

การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน



นางสาว สิรินันท์ กันศิริ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF COD IN TEXTILE MANUFACTURING WASTEWATER BY COAL FLY
ASH ZEOLITE



Miss Sirinun Kansiri

สภามหาวิทยาลัยบูรพา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอย
ถ่านหิน
โดย นางสาวสิรินันท์ กันศิริ
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. กัลยา ดิงศภัทย์) คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

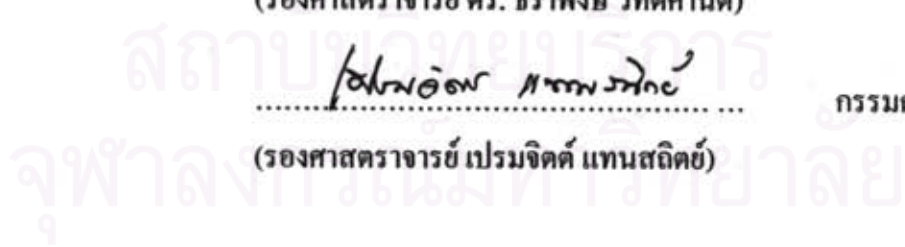
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์) ประธานกรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์) อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชราพงษ์ วิทิตสานต์) กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ เปรมจิตต์ แทนสถิตย์) กรรมการ



สิรินันท์ กันศิริ : การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ่านล่อย่านหิน.
(REMOVAL OF COD IN TEXTILE MANUFACTURING WASTEWATER BY COAL
FLY ASH ZEOLITE) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์, 196 หน้า.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ่านล่อย่านหิน ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ่านล่อย่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) ซึ่งมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์เช่นเดียวกัน คือ ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 517.49 และ 473.74 cmol/kg ตามลำดับ

การนำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline ไปกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัด พบว่า ปริมาณ ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม คือ 20 กรัม ที่เอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเท่ากับ 7 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 120 นาที นำไปทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวสามารถอธิบายได้โดย ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ซึ่งสมการ ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้คือ $x/m = 5.27 \times 10^{-23} C_e^{10.705}$ พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ด้วยถ่านล่อย่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 24.71 มิลลิกรัม

จากการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม พบว่าการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ที่ใช้แล้วปริมาณ 5 กรัม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการสัมผัส 1 และ 3 ชั่วโมง ให้อัตราการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสูงสุด คือ 7.94 ซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพสามารถกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ดี นอกจากนี้ซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพทุกสภาวะจะทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น

ในการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป โดยการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test) เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่า สามารถกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ 26.35, 24.19, 24.13 และ 23.59 BV ตามลำดับ และสามารถกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ 30.36, 28.19, 26.80 และ 26.59 BV ตามลำดับ ที่จุด breakthrough

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....สิรินันท์ กันศิริ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ชเรศ ศรีสถิตย์.....

4889151720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : COAL FLY ASH ZEOLITE / COD / TEXTILE MANUFACTURING WASTEWATER

SIRINUN KANSIRI : REMOVAL OF COD IN TEXTILE MANUFACTURING WASTEWATER BY COAL FLY ASH ZEOLITE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATTI, Ph.D., 196 pp.

This research is to study removal of COD in textile manufacturing wastewater by coal fly ash zeolite. Zeolite syntheses using coal fly ash activated by Sodium Hydroxide and Spent alkaline solution from black oxide coating industry were studied. It found that the optimum condition for synthesis both coal fly ash zeolite activated by Sodium Hydroxide solution and coal fly ash zeolite activated by Spent alkaline solution were similar, they are concentration of 3 molar, reaction temperature of 80°C and reaction time of 4 days. The result revealed that the optimum condition exhibiting the highest CEC of synthesized zeolite were 517.49 and 473.74 cmol/kg, respectively.

It found that the most suitable for removal of COD and color in textile manufacturing wastewater by zeolite synthesized from coal fly ash activation by Spent alkaline solution were quantity of 20 grams at pH 7 and contact time of 120 hours. From testing in term of the organic that involved COD adsorption can explain by Freundlich isotherm that the equation is $x/m = 5.27 \times 10^{-23} C_e^{10.705}$, it was that the organic that involved COD adsorption capacities of synthesized zeolite was 24.71 mg./g of zeolite.

For the study of spent zeolite regeneration reused for removal of COD and color in textile manufacturing wastewater, it found that spent zeolite 5 grams put in Sodium Chloride solution 5% and contact time 1 and 3 hours that gave maximum COD removal was 7.94%. The capacities of regenerated zeolite for removal COD was low and increased color intensity of wastewater for every regeneration conditions.

The removal capacities of COD and color in textile manufacturing wastewater by mold synthesized zeolite were evaluated with continual testing and collected wastewater at depth of synthesized zeolite 30 60 90 and 120 cm. It found that its removal capacities of COD was 26.35, 24.19, 24.13 and 23.59 BV, respectively, while its removal capacities of color was 30.36, 28.19, 26.80 and 26.59 BV, respectively at breakthrough point.

Field of study Environmental Science

Academic year 2007

Student's signature..... S. Kansiri.....

Advisor's signature..... T. Srisatti.....

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โขมิตานนท์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงรองศาสตราจารย์ ดร. ทรายงษ์ วิทิตสานต์ และรองศาสตราจารย์ เปรมจิตต์ แทนสถิตย์ ที่กรุณาใช้เวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำชี้แนะ ปรึกษา ช่วยแก้ไข จนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการของสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณ หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้องปฏิบัติการสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ครูวรรณชนา วงษ์สุด ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณสุรพล มาลัยรัตน์ และพี่เจ้าหน้าที่บริษัทคึกี้เท็กซ์ (ไทย) จำกัด มหาชน ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการไปเก็บน้ำเสียตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ครูบาอาจารย์ ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ซีไอไลต์.....	4
2.2 ถ้ำลอยถ่านหิน.....	32
2.3 การดูดติดผิว.....	40
2.4 กระบวนการฟอกย้อม.....	46
2.5 แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม.....	56
2.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม.....	62
2.7 การรมด้าโลหะ.....	67
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	69
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	76
3.1 รูปแบบการวิจัย.....	76
3.2 แผนการวิจัย.....	76
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	77
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	78
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	85
4.1 ผลของการศึกษาลักษณะเบื้องต้นและสมบัติของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว จากกระบวนการรมด้าโลหะ (Spent alkaline).....	85

บทที่ 4	หน้า
4.2 ผลของการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของถ้ำลอยถ่านหินและ ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	87
4.3 ผลการศึกษาสมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม.....	101
4.4 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	102
4.5 ผลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	109
4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสีย โรงงานฟอกย้อมด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ.....	114
4.7 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงาน ฟอกย้อมด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป โดยการทดลองแบบต่อเนื่อง ในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง.....	117
4.8 ผลการประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน โดยใช้สารละลาย spent alkaline.....	127
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	129
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	129
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป.....	132
รายการอ้างอิง.....	133
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก.....	140
ภาคผนวก ข.....	143
ภาคผนวก ค.....	148
ภาคผนวก ง.....	156
ภาคผนวก จ.....	161
ภาคผนวก ฉ.....	164
ภาคผนวก ช.....	171
ภาคผนวก ซ.....	175
ภาคผนวก ฌ.....	177
ภาคผนวก ฎ.....	181
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	196

