^- หรือโมเลกุลของน้ำเป็นอนุมูล $-OH$ จากหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น

เมื่อสารละลายมีปริมาณหรือความเข้มข้นของ H^+ เพิ่มขึ้น จะทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลที่ผิวของอนุภาครับโปรตอนมากขึ้น จึงทำให้มีประจุบวกเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม เมื่อสารละลายมี OH^- สูงขึ้น จะทำให้เกิดการแตกตัวหรือมีการปลดปล่อย H^+ จากอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น ทำให้อนุภาคมีประจุลบเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเกิดประจุดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ H^+ และ OH^- ในสารละลายหรือขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง จึงเรียกประจุผันแปรชนิดนี้ว่า pH-Dependent Charge

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าแร่ทำหน้าที่เป็นได้ทั้งผู้รับและผู้ให้โปรตอน จึงมีคุณสมบัติเป็นแอมโฟเทอริกหรือแอมฟิโปรติก (Amphoteric or Amphiprotic) คือเป็นได้ทั้งกรดและเบสตามทฤษฎีของบรอนสเตดและเลวี (Bronsted and Lowry)

นอกจากการรับและปลดปล่อยโปรตอนจากอนุมูลไฮดรอกซิลแล้ว ประจุผันแปรยังสามารถเกิดจากการดูดติดผิวหรือแลกเปลี่ยนที่ของไอออนบนผิวอนุภาคกับไอออนอื่นๆในสารละลาย เช่น การดูดติดผิวของไอออนโลหะหนักกับอนุมูลไฮดรอกซิลบนผิวแร่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวกลางเริ่มสูงขึ้น เป็นต้น

6.4 การดูดติดไอออนบนผิวแร่ (Ion Adsorption)

นอกจากการรับและปลดปล่อยโปรตอนแล้ว แร่สามารถดูดติดไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม (Counterion) ในสารละลายไว้บนผิว ตำแหน่งของสารดูดซับที่ดูดติดสารถูกดูดซับที่สำคัญได้แก่ หมู่ฟังก์ชันัล -OH บนผิวแร่ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การดูดติดจะเหนียวแน่นเพียงไร ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและลักษณะของแรงคูยัคีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

6.4.1 การดูดติดที่จำเพาะและไม่จำเพาะเจาะจง (Specific and Non-Specific Adsorption)

การดูดติดที่ไม่จำเพาะเจาะจง (Non-Specific Adsorption) เป็นการดูดติดระหว่างสารดูดซับ และสารถูกดูดซับด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ซึ่งธรรมชาติของแรงคูยัคีเป็นแบบคูบอมม์ การดูดติดดังกล่าวมักเกิดกับไอออน (ตัวถูกดูดซับ) ที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบไว้โดยรอบ และสามารถแลกเปลี่ยนที่กับไอออนอื่นๆ ได้ง่าย (Readily Exchangeable) เช่น แคทไอออนของโลหะอัลคาไลน์ ในทางตรงกันข้าม การดูดติดแบบจำเพาะเจาะจง (Specific Adsorption) ไม่ได้เกิดจากแรงยัคีแบบคูบอมม์อย่างเดียว แต่จะเกิดแรงคูยัคีที่เหนียวแน่นมากขึ้นระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ที่สำคัญเช่นการเกิดพันธะโคเวเลนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์

วิธีการดูดติดไอออน (Modes of Ion Adsorption)

การดูดติดหรือแลกเปลี่ยนไอออนของหมู่ไฮดรอกซิล ที่ผิวของแร่ทำให้เกิดลักษณะของไอออนเชิงซ้อนที่ผิวอนุภาค วิธีการดูดติดดังกล่าวอาจแบ่งเป็น 3 แบบ ตามลักษณะโครงสร้างและธรรมชาติของแรงคูยัคี

ก. ไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นใน (Inner-Sphere Surface Complex)

การดูดติดไอออนบนผิวโดยวิธีนี้ เป็นการดูดติดในลักษณะที่ไม่มีโมเลกุลของน้ำขวางกั้นระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ การดูดติดดังกล่าวมักเป็นแบบจำเพาะเจาะจง

ข. ไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นนอก (Outer-Sphere Surface Complex)

ถ้ามีโมเลกุลของน้ำอย่างน้อยหนึ่งโมเลกุล กั้นขวางระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ การดูดติดดังกล่าวจะเป็นแบบ Outer-Sphere Surface Complex ดังนั้นไอออนที่ถูกดูดติด มักเป็นสารถูกดูดซับที่มีโมเลกุลของน้ำห้อมล้อมอยู่และดูดยึดบนผิวอนุภาคโดยหุ้มฟังก์ชันนอลด้วยพันธะไอออนนอก ซึ่งเป็นการดูดติดแบบไม่จำเพาะเจาะจงด้วยแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดติดในลักษณะของ Inner-Sphere Surface Complex โมเลกุลหรือไอออนที่ถูกดูดติดบนผิวอนุภาคทั้งหลายทั้งแบบ Inner และ Outer-Sphere Surface Complex ถือว่าอยู่ในลักษณะที่เคลื่อนย้ายได้ยากหรือไม่เคลื่อนที่ (Immobile) และมักรวมเรียกว่าอยู่ในชั้นของสเตรน

ค. ไอออนที่แพร่กระจาย (Diffuse ion)

ไอออนที่ถูกดูดติดบนผิวแร่ โดยวิธีนี้จะอยู่ในชั้นที่เรียกว่า ชั้นแพร่กระจาย ซึ่งปกติมักอยู่ห่างจากพื้นผิวมากกว่า Inner และ Outer Sphere Surface Complex ไอออนในชั้น Diffuse Layer มักมีโมเลกุลของน้ำห้อมล้อมอยู่ และถูกดูดยึดบนผิวอนุภาคไว้ด้วยแรงไฟฟ้าสถิตที่อ่อนที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดติด โดยสองวิธีแรก ไอออนที่แพร่กระจายนี้จะเสถียรน้อยและเคลื่อนที่ (Mobile) ตลอดเวลา แต่ยังคงอยู่ภายใต้อำนาจดึงดูดจากผิวแร่

ลักษณะและวิธีการดูดติดของไอออนทั้งสามแบบที่กล่าวมา ทำให้เกิดโครงแบบที่เรียกว่าประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electric Double Layer) ตามทฤษฎีของสเตรน โดยจากที่กล่าวมาทั้งหมดจึงพอสรุปได้ว่าตำแหน่งบนผิวแร่ที่แคทไอออนเกิดการแลกเปลี่ยน (Exchange Site) ดังนั้นได้แก่ ตำแหน่งที่แคทไอออนถูกดูดติดที่ผิวชั้นนอก (Outer-Sphere) และที่อยู่ในชั้นแพร่กระจาย (Diffuse Layer) เนื่องจากการแลกเปลี่ยนแคทไอออนเป็นกระบวนการที่เกิดบนผิวอยู่ระหว่างแคทไอออนที่ถูกดูดติดบนผิวแร่ซึ่งอยู่ในรูป Exchangeable Cation กับแคทไอออนในสารละลายรอบนอก อย่างไรก็ตามในความจริงแล้วการแลกเปลี่ยนมักมีบางส่วนมาจากแคทไอออนเชิงซ้อนที่ผิวใน (Inner-Sphere) ซึ่งยากที่จะแยกออกจากกันได้ชัดเจน

6.5 สมดุลของการดูดติด (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดของสารละลายบนผิวของสารดูดติดในขณะที่เกิดการดูดติดไปเรื่อยๆ นี้สารที่ถูกดูดติดก็มีแนวโน้มที่จะคายกลับมาสู่สารละลายเหมือนเดิมความเข้มข้นของสารละลายจะ

เปลี่ยนแปลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่จำนวนสารละลายที่ถูกดูดติด จะถูกคายออกมาจากการดูดติด ก็จะมีปริมาณเท่าๆ กันผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดติดและการคายสารออกมาก็จะถึงจุดสภาวะ สมดุล ซึ่งจะเรียกว่าสมดุลของการดูดติด โดยที่จุดสมดุลนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ สารละลายบนผิวของสารดูดติด หรือความเข้มข้นของตัวสารละลายเอง การเพิ่มปริมาณสารที่ถูกดูด ติดจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย การแสดงจำนวนของสารละลายที่ถูก ดูดติดต่อจำนวนของสารดูดติดที่อุณหภูมิคงที่จะเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติด (Adsorption Equilibrium) (ปียะ, 2545)

ระบบการดูดติดได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปของสมการ อย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์ค่าคงที่ต่างได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ ในการคำนวณออกแบบระบบดูดติด โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบาย ลักษณะข้อมูลของการดูดติดไว้หลายประการ แต่ที่นิยมใช้ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลง เมียร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

6.5.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ มีสมมุติฐานที่สำคัญคือ

- 1) มีพื้นที่สำหรับการดูดติดจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดติดจะอยู่ใน ตำแหน่งที่แน่นอน
- 2) แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดติดผิว จะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นหรือกล่าวได้ว่ามี การดูดติดเพียงชั้นเดียว
- 3) ตรงบริเวณดูดติดผิวจะเกิดอัตราการดูดติด และการคายสารออก ซึ่งอัตราการ ดูดติดมีมากกว่าอัตราการคายออกจนกระทั่งถึงภาวะสมดุล (อัตราการดูดติดเท่ากับการคายสาร ออก) นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดติดไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้โดยอิสระระหว่างพื้นที่ผิว หรือ ทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้

สำหรับสมการ Langmuir เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1

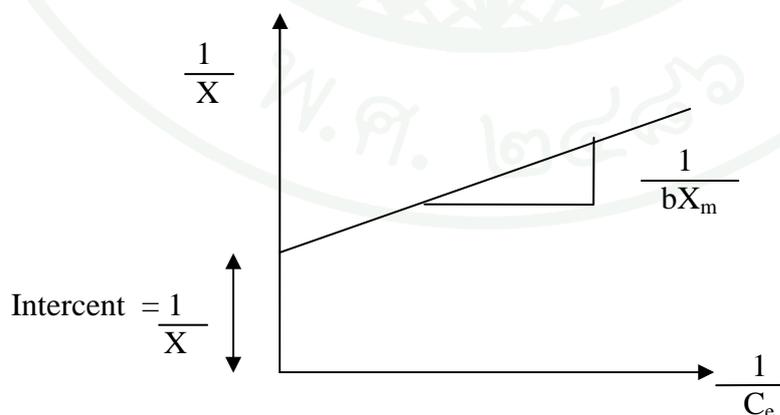
$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

- โดยที่ X = X/m ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลาง; มิลลิกรัมต่อกรัม
- X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว; มิลลิกรัมต่อกรัม
- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มิลลิกรัมต่อลิตร
- b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดติด; ลิตรต่อมิลลิกรัม

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/XC_e จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/X_m$ จุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรงที่ 2

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_m C_e} \quad (2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ มาเขียนกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์

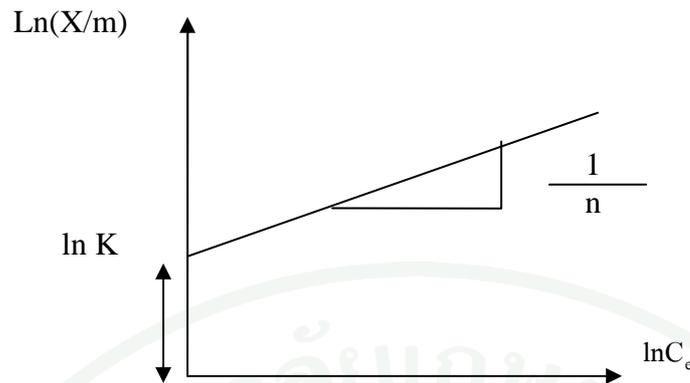
6.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมากสมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว สมการของฟรุนดลิช เขียนได้ดังสมการที่ 3

$$X/m = KC_c^{1/n} \quad (3)$$

โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก; มิลลิกรัมต่อกรัม
 C_c = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มิลลิกรัมต่อลิตร
 K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ ; ลิตรต่อมิลลิกรัม
 $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(X/m)$ และ $\ln C_c$ จะได้กราฟเส้นตรงดังภาพที่ 8

จากภาพที่ 8 มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$ และที่จุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $1/n$ และที่จุดตัดแกนนอนเท่ากับ $\ln K$ สำหรับการดูดซับของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดซับส่วนใหญ่จะมีค่า $\ln K$ ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่าความชันสูงจะมีค่า $1/n$ เข้าใกล้ 1 นี้จะพบว่าความสามารถการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีค่ามากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่ำลง และในกรณีที่มีความชันมีค่าน้อยๆ ค่า $1/n$ จะน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะพบว่าความสามารถในการดูดซับนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลงจากสมการของฟรุนดลิชนี้ได้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับหรือค่า (X/m) จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดซับจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

สมการของฟรุนดลิชนี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารดูดซับที่ต้องการใช้ในการลดค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลว จากค่า X ในสมการ ด้วยค่า $(C_0 - C_e)$ โดยที่ค่า C_0 คือค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในของเหลว สมการที่ 4 ได้ดังนี้

$$\frac{\ln(C_0 - C_e)}{M} = \frac{\ln K + 1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

สมการนี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดซับทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

ไชยวัฒน์ (2548) ได้ศึกษาการปรับปรุงเม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยลิกลงในน้ำเพื่อกำจัดแคดเมียม และศึกษาผลของปริมาณสารช่วยพูนคือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใส่ลงในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนักภายหลังจากการเผาไล่สารช่วยพูนที่ 800 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยพูนที่ใส่ลงในส่วนผสม ซึ่งจะมีส่วนเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงของไอออนในสารละลายตัวกลางได้ และเมื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดแคดเมียมแบบไม่ต่อเนื่องของเม็ดซีโอไลต์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 98 สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 3.14 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมซีโอไลต์

วายุ (2545) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาเม็ดซีโอไลต์และผสมตัวประสานที่มีผลต่อขนาดรูพรุน ความแข็งของเม็ดซีโอไลต์ โดยทำการศึกษาโดยการกรองโมเลกุลก๊าซที่ได้พบว่าเมื่อทำการเผาเม็ดซีโอไลต์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงและกักเก็บก๊าซออกซิเจนได้ร้อยละ 5

ปิยะ (2545) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยลิกไนท์แบบไฮโดรเทอร์มอล ได้ซีโอไลต์ Na-P1 พบว่าตัวแปรที่สำคัญต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์คืออุณหภูมิกระตุ้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-P1 คืออุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 110 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 96 ชั่วโมง ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 635 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และความสามารถสูงสุดในการกำจัดแคดเมียมแบบไม่ต่อเนื่อง 234 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมซีโอไลต์ โดยไอโซเทอมการดูดติดเป็นแบบฟรอนดริชไอโซเทอม สำหรับความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยใช้เม็ดซีโอไลต์ที่ผลิตโดยวิธีแกรนูลเปียกแบบต่อเนื่อง เท่ากับ 0.2 และ 0.5 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมซีโอไลต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการบรรทุกทางศาสตร์ 0.22 และ 0.44 ลิตรต่อตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ และเท่ากับ 0.79 และ 0.44 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมซีโอไลต์ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเม็ดซีโอไลต์ผสมเบนโทไนท์มากที่สุด (ร้อยละ 10) และเผาที่อุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูงสุด ทั้งนี้ความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยใช้เม็ดซีโอไลต์แบบต่อเนื่องต่ำกว่ากำจัดแบบใช้เม็ดซีโอไลต์แบบไม่ต่อเนื่องเนื่องจากเม็ดซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวในการดูดติดน้อยกว่าและอาจจะสาเหตุอื่นเช่น การกำจัดแบบไม่ต่อเนื่อง ทำให้เกิดการดูดซับอย่างทั่วถึง เนื่องจากการทำงานแบบกวนสมบูรณ์ การไหลลัดวงจรหรืออากาศที่แทรกอยู่ระหว่างเม็ดซีโอไลต์ทำให้เกิดการสัมผัสไม่ทั่วถึง เป็นต้น

จุฑาทิพย์ (2547) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยโดยตรวจสอบคุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์เถ้าลอยถ่านหินคืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมล และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 565.62 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อยคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความ

เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมล และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 303.19 เซนติโมลต่อกิโกรัม และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อย มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียได้เท่ากับร้อยละ 93.24 และร้อยละ 91.36 ตามลำดับ

อนรรฆพร (2549) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยขานอ้อยด้วยสารละลายต่าง ที่ผ่านการใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ (Spent alkaline) พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อยคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย Spent alkaline 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 418.36 เซนติโมลต่อกิโกรัมและ 286.29 เซนติโมลต่อกิโกรัม ตามลำดับ ศึกษาการนำซีโอไลต์สังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 และความเข้มข้นตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับที่สถานะดังกล่าวเป็นสมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 78.31 และ 65.23 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า ได้เท่ากับร้อยละ 92.86 และร้อยละ 89.56 ตามลำดับ

Curkovic และคณะ (1997) ได้ทำการทดลองการกำจัดตะกั่วและแคลเซียมออกจากน้ำเสียโดยใช้ซีโอไลต์ตามธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านขบวนการพิเศษ และซีโอไลต์ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้จะนำมาทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะใช้ซีโอไลต์ 3 แบบ คือซีโอไลต์ธรรมชาติ 1 ตัวอย่าง และซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษอีก 2 ตัวอย่าง โดยซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษทำโดยการนำซีโอไลต์ธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ผลของการกำจัดตะกั่วและแคลเซียมพบว่าซีโอไลต์ที่ผ่านขบวนการพิเศษจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และประสิทธิภาพในการกำจัดเมื่อทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิจะพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากขึ้น

E.Alvarez-Ayuso และคณะ (2548) ได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ Na-P1 และ Clinoptilolite มาศึกษาการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ โครเมียม นิกเกิล สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ที่ความเข้มข้น 10-200 มิลลิกรัม ต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม 43.6 มิลลิกรัมต่อกรัม 20.1 มิลลิกรัมต่อกรัมของนิกเกิล 32.6 มิลลิกรัมต่อกรัมของสังกะสี 50.5 มิลลิกรัมต่อกรัมของทองแดง และ 50.8 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับแคดเมียม

Lin, C. F และ His, H-C (1995) ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ได้จากเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินของโรงงานไฟฟ้าในประเทศไทยได้หว่าน พบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นนี้จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการเผา ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.5 นอร์มอล จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดคือ 94 ตารางเมตรต่อกรัม และพบว่าการเกิดซีโอไลต์มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 นอร์มอล จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดคือ 52 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเบส และการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาที่มากกว่า 90 องศาเซลเซียส จะไม่ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในแง่ของการนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาใช้ในการกำจัดแคดเมียมในสารละลายพบว่า สามารถนำมาใช้ในการกำจัดแคดเมียมได้ถึงร้อยละ 65 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ในระบบเปิด (90 องศาเซลเซียส 3.5 นอร์มอล NaOH) ถ้าทดลองในระบบปิด (110 องศาเซลเซียส 2 นอร์มอล NaOH) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเท่ากับ 210 มิลลิสมมูลต่อ 100 กรัม จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดถึงร้อยละ 80 สรุปได้ว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของซีโอไลต์ดีขึ้น

L.Min-Gyu และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาการกำจัดทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ในการดูดซับ พบว่าไอออนของทองแดงและตะกั่วจะถูกดูดซับได้ร้อยละ 90 เมื่อเวลา 30 นาที และเข้าสู่สมดุลของการดูดซับที่เวลา 2 ชั่วโมง ที่สภาวะที่เหมาะสมคือค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5-6 มีความสามารถในการกำจัด ตะกั่ว และทองแดง ได้สูงสุดโดยใช้สมมูลการดูดซับของแลงเมียร์ได้เท่ากับ 1.29 มิลลิโมลต่อกรัม และ 1.16 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ

Steenbruggen and Hollman (1998) ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยนำเอาเถ้าลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายประเภท

ไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่เกิดปฏิกิริยาในระบบปิด ตัวแปรที่สำคัญคืออุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา สัดส่วนของของเหลวต่อของแข็ง ความเข้มข้นและชนิดของสารละลายประเภทไฮดรอกไซด์ และจากการทดลองสังเคราะห์แล้วลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ที่อุณหภูมิ 90-150 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นคือ ซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (Zeolite Na-PI) แล้วลอยถ่านหินจะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ประมาณร้อยละ 45 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม เพิ่มขึ้นจาก 0.02 เป็น 2.4 มิลลิสมมูลย์ต่อกรัม จากนั้นได้นำซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำการกำจัดโลหะออกจากรน้ำ พบว่าลำดับความชอบของไอออนของซีโอไลต์คือ $Ba > Cu > Cd \sim Zn > Co > Ni$

U.Wingenfelder และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาโดยการนำซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ Clinoptilolite มาปรับปรุงคุณภาพ พบว่าจะสามารถดูดซับสารตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำเสียได้

อุปกรณ์และวิธีการ

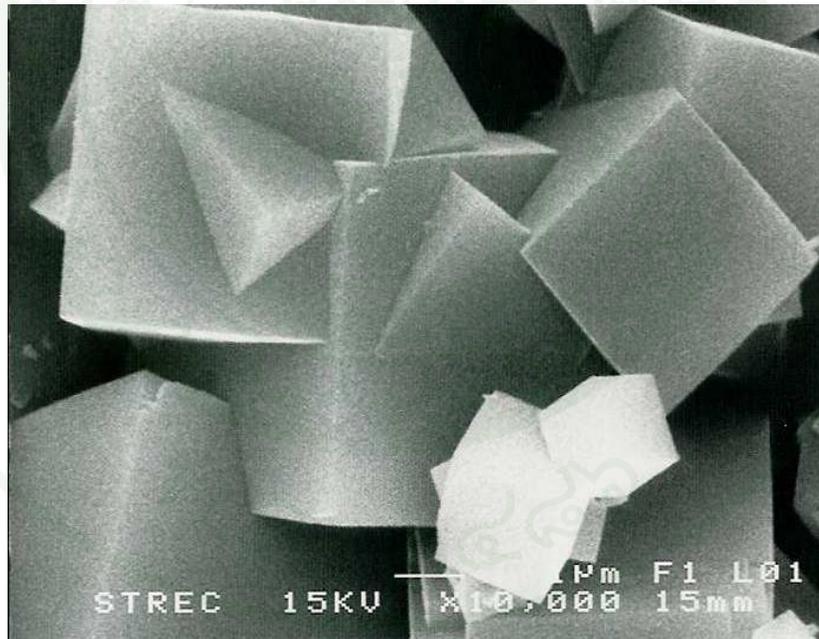
อุปกรณ์

1. อุปกรณ์การทดลอง

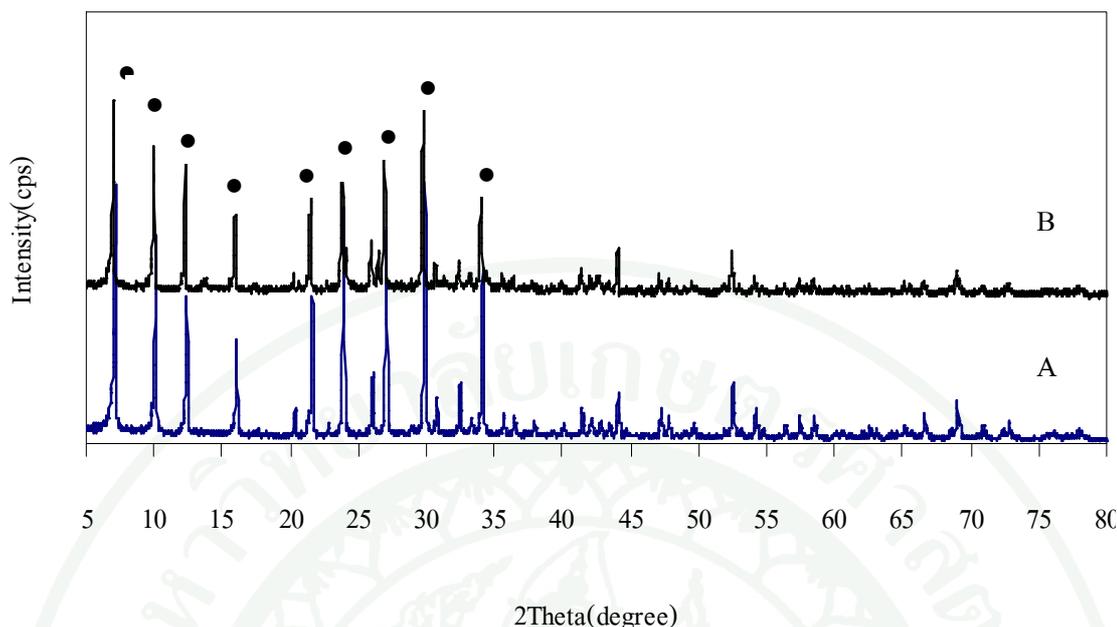
- 1.1 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น FX2000i ยี่ห้อ AND
- 1.2 เครื่องกวนผสมแป้งแบบ Planetary Mixer Hobart
- 1.3 ตู้อบความร้อน รุ่น LDO-100E ยี่ห้อ Labtech
- 1.4 เครื่องอัดเม็ด
- 1.5 เตาเผา รุ่น EF 11/8B ยี่ห้อ Lenton
- 1.6 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- 1.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น pH510 ยี่ห้อ EUTECH
- 1.8 ตะแกรงร่อนขนาดเม็ด
- 1.9 ชุดเครื่องแก้ว
- 1.10 ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
- 1.11 ครูซิเบิลพอร์ซเลน พร้อมฝาปิด
- 1.12 เครื่องสูบลูญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
- 1.13 โถดูดความชื้น (Desiccators)
- 1.14 เครื่อง Inductive Coupled Plasma Spectroscopy (ICPS) รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer
- 1.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning Microscope ยี่ห้อ JEOL
- 1.1.6 BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME