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ประวัติของการศึกษาด้านซีโอไลต์.....	5
2.2 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทฤษฎี.....	11
2.3 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจำแนกตาม Secondary Building Units.....	12
2.4 คุณลักษณะของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ.....	22
2.5 สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ.....	24
2.6 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็น โครงสร้างของผลึกซีโอไลต์.....	26
2.7 จุดมุ่งหมายของการเตรียมผ้า.....	50
2.8 ประเภทสีย้อม.....	54
2.9 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์.....	60
4.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนและค่าพีเอชของสารละลายต่างๆที่ใช้แล้ว.....	86
4.2 ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักทั้งหมดและค่าเฉลี่ยโลหะที่ละลายได้ของสารละลายต่าง ที่ใช้แล้ว.....	87
4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์ได้.....	93
4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก ถ้ำลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ.....	95
4.5 สรุปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์สังเคราะห์.....	98
4.6 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน....	99
4.7 แสดงซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	101
4.8 ผลการวัดค่าพีเอช ความเข้มข้น และวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม.....	102
4.9 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี ความเข้มข้น และค่าพีเอชของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่าน การบำบัดด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณต่างๆ.....	103
4.10 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี และความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่พีเอชต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	105
4.11 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี และความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระยะเวลา ต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	107

ตาราง	หน้า
4.12 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์ได้.....	110
4.13 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี และความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัด ด้วยซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ.....	115
4.14 ปริมาณซีโอดี และความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านการบำบัดด้วย ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผงและซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ณ สภาวะ ที่เหมาะสม.....	118
4.15 ปริมาตรและน้ำหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่บรรจุในระดับความลึก ต่างๆ.....	119
4.16 ความสามารถในการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์ สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ณ จุดยุติ ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร.....	124
4.17 ความสามารถในการกำจัดสีของคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ผ่านการขึ้นรูป ณ จุดยุติ ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร.....	125

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	7
2.2 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$	7
2.3 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	10
2.4 ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ.....	11
2.5 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่.....	14
2.6 ลักษณะโครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Analcite และ Laumonite.....	15
2.7 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Natrolite, Brewsterite และ ZSM-5.....	16
2.8 ลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite.....	16
2.9 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UDD, UDUD และ UDUU.....	17
2.10 หน่วยทุติยภูมิ Heulandite Group และ Stilbite.....	17
2.11 ลักษณะโครงสร้างของ Mordenite และ Epstilbite.....	18
2.12 ลักษณะโครงสร้างของ Ferrierite, Bikitaite, Dachiardite, ZEM-5 และ ZEM-11.....	19
2.13 ลักษณะโครงสร้างของ Sodalite, A, และ ZK-5.....	20
2.14 ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-39 และ Melanophlogite.....	21
2.15 ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite.....	22
2.16 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับ.....	41
2.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich.....	44
2.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir.....	46
2.19 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	47
2.20 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ.....	57
2.21 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก.....	58
2.22 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย.....	59
2.23 ขั้นตอนการรมด้าโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมด้าโลหะ.....	67
3.1 เครื่อง heating waterbath สำหรับทำปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	84
3.2 คอลัมน์ดูดซับแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป และเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร.....	84

รูปที่	หน้า
4.1 ลักษณะของถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต.....	88
4.2 ตัวอย่างถ้ำลอยถ่านหินที่เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	88
4.3 ตัวอย่างซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน.....	89
4.4 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	90
4.5 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	91
4.6 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินโดยกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	91
4.7 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินโดยกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	92
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้กับร้อยละการกำจัดซีโอดีและสี.....	104
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ 20 กรัม กับร้อยละการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่พีเอชต่าง ๆ.....	106
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ 20 กรัม กับร้อยละการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่าง ๆ.....	108
4.11 ไอโซเทอมการดูดคิดแบบฟรอนคลิชของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	111
4.12 ไอโซเทอมการดูดคิดแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้.....	111
4.13 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการดูดคิดผิว เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	113
4.14 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการดูดคิดผิว เมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	114
4.15 ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร.....	117
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดคิดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด.....	121
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดคิดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด.....	121

- 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์
ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90
และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด..... 122
- 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์
ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90
และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด..... 122
- 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง
บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร
กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด..... 123
- 4.21 ความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมตามระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์
ที่ผ่านการขึ้นรูปบรรจุในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง..... 126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ช่วงเวลาที่ผ่านมามอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในประเทศไทย การก่อตั้งและขยายโรงงานฟอกย้อมเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และเนื่องจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีการใช้น้ำในแต่ละขั้นตอนของการผลิตปริมาณมาก ทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณที่มากด้วย ซึ่งลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมนี้จะมีปริมาณสารอินทรีย์ ค่าพีเอช ค่าสภาพกรด-ด่าง ปริมาณของแข็งละลายน้ำ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ความเข้มข้น รวมทั้งสารประกอบต่างๆ ที่เป็นพิษมากมาย และมีปริมาณสูง (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) หากปล่อยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่มีการบำบัดก่อนจะเป็นผลเสียต่อระบบนิเวศ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย ซึ่งวิธีการบำบัดทางเคมีและทางกายภาพสามารถกำจัดสารมลพิษที่อยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นสี (Chern และ Huang, 1998; Al-Degs และคณะ, 2000) และในบางครั้งหลังจากน้ำเสียผ่านการบำบัดแล้วค่าซีโอดีที่ได้ในน้ำทิ้งจะยังมีค่าเกินมาตรฐานอยู่ ซึ่งไม่เพียงแต่ปัญหาความเป็นพิษ สีในน้ำทิ้งยังส่งผลกระทบต่อทัศนวิสัยในการมอง มีวิธีการหลายวิธีการที่นำมาใช้ในการกำจัดซีโอดี สีย้อมและสี เช่น การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน การจับก้อน chemical oxidation กระบวนการแยกโดยเยื่อเคมีไฟฟ้า การกรอง และออสโมซิสผันกลับ (Robinson และคณะ, 2001) อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งหมดที่กล่าวมายังมีข้อจำกัดอยู่บ้างและยังไม่มีวิธีการใดที่ประสบความสำเร็จในการกำจัดสีในน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการดูดซับอาจจะเป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดในการกำจัดซีโอดีและสี

ประเทศไทยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลักชนิดหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้า และเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ถ่านหินที่นำไปใช้เมื่อถูกเผาไหม้แล้วจะทำให้เกิดเถ้าลอย ถ่านหินในปริมาณสูงเกือบถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของถ่านหินที่ใช้ไป มีความพยายามที่จะนำเถ้าลอยถ่านหินไปใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น เช่น สังกะหรณ์เป็นซีโอไลต์ ทำปุ๋ยโพแทสเซียม เป็นตัวดูดซับในปล่อง (Kikuchi, 1999) และนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีต ใช้ในงานก่อสร้างถนน ใช้เป็นคันทาง เป็นวัสดุถม และเป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐ เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่ยังนำไปใช้งานในปริมาณที่น้อย นอกจากนี้แหล่งของเถ้าลอยถ่านหินอยู่

ห่างไกลจากโรงงาน ทำให้ไม่คุ้มค่ากับการขนส่ง และให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจที่ไม่ชัดเจนนัก ทำให้ความสนใจในการนำถ้ำลอยถ่านหินมาไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมยังคงมีน้อย ดังนั้นการนำถ้ำลอยถ่านหินมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์เป็นวิธีการที่สำคัญวิธีการหนึ่งในการจัดการของเสีย ซึ่งซีโอไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไอออนบวกของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูง เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และเรซินซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียแต่มีราคาแพงและค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพหลังการใช้มีราคาสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินมาใช้ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินและศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้รวมทั้งสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน
3. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพและนำมาใช้ใหม่ของซีโอไลต์ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) ซึ่ง ถ้ำลอยถ่านหินที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้มาจากโรงผลิตไฟฟ้าปัญญาผล ส่วนสารละลายด่างก็นำมาจากโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะอุตสาหกรรม จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปทดลองแบบไม่ต่อเนื่องกับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม จังหวัดสมุทรปราการ ทำการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้แล้วโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และนำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาใช้ในการทดลองใหม่กับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม รวมทั้งทำการทดสอบประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปในการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test) สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ คือ พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึก องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างทางเคมี และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ในขณะที่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย คือ พีเอช ซีโอดี และความเข้มข้น ซึ่งการวิจัยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- 1) สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน
- 3) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนแคตไอออนและการดูดซับในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ได้แก่ ปริมาณซีโอไลต์ พิเศษของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัส และทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)
- 4) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว ได้แก่ ปริมาณของซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และระยะเวลาในการสัมผัส จากนั้นนำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาใช้ใหม่ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม
- 5) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ซีโอไลต์ที่ผ่านการขึ้นรูป ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่ง (Column test)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้ง (เถ้าลอยถ่านหิน โซเดียมไฮดรอกไซด์จากอุตสาหกรรมด้าโลหะอุตสาหกรรม) กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อันเป็นการลดของเสียอุตสาหกรรมที่จะต้องถูกกำจัด
2. เป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้ง (เถ้าลอยถ่านหิน) สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีคุณภาพดีขึ้น
3. สามารถนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ไปใช้ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)

2.1.1 ประวัติและวิวัฒนาการของซีโอไลต์

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

วิทยา บุญเจริญสุข (2537), Breck (1974) และ Dyer (1988) ได้กล่าวถึงประวัติของซีโอไลต์ไว้ดังนี้

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

ปี ค.ศ. 1845 ได้ทำการทดลองพบว่า ดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ จะเห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

ปี ค.ศ. 1909 ได้ทำการทดลองดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง คือ chabazite พบว่าสามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดซัลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโบรมีนที่อุณหภูมิสูงได้ แม้แต่ไอปรอทก็อาจถูกดูดซับได้

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

ปี ค.ศ. 1933 ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ chabazite

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

ปี ค.ศ. 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ของ faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติและซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ขึ้น

ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะทำภายใต้สภาวะที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมา Milton และคณะทำงาน (1959) ของบริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูง ทำปฏิกิริยาในภาชนะปิด หรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้พัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 จนถึงปี 1972 นั้นพบว่า มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์เกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารสิทธิบัตรอีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ นอกจากนี้มีรายงานว่า การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1862 แต่ Breck (1862) ได้ให้ความเห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้ในขณะนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันและสารบางตัวยังไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime โดย Barret (1951)

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

ประวัติของการศึกษาด้านซีโอไลต์สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประวัติของการศึกษาด้านซีโอไลต์

ค.ศ.	เหตุการณ์
1756	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นครั้งแรก โดยให้ชื่อว่า stibite
1825	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด levynite
1842	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด faujasite
1862	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด levynite เป็นครั้งแรก
1863	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด mordenite
1870-88	การศึกษาคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์เป็นครั้งแรก
1890	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด erionite
1929	การอธิบายถึงความเป็นกรดในซีโอไลต์

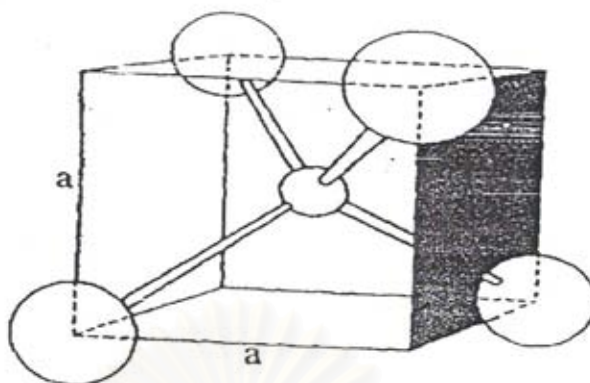
ตารางที่ 2.1 ประวัติของการศึกษาด้านซีโอไลต์ (ต่อ)

ค.ศ.	เหตุการณ์
1930-34	การกำหนดโครงสร้างของซีโอไลต์เป็นครั้งแรก
1932	การอธิบายคุณสมบัติตะแกรงร่อน โมเลกุล (molecular sieve) ของซีโอไลต์
1942-45	การแยกเชิงปริมาณของสารโดยใช้คุณสมบัติตะแกรงร่อน โมเลกุล
1948	สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์บริสุทธิ์ได้เป็นครั้งแรก
1948	สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด mordenite
1949	การเตรียมซีโอไลต์ในรูปกรด
1956-64	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A, X และ Y โดยบริษัท Union carbide
1962	การนำซีโอไลต์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว โดยบริษัท Mobile Oil
1971-72	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ ZSM-8 โดยบริษัท Mobile Oil
1975	การนำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลเบนซีน
1978	การนำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ไปใช้ในการกำจัดไขมัน
1978	การศึกษาโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ชนิด ZSM-5 และ ZSM-8 และ ZSM-11
1979	การวิเคราะห์ซีโอไลต์โดยใช้เครื่อง Electron Microscopy ที่มีความละเอียดสูง และเครื่อง NMR
1985	การเริ่มนำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ไปใช้ในการผลิตก๊าซโซลีนจากเมทานอลในระดับอุตสาหกรรม
1986	การสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟอสเฟต (aluminophosphate) และซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาสูงชนิด NU-1 และ FU-1

ที่มา : Bhatia, 1990 อ้างถึงใน วีระพงษ์ นามโท, 2543

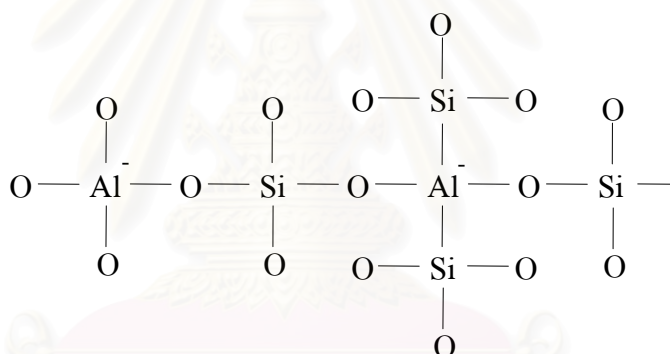
2.1.2 นิยามของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ ผลึกของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งโดยมากจะเป็น โลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติของ อะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถประกอบกันเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อกันของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุด คือเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