วิธีการ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย จากงานวิจัยของเรวดี, 2551 ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเศษชานอ้อย ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $\text{SiO}_2 : 9.03\text{Al}_2\text{O}_3 : 1.31\text{Na}_2\text{O} : 1.14\text{H}_2\text{O}$ ผลึกของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์นั้นมีโครงสร้างเป็นทรงลูกบาศก์เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning microscope ยี่ห้อ JEOL ดังภาพที่ 9 โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์มีรูปแบบ two-theta ที่มุม 7.14, 12.49, 16.13, 21.68, 24.01, 26.09, 27.13, 29.95, 34.16 ตามลำดับ (JCPDS 39-222) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) รุ่น XRD6000 ยี่ห้อ SHIMADZU ดังภาพที่ 10 และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 788.3 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนต ต่อกรัมซีโอไลต์



ภาพที่ 9 ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning microscope ยี่ห้อ JEOL (เรวดี, 2551)



ภาพที่ 10 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น รุ่น XRD6000 ยี่ห้อ SHIMADZU (เรวดี, 2551) A) ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง B) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง (●แทน Na-A zeolite)

ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียต่อไป

เนื่องจากซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเศษชานอ้อยนั้นมีลักษณะเป็นผง มีความหนาแน่นต่ำ จึงเกิดการลอยน้ำ และเมื่อกวนผสมกับน้ำจะมีลักษณะคล้ายแป้งเปียกทำให้แยกซีโอไลต์ออกจากน้ำเสียได้ยาก อีกทั้งยังมีปัญหาเรื่องความขุ่นจากซีโอไลต์ทำให้เกิดปริมาณตะกอนสะสมในระบบบำบัด ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม (สันทัด, 2549) ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการผลิตซีโอไลต์แบบเม็ดเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน และง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่

1. ศึกษาหาสถานะที่เหมาะสม ในการอัดเม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย

ในขั้นตอนการอัดเม็ดได้ศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา (ไชยวัฒน์, 2548) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดมาใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

1.1 การศึกษาผลของสารช่วยพูน (Pore Forming Agent) ต่อการขึ้นรูปเม็ดซีโอไลต์

1.1.1 ชั่งเกลือคโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA 88% mol. Hydrolyzed Grade) ที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด โดยผันแปรกับปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ได้จากเศษชานอ้อยที่ร้อยละ 79.5, 74.5, 69.5, 64.5 และ 59.5 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ตามลำดับ ผสมให้เข้ากันเป็นสารช่วยพูน

1.1.2 ชั่งผงเบนโทไนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ผสมกับสารช่วยพูน (PVA รวมกับซีโอไลต์) โดยผสมเปียกให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ใช้น้ำประมาณ 100-120 มิลลิลิตร ซึ่งเพียงพอที่ทำให้ส่วนผสมทั้งหมดผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวโดยนำมาผสมด้วยเครื่องกวนแป้ง ดังภาพที่ 11

1.1.3 นำส่วนผสมที่ผสมเข้ากันแล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อลดปริมาณน้ำ

1.1.4 เตรียมสารช่วยไหล (Magnesium stearate) และสารหล่อลื่นเบ้า (talcum) โดยชั่ง Magnesium stearate ร้อยละ 0.35 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ผสมกับ talcum ร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด

1.1.5 ผสมสารช่วยพูน (ซีโอไลต์กับ PVA) สารยึดเกาะ (เบนโทไนท์) สารช่วยไหล และสารหล่อลื่นเบ้า ให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนแป้ง จากนั้นอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดดังภาพที่ 12 ใช้แรงอัดไม่น้อยกว่า 400 Psi เม็ดซีโอไลต์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร นำผลิตภัณฑ์เม็ดซีโอไลต์ที่ได้เผาเพื่อไล่สารช่วยพูน (PVA) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 3 ชั่วโมง

1.1.6 ลดขนาดเม็ดซีโอไลต์ที่ได้จากกระบวนการอัดเม็ดด้วยโกร้งบด จากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนเพื่อแยกขนาดต่างๆ ดังนี้

ชั้นที่ 1 ขนาดเม็ดเท่ากับ	>2	มิลลิเมตร
ชั้นที่ 2 ขนาดเม็ดเท่ากับ	1-2	มิลลิเมตร
ชั้นที่ 3 ขนาดเม็ดเท่ากับ	0.5-1	มิลลิเมตร

ชั้นที่ 4 ขนาดเม็ดเท่ากับ	0.25- 0.5	มิลลิเมตร
ชั้นที่ 5 ขนาดเม็ดเท่ากับ	<0.25	มิลลิเมตร

1.1.7 ทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเม็ดซีโอไลต์แต่ละขนาด เพื่อเลือกขนาดเม็ดที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)

1.1.8 ทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของเม็ดซีโอไลต์ที่ผันแปรปริมาณ PVA ที่ร้อยละต่างๆ โดยเลือกขนาดเม็ดที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 1.1.7 วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วย BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1.2 การศึกษาผลของสารยึดเกาะต่อการขึ้นรูปเม็ดซีโอไลต์

1.2.1 ชั่งผงเบนโทไนต์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด โดยผันแปรกับปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ได้จากเศษขานอ้อยที่ร้อยละ 74.5, 69.5, 64.5 และ 59.5 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ตามลำดับ

1.2.2 ชั่ง PVA ปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 1.1 ผสมกับสารผสมข้างต้น โดยผสมเปียกให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ใช้น้ำประมาณ 100-120 มิลลิลิตร ซึ่งเพียงพอที่ทำให้ส่วนผสมทั้งหมดผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

1.2.3 นำส่วนผสมที่ผสมเข้ากันแล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อลดปริมาณน้ำ

1.2.4 ผสมสารช่วยไหลและสารหล่อลื่นเบ้า ดังขั้นตอนที่ 1.1.4

1.2.5 ผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน และนำไปเผา ดังขั้นตอนที่ 1.1.5

1.2.6 บดเพื่อลดขนาดเม็ดซีโอไลต์ ดังขั้นตอนที่ 1.1.6

1.2.7 ทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเม็ดแต่ละขนาดเพื่อเลือกขนาดเม็ดที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)

1.2.8 ศึกษาหาปริมาณซีโอไลต์ที่หลุดออกหลังการกวนผสมของเม็ดซีโอไลต์ที่ผันแปรปริมาณเบนโทไนท์ที่ร้อยละต่างๆ โดยเลือกขนาดเม็ดที่เหมาะสมที่สุดจากขั้นตอน 1.2.7 โดยทำการทดลองกับน้ำกลั่นดังนี้ ซีโอไลต์แบบเม็ดที่ผันแปรปริมาณเบนโทไนท์สูตรต่างๆ 1 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร กวนผสมที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กรองซีโอไลต์ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำกระดาษกรองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นใช้แปรงขนอ่อนปัดเศษผงที่ติดอยู่ที่ผิวของเม็ดซีโอไลต์ออก แล้วนำเม็ดซีโอไลต์ไปชั่งน้ำหนักคำนวณหาปริมาณที่หายไปเพื่อเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 11 เครื่องกวนผสมแป้งแบบ Planetary Mixer Hobar

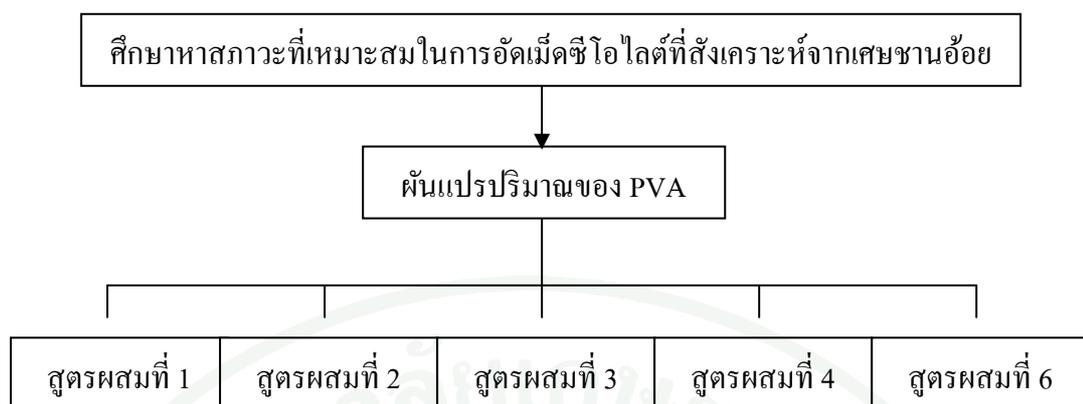


ภาพที่ 12 เครื่องอัลตราซาวด์

2. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยใช้ไฮไลต์สังเคราะห์จากเศษขานอ้อยแบบเม็ด ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ระยะเวลาสัมผัส (Contact Time) และปริมาณไฮไลต์ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยสารละลายมาตรฐาน $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Cd(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot H_2O$, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (Fluka AR grade) ที่ความเข้มข้น 1000 ± 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร วัดความเข้มข้นโดยใช้เครื่อง ICP รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer



PVA ร้อยละ 5 PVA ร้อยละ 10 PVA ร้อยละ 15 PVA ร้อยละ 20 PVA ร้อยละ 25
 (ผสมด้วยเบนโทไนท์ร้อยละ 15 Magnesium stearate ร้อยละ 0.35 และ talcum ร้อยละ 0.15)

วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area)
 และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน



(ผสมด้วย Magnesium stearate ร้อยละ 0.35 และ talcum ร้อยละ 0.15)

วิเคราะห์หาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน
 ศึกษาหาปริมาณซีโอไลต์ที่หลุดออกหลังการกวนผสม

ภาพที่ 13 แผนภาพแสดงการทดลองในขั้นตอนที่ 1.1 และ 1.2

2.1 การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคลเมียม และนิกเกิล) ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

2.1.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

2.1.2 ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.1.3 เติมซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดปริมาณ 1 ± 0.05 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ พร้อมนำไปกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง

2.1.4 กรองซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายที่กรองได้ด้วยเครื่อง ICP รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

2.1.5 ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) นำค่าร้อยละในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยเฉลี่ยที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

2.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคลเมียม และนิกเกิล) ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

2.2.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดต่างๆ ได้แก่ 3, 6, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่น้ำในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2.2 เติมซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดปริมาณ 1 ± 0.05 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ พร้อมนำไปกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง

2.2.3 กรองซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และนำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียหลังการกวนผสม

2.2.4 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายที่กรองได้ด้วยเครื่อง ICP รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

2.2.5 ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) นำค่าร้อยละในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยเฉลี่ยที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

2.3 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส (contact time) ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

2.3.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 และปรับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เหมาะสมตามข้อ 2.2 ปริมาตรน้ำ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.3.2 เติมซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดปริมาณ 1 ± 0.05 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ พร้อมนำไปกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัส 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ

2.3.3 กรองซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และนำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียหลังการกวน

2.3.4 วิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายที่กรองได้ด้วยเครื่อง ICP รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

2.3.5 ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) นำค่าร้อยละในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยเฉลี่ยที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าระยะเวลาสัมผัส (Contact Time) ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

2.4 การศึกษาผลของมวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และ นิกเกิล)

2.4.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 และปรับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เหมาะสมตามข้อ 2.2 ปริมาตรน้ำ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.4.2 เติมซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดที่ 0, 0.01, 0.08, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ พร้อมนำไปกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ด้วยระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากข้อ 2.3

2.4.3 กรองซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และนำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียหลังการกวน พร้อมบันทึกค่า

2.4.4 วิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายที่กรองได้ด้วยเครื่อง ICP รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

2.4.5 ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) นำค่าร้อยละในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยเฉลี่ยที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อหา มวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

3. ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์เชิงการค้ำแบบผงและแบบเม็ด ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงและแบบเม็ด ด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดติดผิว โดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

3.1 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์เชิงการค้ำแบบผง

3.1.1 เตรียมน้ำเสียดังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โคโรเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้มีค่าที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 และปรับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียดังเคราะห์ให้เหมาะสมตามข้อ 2.2 ปริมาตร 100 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.1.2 เติมซีโอไลต์เชิงการค้ำแบบผง 0.01, 0.08, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ พร้อมนำไปกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากข้อ 2.3

3.1.3 กรองซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และนำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยหาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง ICP รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

3.1.4 นำค่าที่ได้หลังการดูดซับมาวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการดูดติดผิวด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดติดผิวของโลหะหนักชนิดต่างๆ โดยศึกษาสมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช เพื่ออธิบายความเหมาะสมในการดูดติดผิวโลหะหนักชนิดต่างๆ ของซีโอไลต์ โดยที่ความน่าเชื่อถือของแต่ละสมการจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Determination, R^2) ซึ่งค่าต่ำสุดที่ 0 แสดงว่ามีค่าความน่าเชื่อถือต่ำสุดและค่าสูงสุดเท่ากับ 1 มีค่าความน่าเชื่อถือมากที่สุด (กัลยา, 2542)

3.2 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์เชิงการค้ำแบบเม็ด ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1 โดยเปลี่ยนชนิดของซีโอไลต์เป็นซีโอไลต์เชิงการค้ำแบบเม็ด

3.3 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1 โดยเปลี่ยนชนิดของซีโอไลต์เป็นซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง

3.4 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1 โดยเปลี่ยนชนิดของซีโอไลต์เป็นซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

4. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

การศึกษาได้ทดลองกำจัดโลหะหนักผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และ นิกเกิล) ในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง วิธีการทดลองดังนี้

4.1 เตรียมน้ำเสียจริงโดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้มีค่าที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองจะใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียจริง ปริมาตรน้ำ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

4.2 เติมซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดในปริมาณที่เหมาะสมดังข้อ 2.4 ลงในขวดแต่ละใบ พร้อมนำไปกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากข้อ 2.3

4.3 กรองซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และนำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียหลังการกวน พร้อมบันทึกค่า

4.4 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายที่กรองได้ด้วยเครื่อง ICP รุ่น Optima3000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

4.5 โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD)

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลต่างๆ ในการทดลองนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้วิธี Analysis of Variance (ANOVA) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6. สถานที่ทำการวิจัย

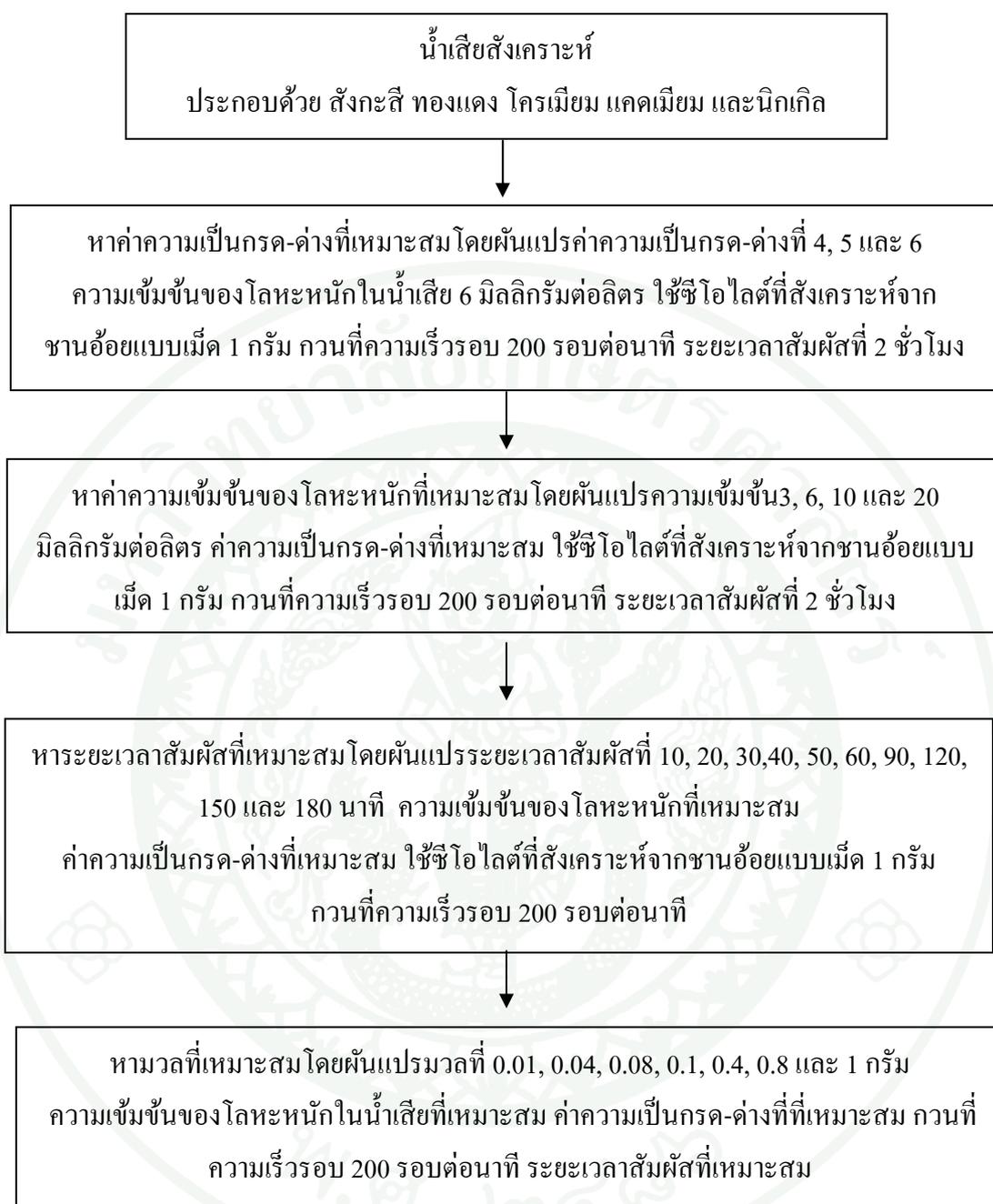
ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

7. ระยะเวลาทำการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2552 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2553

8. ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ให้ทุนอุดหนุนในงานวิจัย และทุนภาคิบัณฑิต



ภาพที่ 14 แผนภาพแสดงการทดลองในขั้นตอนที่ 2

การหาไอโซเทอมการดูดติดผิวโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช
ปริมาณซีโอไลต์ที่ 0, 0.01, 0.08, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 กรัม



เปรียบเทียบชนิดของซีโอไลต์ดังนี้
ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง
ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

ภาพที่ 15 แผนภาพแสดงการทดลองในขั้นตอนที่ 3

ผลและวิจารณ์

1. ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย

1.1 ผลการศึกษาผลของสารช่วยพูนต่อการขึ้นรูปเม็ดซีโอไลต์

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเศษชานอ้อยแบบผงถูกนำมาผลิตเป็นซีโอไลต์แบบเม็ด โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย ทำการศึกษาผลของสารช่วยพูนคือ PVA ต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยผสม PVA ในส่วนผสมที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ PVA ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มมากขึ้น และที่ขนาดเม็ดซีโอไลต์เท่ากับ 1-2 มิลลิเมตรนั้นส่วนผสมของ PVA ที่ร้อยละต่างกันมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนเม็ดซีโอไลต์ที่มีขนาดต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร คือขนาด 0.5-1 มิลลิเมตร ขนาด 0.25-0.5 มิลลิเมตร และขนาดน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตรนั้น พบว่ามีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเม็ดซีโอไลต์ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเม็ดที่เล็กลงจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น (สันทัด, 2545) ส่งผลให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่จากผลการทดลองเพื่อหาขนาดเม็ดที่เหมาะสมในการใช้งาน พบว่าเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตรนั้น เมื่อกวนผสมกับน้ำเสียแล้วเม็ดซีโอไลต์จะแตกได้ง่าย ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องความขุ่นจากซีโอไลต์และเกิดปริมาณตะกอนสะสมในระบบบำบัด จึงไม่เหมาะสมที่จะนำซีโอไลต์ที่มีเม็ดขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตรไปใช้ในอุตสาหกรรม ดังนั้นในการทดลองนี้ได้เลือกขนาดเม็ดที่เหมาะสม คือขนาดเม็ดที่ 1-2 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อกวนผสมกับน้ำแล้วเม็ดยังคงสภาพเดิม

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของเม็ดซีโอไลต์ที่ผสม PVA สูตรต่างๆ โดยเลือกขนาดเม็ดเท่ากับ 1-2 มิลลิเมตร วิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET surface area รุ่น AUTOSORB1 ยี่ห้อ QUANTA CHROME (ภาคผนวก ข) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ PVA ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 2 เม็ดซีโอไลต์ที่ทำการผันแปร PVA ที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 5.06, 5.39, 6.16, 7.71 และ 9.32 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 14 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบ

เม็ดมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าเนื่องจากกระบวนการอัดเม็ดซีโอไลต์ จึงผสมสารช่วยพูนคือ PVA ในส่วนผสมที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด จากนั้นทำการเผาไล่ PVA ซึ่ง PVA นั้นสามารถสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส (Barklouti *et al.*, 2001) เมื่อเผาไล่ PVA จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะได้ เนื่องจาก PVA เป็น โพลีเมอร์อินทรีย์เมื่อเผาไล่ PVA จะสลายตัวทำให้เกิดช่องว่างทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น (Khadhraoui *et al.*, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ PVA ทำให้เม็ดซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการ แลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 1 ผลของปริมาณ PVA และขนาดเม็ดต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน โดย คงที่ปริมาณของเบนโทไนท์ที่ร้อยละ 15 (ค่าเฉลี่ย \pm SD)