ที่มา : Breck, 1974



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

ที่มา : สัจชนาด สิทธวารยัน และ สมชาย พานิชสาส์น, 2540

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ



- n คือ วาเลนซ์ของแคทไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ท
- x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2
- y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

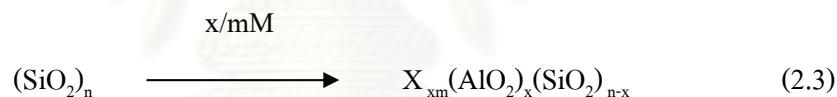
สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์



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

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

การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล กับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็น โครงสร้างตาข่ายนั้นทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจวบจากแคทไอออนของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ดังสมการ (2.3)



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

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

1) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural zeolite)

เป็นซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยกระบวนการ hydrothermal ของสารละลายได้ ทั่วโลกที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (alumina), ซิลิกา (silica) และสถานะเป็นเบสอย่างแรง (มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่เกิดจากการชะล้างของน้ำฝนผ่านชั้นหินลงมา) ภายใต้อุณหภูมิ 70-350 องศาเซลเซียส และความดันค่อนข้างสูงเป็นเวลานานจนค่อยๆ ก่อตัวเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ส่วนมากซีโอไลต์ชนิดนี้จะพบในบริเวณที่เป็นหินภูเขาไฟ ใต้พื้นมหาสมุทร บริเวณน้ำพุร้อน ธารน้ำจากแหล่งภูเขาไฟ หรือพื้นผิวดินบางแห่ง ข้อมูลจาก ZEO (2003) ได้ทำการศึกษาซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) 24.9

ตารางเมตรต่อกรัม ความหนาแน่น(bulk density) 55 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และขนาดของรูพรุน (pore diameter) 1000 Å ตัวอย่างซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ faujasite, erionite, offertite, chabazite, mordenite และ heulandite เป็นต้น

เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ hydrological system ได้ ดังนี้ คือ

- Saline Alkaline Lakes แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close resin และควบคุม การเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม lake chemistry

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

- Marine Sediment ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง

- Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

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

- Burial Diagenetic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้อยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)

- Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนีและอาจพบบ้างใน imertitial และ globules

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

2) ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic Zeolites) ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล

(Gelation) เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

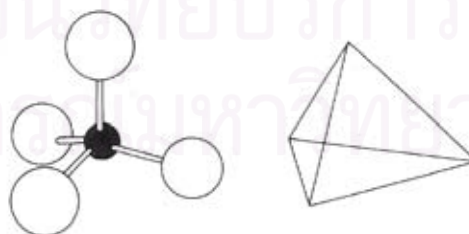
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่น วิธีเรียกชื่อคล้ายระบบของ IUPAC โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

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

การเรียกชื่อดังกล่าวต้องมีความรู้เกี่ยวกับหน่วยเซลล์ สำหรับวิธีอื่นๆ เช่น การใช้ตัวอักษรหรือกลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นที่นิยมมากกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่า และยังมีควมบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมือนกันทุกครั้ง โดยเฉพาะสารเจือปนที่อยู่ในซีโอไลต์ธรรมชาติ เช่น ปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายในปฏิกิริยา heterogeneous catalyst

2.1.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง (Breck, 1974)

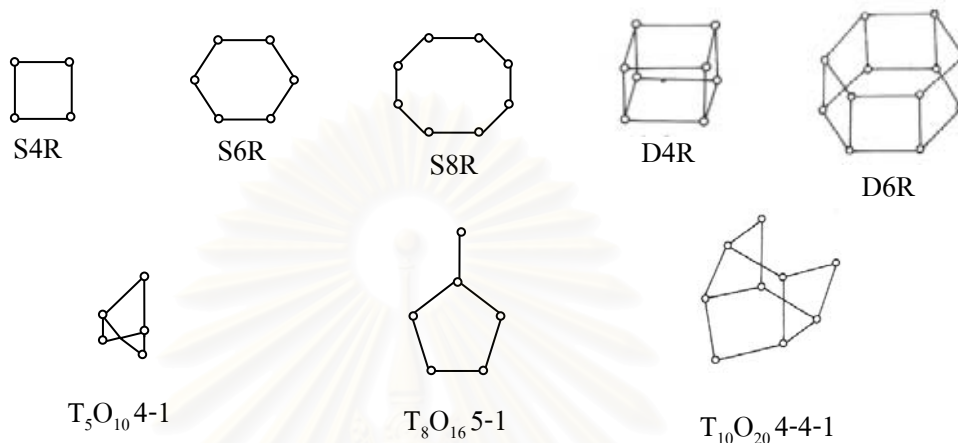
2.1.3.1 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building units) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุด มีรูปร่างเป็นเตตระฮีดรอนของซิลิกอนเตตระออกไซด์ (SiO_4)⁴⁻ หรืออะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ (AlO_4)⁵⁻ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

ที่มา : Breck, 1974

2.1.3.2 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units) เกิดจากหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิเชื่อมต่อกันเป็นรูปร่างวงเหลี่ยมต่างๆ อาจเป็นวงเดี่ยว เช่น Single 4-Ring (S4R) Single 6-Ring (S6R) Single 8-Ring (S8R) หรือต่อกันเป็นวงคู่ เช่น Double 4-Ring (D4R) และ Double 6-Ring (D6R) ต่อเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อน เช่น Complex 4-1 Complex 5-1 และ Complex 4-4-1 แสดงดังรูปที่ 2.4



ที่มา : Breck, 1974

แบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units: SBU) ได้ 8 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.2 และ โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจำแนกตาม Secondary Building Units แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ

ชนิด	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ
1	วงเดี่ยว 4 มุม (single 4-ring, S4R)
2	วงเดี่ยว 6 มุม (single 6-ring, S6R)
3	วงเดี่ยว 8 มุม (single 8-ring, S8R)
4	วงคู่ 4 มุม (double 4-ring (D4R))
5	วงคู่ 6 มุม (double 6-ring (D6R))
6	วงเชิงซ้อน 4-1 (complex 4-1, $T_5O_{10}4-1$)
7	วงเชิงซ้อน 5-1 (complex 5-1, $T_8O_{16}5-1$)
8	วงเชิงซ้อน 4-4-1 (complex 4-4-1, $T_{10}O_{20}4-4-1$)

ที่มา : Breck, 1974

ตารางที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจำแนกตาม Secondary Building Units