ขนาดเม็ด ซีโอไลต์ (มิลลิเมตร)	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์)				
	PVA ร้อยละ 5	PVA ร้อยละ 10	PVA ร้อยละ 15	PVA ร้อยละ 20	PVA ร้อยละ 25
>2	98.97 \pm 1.61 ^a	120.62 \pm 9.07 ^b	137.30 \pm 9.36 ^c	143.33 \pm 9.47 ^{dc}	154.29 \pm 9.98 ^c
1-2	137.59 \pm 10.25 ^a	165.36 \pm 1.33 ^b	214.39 \pm 0.53 ^c	229.38 \pm 3.54 ^d	274.57 \pm 8.75 ^c
0.5-1	208.53 \pm 9.16 ^a	263.25 \pm 2.42 ^b	268.74 \pm 8.49 ^b	322.47 \pm 9.83 ^c	330.69 \pm 1.87 ^c
0.25-0.5	399.66 \pm 7.76 ^a	414.49 \pm 1.15 ^{ab}	427.24 \pm 15.30 ^{bc}	443.36 \pm 9.19 ^c	465.92 \pm 4.65 ^d
<0.25	502.93 \pm 10.22 ^a	513.53 \pm 11.51 ^{ab}	527.80 \pm 3.34 ^{bc}	537.29 \pm 7.95 ^{cd}	550.98 \pm 8.83 ^d

หมายเหตุ a b c d e ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

แต่จากการทดลองพบว่าการใส่ PVA ถึงร้อยละ 25 ทำให้เม็ดมีความกรอบเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกสภาวะการเติม PVA ที่เหมาะสมคือที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 229.38 \pm 3.54 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเม็ดซีโอไลต์ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ที่ผันแปรปริมาณ PVA ที่ปริมาณต่างๆ (ค่าเฉลี่ย \pm SD)

ปริมาณ PVA (โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ค่าความสามารถในการ แลกเปลี่ยนไอออน (มิลลิกรัมแคลเซียม คาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์)
ร้อยละ 5	5.06	137.59 \pm 10.25
ร้อยละ 10	5.39	165.36 \pm 1.33
ร้อยละ 15	6.16	214.39 \pm 0.53
ร้อยละ 20	7.71	229.38 \pm 3.54
ร้อยละ 25	9.32	274.57 \pm 8.75

1.2 ผลการศึกษาผลของสารยึดเกาะต่อการขึ้นรูปเม็ดซีโอไลต์

จากผลการทดลองข้อ 1.1 พบว่าปริมาณ PVA ที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด จากนั้นจึงศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยโดยศึกษาผลของสารยึดเกาะคือ เบนโทไนท์ ต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ทดลองทำการผันแปรปริมาณเบนโทไนท์ที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งผันแปรกับปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยที่ร้อยละ 74.5, 69.5, 64.5, 59.5 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนต์มากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 3 เนื่องจากการทดลองได้ทำการผันแปรปริมาณเบนโทไนต์ต่อปริมาณซีโอไลต์ เมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์จะทำให้สัดส่วนของซีโอไลต์ลดลง ฉะนั้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงด้วย

ผลการศึกษาขนาดเม็ดที่เหมาะสมต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ขนาดต่างๆ พบว่าเมื่อขนาดเม็ดซีโอไลต์เล็กลงทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเม็ดที่เล็กลงจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น(สันทัด, 2549) ส่งผลให้ค่า

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เนื่องจากเหตุผลในด้านการนำไปใช้งานดังที่กล่าวในข้อ 1.2 นั้น พบว่าขนาดเม็ดที่ 1-2 มิลลิเมตรเหมาะสมที่สุด จึงนำไปศึกษาคุณสมบัติในการกรองตัวต่อไป

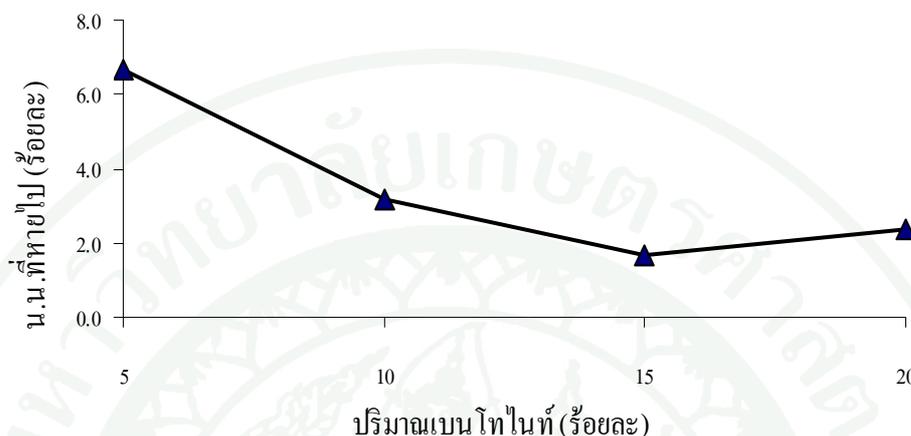
ตารางที่ 3 ผลของปริมาณเบนโทไนท์และขนาดเม็ดต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (ค่าเฉลี่ย \pm SD)

ขนาดเม็ด ซีโอไลต์ (มิลลิเมตร)	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์)			
	เบนโทไนท์	เบนโทไนท์	เบนโทไนท์	เบนโทไนท์
	ร้อยละ 5	ร้อยละ 10	ร้อยละ 15	ร้อยละ 20
>2	233.53 \pm 0.40 ^a	168.89 \pm 8.36 ^b	143.33 \pm 9.46 ^c	111.06 \pm 9.45 ^d
1-2	291.40 \pm 7.78 ^a	251.08 \pm 4.97 ^b	229.38 \pm 3.54 ^c	182.65 \pm 1.94 ^d
0.5-1	375.61 \pm 2.47 ^a	347.26 \pm 9.80 ^b	322.47 \pm 9.82 ^c	221.11 \pm 7.78 ^d
0.25-0.5	547.41 \pm 0.56 ^a	454.44 \pm 13.23 ^b	443.36 \pm 9.19 ^b	274.77 \pm 11.39 ^c
<0.25	649.52 \pm 8.75 ^a	542.28 \pm 9.19 ^b	537.29 \pm 7.95 ^b	387.35 \pm 8.97 ^c

หมายเหตุ a b c d ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

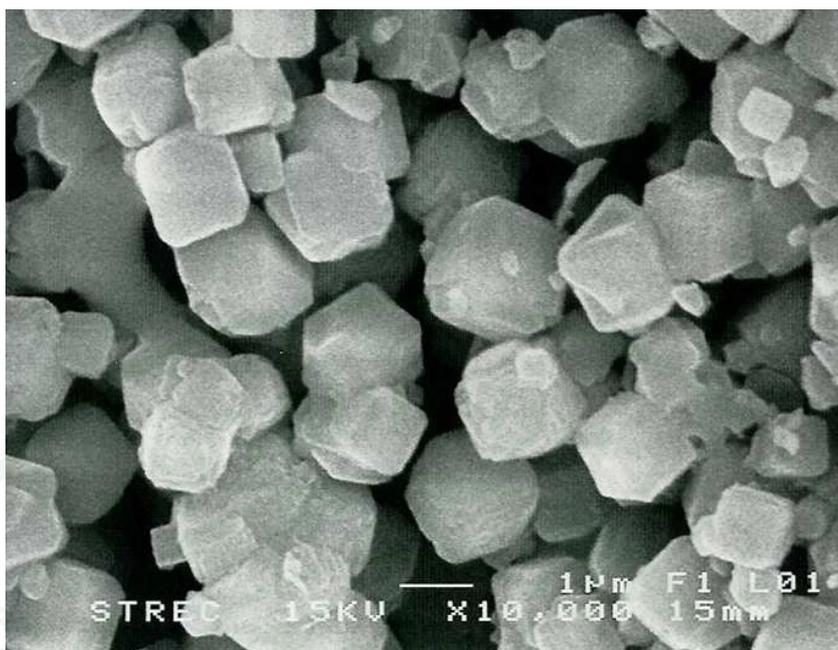
ผลการศึกษาการกรองตัวของเม็ดซีโอไลต์ เนื่องจากการกวนผสมเมื่อเม็ดซีโอไลต์สัมผัสกับน้ำจะมีบางส่วนหลุดออกจากตัวเม็ดซีโอไลต์ จากผลการศึกษาการกรองตัวของเม็ดซีโอไลต์ที่ผันแปรปริมาณเบนโทไนท์ในปริมาณต่างๆ โดยศึกษาจากน้ำหนักที่หายไปของเม็ดซีโอไลต์ที่ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 16 พบว่าเมื่อปริมาณเบนโทไนท์เพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักที่หายไปหลังการกวนผสมลดลง กล่าวคือปริมาณเบนโทไนท์เพิ่มขึ้นทำให้กรองตัวลดลง เนื่องจากเบนโทไนท์มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานทำให้เม็ดมีคุณสมบัติเกาะตัวกันมากขึ้น แต่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์ที่ร้อยละ 20 เม็ดซีโอไลต์จะเริ่มแตก ทั้งนี้เนื่องจากเบนโทไนท์มีคุณสมบัติในการหดตัวสูง หากใส่ในปริมาณที่มากเกินไปเมื่อทำให้แห้งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เม็ดซีโอไลต์แตกร้าวได้ (ไชยวัฒน์, 2548) ดังนั้นเมื่อใส่เบนโทไนท์ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้เม็ดกรองตัวมาก

ขึ้น อีกทั้งเบนโทไนด์ยังมีปัญหาเรื่องการเจือปนของแร่เหล็กอีกด้วย จากการทดลองปริมาณเบนโทไนด์ที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมดจึงเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเม็ดซีโอไลต์ยังคงมีความแข็งและยังคงรูปเดิมเมื่อผ่านการกวนผสมในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 16 ปริมาณเบนโทไนด์ของเม็ดซีโอไลต์ต่อน้ำหนักที่หายไป

จากผลการทดลองข้อ 1.1 และ 1.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดมีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 20 และเบนโทไนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ดที่ 1-2 มิลลิเมตร มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 229.38 ± 3.54 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์ และเมื่อวิเคราะห์พื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จากภาพที่ 17 พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเม็ดยังคงมีความเป็นผลึกซีโอไลต์ยังคงเป็นทรงลูกบาศก์เหมือนซีโอไลต์ผง สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดนั้นยังคงเป็นซีโอไลต์ชนิด NaA จึงเลือกสภาวะดังกล่าวเพื่อทำการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักต่อไป



ภาพที่ 17 ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษขานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 20 และเบนโทไนท์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ดที่ 1-2 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning microscope ยี่ห้อ JEOL

2. ผลการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษขานอ้อยแบบเม็ด ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ระยะเวลาสัมผัส (Contact Time) และปริมาณซีโอไลต์ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

จากการทดลองศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแบบไม่ต่อเนื่อง ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ระยะเวลาสัมผัส (Contact Time) มวลของซีโอไลต์ ทำการทดสอบในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) ได้ผลดังนี้

2.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

จากผลการทดลองการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในน้ำเสียโลหะหนักสังเคราะห์แบบผสม(สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ร้อยละการกำจัด) โดยศึกษาที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4, 5 และ 6 ในน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง สุดท้ายหลังการดูดซับแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นและสุดท้ายหลังการดูดซับ และผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ค่าเฉลี่ย \pm SD)

ความเป็นกรด-ด่างก่อนดูดซับ	ความเป็นกรด-ด่างหลังดูดซับ	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ร้อยละการกำจัด)				
		สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	แคดเมียม	นิกเกิล
4	5.1	98.95 \pm 0.03 ^a	97.89 \pm 0.02 ^a	95.63 \pm 0.01 ^a	95.14 \pm 0.01 ^a	90.96 \pm 0.01 ^a
5	6.5	99.00 \pm 0.01 ^b	98.71 \pm 0.00 ^b	96.89 \pm 0.01 ^b	96.23 \pm 0.01 ^b	93.66 \pm 0.00 ^b
6	7.3	99.35 \pm 0.02 ^b	98.88 \pm 0.01 ^c	98.61 \pm 0.02 ^c	96.50 \pm 0.01 ^c	94.38 \pm 0.01 ^c

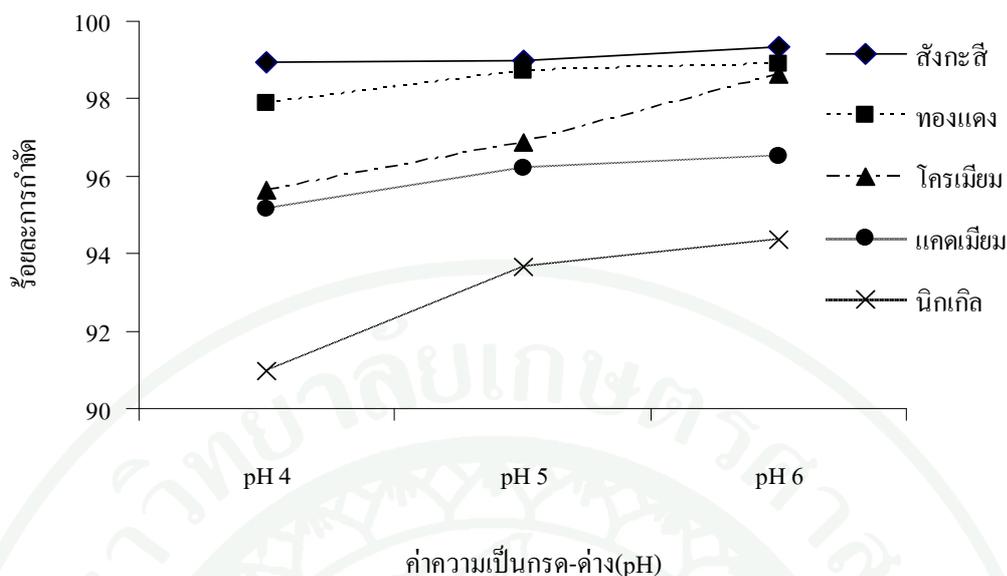
หมายเหตุ a b c ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าสูงขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการผสมกับซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด เนื่องจากในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะมีไอออนของ H^+ อยู่ เมื่อผสมกับซีโอไลต์ซึ่งมีไอออน Na^+ ทำให้ H^+ เข้าไปแย่งที่ Na^+ ในการแลกเปลี่ยนไอออนส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายหลังการดูดซับเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายปฏิกิริยาดังนี้



จากผลการทดลองของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกันมีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมสูงสุดที่สุดคือ สังกะสีร้อยละ 99.35 ± 0.02 ทองแดงร้อยละ 98.88 ± 0.01 โครเมียมร้อยละ 98.61 ± 0.02 แคดเมียมร้อยละ 96.50 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 94.38 ± 0.01 และที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ต่ำที่สุด คือ สังกะสีร้อยละ 98.95 ± 0.03 ทองแดงร้อยละ 97.89 ± 0.02 โครเมียมร้อยละ 95.63 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 95.14 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 90.96 ± 0.01

จากภาพที่ 18 พบว่าในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ สามารถอธิบายได้ว่าในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำนั้นจะมีปริมาณของ H^+ สูง ทำให้เกิดการแข่งขันระหว่าง H^+ กับไอออนบวกของโลหะหนัก (M^{2+}) ในการแลกเปลี่ยนกับ Na^+ ในซีโอไลต์ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำลงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักต่ำลง ในทางตรงกันข้ามสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงนั้นจะมีปริมาณของ H^+ ต่ำ ทำให้เกิดการแข่งขันระหว่าง H^+ กับไอออนบวกของโลหะหนัก (M^{2+}) ในการแลกเปลี่ยนกับ Na^+ ในซีโอไลต์น้อย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าส่งผลให้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ซึ่งจะพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6 นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงที่สุด แต่จากการทดลองของ Norberg, 1984 พบว่าโลหะหนักจะเริ่มตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6-7 ดังนั้นการเลือกค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก สังกะสีร้อยละ 99.00 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 98.71 ± 0.00 โครเมียมร้อยละ 96.89 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 96.23 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 93.66 ± 0.00 ซึ่งเป็นช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่โลหะหนักยังไม่ตกตะกอน ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงกว่านี้ เพราะค่าร้อยละการกำจัดที่สูงขึ้นอาจเนื่องมาจากการตกตะกอนของโลหะหนักมากกว่าการถูกดูดซับ (อนรรฆอร, 2545) ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดคือค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 จึงนำค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ไปใช้ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อไป



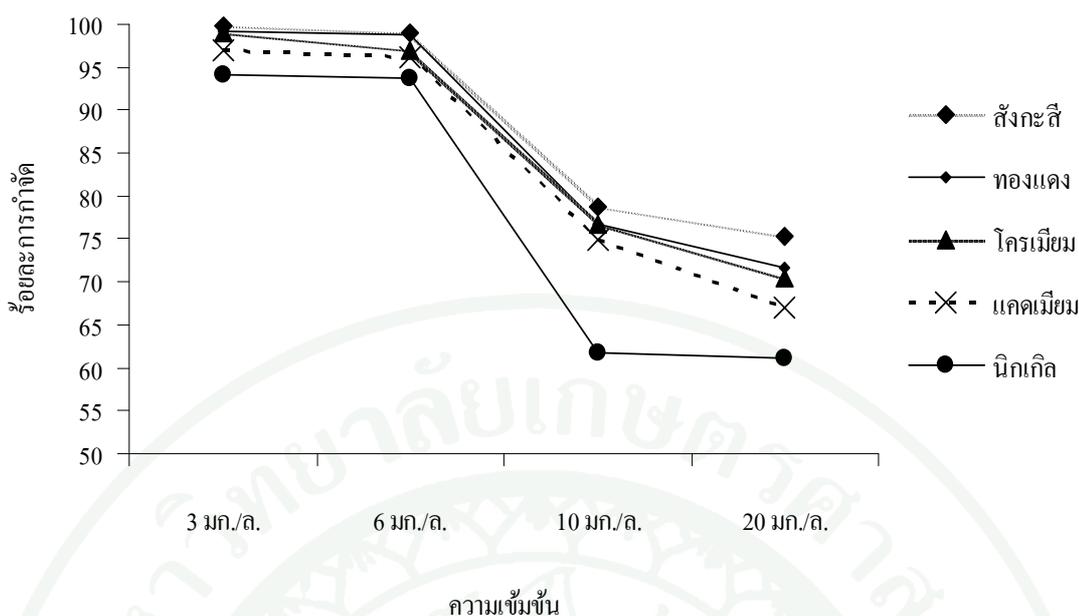
ภาพที่ 18 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพในการกำจัด โลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์

2.2 ผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก โดยปรับความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 3, 6, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างกัน มีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมสูงที่สุดคือสังกะสีร้อยละ 99.88 ± 0.03 ทองแดงร้อยละ 99.23 ± 0.03 โครเมียมร้อยละ 98.91 ± 0.05 แคดเมียมร้อยละ 97.01 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 94.18 ± 0.03 และที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมต่ำที่สุดคือ สังกะสีร้อยละ 75.36 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 71.64 ± 0.02 โครเมียมร้อยละ 70.42 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 67.05 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 61.08 ± 0.01

จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ต่างๆ ดังนี้ 3, 6, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 19 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 6 เป็น 10 เป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะของเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยมีค่าลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของเม็ดซีโอไลต์ เมื่อปริมาณของเม็ดซีโอไลต์คงที่ แต่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้โอกาสที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงตาม อธิบายว่าอาจเกิดจากการดูดซับของโลหะหนักของซีโอไลต์แบบเม็ด ซึ่งพบว่าในระยะแรกโลหะหนักจะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณรูพรุน ซึ่งอยู่บริเวณผิวของซีโอไลต์ แต่เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โลหะนี้จะจับอยู่แค่บริเวณผิวของซีโอไลต์เท่านั้น โดยมีลักษณะการจับตัวเป็นชั้นแผ่นฟิล์ม ซึ่งจับตัวไม่แน่น หรือไม่แข็งแรงมากนักดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะหลุดออกได้ง่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ต่ำๆ เม็ดซีโอไลต์จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่า (Biskup and Subotic, 1998)

แต่จากค่ามาตรฐานการควบคุมระบายนํ้าทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมดังกล่าว พบว่าสังกะสีมีค่ามาตรฐานได้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้หากเลือกที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงที่สุด แต่ที่ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้นสังกะสียังไม่เกินมาตรฐาน ซึ่งไม่จำเป็นต้องผ่านการบำบัด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดคือความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 6 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมคือ สังกะสีร้อยละ 99.00 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 98.71 ± 0.00 โครเมียมร้อยละ 96.89 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 96.23 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 93.66 ± 0.00 ดังนั้นจึงนำความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปใช้ในการทดลองหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อไป



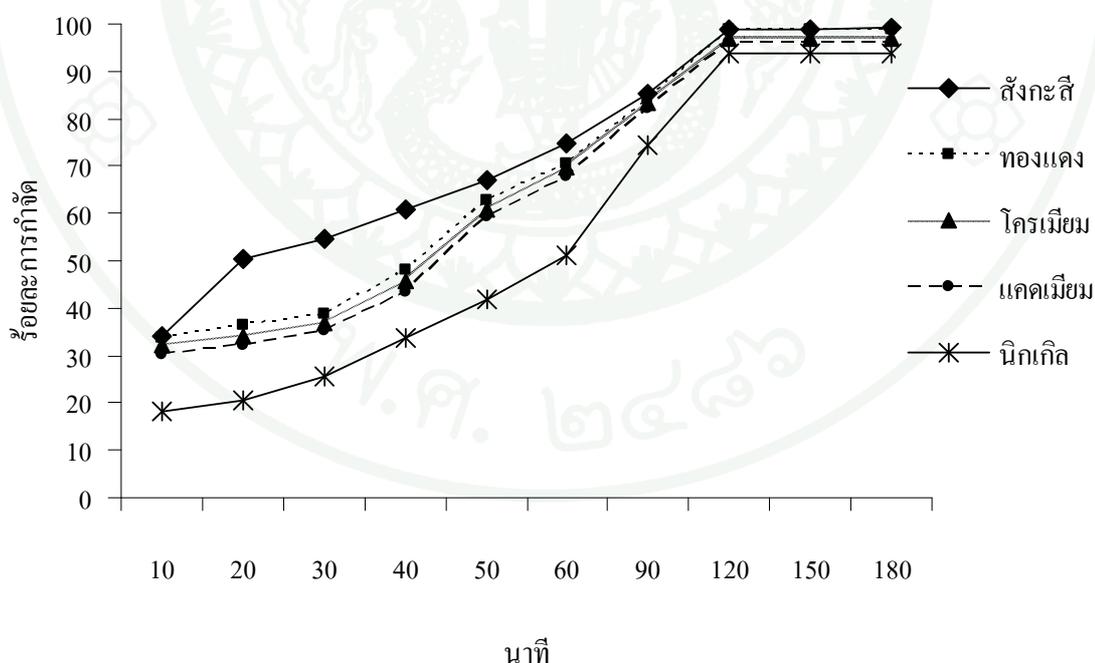
ภาพที่ 19 ผลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์

2.3 ผลของระยะเวลาสัมผัส (Contact Time) ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคลเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

จากผลการทดสอบปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมที่สุดคือค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดปริมาณ 1 ± 0.05 กรัม นำไปกวนบนเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ คือ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักส่วนใหญ่ คือ ทองแดง แคลเมียม และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 10-120 นาที นั้นมีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัส 120-180 นาที นั้นไม่มีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ดังนั้นช่วงระยะเวลาสัมผัสที่ 120 นาทีจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัด ทองแดง แคลเมียม และนิกเกิลเหมาะสมที่สุด คือ ร้อยละ 98.71 ± 0.00 ร้อยละ 96.23 ± 0.01 และร้อยละ 93.66 ± 0.00 ตามลำดับ ช่วงเวลา 180 นาที นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีและโครเมียมสูงที่สุดคือร้อยละ 99.03 ± 0.01 และร้อยละ 96.99 ± 0.01 ตามลำดับ ส่วนเวลาที่ 10 นาทีนั้นจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทุกชนิดต่ำ

ที่สุดคือ สังกะสีร้อยละ 34.12 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 33.90 ± 0.01 โครเมียมร้อยละ 32.31 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 30.32 ± 0.02 และนิกเกิลร้อยละ 18.37 ± 0.01

จากภาพที่ 20 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์จากชานอ้อยแบบเม็ด จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นเวลาสัมผัส (10-120 นาที) เนื่องจากในน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงเมื่อเทียบกับในเม็ดซีโอไลต์ จึงส่งผลให้อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียมกับไอออนของโลหะหนักสูงในช่วงแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจะค่อยๆ ลดลง แต่ภายในเม็ดซีโอไลต์นั้นความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มอิ่มตัวและเข้าสู่สมดุลในที่สุด ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียมกับไอออนของโลหะหนักเข้าสู่สมดุล ลักษณะกราฟที่ได้จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง (120-180 นาที) ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่ (ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล) จะเข้าสู่จุดสมดุลที่เวลา 120 นาที ดังนั้นจึงเลือกเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือ 120 นาที ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมคือ สังกะสีร้อยละ 99.00 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 98.71 ± 0.00 โครเมียมร้อยละ 96.89 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 96.23 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 93.66 ± 0.00 จึงนำระยะเวลาสัมผัสคือ 120 นาที ไปศึกษาหามวลของซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อไป

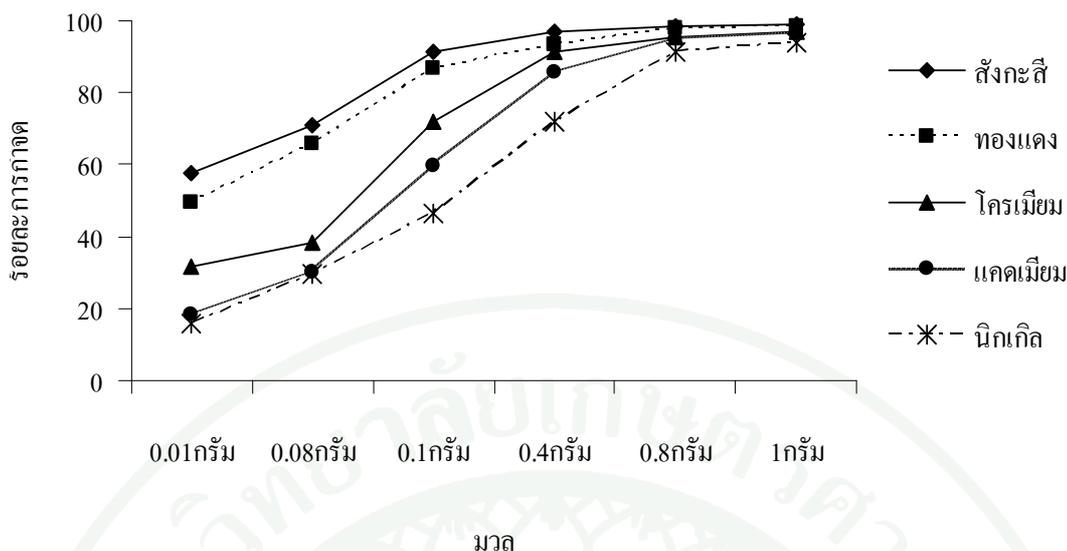


ภาพที่ 20 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

2.4 ผลของมวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล)

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่ดีที่สุดคือ 5 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 120 นาที จากนั้นจึงนำสถานะเหล่านี้ไปศึกษาผลของซีโอไลต์ที่เหมาะสม โดยผันแปรมวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดที่ 0.01, 0.04, 0.08, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 กรัม ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 7 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดต่างกันมีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ที่มวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด 1 ± 0.05 กรัม มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมสูงที่สุดคือ สังกะสีร้อยละ 99.00 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 98.71 ± 0.00 โครเมียมร้อยละ 96.89 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 96.23 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 93.66 ± 0.00 และที่มวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด 0.01 ± 0.05 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมต่ำที่สุดคือ สังกะสีร้อยละ 57.45 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 49.40 ± 0.02 โครเมียมร้อยละ 31.48 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 18.42 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 15.83 ± 0.01

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมวลซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 0.08 เป็น 0.1 เป็น 0.4 เป็น 0.8 และ 1 กรัม ตามลำดับนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับดังภาพที่ 21 ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของเม็ดซีโอไลต์ ซึ่งจะเห็นว่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ผสมคงที่ แต่ปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นตาม



ภาพที่ 21 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่มวลซีโอไลต์ต่างๆ

จากผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือที่ความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด 1 ± 0.05 กรัม ระยะเวลาสัมผัสที่ 120 นาที ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมคือ สังกะสีร้อยละ 99.00 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 98.71 ± 0.00 โคโรเมียมร้อยละ 96.89 ± 0.01 แคดเมียมร้อยละ 96.23 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 93.66 ± 0.00 กล่าวได้ว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ จากผลการทดลองสามารถอธิบายว่าไอออนของโลหะหนัก (M^{2+}) จะถูกดูดซับโดยซีโอไลต์แบบแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งองค์ประกอบของซีโอไลต์จะมีประจุ Na^+ สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนัก (M^{2+}) ซึ่งมีประจุ +2 ได้ ดังปฏิกิริยา



ตารางที่ 5 แสดงผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ย \pm SD)

ความเข้มข้น (มก/ล)	ค่าความเป็น	ค่าความเป็น	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ร้อยละการกำจัด)				
	กรด-ด่าง ก่อนดูดซับ	กรด-ด่าง หลังดูดซับ	สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	แคดเมียม	นิกเกิล
3	5.2	6.7	99.88 \pm 0.03 ^a	99.23 \pm 0.03 ^a	98.91 \pm 0.05 ^a	97.01 \pm 0.01 ^a	94.18 \pm 0.03 ^a
6	5.1	6.5	99.00 \pm 0.01 ^b	98.71 \pm 0.00 ^b	96.89 \pm 0.00 ^b	96.23 \pm 0.01 ^b	93.66 \pm 0.00 ^b
10	5.1	5.7	78.84 \pm 0.01 ^c	76.70 \pm 0.02 ^c	76.65 \pm 0.00 ^c	74.83 \pm 0.05 ^c	61.83 \pm 0.02 ^c
20	5.3	5.8	75.36 \pm 0.01 ^d	71.64 \pm 0.02 ^d	70.42 \pm 0.01 ^d	67.05 \pm 0.01 ^d	61.08 \pm 0.01 ^d

หมายเหตุ a b c d ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 6 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ย \pm SD)

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที)	ค่าความเป็น กรด-ด่าง ก่อนดูดซับ	ค่าความเป็น กรด-ด่าง หลังดูดซับ	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ร้อยละการกำจัด)				
			สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	แคดเมียม	นิกเกิล
10	5.1	5.3	34.12 \pm 0.01 ^a	33.90 \pm 0.01 ^a	32.31 \pm 0.01 ^a	30.32 \pm 0.02 ^a	18.37 \pm 0.01 ^a
20	5.1	5.5	50.38 \pm 0.01 ^b	36.45 \pm 0.01 ^b	33.94 \pm 0.01 ^b	32.11 \pm 0.01 ^b	20.60 \pm 0.01 ^b
30	5.1	5.5	54.70 \pm 0.00 ^c	38.67 \pm 0.01 ^c	36.65 \pm 0.00 ^c	35.32 \pm 0.01 ^c	25.54 \pm 0.01 ^c
40	5.1	5.6	60.98 \pm 0.02 ^d	47.93 \pm 0.00 ^d	45.77 \pm 0.01 ^d	43.40 \pm 0.01 ^d	33.75 \pm 0.01 ^d
50	5.1	5.8	67.22 \pm 0.00 ^e	62.89 \pm 0.01 ^e	60.91 \pm 0.01 ^e	59.36 \pm 0.01 ^e	41.67 \pm 0.01 ^e
60	5.1	6.0	74.69 \pm 0.01 ^f	70.50 \pm 0.01 ^f	69.68 \pm 0.01 ^f	67.71 \pm 0.01 ^f	51.31 \pm 0.01 ^f
90	5.1	6.3	85.36 \pm 0.01 ^g	84.09 \pm 0.01 ^g	83.18 \pm 0.01 ^g	82.12 \pm 0.00 ^g	74.50 \pm 0.02 ^g
120	5.1	6.5	99.00 \pm 0.01 ^h	98.71 \pm 0.00 ^h	96.89 \pm 0.00 ^h	96.23 \pm 0.01 ^h	93.66 \pm 0.00 ^h
150	5.1	6.6	99.02 \pm 0.01 ^{hi}	98.71 \pm 0.00 ^h	96.90 \pm 0.01 ^h	96.23 \pm 0.00 ^h	93.66 \pm 0.01 ^h
180	5.1	6.5	99.03 \pm 0.01 ⁱ	98.72 \pm 0.00 ^h	96.99 \pm 0.01 ⁱ	96.24 \pm 0.01 ^h	93.66 \pm 0.01 ^h

หมายเหตุ a b c d e f g h i ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0$)

ตารางที่ 7 ผลของมวลซีโอโลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ย ± SD)

มวลซีโอโลต์ (กรัม)	ค่าความเป็น กรด-ด่าง ก่อนดูดซับ	ค่าความเป็น กรด-ด่าง หลังดูดซับ	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ร้อยละการกำจัด)				
			สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	แคดเมียม	นิกเกิล
0.01	5.2	5.4	57.45±0.01 ^a	49.40±0.01 ^a	31.48±0.00 ^a	18.42±0.02 ^a	15.83±0.01 ^a
0.08	5.2	5.6	70.82±0.01 ^b	66.03±0.01 ^b	38.14±0.01 ^b	30.21±0.01 ^b	32.62±0.01 ^b
0.1	5.2	5.6	91.25±0.02 ^c	86.82±0.02 ^c	71.84±0.01 ^c	59.52±0.02 ^c	46.65±0.02 ^c
0.4	5.2	5.7	96.69±0.01 ^d	93.47±0.01 ^d	91.20±0.01 ^d	85.94±0.01 ^d	71.82±0.01 ^d
0.8	5.2	6.2	98.36±0.01 ^e	97.92±0.01 ^e	95.20±0.02 ^e	94.79±0.01 ^e	90.94±0.02 ^e
1	5.1	6.5	99.00±0.01 ^b	98.71±0.00 ^b	96.89±0.00 ^b	96.23±0.01 ^b	93.66±0.00 ^b

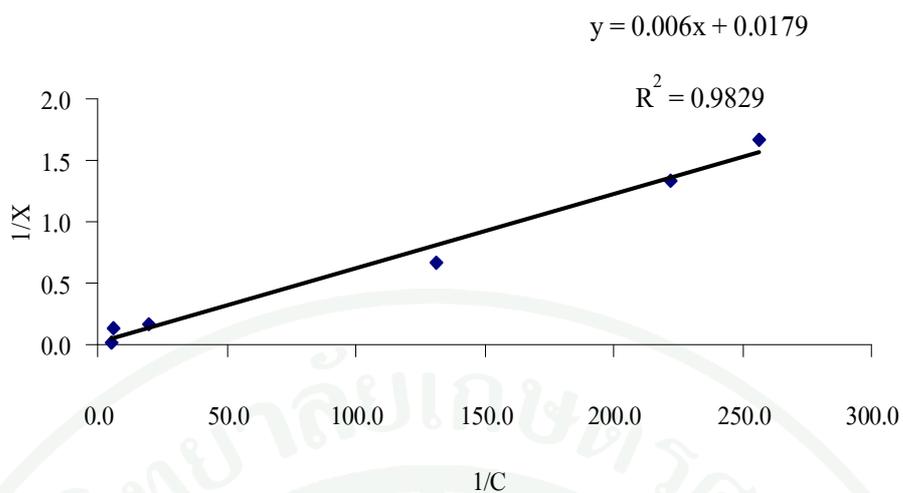
หมายเหตุ a b c d e f ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. ผลการศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผงและแบบเม็ด ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงและแบบเม็ด ด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดติดผิวโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดิช

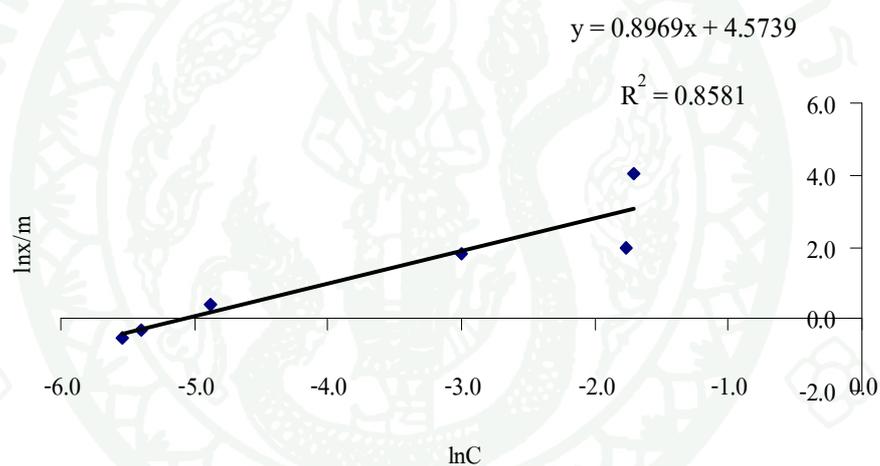
ในการทดลองศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวนี้ เป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) โดยเปรียบเทียบซีโอไลต์ 4 ชนิด คือซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ในน้ำเสียโลหะหนักสังเคราะห์แบบผสม (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ที่ความเข้มข้นอย่างละ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ที่ปริมาณซีโอไลต์ 0.01, 0.08, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัสที่ 120 นาที จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์

3.1 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง

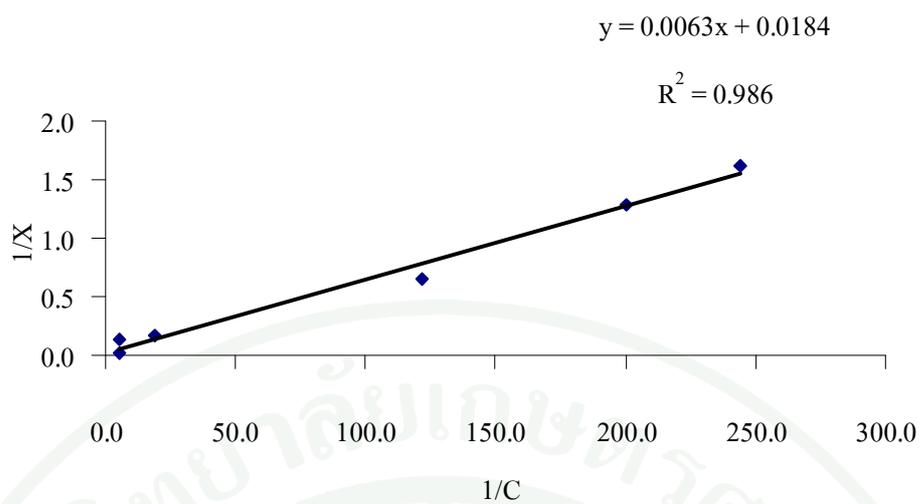
ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง โดยวิเคราะห์ความสามารถในการดูดติดผิวตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิว ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ไอโซเทอมการดูดติดผิว 2 ไอโซเทอม ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดิช โดยการวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์จะทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C$ และ $1/(x/m)$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดิชทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C$ และ $\ln x/m$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ดังภาพที่ 22-31



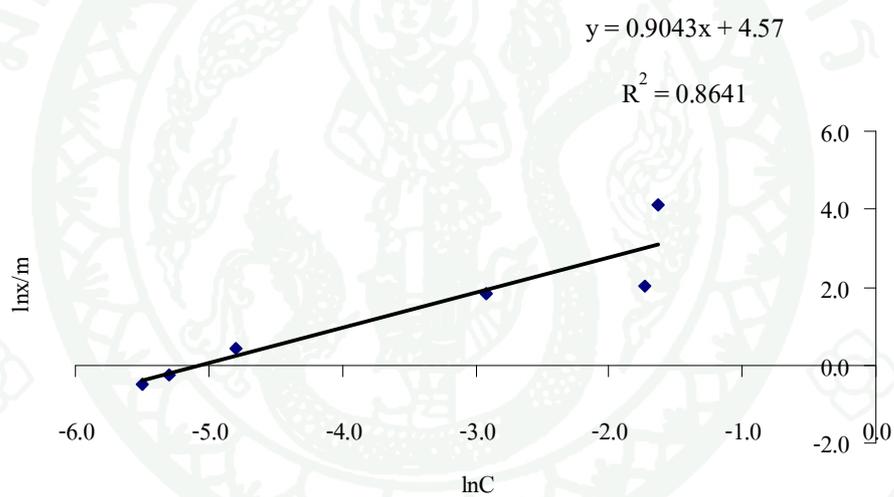
ภาพที่ 22 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



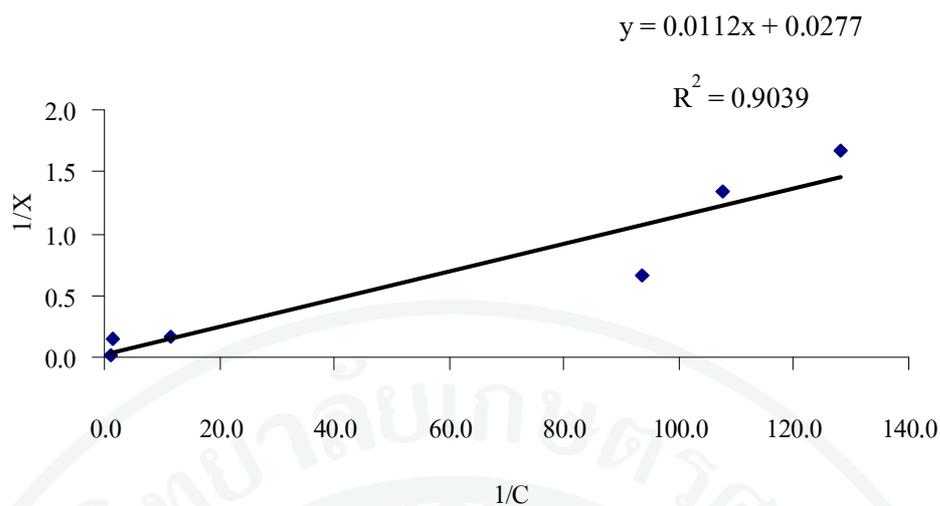
ภาพที่ 23 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



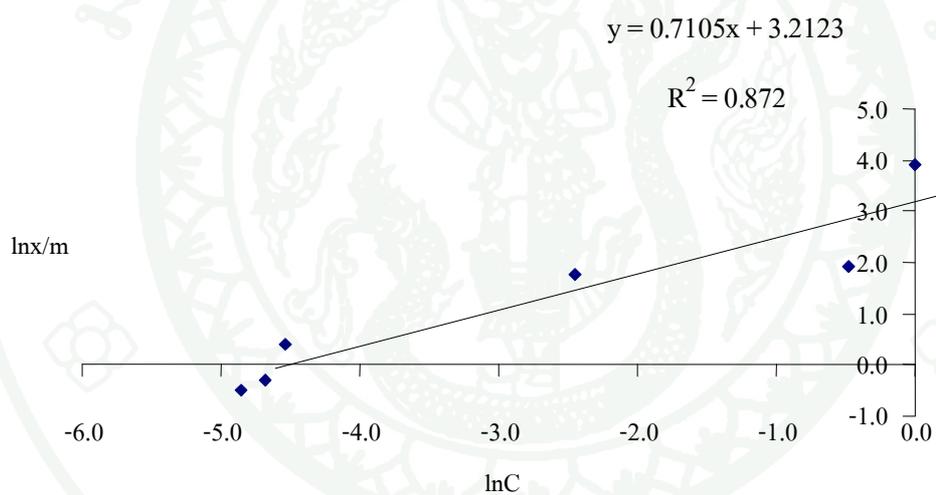
ภาพที่ 24 ไอโซเทอมการดูดซับผิวทองแดงแบบแลงเมียร์ ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



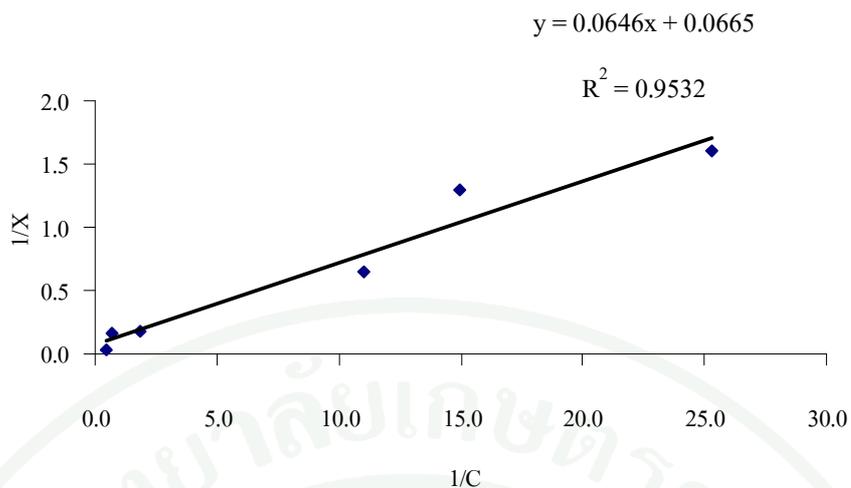
ภาพที่ 25 ไอโซเทอมการดูดซับผิวทองแดงแบบฟรุนดลิช ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



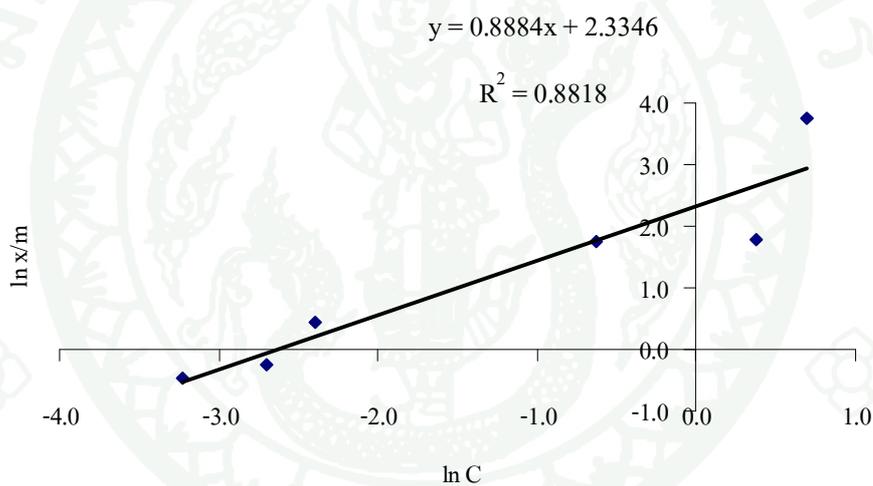
ภาพที่ 26 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