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

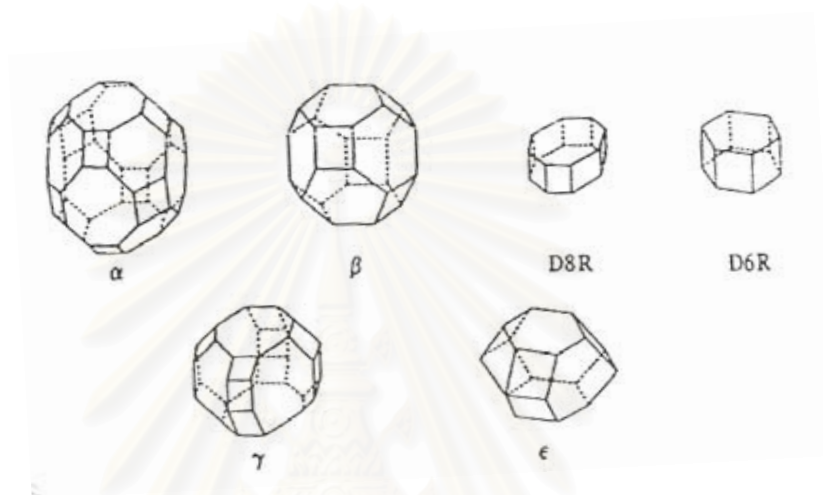
ตารางที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจำแนกตาม Secondary Building Units (ต่อ)

Secondary Building Units (SBUs)	Structure type	Name	Typical unit cell content
5-1	FAU	Faujasite	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{1.2}\text{Mg}_{11}\text{Al}_{58}\text{Si}_{134}\text{O}_{384}\cdot 235\text{H}_2\text{O}$
	FAU	Zeolite X	$\text{Na}_{88}\text{Al}_{88}\text{Si}_{104}\text{O}_{384}\cdot 220\text{H}_2\text{O}$
	GME	Gmelinite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	KFI	Zeolite ZK-5	$\text{Na}_{30}\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}\cdot 98\text{H}_2\text{O}$
	RHO	Zeolite Rho	$(\text{Na},\text{Cs})_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{36}\text{O}_{96}\cdot 46\text{H}_2\text{O}$
	EDI	Edingtonite	$\text{Ba}_2\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Natrolite	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Tetranatrolite	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Paranatrolite	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Mesolite	$\text{Na}_{16}\text{Ca}_{16}\text{Al}_{48}\text{Si}_{72}\text{O}_{240}\cdot 64\text{H}_2\text{O}$
	NAT	Scolecite	$\text{Ca}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	THO	Thomsonite	$\text{Na}_4\text{Ca}_8\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	THO	Gonnardites	$\text{Na}_5\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{11}\text{O}_{40}\cdot 14\text{H}_2\text{O}$
	BIK	Bikitaite	$\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	DAC	Dachiardite	$\text{Na}_5\text{Al}_5\text{Si}_{19}\text{O}_{48}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	EPI	Epistilbite	$\text{Ca}_3\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	4-4-1	FER	Ferrierite
MFI		Zeolite ZSM-5	$\text{Na}_n\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}\cdot \sim 16\text{H}_2\text{O} (n\sim 3)$
MOR		Mordenite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
BRE		Brewsterite	$\text{Sr}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
HEU		Heulandite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
HEU		Clinoptilolite	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
STI		Stibite	$\text{Na}_2\text{Ca}_4\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}\cdot 34\text{H}_2\text{O}$
STI		Stellerite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$
STI	Barrerite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$	

ที่มา : Dyer, 1988

2.1.3.3 หน่วยโครงสร้างหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงขนาดใหญ่ที่สมมาตรได้จากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น

- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้า หรือ β (truncated octahedral type)
- รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ α (truncated cubooctahedral)
- รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ γ (18-hedral)
- รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ ϵ (11-hedral) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่

ที่มา : Breck, 1974

นอกจากนี้อาจแบ่งซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง 8 ชนิดข้างต้น ดังนี้

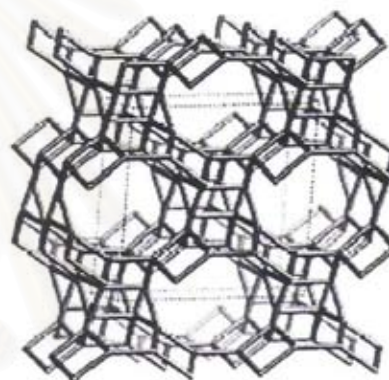
- 1) Analcite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring โดยจะมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumonite แสดงดังรูปที่ 2.6
- 2) Natrolite Group มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบ คือ Natrolite, Edingtonite และ Thosonite ซึ่งถ้ามองในสองมิติแล้วโครงสร้างทั้ง 3 แบบจะเป็นระบบโพรงที่ประกอบด้วย 8 วง (8-ring channel system) แสดงดังรูปที่ 2.7
- 3) Chabazite Group โครงสร้างประกอบด้วย 6-ring ต่อขนานกันซึ่งมีการต่อเชื่อมกันมากมายหลายรูปแบบ ได้แก่ Offretite และ Erionite แสดงดังรูปที่ 2.8

4) Phillipsite Group โครงสร้างประกอบด้วย 4- ring ที่ต่อขนานกันแบบ U (up) และ D (down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ Phillipsite และ Gismondite ประกอบด้วยการเชื่อมโยงของโซ่แบบ UDD ในขณะที่ LiA(BW) และ Yagawaralite จะมีการเชื่อมต่อกันด้วย single 4- ring แสดงดังรูปที่ 2.9

5) Heulandite Group โครงสร้างเกิดจาก 5-ring จำนวน 4 วง ต่อเชื่อมกับ 4-ring จำนวน 2 วง ซึ่งจะเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ถ้าการเชื่อมโยงผ่านโครงสร้างตรงกลางรูปแบบพันธะก็จะ เป็นแบบในรูปที่ 2.10 ซึ่งเมื่อเชื่อมโยงต่อกันจะทำให้เป็นแบบ Brewsterite การเชื่อมต่อของ บล็อก โดยผ่านทางโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ Heulandite และ Stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-ring ในบางส่วนแสดงดังรูปที่ 2.10