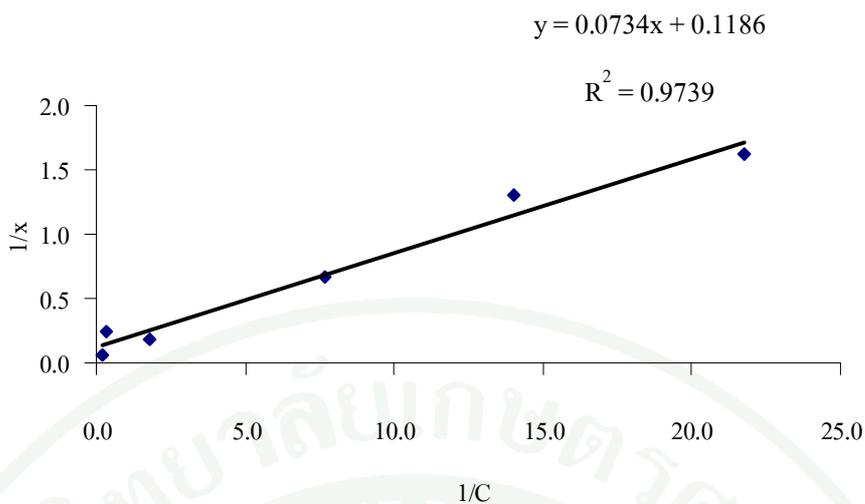
ภาพที่ 27 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



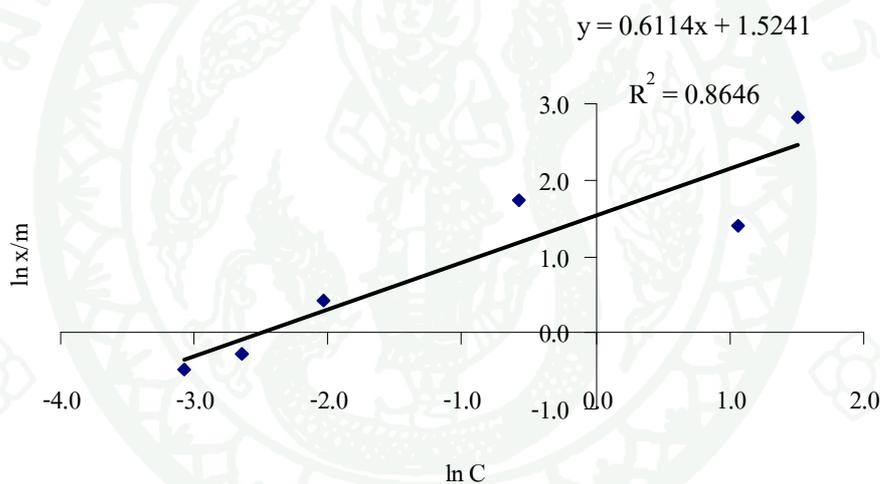
ภาพที่ 28 ไอโซเทอมการดูดซับผิวแคดเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



ภาพที่ 29 ไอโซเทอมการดูดซับผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



ภาพที่ 30 ไอโซเทอมการดูดติดผิววิกฤตแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง



ภาพที่ 31 ไอโซเทอมการดูดติดผิววิกฤตแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง

จากภาพที่ 22-31 นำไปคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ตั้งสมการที่ 1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิชตั้งสมการที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และฟรุนดิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง

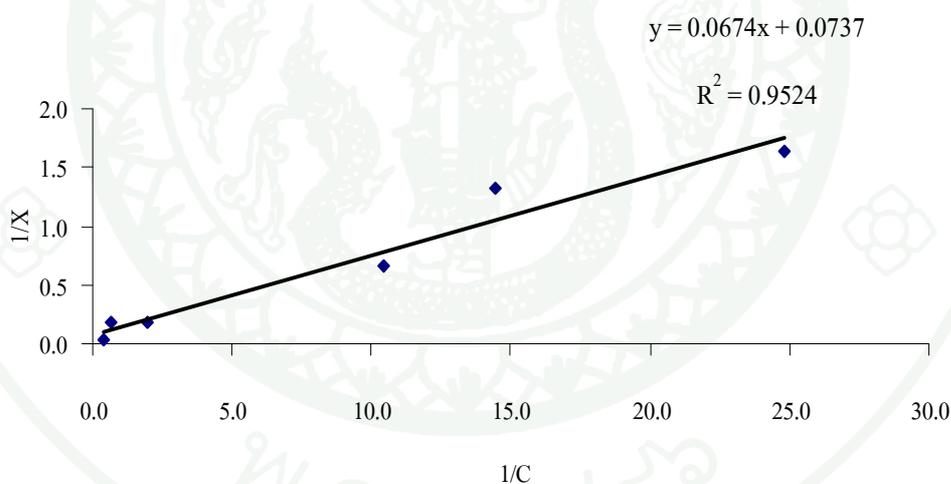
โลหะหนัก	ชนิดของสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว	ค่าคงที่	ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
สังกะสี	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0179$ $b = 2.9833$	52.91	0.9829
	ฟรุนดิช	$K = 96.92$ $1/n = 0.8969$	483.43	0.8581
ทองแดง	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0184$ $b = 2.9206$	51.41	0.9860
	ฟรุนดิช	$K = 96.54$ $1/n = 0.9043$	487.97	0.8641
โครเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0277$ $b = 2.4732$	33.82	0.9039
	ฟรุนดิช	$K = 24.84$ $1/n = 0.7105$	88.72	0.8720
แคดเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0665$ $b = 1.0294$	12.94	0.9532
	ฟรุนดิช	$K = 10.3253$ $1/n = 0.8884$	50.70	0.8818
นิกเกิล	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.1186$ $b = 1.6158$	7.64	0.9739
	ฟรุนดิช	$K = 4.5910$ $1/n = 0.6114$	13.73	0.8646

จากตารางที่ 8 พบว่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และ นิกเกิล) ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผงเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ ดังนั้น

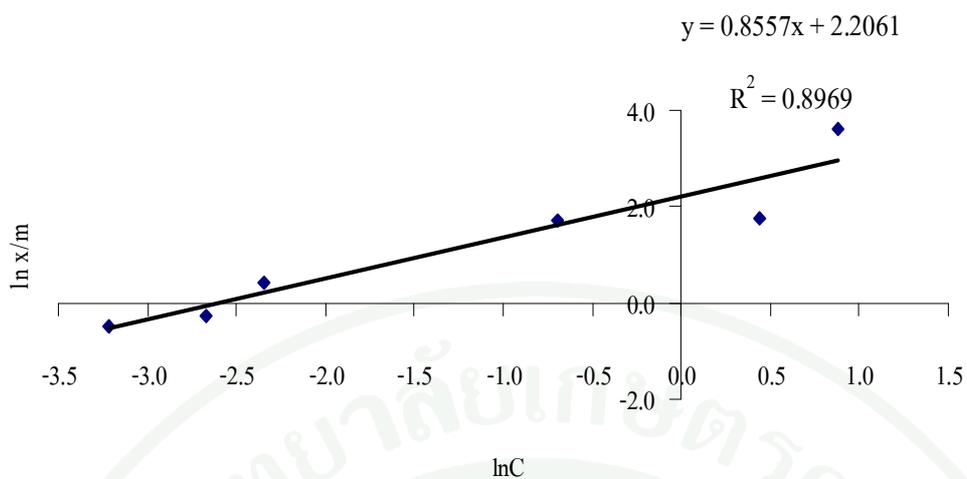
ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง 1 กรัม สามารถดูดติดผิวของสังกะสีสูงสุดได้ 52.91 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของทองแดงสูงสุดได้ 51.41 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของโครเมียมสูงสุดได้ 33.82 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสุดได้ 12.94 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของนิกเกิลสูงสุดได้ 7.64 มิลลิกรัม

3.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด

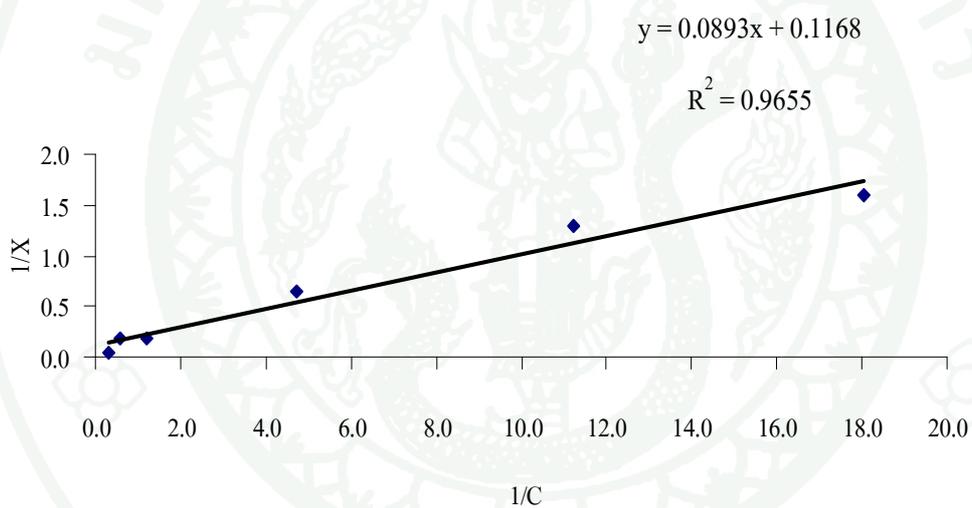
ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด โดยนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการดูดติดผิวตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิว ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ไอโซเทอมการดูดติดผิว 2 ไอโซเทอม ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช โดยการวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์จะทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C$ และ $1/(x/m)$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช ทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C$ และ $\ln x/m$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ดังภาพที่ 32-41



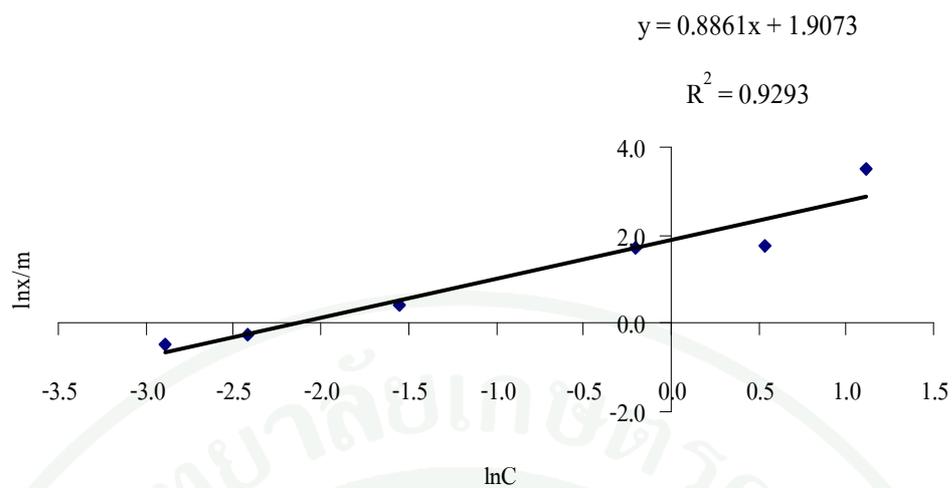
ภาพที่ 32 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



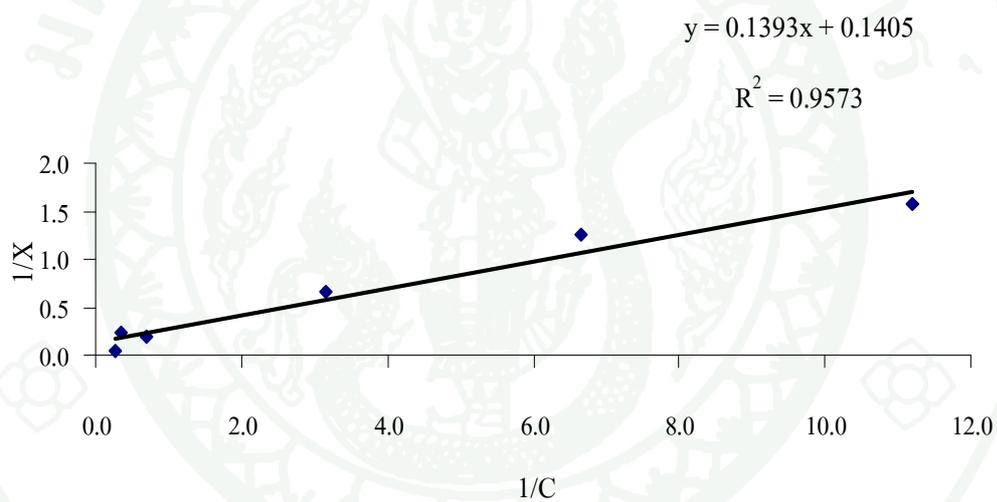
ภาพที่ 33 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบพุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



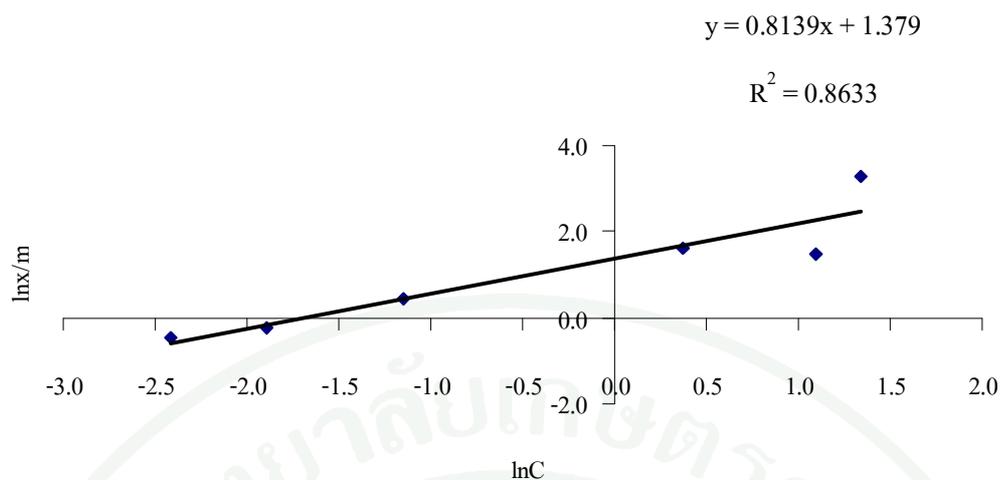
ภาพที่ 34 ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



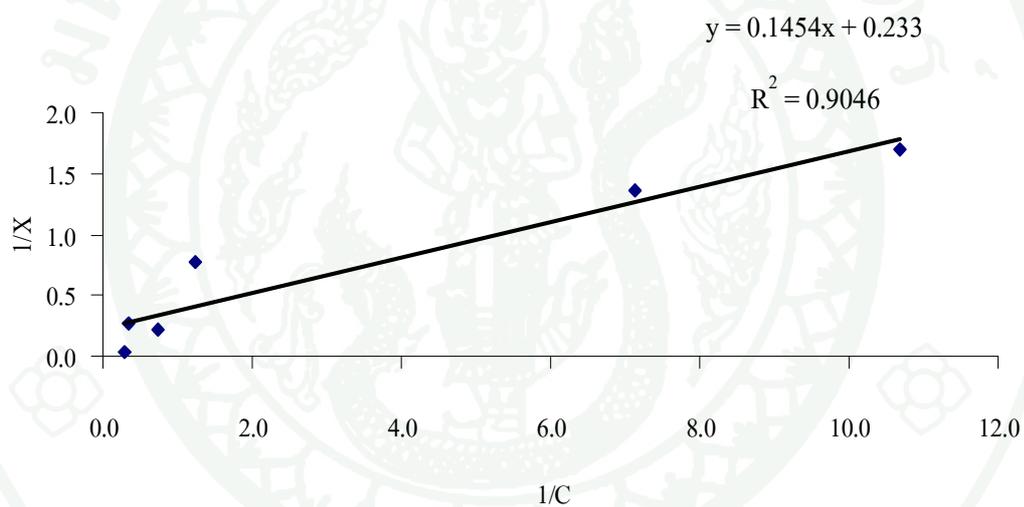
ภาพที่ 35 ไอโซเทอมการดูดซับผิวทองแดงแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



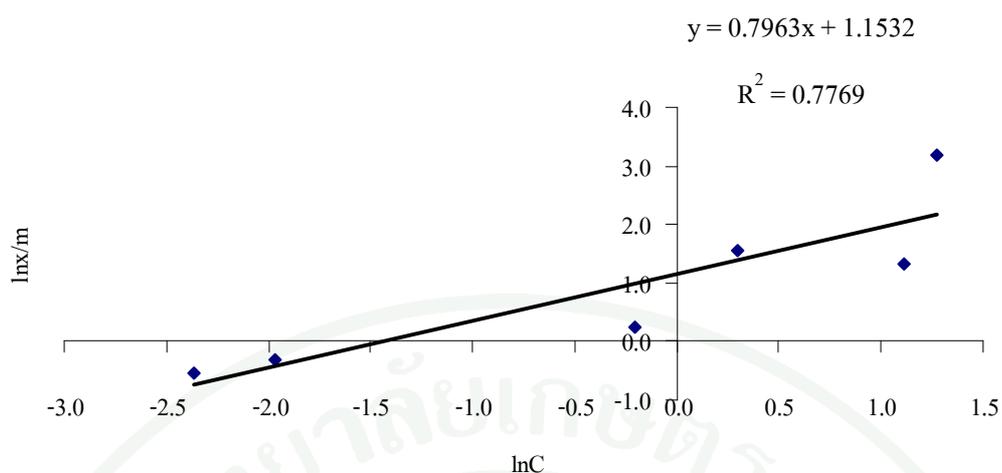
ภาพที่ 36 ไอโซเทอมการดูดซับผิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



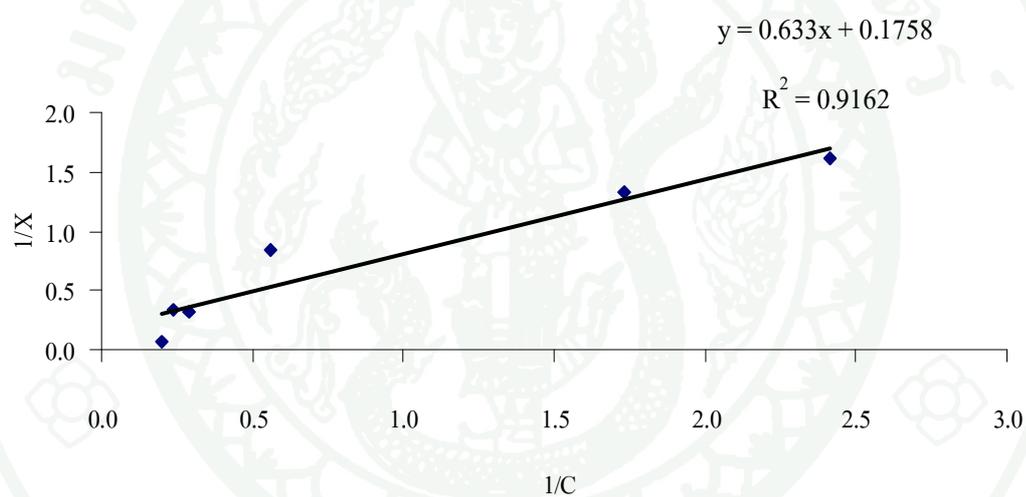
ภาพที่ 37 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



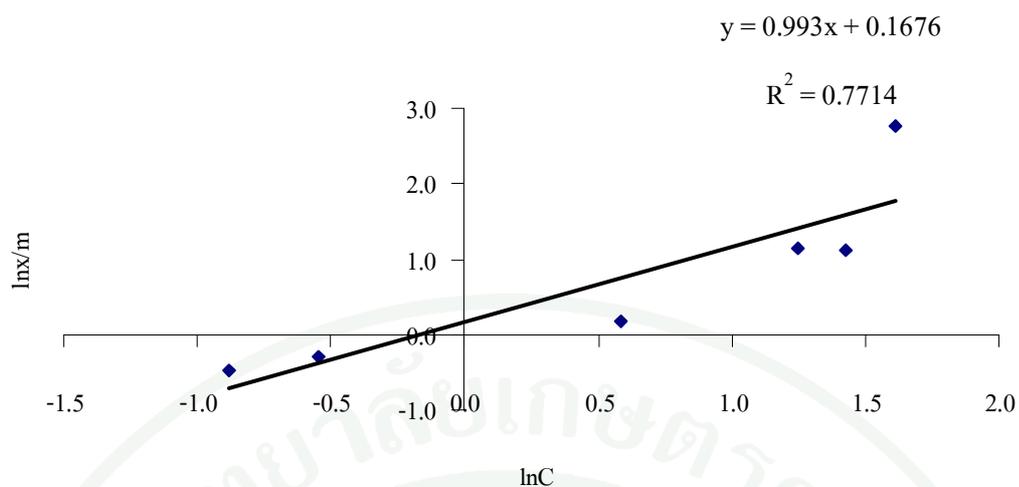
ภาพที่ 38 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



ภาพที่ 39 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



ภาพที่ 40 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิลแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด



ภาพที่ 41 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิดแบบฟรุนดลิช ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด

จากภาพที่ 32-41 นำไปคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ดังสมการที่ 1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิชดังสมการที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดซับผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด

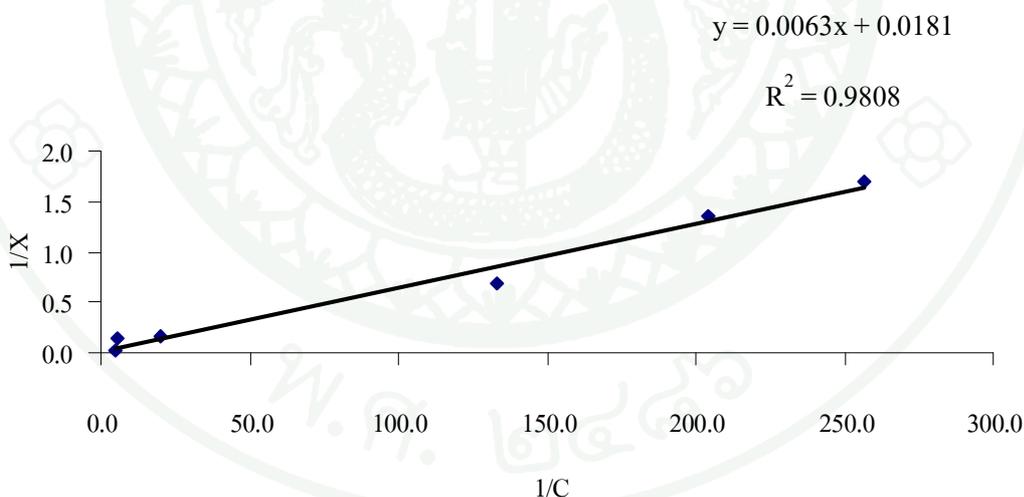
โลหะหนัก	ชนิดของสมการไอโซเทอมการดูดซับผิว	ค่าคงที่	ความสามารถในการดูดซับผิวสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
สังกะสี	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0737$ $b = 1.0935$	11.78	0.9524
	ฟรุนดลิช	$K = 9.0802$ $1/n = 0.8557$	42.07	0.8969
ทองแดง	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.1168$ $b = 1.3080$	7.59	0.9655
	ฟรุนดลิช	$K = 6.7349$ $1/n = 0.8861$	32.95	0.9293
โครเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.1405$ $b = 1.0086$	6.11	0.9573
	ฟรุนดลิช	$K = 3.9709$ $1/n = 0.8139$	17.07	0.8633
แคดเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.233$ $b = 1.6025$	3.89	0.9046
	ฟรุนดลิช	$K = 3.1683$ $1/n = 0.7963$	13.20	0.7769
นิกเกิล	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.1758$ $b = 0.2777$	3.56	0.9162
	ฟรุนดลิช	$K = 1.1825$ $1/n = 0.993$	7.01	0.7714

จากตารางที่ 9 พบว่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับผิวของแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าความสามารถในการดูดซับผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และ นิกเกิล) ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ดเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับผิวของแลงเมียร์ ดังนั้น

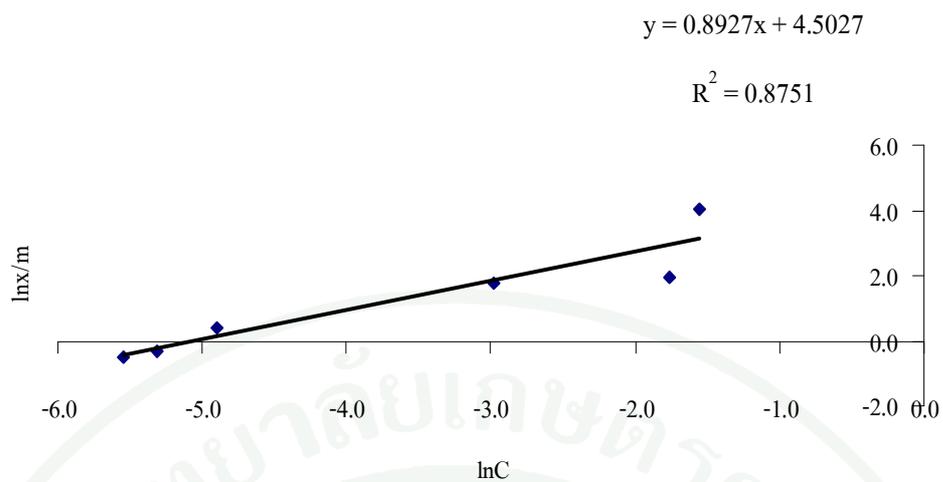
ซีโอดีเซ็งการค้ำแบบเม็ด 1 กรัม สามารถดูดติดผิวของสังกะสีสูงสุดได้ 11.78 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของทองแดงสูงสุดได้ 7.59 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของโครเมียมสูงสุดได้ 6.11 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสุดได้ 3.89 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของนิกเกิลสูงสุดได้ 3.56 มิลลิกรัม

3.3 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอดีเซ็งการค้ำจากเศษชานอ้อยแบบผง

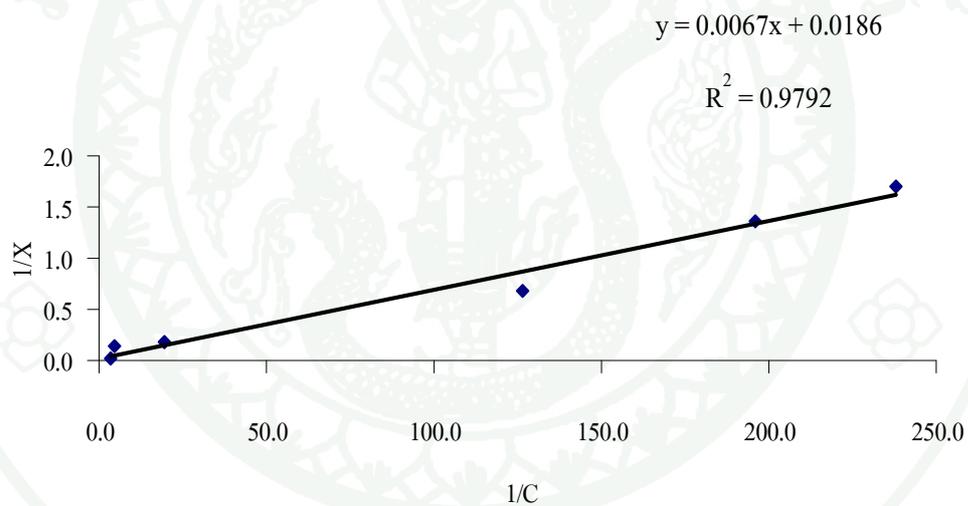
ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก(สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ของซีโอดีเซ็งการค้ำจากเศษชานอ้อยแบบผง โดยนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการดูดติดผิว ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิว ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ไอโซเทอมการดูดติดผิว 2 ไอโซเทอม ได้แก่ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช โดยการวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์จะทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C$ และ $1/(x/m)$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช ทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C$ และ $\ln x/m$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ดังภาพที่ 42-51



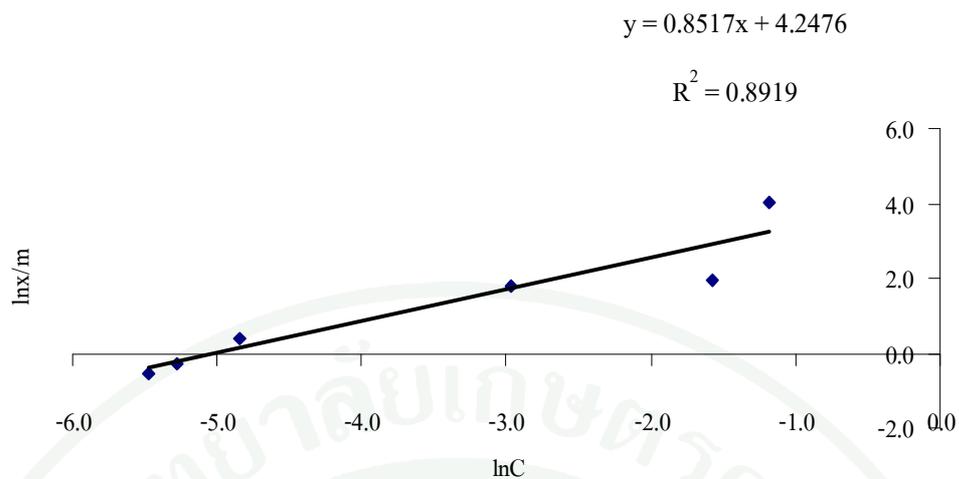
ภาพที่ 42 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอดีเซ็งการค้ำจากเศษชานอ้อยแบบผง



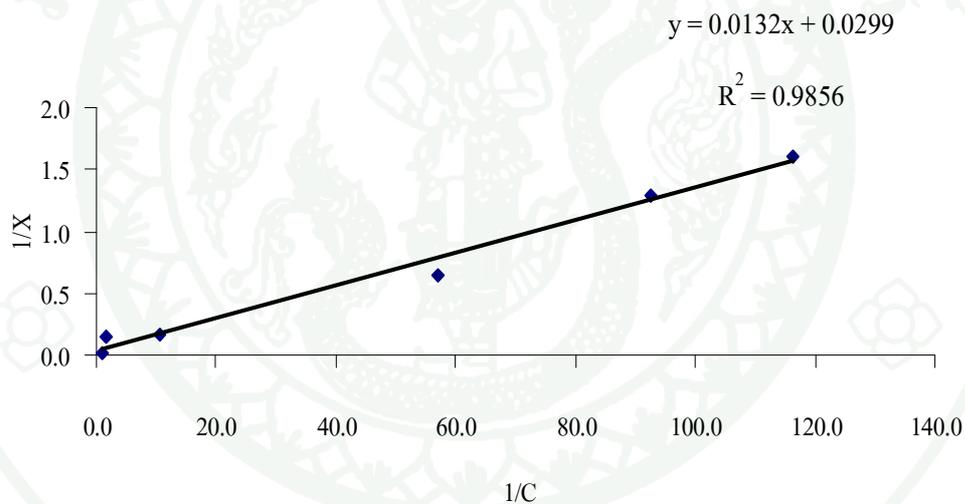
ภาพที่ 43 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



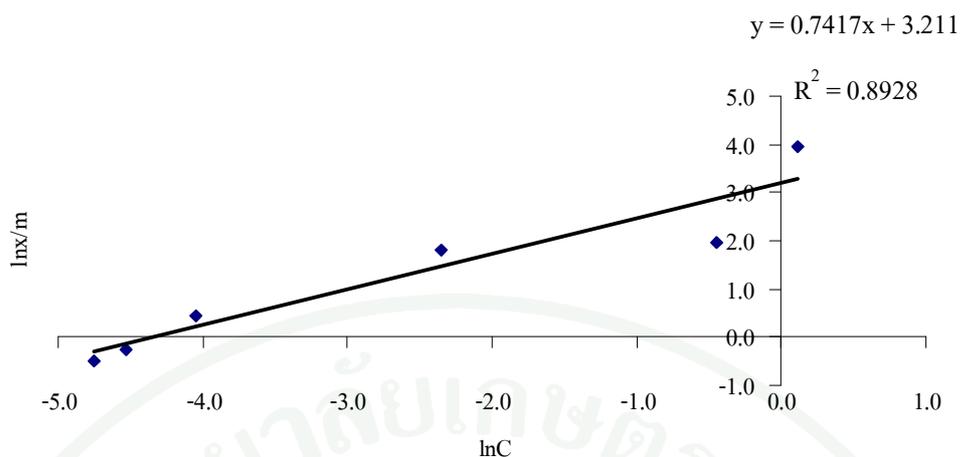
ภาพที่ 44 ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



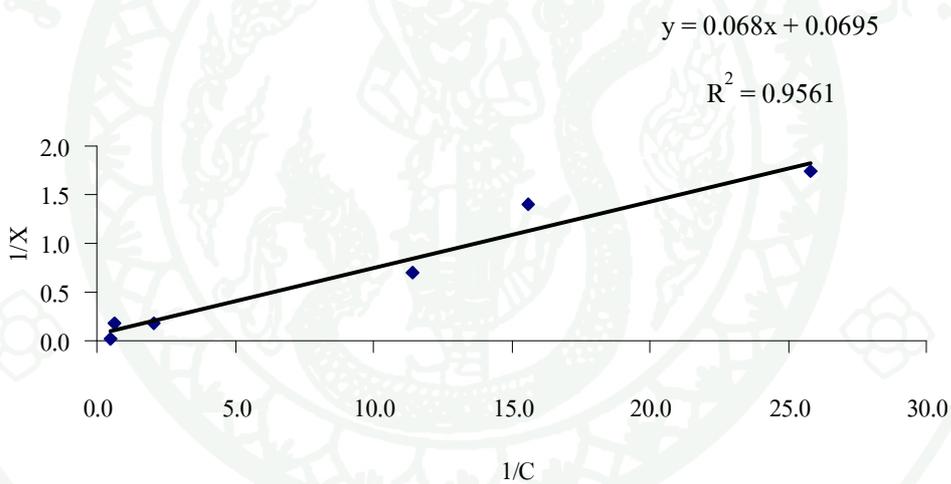
ภาพที่ 45 ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบฟรอนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



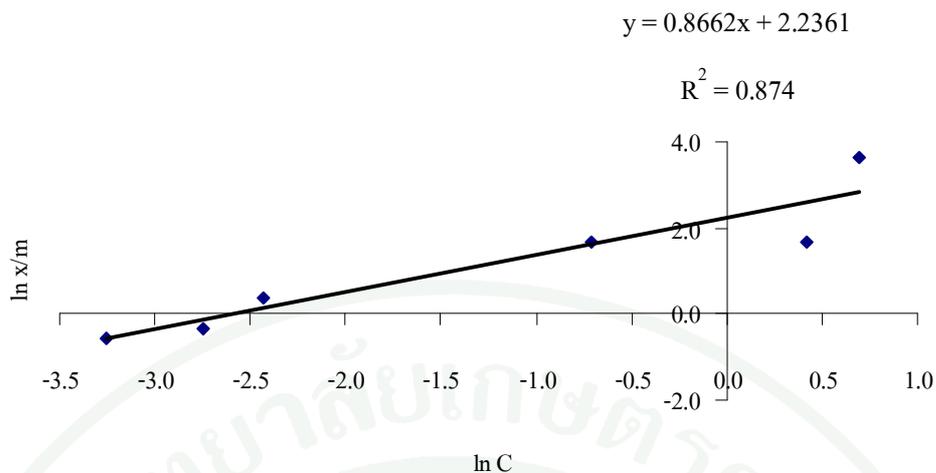
ภาพที่ 46 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



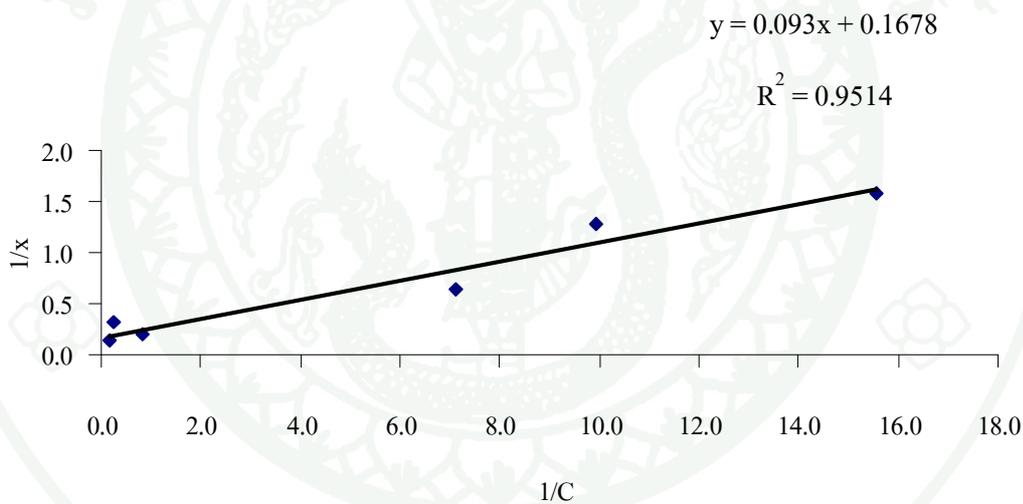
ภาพที่ 47 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



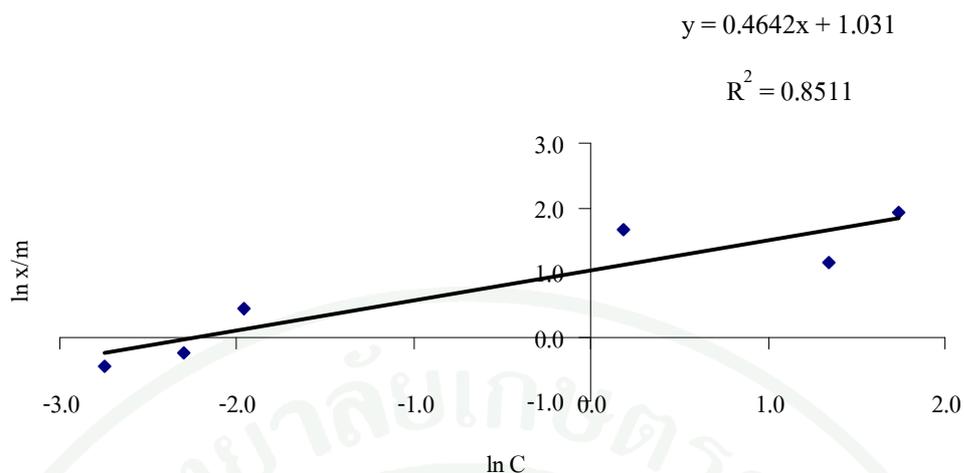
ภาพที่ 48 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคลเซียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



ภาพที่ 49 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



ภาพที่ 50 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิลแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง



ภาพที่ 51 ไอโซเทอมการดูดซับของนิกเกิลแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง

จากภาพที่ 42-51 นำไปคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ดังสมการที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดิชดังสมการที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดซับโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอโซเทอมการดูดซับผิวของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดซับผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง

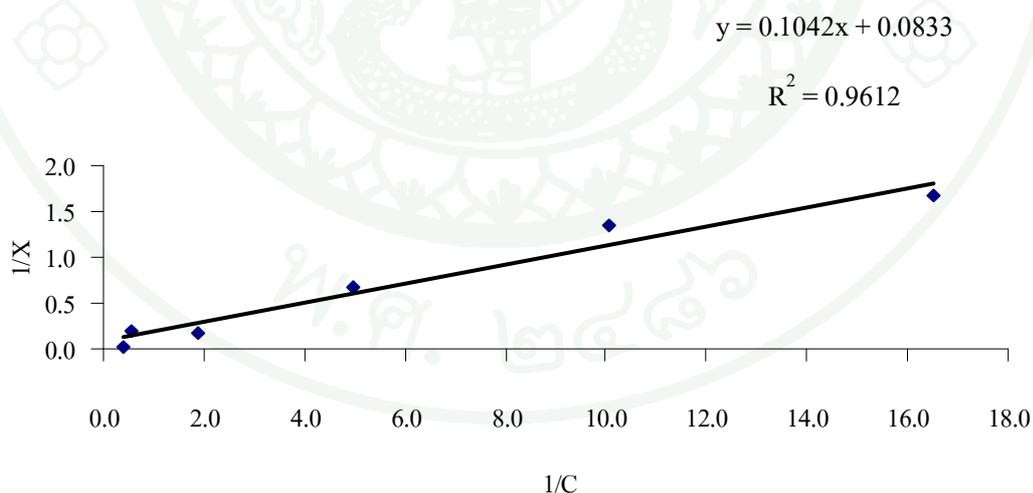
โลหะหนัก	ชนิดของสมการไอโซเทอมการดูดซับผิว	ค่าคงที่	ความสามารถในการดูดซับผิวสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
สังกะสี	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0181$ $b = 2.8730$	52.22	0.9808
	ฟรุนดลิช	$K = 90.2605$ $1/n = 0.8927$	446.84	0.8751
ทองแดง	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0186$ $b = 2.7761$	50.72	0.9792
	ฟรุนดลิช	$K = 69.9374$ $1/n = 0.8517$	321.71	0.8919
โครเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0299$ $b = 0.2265$	31.15	0.9856
	ฟรุนดลิช	$K = 24.8039$ $1/n = 0.7417$	93.69	0.8928
แคดเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.0695$ $b = 1.0221$	12.37	0.9561
	ฟรุนดลิช	$K = 9.3568$ $1/n = 0.8662$	44.21	0.875
นิกเกิล	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.1678$ $b = 1.8043$	5.46	0.9514
	ฟรุนดลิช	$K = 2.8039$ $1/n = 0.4642$	6.44	0.8511

จากตารางที่ 10 พบว่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับผิวของแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าความสามารถในการดูดซับผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับผิวของ

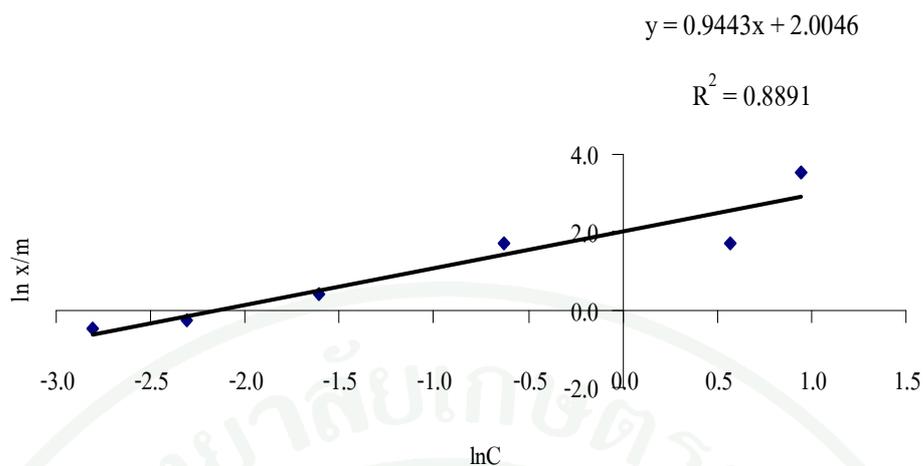
แลงเมียร์ ดังนั้นซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง 1 กรัม สามารถดูดติดผิวของสังกะสี สูงสุดได้ 52.22 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของทองแดงสูงสุดได้ 50.72 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของโครเมียม สูงสุดได้ 31.15 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสุดได้ 12.37 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของนิกเกิล สูงสุดได้ 5.46 มิลลิกรัม

3.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

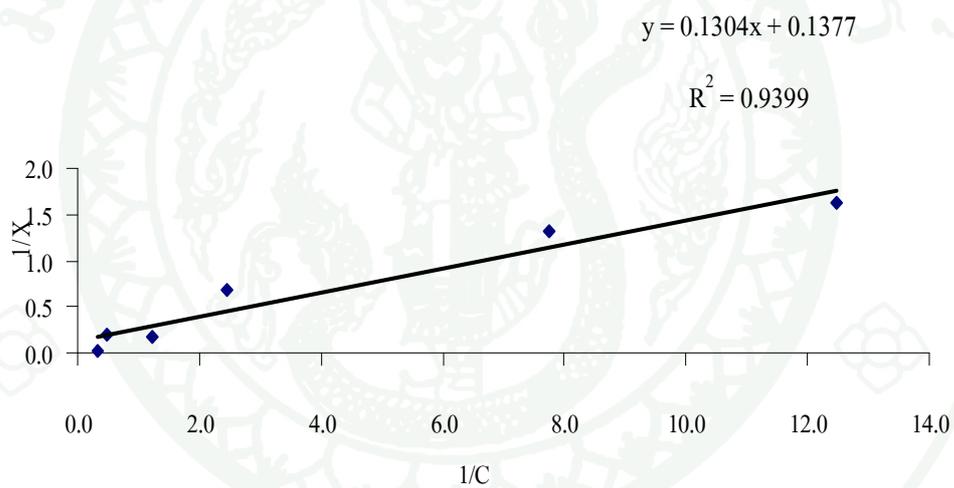
ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด โดยนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการดูดติดผิว ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิว ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ ไอโซเทอมการดูดติดผิว 2 ไอโซเทอม ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ และไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช โดยการวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์จะทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C$ และ $1/(x/m)$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช ทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C$ และ $\ln x/m$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ดังภาพที่ 52-61



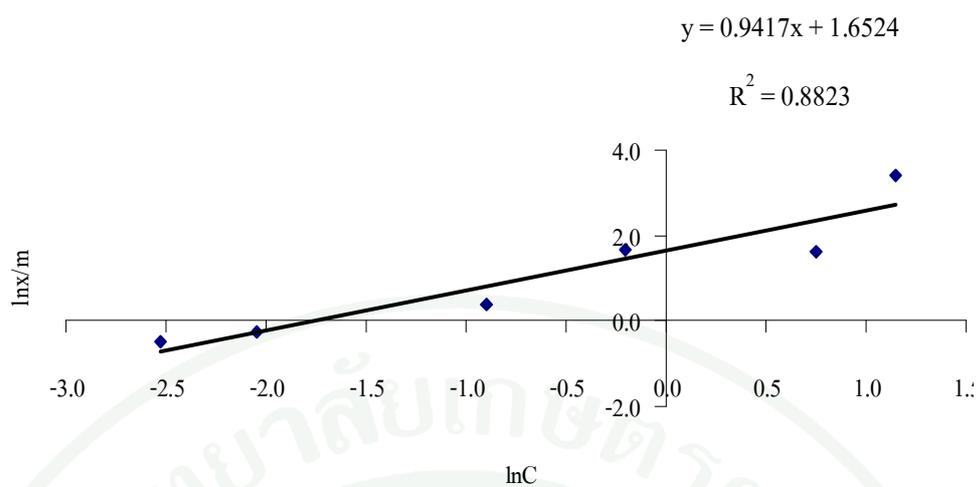
ภาพที่ 52 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