Analcite

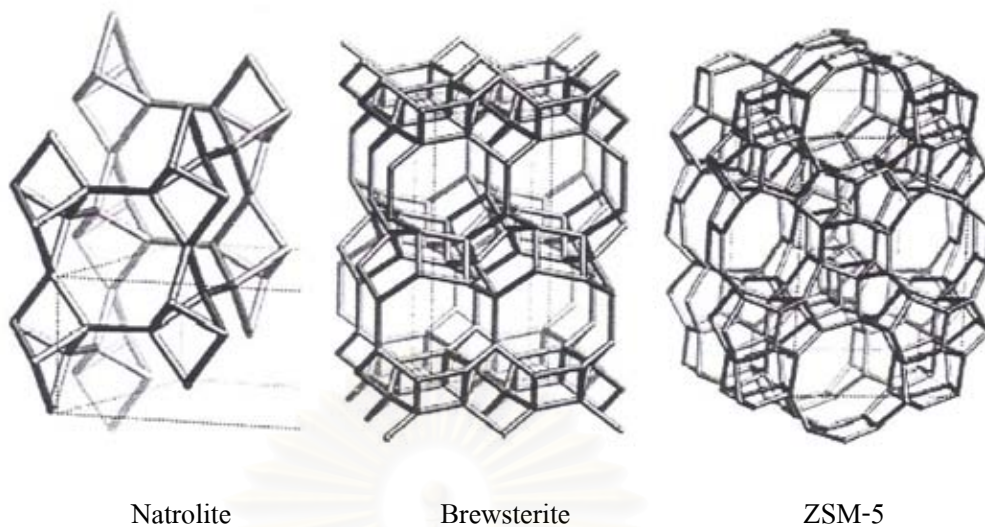


Laumonite

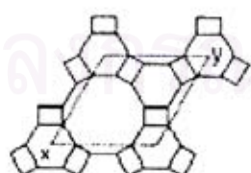
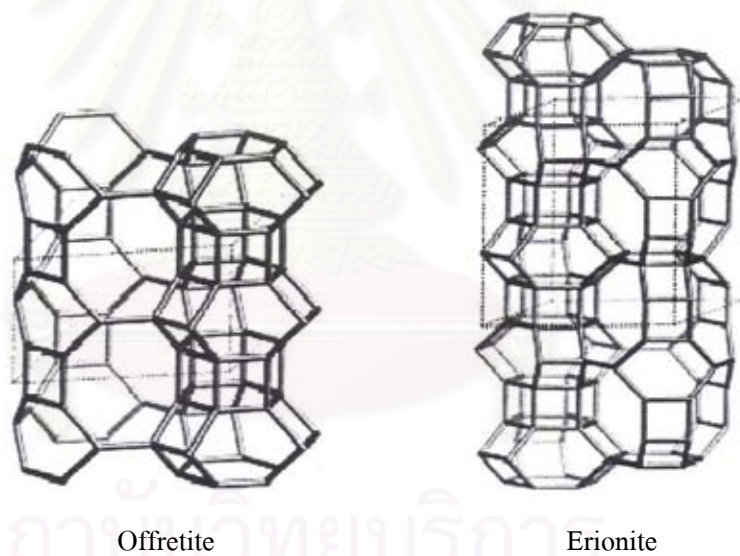
รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Analcite และ Laumonite

ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถัตรีตนนนท์, 2549

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ Natrolite, Brewsterite และ ZSM-5
ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถักรัตนนนท์, 2549

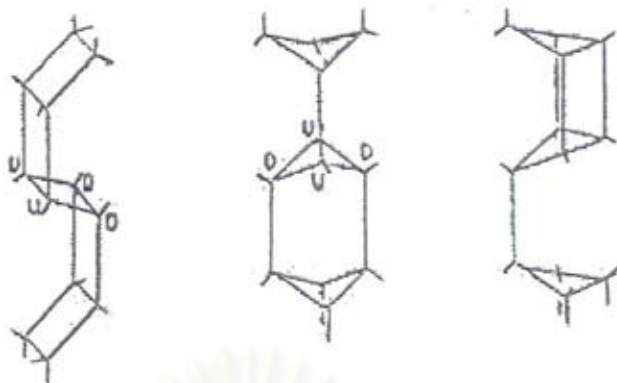


c-projection of Offretite

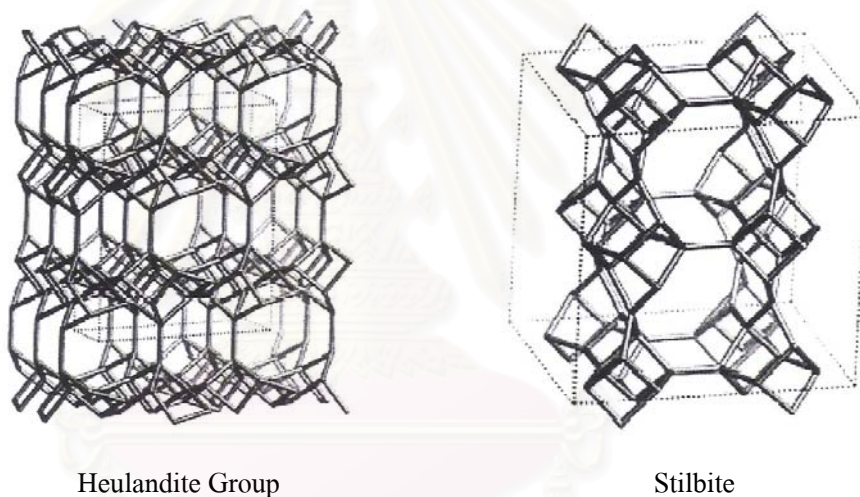


c-projection of Erionite

รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite
ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถักรัตนนนท์, 2549



รูปที่ 2.9 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UDD, UDUD และUDUU
ที่มา : Dyer, 1988 อ้างถึงใน มนตรี ทองคำ, 2542



รูปที่ 2.10 หน่วยทุติยภูมิของ Heulandite Group และ Stilbite
ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล นัทรรัตนนนท์, 2549

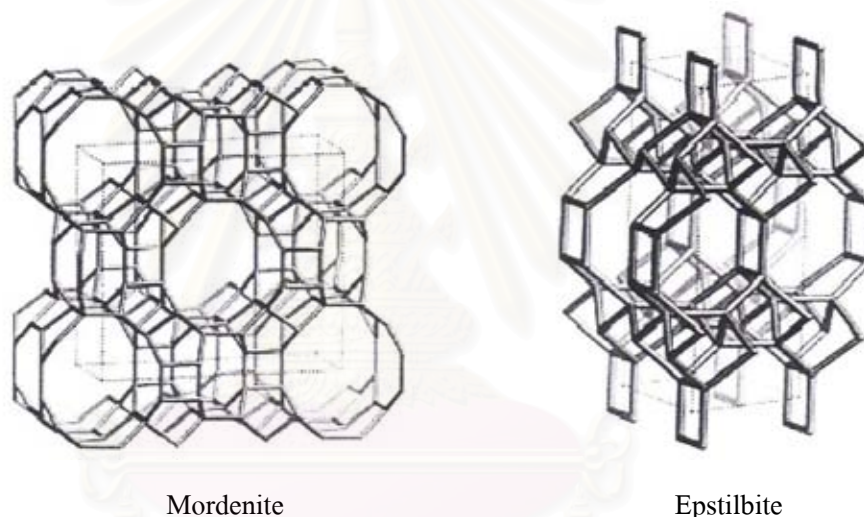
6) Mordenite Group โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วง ต่อเชื่อมกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม กลุ่มนี้จะมีทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ Mordenite, Epstilbite (รูปที่ 2.11), Ferrierite, Bikitaite, Dachiardite ZEM-5 และ ZEM-11 (รูปที่ 2.12)

7) Faujasite Group ซีโอไลต์กลุ่มนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ Sodalite, A และ ZK-5 แสดงดังรูปที่ 2.13

8) Melanophlogite Group โครงสร้างประกอบด้วย Interwoven Layer 12 และ 14-Hedro โดยโครงสร้างจะมีลักษณะหนาแน่น และมีชั้นผิวหน้าเป็น 12-Hedral ซึ่งชั้นผิวเหล่านี้ได้มีการต่อกันขึ้นเป็นลำดับ ABC และช่องเปิดในโครงสร้างจะมีจำกัดเพียง 5 และ 6 วง เท่านั้นกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ZSM-39 และ Melanophlogite (รูปที่ 2.14) ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น ZSM-39 และ Melanophlogite จะมีหลายรูปแบบเช่น 12- Hedron, 14- Hedron, 15-Hedron และ 16-Hedron