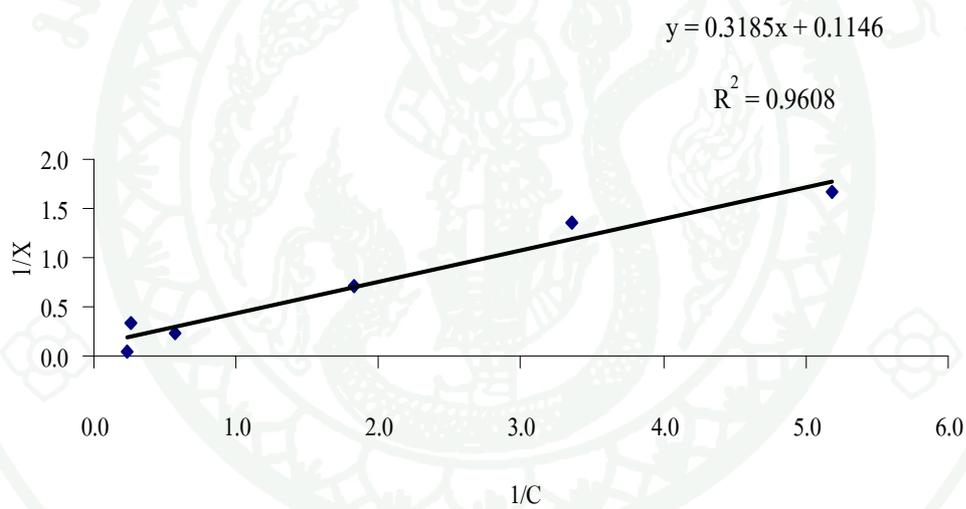
ภาพที่ 53 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรอนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



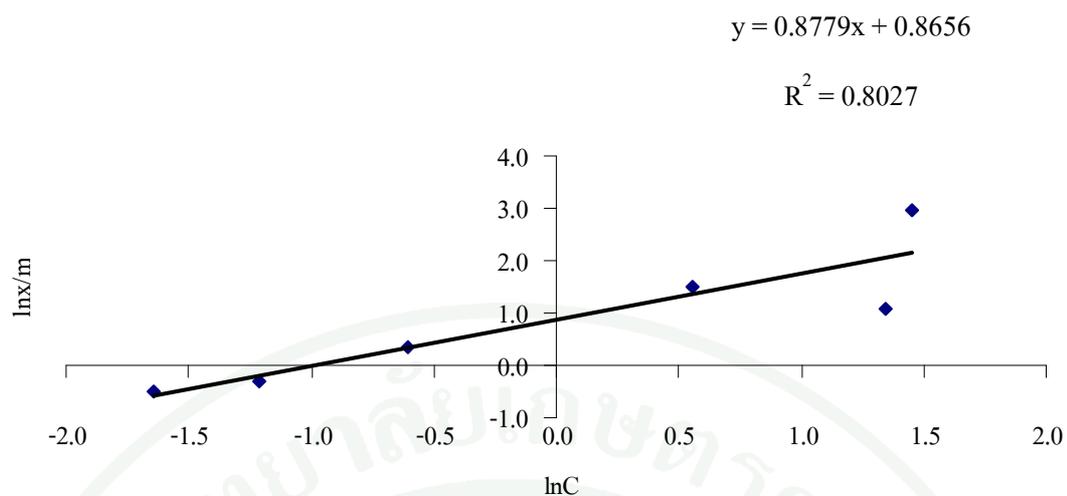
ภาพที่ 54 ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



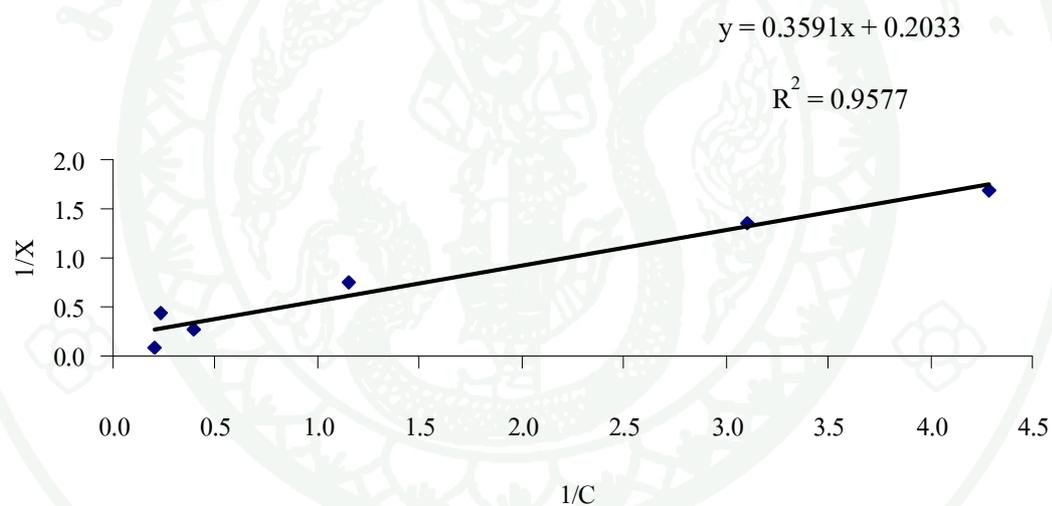
ภาพที่ 55 ไอโซเทอมการดูดติดผิวทองแดงแบบฟรอนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



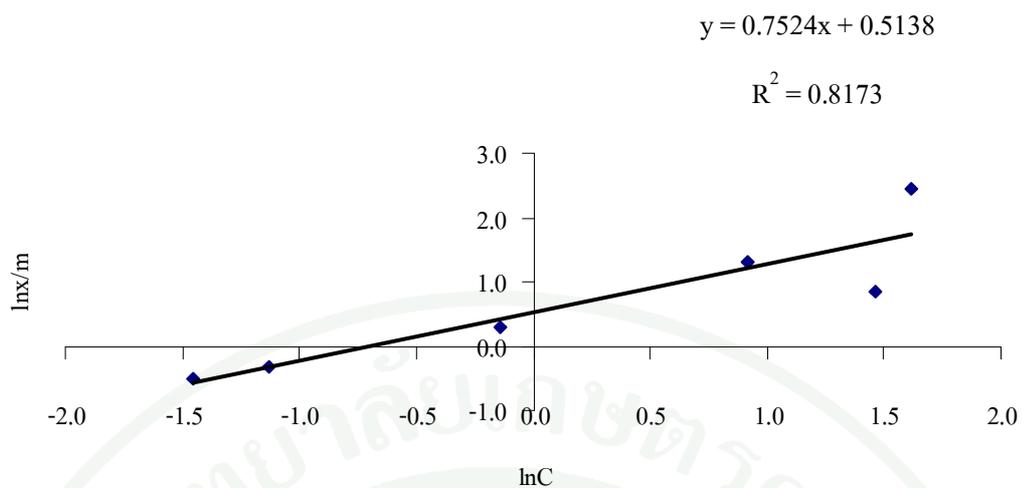
ภาพที่ 56 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



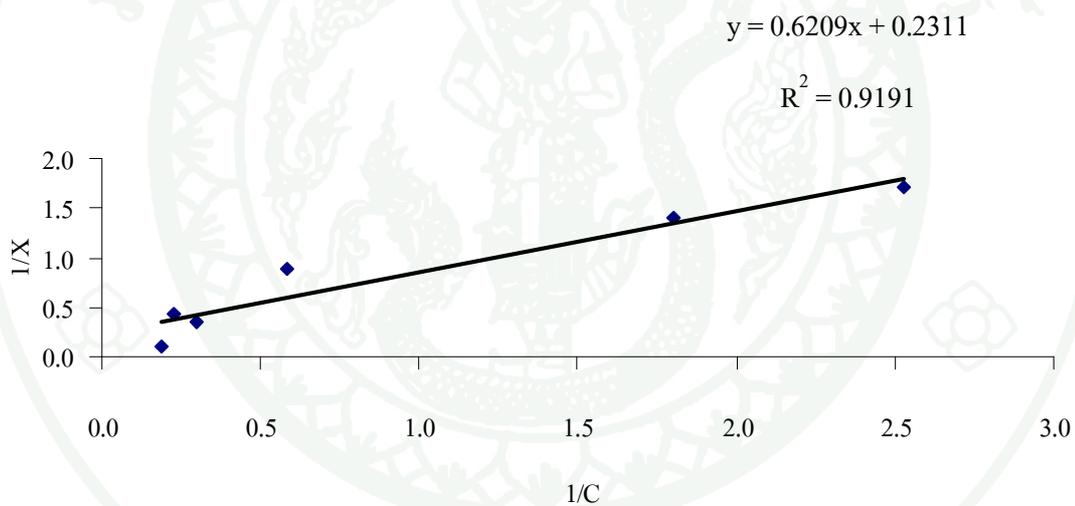
ภาพที่ 57 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



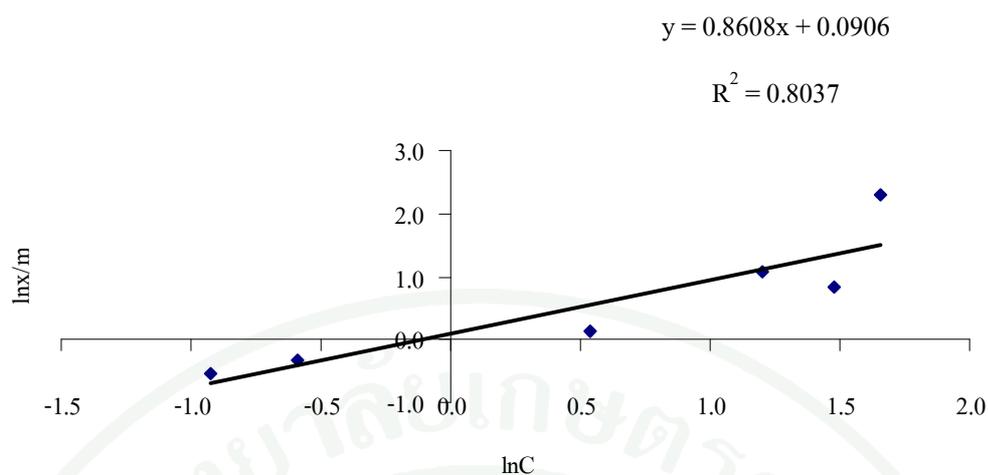
ภาพที่ 58 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



ภาพที่ 59 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



ภาพที่ 60 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิลแบบแลงเมียร์ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด



ภาพที่ 61 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิกเกิดแบบฟรุนดิชของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

จากภาพที่ 52-61 นำไปคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ดั่งสมการที่ 1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดิชดั่งสมการที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าคงที่ ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์และฟรุนดิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวโลหะหนักโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

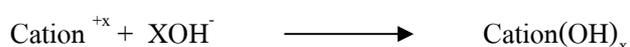
โลหะหนัก	ชนิดของสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว	ค่าคงที่	ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
สังกะสี	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.083$ $b = 0.7981$	9.98	0.9612
	ฟรุนดิช	$K = 7.4231$ $1/n = 0.9443$	40.31	0.8891
ทองแดง	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.1377$ $b = 1.0560$	6.27	0.9399
	ฟรุนดิช	$K = 5.2195$ $1/n = 0.9417$	28.21	0.8823
โครเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.1146$ $b = 0.3598$	5.96	0.9608
	ฟรุนดิช	$K = 2.3764$ $1/n = 0.8779$	11.46	0.8027
แคดเมียม	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.2033$ $b = 0.5661$	3.80	0.9577
	ฟรุนดิช	$K = 1.6716$ $1/n = 0.7524$	6.44	0.8173
นิกเกิล	แลงเมียร์	$1/X_m = 0.2311$ $b = 0.3722$	2.99	0.9191
	ฟรุนดิช	$K = 1.0948$ $1/n = 0.8608$	5.12	0.8037

จากตารางที่ 11 พบว่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และนิกเกิล) ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดติดผิวของ

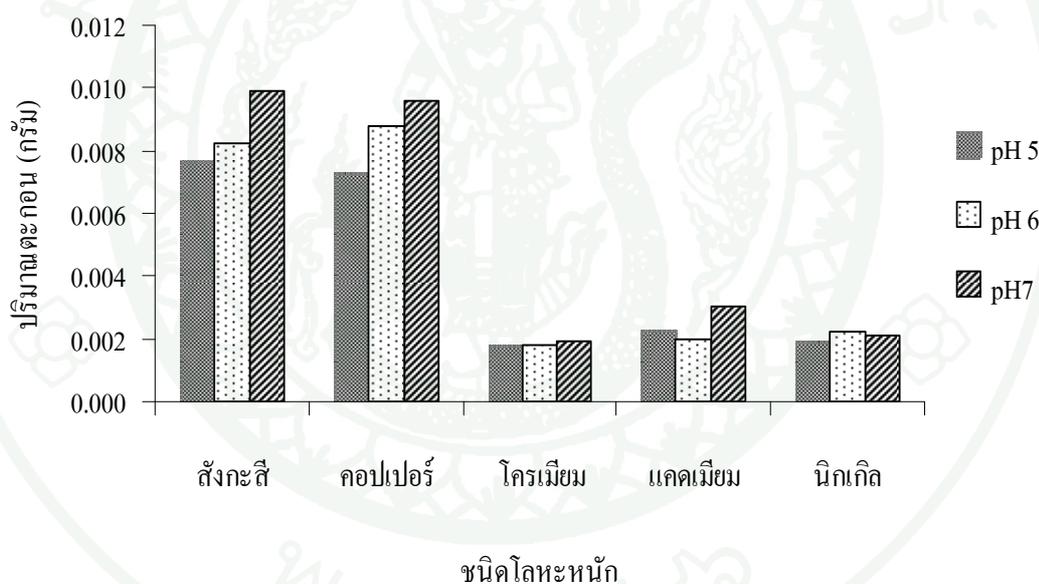
แลงเมียร์ ดังนั้นซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด 1 กรัม สามารถดูดติดผิวของสังกะสี สูงสุดได้ 9.98 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของทองแดงสูงสุดได้ 6.27 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของโครเมียม สูงสุดได้ 5.96 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสุดได้ 3.80 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของนิกเกิลสูงสุด ได้ 2.99 มิลลิกรัม

ผลการศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิด คือ ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบ ผง และซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด พบว่าซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิดเหมาะสมกับไอโซ เทอมนการดูดติดผิวของแลงเมียร์ ซึ่งมีสมมุติฐานว่าไอออนของโลหะหนักถูกดูดติดที่ผิวของ ซีโอไลต์ในตำแหน่งที่แน่นอน แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดติดจะมีเพียงหนึ่งไอออนเท่านั้น หรือกล่าวได้ ว่ามีการดูดติดเพียงชั้นเดียว (Monolayer) โดยลำดับความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักเป็น ดังนี้ ซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง >ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง> ซีโอไลต์เชิงการค้า แบบเม็ด>ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างซีโอไลต์แบบผงกับ ซีโอไลต์แบบเม็ด จะพบว่าซีโอไลต์แบบผงมีความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักมากกว่า ซีโอไลต์แบบเม็ด เนื่องจากซีโอไลต์แบบผงมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดติดผิวโลหะ หนักมากกว่าทำให้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักมากกว่าซีโอไลต์แบบเม็ด และเมื่อ เปรียบเทียบระหว่างซีโอไลต์เชิงการค้ากับซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย พบว่าซีโอไลต์เชิง การค้ามีความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักมากกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อย เนื่องจากค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์เชิงการค้า (833 มิลลิกรัม แคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์) มากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเศษชานอ้อย(788.3 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนต ต่อกรัมซีโอไลต์) อีกทั้งซีโอไลต์เชิงการค้าที่สังเคราะห์จากสารเคมี จึงมีคุณสมบัติสม่ำเสมอและบริสุทธิ์มากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากของเสียคือเศษชานอ้อย

การดูดติดผิวของซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิด มีลำดับความชอบในการดูดติดผิวเหมือนกันคือ สังกะสี >ทองแดง>โครเมียม> แคดเมียม>นิกเกิล สามารถอธิบายด้วยการตกตะกอนของโลหะ หนักที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ ดังภาพที่ 62 พบว่าเมื่อทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โลหะหนักจะเกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ดัง ปฏิกริยา



จากภาพที่ 62 พบว่าเมื่อปรับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ 5, 6 และ 7 โลหะหนักแต่ละตัวจะเกิดการตกตะกอนเพิ่มขึ้น โดยสังกะสีจะตกตะกอนมากที่สุด ตามด้วย ทองแดง แคลเซียม นิกเกิล โครเมียมตามลำดับ พบว่าโครเมียมจะเกิดการตกตะกอนน้อยที่สุด เนื่องจากโครเมียมที่ใช้ในการทดลองคือไตรวาเลนซ์โครเมียม ซึ่งมีคุณสมบัติในการตกตะกอนเมื่อมีค่าค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7.25 (มกคล, 2549) แต่ในการทดลองทำการปรับค่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5, 6 และ 7 ทำให้ไตรวาเลนซ์โครเมียมมีการตกตะกอนน้อยกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ทำให้คุณสมบัติในการตกตะกอนลดลง การตกตะกอนของโลหะหนักในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ภายในรูปพูนของซีโอไลต์นั้นส่งผลให้ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง ซึ่งลำดับความชอบในการดูดซับคือสังกะสี >ทองแดง > โครเมียม>แคลเซียม>นิกเกิล อาจเกิดจากโลหะต่างๆ เกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ภายในรูปพูนของซีโอไลต์



ภาพที่ 62 ความสามารถในการตกตะกอนโลหะหนักในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ

4. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียจริงแสดงดังตาราง 12 ทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง สภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 2 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียจริงเท่ากับ 2.0 จึงทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียจริงให้เท่ากับ 5 แล้วเติมซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดปริมาณ 1 ± 0.05 กรัม นำไปกวนบนเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 นาที

ตารางที่ 12 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียจริง

ชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียจริง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
สังกะสี	1015.12
นิกเกิล	340.62
โครเมียม	20.93
ทองแดง	7.61
ตะกั่ว	0.97
แคดเมียม	0.49

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ค่าเฉลี่ยร้อยละการกำจัด \pm SD) ในน้ำเสียจริงโดยซีโอไลท์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

ค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนดูดซับ	ค่าความเป็นกรด-ด่างหลังดูดซับ	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ร้อยละการกำจัด)				
		สังกะสี	ทองแดง	โครเมียม	แคดเมียม	นิกเกิล
5	5.7	85.25 \pm 0.91	82.63 \pm 1.09	79.71 \pm 2.13	74.21 \pm 1.85	71.51 \pm 2.06

จากตารางที่ 13 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียจริงคือ สังกะสีร้อยละ 85.25 \pm 0.91 ทองแดงร้อยละ 82.63 \pm 1.09 โครเมียมร้อยละ 79.71 \pm 2.13 แคดเมียมร้อยละ

74.21±1.85 และนิกเกิลร้อยละ 71.51±2.06 ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียจริงจะมีค่าต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากพบว่าในน้ำเสียจริงนั้นอาจมีชนิดของโลหะหนักมากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เช่น ตะกั่ว และเหล็ก เป็นต้น อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแข่งขันในการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง อีกทั้งในน้ำเสียจริงมีความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ สูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกลดลงด้วย



สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

สรุป

1. เม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยที่มีลักษณะดี ไม่กร่อน และพื้นที่ผิวมาก ควรมีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 20 และเบนโทไนท์ร้อยละ 15 ขนาดเม็ดที่ 1-2 มิลลิเมตร มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 229.38 ± 3.53 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์

2. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด 1 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมคือสังกะสีร้อยละ 99.00 ± 0.01 ทองแดงร้อยละ 98.71 ± 0.00 โครเมียมร้อยละ 96.89 ± 0.01 แคลเมียมร้อยละ 96.23 ± 0.01 และนิกเกิลร้อยละ 93.66 ± 0.00

3. ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคลเมียม และนิกเกิล) ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผงเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับผิวของแลงเมียร์ พบว่าซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง 1 กรัม สามารถดูดซับผิวของสังกะสีสูงสุดได้ 52.91 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของทองแดงสูงสุดได้ 51.41 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของโครเมียมสูงสุดได้ 33.82 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของแคลเมียมสูงสุดได้ 12.94 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของนิกเกิลสูงสุดได้ 7.64 มิลลิกรัม

4. ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคลเมียม และนิกเกิล) ของซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ดเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับผิวของแลงเมียร์ พบว่าซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด 1 กรัม สามารถดูดซับผิวของสังกะสีสูงสุดได้ 11.78 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของทองแดงสูงสุดได้ 7.59 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของโครเมียมสูงสุดได้ 6.11 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของแคลเมียมสูงสุดได้ 3.89 มิลลิกรัม ดูดซับผิวของนิกเกิลสูงสุดได้ 3.56 มิลลิกรัม

5. ความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และ นิกเกิล) ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดติดผิวของ แลงเมียร์ พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผง 1 กรัม สามารถดูดติดผิวของสังกะสี สูงสุดได้ 52.22 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของทองแดงสูงสุดได้ 50.72 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของโครเมียม สูงสุดได้ 31.15 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสุดได้ 12.37 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของนิกเกิล สูงสุดได้ 5.46 มิลลิกรัม

6. ความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนัก (สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม และ นิกเกิล) ของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดติดผิว ของแลงเมียร์ พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด 1 กรัม สามารถดูดติดผิวของ สังกะสีสูงสุดได้ 9.98 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของทองแดงสูงสุดได้ 6.27 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของ โครเมียมสูงสุดได้ 5.96 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสุดได้ 3.80 มิลลิกรัม ดูดติดผิวของ นิกเกิลสูงสุดได้ 2.99 มิลลิกรัม

7. การดูดติดผิวของซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิด คือซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง ซีโอไลต์เชิงการค้า แบบเม็ด ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงและซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบ เม็ด ด้วยการหาค่าไอโซเทอมการดูดติดผิวโดยใช้สมการของแลงเมียร์ พบว่าการดูดติดผิวของ ซีโอไลต์ทั้ง 4 ชนิด มีลำดับความชอบในการดูดติดผิวเหมือนกันคือ สังกะสี >ทองแดง >โครเมียม > แคดเมียม > นิกเกิล

8. ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักผสมในน้ำเสียจริงคือ สังกะสีร้อยละ 85.25±0.91 ทองแดงร้อยละ 82.63±1.09 โครเมียมร้อยละ 79.71±2.13 แคดเมียมร้อยละ 74.21±1.85 และนิกเกิล ร้อยละ 71.51±2.06

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆ เช่น ถ้ำลอยถ่านหิน ตะกรันเหล็ก แกลบ เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาการใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย ในระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อนำไปใช้จริงในการกำจัดโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป
3. ควรมีการศึกษาการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดที่ใช้แล้ว เพื่อนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง
4. ควรมีการศึกษาเรื่องค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าในการผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด เพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ . 2545. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง แคดเมียม (cadmium). พิมพ์ครั้งที่ 3

กัลยา วานิชบัญชา. 2542. การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย SPSS for Windows. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. 2547. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหิน และจากเถ้าลอยขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไชยวัฒน์ รงค์สยามานนท์. 2548. การปรับปรุงเม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยลิกไนต์เพื่อกำจัดแคดเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ปิยะ ปุฒิเวคินทร์. 2545. การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

มงคล คำรงค์ศรี. 2549. การบำบัดน้ำเสียของโรงงาน SME ประเภทชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการตกตะกอนทางเคมี. รายงานการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 44. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มลิวรรณ บุญเสนอ. 2545. พิษวิทยาสังแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. , กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันทุลเวศน์. 2542. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทแซนอี.68 คอลชัลติง เอ็นจิเนียร์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

เรวดี อนุวัฒนา. 2551. โครงการพัฒนาเทคโนโลยีในการสังเคราะห์และขึ้นรูปซีโอไลต์จากเศษขาน
อ้อยเพื่อใช้ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานซูบโลหะ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

วายุ ก้องเกรียงไกร สยาม เจียรพงศ์ปกรณ และ ศุภกร อัจฉริยวุฒิ. 2545. การพัฒนาเม็ดซีโอไลต์เพื่อ
ใช้ในการกรองแยกโมเลกุลก๊าซ วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี.

วัฒนชัย อยู่ในวงศ์. 2546. การใช้ซีโอไลต์กำจัดแคดเมียม ตะกั่ว ปรอท และสังกะสีในน้ำเสีย
สังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ศิริพงษ์ มีมันคง. 2526. การปรับปรุงความพรุนในสารเซรามิกส์. การค้นคว้าอิสระเชิงวิทยานิพนธ์
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุพล อนันตา. 2545. กระบวนการผลิตสำหรับเซรามิกส์ขั้นสูง. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิทยาศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สันทัด ศิริอนันต์ไพบุลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย. สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.

สัญญาภา สันธวารยัน และสมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยซึ่งเกิด
จากการสังเคราะห์ถ่านหิน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล. 2549. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย
เพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Alvarez- Ayuso, E., Garcia-Sanchez, A., Querol, X. 2003. **Purification of metal electroplating
waste water using zeolites.** Water Research, 37, 4855-4862.

- Barklouti S., Bouaziz J., Chartier T., and Baumard J.-F. 2001. **Binder burnout and evolution of the mechanical strength of dry-pressed ceremica containind poly(vinyl alcohol).** J.of the Euro.Cer.Soc., 21, 1087-1092.
- Biskup, B. and Subotic B. 1998. **Removal of Heavy Metallons from Solution by means of zeolite.I. Thermodynamics of the Exchange Process between Cadmium Ions from Solution and Sodium Ions from Zeolite A.** Separation Science and Technology. 33. 449-466
- Breck, D.W. 1974. **Zeolite Molecular Sieve : Structure, Chemistry, and Use.** New York : John Wiley&Son.
- Curkovic L., Cerjan-Stefanovic S. and Filipan, T. 1996. **Metal Ion Exchange and Modified Zeolite.** Water Research. 31 .1379-1382.
- Faust SD., and Aly O.M. 1987. **Adsorption processe for water treatment.** Butterworths Publisher, Boston.
- Hui K.S., Chao C.Y.H and Kot S.C. 2005. **Remaval of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash.** Hazardous Materials. 127. 89-101
- Khadhraoui M., Watanabe T., and Kuroda M. 2002. **The effect of the physical structure of a porous Ca-based sorbent on its phosphorus removal capacity.** Water Research. 36. 3711-3718
- Lin C. F ,His H-C.1995. **Resource recovery of waste fly ash: synthesis of zeolite-like material.** Environ.Sci Techno. 29. 1109-1117.

- Patane, G., Dipasquale, S., Corigliano, F. and Mavilia, L. 1996. **Use of Zeolitised waste material in removal of Copper (II) and Zinc(II) from waste water.** Annali. Di. Chmica. 86 : 87-98.
- Rewadee Anuwattana, Kenneth J. Balkus Jr., Suwimol Asavapisit, Pojanie Khummongkol. 2008. **Conventional and microwave hydrothermal synthesis of zeolite ZSM-5 from the cupola slag.** Microporous and Mesoporous Materials. 260-266
- Rewadee Anuwattana, and Pojanie Khummongkol. 2008. **Conventional hydrothermal synthesis of Na-A zeolite from cupola slag and aluminum sludge.** Hazardous material.
- Sawyer, C. McCarty, P. and Parkin, G. 2003. **Chemistry for environmental engineering and science.** 5th ed. McGrawhill. Singapore
- Steenbruggen, G. and Hollman, GG. 1998. **The synthesis of zeolite from fly ash and properties of zeolite products.** Journal of Geochemical exploration 62: 305-309.
- Ulla Wingenfelder, Bernd Nowack, Gerhard Furrer, Rainer Schulin. 2005. **Adsorption of Pb and Cd by amine-modified zeolite.** Water Research. 39. 3287-3297.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ตารางปริมาณ โลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์ชนิดต่างๆ

ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้า
แบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.0125	0.000						0.00
0.01	0.1816	0.583	58.284	-1.706	4.065	5.507	0.017	96.98
0.08	0.1714	0.584	7.298	-1.764	1.988	5.834	0.137	97.15
0.1	0.0500	0.596	5.960	-2.996	1.785	20.000	0.168	99.17
0.4	0.0076	0.600	1.501	-4.880	0.406	131.579	0.666	99.87
0.8	0.0045	0.601	0.751	-5.404	-0.287	222.222	1.332	99.93
1	0.0039	0.601	0.601	-5.547	-0.510	256.410	1.665	99.94

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้า
แบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.1952	0.000						
0.01	0.1967	0.600	60.033	-1.626	4.095	5.084	0.017	96.82
0.08	0.1772	0.602	7.529	-1.730	2.019	5.643	0.133	97.14
0.1	0.0536	0.615	6.146	-2.926	1.816	18.657	0.163	99.13
0.4	0.0082	0.619	1.548	-4.804	0.437	121.951	0.646	99.87
0.8	0.0050	0.620	0.774	-5.298	-0.256	200.000	1.291	99.92
1	0.0041	0.620	0.620	-5.497	-0.479	243.902	1.614	99.93

ตารางผนวกที่ ก3 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์เชิงการค้า
แบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	5.9987	0.000						0.00
0.01	1.0053	0.499	49.947	0.005	3.911	0.995	0.020	83.24
0.08	0.6179	0.538	6.728	-0.481	1.906	1.618	0.149	89.70
0.1	0.0861	0.591	5.914	-2.452	1.777	11.614	0.169	98.56
0.4	0.0107	0.599	1.497	-4.538	0.404	93.458	0.668	99.82
0.8	0.0093	0.599	0.749	-4.678	-0.289	107.527	1.335	99.84
1	0.0078	0.599	0.599	-4.854	-0.512	128.205	1.669	99.87

ตารางผนวกที่ ก4 ปริมาณแกลดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์เชิงการค้า
แบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.2584	0.000						
0.01	2.0061	0.425	42.539	0.696	3.750	0.498	0.024	67.95
0.08	1.4563	0.480	6.005	0.376	1.793	0.687	0.167	76.73
0.1	0.5298	0.573	5.730	-0.635	1.746	1.888	0.175	91.53
0.4	0.0908	0.617	1.542	-2.399	0.433	11.013	0.648	98.55
0.8	0.0669	0.619	0.774	-2.705	-0.256	14.948	1.292	98.93
1	0.0395	0.622	0.622	-3.231	-0.475	25.316	1.608	99.37

ตารางผนวกที่ ก5 ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้า
แบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.1944	0.000						
0.01	4.5161	0.167	16.739	1.508	2.818	0.221	0.060	27.09
0.08	2.9063	0.328	4.105	1.067	1.412	0.344	0.244	53.08
0.1	0.5597	0.563	5.630	-0.580	1.728	1.787	0.178	90.96
0.4	0.1299	0.606	1.515	-2.041	0.415	7.698	0.660	97.90
0.8	0.0714	0.612	0.765	-2.639	-0.268	14.006	1.307	98.85
1	0.0459	0.614	0.614	-3.081	-0.487	21.786	1.628	99.26

ตารางผนวกที่ ก6 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์เชิงการค้า
แบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.1354	0.000						
0.01	2.4091	0.373	37.309	0.879	3.619	0.415	0.027	60.73
0.08	1.5587	0.458	5.727	0.444	1.745	0.642	0.175	74.59
0.1	0.5005	0.564	5.640	-0.692	1.730	1.998	0.177	91.84
0.4	0.0958	0.604	1.511	-2.345	0.413	10.438	0.662	98.44
0.8	0.0692	0.607	0.759	-2.671	-0.276	14.451	1.318	98.87
1	0.0403	0.610	0.610	-3.211	-0.494	24.814	1.639	99.34

ตารางผนวกที่ ก7 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.3142	0.000						
0.01	3.0425	0.327	32.675	1.113	3.487	0.329	0.031	51.81
0.08	1.7016	0.461	5.761	0.532	1.751	0.588	0.174	73.05
0.1	0.8184	0.549	5.492	-0.200	1.703	1.222	0.182	87.04
0.4	0.2121	0.610	1.524	-1.551	0.422	4.715	0.656	96.64
0.8	0.0890	0.622	0.778	-2.419	-0.252	11.236	1.286	98.59
1	0.0554	0.625	0.625	-2.893	-0.469	18.051	1.599	99.12

ตารางผนวกที่ ก8 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.4682	0.000						
0.01	3.8091	0.266	26.609	1.337	3.281	0.263	0.038	41.11
0.08	2.9918	0.348	4.348	1.096	1.470	0.334	0.230	53.75
0.1	1.4505	0.502	5.020	0.372	1.613	0.689	0.199	77.57
0.4	0.3158	0.615	1.539	-1.153	0.431	3.167	0.650	95.12
0.8	0.1502	0.632	0.790	-1.896	-0.236	6.658	1.266	97.68
1	0.0893	0.638	0.638	-2.416	-0.449	11.198	1.567	98.62

ตารางผนวกที่ ก9 ปริมาณแกลดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	5.9874	0.000						
0.01	3.5795	0.241	24.105	1.275	3.182	0.279	0.041	40.22
0.08	3.0288	0.296	3.702	1.108	1.309	0.330	0.270	49.41
0.1	1.3503	0.464	4.640	0.300	1.535	0.741	0.216	77.45
0.4	0.8151	0.517	1.294	-0.204	0.258	1.227	0.773	86.39
0.8	0.1403	0.585	0.731	-1.964	-0.313	7.128	1.368	97.66
1	0.0935	0.590	0.590	-2.370	-0.528	10.695	1.696	98.44

ตารางผนวกที่ ก10 ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.5987	0.000						
0.01	5.0241	0.158	15.759	1.614	2.757	0.199	0.063	23.86
0.08	4.1694	0.243	3.038	1.428	1.111	0.240	0.329	36.81
0.1	3.4814	0.312	3.119	1.247	1.137	0.287	0.321	47.24
0.4	1.7932	0.481	1.202	0.584	0.184	0.558	0.832	72.82
0.8	0.5782	0.602	0.753	-0.548	-0.284	1.730	1.329	91.24
1	0.4141	0.619	0.619	-0.882	-0.480	2.415	1.617	93.72

ตารางผนวกที่ ก11 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	5.8972	0.000						
0.01	0.2122	0.569	56.878	-1.550	4.041	4.713	0.018	96.40
0.08	0.1724	0.573	7.160	-1.758	1.968	5.800	0.140	97.08
0.1	0.0505	0.585	5.850	-2.986	1.766	19.802	0.171	99.14
0.4	0.0075	0.589	1.473	-4.893	0.387	133.333	0.679	99.87
0.8	0.0049	0.590	0.737	-5.319	-0.305	204.082	1.357	99.92
1	0.0039	0.590	0.590	-5.547	-0.528	256.410	1.696	99.93

ตารางผนวกที่ ก12 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	5.9158	0.000						
0.01	0.3059	0.561	56.141	-1.184	4.028	3.269	0.018	94.83
0.08	0.2074	0.571	7.141	-1.573	1.966	4.822	0.140	96.49
0.1	0.0512	0.587	5.869	-2.972	1.770	19.531	0.170	99.13
0.4	0.0079	0.591	1.478	-4.841	0.391	126.582	0.677	99.87
0.8	0.0051	0.591	0.739	-5.279	-0.302	196.078	1.353	99.91
1	0.0042	0.592	0.592	-5.473	-0.525	238.095	1.690	99.93

ตารางผนวกที่ ก13 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.2173	0.000						
0.01	1.1253	0.509	50.947	0.118	3.931	0.889	0.020	81.90
0.08	0.6409	0.558	6.974	-0.445	1.942	1.560	0.143	89.69
0.1	0.0954	0.612	6.125	-2.350	1.812	10.482	0.163	98.47
0.4	0.0175	0.620	1.551	-4.046	0.439	57.143	0.645	99.72
0.8	0.0108	0.621	0.776	-4.528	-0.253	92.593	1.288	99.83
1	0.0086	0.621	0.621	-4.756	-0.476	116.279	1.610	99.86

ตารางผนวกที่ ก14 ปริมาณแคลเซียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/(x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	5.8066	0.000						
0.01	2.0121	0.380	37.979	0.699	3.637	0.497	0.026	65.35
0.08	1.5163	0.429	5.367	0.416	1.680	0.660	0.186	73.89
0.1	0.4917	0.532	5.318	-0.710	1.671	2.034	0.188	91.53
0.4	0.0878	0.572	1.431	-2.433	0.358	11.390	0.699	98.49
0.8	0.0642	0.575	0.718	-2.746	-0.331	15.576	1.392	98.89
1	0.0387	0.577	0.577	-3.252	-0.550	25.840	1.733	99.33

ตารางผนวกที่ ก15 ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบผง

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.3726	0.000						
0.01	5.6921	0.068	6.779	1.739	1.914	0.176	0.148	10.68
0.08	3.8279	0.254	3.178	1.342	1.156	0.261	0.315	39.93
0.1	1.2051	0.516	5.165	0.187	1.642	0.830	0.194	81.09
0.4	0.1403	0.623	1.557	-1.964	0.443	7.128	0.642	97.80
0.8	0.1005	0.627	0.784	-2.298	-0.244	9.950	1.276	98.42
1	0.0642	0.631	0.631	-2.746	-0.461	15.576	1.586	98.99

ตารางผนวกที่ ก16 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.0618	0.000						
0.01	2.5795	0.348	34.805	0.948	3.550	0.388	0.029	57.45
0.08	1.7688	0.429	5.364	0.570	1.680	0.565	0.186	70.82
0.1	0.5303	0.553	5.530	-0.634	1.710	1.886	0.181	91.25
0.4	0.2008	0.586	1.465	-1.605	0.382	4.980	0.683	96.69
0.8	0.0993	0.596	0.745	-2.310	-0.294	10.070	1.342	98.36
1	0.0605	0.600	0.600	-2.805	-0.511	16.529	1.667	99.00

ตารางผนวกที่ ก17 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.2120	0.000						
0.01	3.1425	0.307	30.675	1.145	3.423	0.318	0.033	49.40
0.08	2.1096	0.410	5.126	0.746	1.634	0.474	0.195	66.03
0.1	0.8185	0.539	5.392	-0.200	1.685	1.222	0.185	86.82
0.4	0.4056	0.580	1.451	-0.902	0.372	2.465	0.689	93.47
0.8	0.1290	0.608	0.760	-2.048	-0.274	7.752	1.316	97.92
1	0.0801	0.613	0.613	-2.524	-0.489	12.484	1.631	98.71

ตารางผนวกที่ ก18 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.2156	0.000						
0.01	4.2591	0.196	19.609	1.449	2.976	0.235	0.051	31.48
0.08	3.8448	0.238	2.969	1.347	1.088	0.260	0.337	38.14
0.1	1.7505	0.447	4.470	0.560	1.497	0.571	0.224	71.84
0.4	0.5468	0.567	1.418	-0.604	0.349	1.829	0.705	91.20
0.8	0.2982	0.592	0.740	-1.210	-0.301	3.353	1.351	95.20
1	0.1931	0.603	0.603	-1.645	-0.506	5.179	1.659	96.89

ตารางผนวกที่ ก19 ปริมาณแควมเข้มข้นในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.1907	0.000						
0.01	5.0503	0.114	11.397	1.619	2.433	0.198	0.088	18.42
0.08	4.3204	0.187	2.337	1.463	0.849	0.231	0.428	30.21
0.1	2.5061	0.368	3.684	0.919	1.304	0.399	0.271	59.52
0.4	0.8702	0.532	1.330	-0.139	0.285	1.149	0.752	85.94
0.8	0.3225	0.587	0.733	-1.132	-0.310	3.101	1.363	94.79
1	0.2335	0.596	0.596	-1.455	-0.518	4.283	1.679	96.23

ตารางผนวกที่ ก20 ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์
จากเศษชานอ้อยแบบเม็ด

น้ำหนัก ซีโอไลต์	ความเข้มข้น โลหะที่เหลือ C (mg/l)	x(mg)	x/m (mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ
								การกำจัด (ร้อยละ)
0	6.2340	0.000						
0.01	5.2469	0.098	9.831	1.658	2.286	0.191	0.102	15.83
0.08	4.3799	0.185	2.313	1.477	0.838	0.228	0.432	29.74
0.1	3.3256	0.290	2.904	1.202	1.066	0.301	0.344	46.65
0.4	1.7069	0.452	1.131	0.535	0.123	0.586	0.884	72.62
0.8	0.5549	0.568	0.709	-0.589	-0.343	1.802	1.410	91.10
1	0.3954	0.583	0.583	-0.928	-0.539	2.529	1.714	93.66



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบผงและซีโอไลต์
สังเคราะห์จากเศษชานอ้อยแบบเม็ดปริมาณ PVA สูตรต่างๆ

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	SynBA				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.0667 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	472.3 min
VonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	0	End of Run	11/24/2010 00:32
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS972413.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.40		

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	1.407E+01	m ² /g
Single Point BET.....	1.429E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.553E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.750E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.684E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.276E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.677E+01	m ² /g

ภาพผนวกที่ ข1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area ของซีโอไลต์
สังเคราะห์จากขานอ้อยแบบผง

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	PVA1				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.1570 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	496.5 min
VonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	0	End of Run	11/24/2010 17:24
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS972414.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.40		

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	5.063E+00	m ² /g
Single Point BET.....	4.978E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	5.772E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	9.869E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	6.444E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.082E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	6.299E+00	m ² /g

ภาพผนวกที่ ข2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area ของซีโอไลต์
สังเคราะห์จากขานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ
ส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	PVA2				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.1227 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	489.6 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	0	End of Run	11/26/2010 02:45
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS972416.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.40		

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	5.391E+00	m ² /g
Single Point BET.....	5.216E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	6.136E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.279E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	7.328E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.553E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	6.959E+00	m ² /g

ภาพผนวกที่ ๓3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area ของซีโอไลต์
สังเคราะห์จากขานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
ของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	PVA3				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.1223 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	512.3 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	0	End of Run	11/25/2010 16:50
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS972415.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.40		

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	6.164E+00	m ² /g
Single Point BET.....	5.923E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	7.632E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.029E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	8.905E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.140E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	7.498E+00	m ² /g

ภาพผนวกที่ ๓4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area ของซีโอไลต์
สังเคราะห์จากขานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
ของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	PVA4				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.1149 g	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Absorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	484.8 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	0	End of Run	11/30/2010 17:16
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS972418.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.40		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	7.714E+00	m ² /g
Single Point BET.....	7.409E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	9.767E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.464E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.012E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.556E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	9.302E+00	m ² /g

ภาพผนวกที่ ข5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area ของซีโอไลต์
สังเคราะห์จากขานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
ของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	PVA5				
Description	TISTR				
Comments					
Sample Weight	0.1246 g	Outgas Temp	300.0 °C	Operator	rungrueang
Absorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	512.3 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	0	End of Run	11/29/2010 23:17
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS972417.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.40		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	9.319E+00	m ² /g
Single Point BET.....	8.925E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.241E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.871E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.272E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.996E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.079E+01	m ² /g

ภาพผนวกที่ ข6 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET surface area ของซีโอไลต์
สังเคราะห์จากขานอ้อยแบบเม็ดที่มีส่วนผสมของ PVA ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
ของส่วนผสมทั้งหมด ขนาดเม็ด 1-2 มิลลิเมตร



วิธีคำนวณค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC)

1. ชั่งตัวอย่างซีโอไลต์ที่ต้องการวิเคราะห์ 0.5 กรัม ใส่ในครุชเบิลและไปเผาที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาค่าการสูญเสียจากการเผา (Loss On Ignition, LOI)

$$LOI = \frac{\text{มวลตัวอย่างก่อนเผา} - \text{มวลตัวอย่างหลังเผา}}{\text{มวลตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

2. ใส่สารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ใส่แท่งแม่เหล็กพร้อมกวนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

3. ชั่งตัวอย่างซีโอไลต์ที่ต้องการวิเคราะห์ 0.5 กรัม แล้วถ่ายใส่ลงในสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียมกวนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที กรองอย่างเร็วจนได้สารละลายใส

4. ปิเปตสารละลายส่วนใส 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดแก้ว 125 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัพเฟอร์ 2 มิลลิลิตร และไฮดรอกซีเนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม แล้วไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ 0.005 โมลต่อลิตร จนถึงจุดยุติเมื่อมีการเปลี่ยนจากสีแดงเป็นน้ำเงิน

5. ทำแบบลค์เปรียบเทียบ ถ้าปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ไทเทรต 2 ครั้งเกิน 0.1 มิลลิลิตร ให้ทำแบบลค์ใหม่เปรียบเทียบ

$$\text{ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์)} = \frac{[(V_2 - V_1) \times c \times 100.09 \times 25] \times 100}{m \times (100 - L)}$$

V_1 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายตัวอย่างเป็น มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ไทเทรตกับแบบลค์เป็น มิลลิลิตร

C = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ เป็น โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

100.09 = มวลโมเลกุลแคลเซียมคาร์บอเนต

M = มวลตัวอย่างเป็นกรัม

L = น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผาเป็นร้อยละ

หมายเหตุ ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องเก็บในเคซิเคเตอร์ (ปราศจากซิลิกาเจล) ที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วันก่อนนำไปวิเคราะห์





การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิช

ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และของฟรุนดลิชโดยซีโอดีเชิงการคำนวณ จากตารางผนวกที่ ก1 ทำการวิเคราะห์หาไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์จะทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C$ และ $1/(x/m)$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช ทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C$ และ $\ln x/m$ ในแกน X และ Y ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 และ 23 ตามลำดับ

การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์โดยซีโอดีเชิงการคำนวณ

จากสมการของแลงเมียร์	X	$= X_m b C_e / (1 + b C_e)$
จากภาพที่ 23 จุดตัดแกน $1/X$ เท่ากับ	$1/X_m$	$= 0.0179$
ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ	$1/X_m b$	$= 0.006$
	b	$= 2.9833$
	X	$= 166.6667 C_e / (1 + 2.9833 C_e)$

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับของซีโอดีเชิงการคำนวณ เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้น (C_e) ของสังกะสี เท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความหนาแน่นของการดูดซับสูงสุดที่

$$X = 166.6667(6) / (1 + 2.9833(6))$$

$$X = 52.91 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับของของแลงเมียร์ โดยซีโอดีเชิงการคำนวณ พบว่าซีโอดีเชิงการคำนวณ 1 กรัม สามารถดูดซับของสังกะสีสูงสุดได้ 52.91 มิลลิกรัม

การคำนวณค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีของฟรุณฑิชโดยซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง

$$\begin{aligned} \text{จากสมการของฟรุณฑิช} \quad X &= KC_c^{1/n} \\ \text{จากภาพที่ 24 จุดตัดแกน } \ln x/m \text{ เท่ากับ} \quad \ln K &= 4.5739 \\ &K = 96.92 \\ \text{ความลาดชันของเส้นตรงเท่ากับ} \quad 1/n &= 0.8969 \\ X &= 96.92C_c^{0.8969} \end{aligned}$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวของซีโอไลต์เชิงการค้า เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้น (C_c) ของสังกะสี เท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความหนาแน่นของการดูดติดผิวสูงสุดที่

$$\begin{aligned} X &= 96.92(6)^{0.8969} \\ X &= 483.43 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม} \end{aligned}$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุณฑิชโดยซีโอไลต์เชิงการค้า พบว่าซีโอไลต์เชิงการค้าแบบผง 1 กรัม สามารถดูดติดผิวของสังกะสีสูงสุดได้ 52.91 มิลลิกรัม



ภาคผนวก จ
คำมาตรฐานการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจำพวกโลหะหนัก

ตารางผนวกที่ จ1 ค่ามาตรฐานการควบคุมระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน
อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Cr^{3+})	ไม่เกิน 0.75
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0
แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03
นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0

ที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสมเนตร จันทวิชชประภา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	6 เมษายน 2529
สถานที่เกิด	อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วท. บ. (สัตวศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนภาคิบัณฑิต สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งประเทศไทย (พ.ศ. 2551)