9) Lovdarite Group เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring และ 8-ring เชื่อมผ่านมุมของ 3-ring ซึ่งเป็นระบบที่ช่องว่างระหว่าง 2 มิติเชื่อมต่อกันโดย 9- ring แสดงดังรูปที่ 2.15

ขนาดของโพรงและอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.4



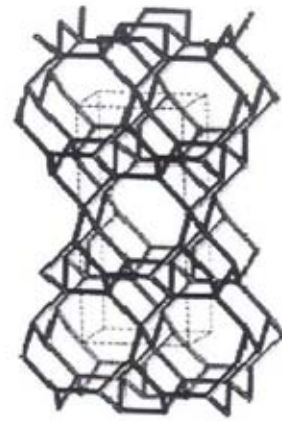
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของ Mordenite และ Epstilbite

ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถักรัตนนนท์, 2549

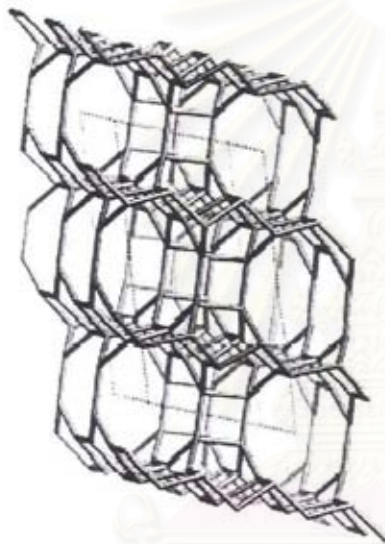
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



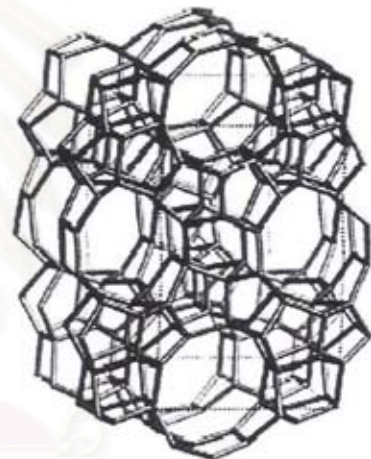
Ferrierite



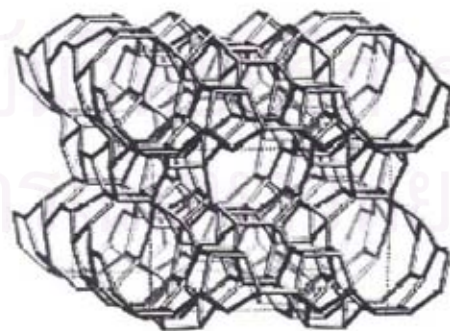
Bikitaite



Dachiardite



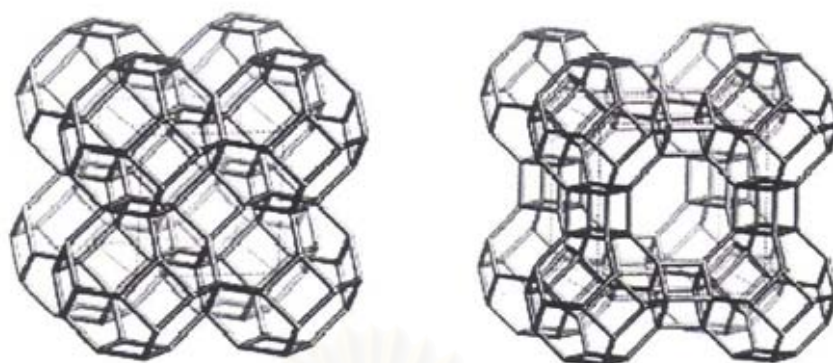
ZEM-5



ZEM-11

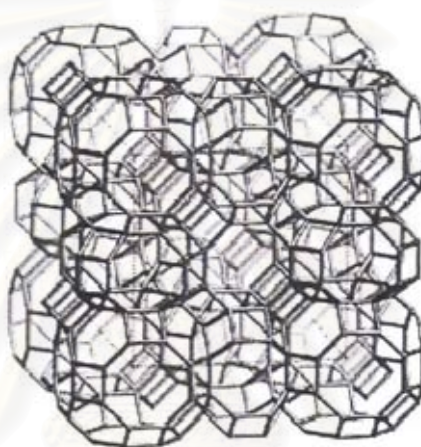
รูปที่ 2.12 ลักษณะ โครงสร้างของ Ferrierite, Bikitaite, Dachiardite, ZEM-5 และ ZEM-11

ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถัตรีรัตนนนท์, 2549



Sodalite

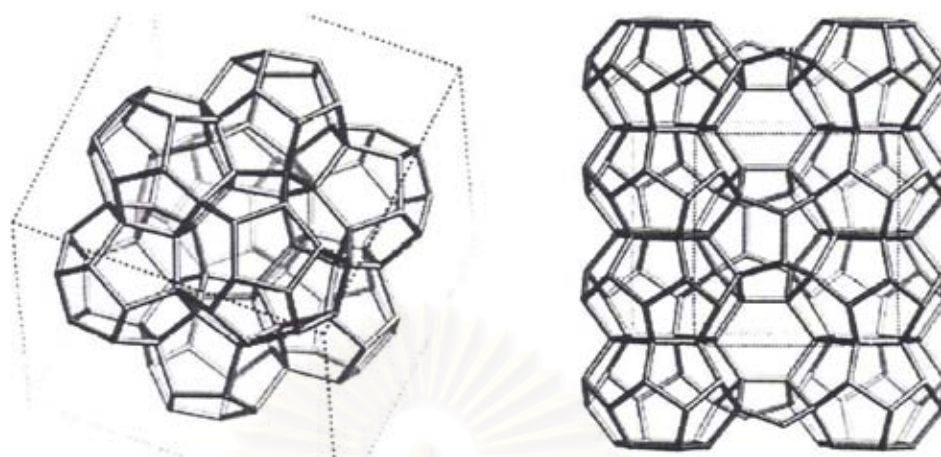
A



ZK-5

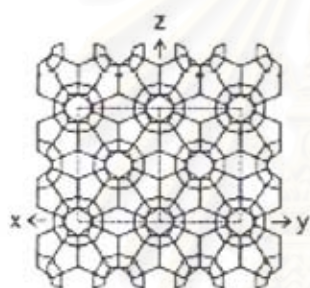
รูปที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของ Sodalite, A, และ ZK-5
ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถัตรีรัตนนท์, 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

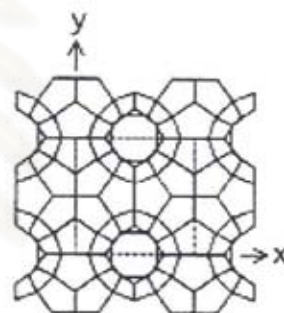


ZEM-39

Melanophlogite



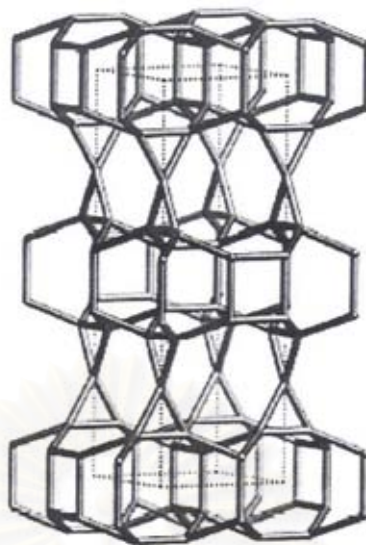
ZEM-39: c-projection



Melanophlogite:c-projection

รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของ ZEM-39 และ Melanophlogite
ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถัตรีรัตนนท์, 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite
ที่มา : Baerlocher, 2001 อ้างถึงใน ชัชวาล ถัตรีรัตนนท์, 2549

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ

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

ที่มา : จำรัส, 2540

2.1.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

องค์ประกอบหลักของการสังเคราะห์ซีโอไลต์

- 1) แหล่งของอะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลองโดยทั่วไปจะใช้สารประกอบอะลูมิเนียม (Aluminium Compound) เป็นสารตั้งต้น เช่น สารประกอบโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium Aluminate Compound) อะลูมิเนียมอัลคอกไซด์ (Aluminium Alkoxide) เกลืออะลูมิเนียม (Aluminium Salt) และแหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว
- 2) แหล่งของซิลิกอน โดยทั่วไปจะใช้สารละลายของซิลิกา เช่น ซิลิกาโซล (Silica Sol) ซิลิกาเจล (Silica Gel) แร่ควอตซ์ (Quartz) เป็นต้น
- 3) แหล่งของไฮดรอกไซด์ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ของโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA ที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ion) นอกจากนี้ยังสามารถได้จากสารประกอบออกไซด์ (Oxide Compound) และเกลือของโลหะหมู่ IA และหมู่ IIA ได้
- 4) สารเคมีอื่นๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) ที่แตกตัวได้ไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่า สารโครงสร้าง (Template) ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TEAOH) และเตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (TPABr) เป็นต้น

การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปจะใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Treatment) และวิธีสังเคราะห์ซิลิเกต (silicate) ในช่วงเวลากว่า 100 ปีที่ผ่านมาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นได้หลายวิธี แสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้น จะทำให้แหล่งของอะลูมินา ซิลิกา และอัลคาไลน์ รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน และก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า ที่ความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น บางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล องค์ประกอบของอะลูมินา ซิลิกา ประจุบวก สารอินทรีย์และน้ำ จะรวมตัวกันเป็นเจล ซึ่งอยู่ในสภาพสารละลายด่างอิ่มตัวยิ่งยวด (an alkaline super-saturated solution) แปลงสภาพเป็นโครงสร้างรูพรุนของผลึกอะลูมิโนซิลิเกต (microporous crystalline aluminosilicate) ซึ่งเรียกกระบวนการทางเคมีนี้ว่า กระบวนการซีโอไลติเซชัน (zeolitization) เป็นการกระตุ้นโดยความร้อนภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม อุณหภูมิที่ใช้โดยปกติจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเพื่อที่จะให้ได้ผลผลิตที่สูง

ตารางที่ 2.5 สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ

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

ที่มา : Breck, 1974

ขั้นตอนสำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ได้แก่ (Weitkamp, 1994)

1) ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก (The ageing period) หมายถึง ช่วงเวลาหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเจล โดยที่อุณหภูมิของเจลมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึก (crystallization temperature) สิ่งหนึ่งที่สำคัญในระหว่างระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก (the ageing period) คือการละลาย หรือดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ของซิลิกาโดยต่าง ซึ่งการละลายดังกล่าวเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกา ผลิตภัณฑ์เริ่มแรกอยู่ในรูปของโมโนเมอร์ซิลิเกตแอนไอออน (monomeric silicate anions) หลังจากนั้นโมโนเมอร์ซิลิเกตแอนไอออน จะถูกเปลี่ยนไปเป็น โอลิโกเมอร์ (oligomeric species) โดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation-polymerization)

สารละลายต่างดังกล่าวข้างต้น ประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_4^-$ (tetrahedral $Al(OH)_4^-$ species) ซึ่งโอลิโกเมอร์ซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับ โมโนเมอร์ $Al(OH)_4^-$ เกิดเป็นโครงสร้างอะลูมิเนียมซิลิเกต

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

- การอิ่มตัวยิ่งยวด (Achievement of Supersaturation)

เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงของการตกผลึก (ageing) และชัดเจนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกละลาย (dissolved components : aluminosilicate species) เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายจากสารละลายที่มีเสถียรภาพไปเป็นสารละลายที่มีความเสถียรภาพไม่แน่นอน (metastable solution) และสุดท้ายอยู่ในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (labile solution)

- การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)

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

- การเจริญผลึกซีโอไลต์ (Crystal Growth)

การเจริญผลึกซีโอไลต์เริ่มเกิดขึ้นหลังจากการเกิดนิวเคลียส โดยนิวเคลียสที่เกิดขึ้น จะเกิดการเจริญเติบโต โดยการเพิ่มหรือควบแน่นขององค์ประกอบข้างต้นกลายเป็นผลึกซีโอไลต์ที่สมบูรณ์

ลักษณะของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของไอออนบวกของทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่ โดยปกติการก่อตัวของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักนั้นอยู่ที่ว่า ไอออนบวกที่มีอยู่นั้นจะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ (templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบ หรือแม่พิมพ์เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะ ทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะ โครงสร้างเหมือน โครงสร้างของแม่แบบนั้นๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เรานำมาใช้เป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ 4 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์

ZEM-5 type	Omega type	Femirite type	ALPO 4-5 type
Na	TMA	Na + K	TEAOH
TPA	Pyrolidine	Sr	TPAOH
TDA	DABCO	Li + Sr (Ba) + seed	Choline hydroxide
Propylamine		Choline	Et3N
EDA		Pyridine	Pr3N
Ethanolamine		Ethylenediamine	$(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3\text{N}$
Methylquinuclidine		1,3-Diaminopropane	Cyhexylamine
NH_3 + alcohol		1,4-Diaminobutane	N,N-Dimethylbenzylamine
Alcohol		2,4-Pentanedione	Diethylethanolamine
Glycerol		N-methylpyridimium	Amino Diethylethanolamine

ที่มา : Breck, 1974

2.1.5 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ (คงศักดิ์ วัฒนวงศ์พิทักษ์, 2543)

- 1) การแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวกนี้เป็นกระบวนการแบบผันกลับได้
- 2) การดูดซับน้ำ ซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำให้เข้าไปอยู่ในช่องว่างบริเวณผนังด้านในของโพรงชนิดต่างๆ ได้ และสามารถกำจัดน้ำออกได้ที่อุณหภูมิที่สูงพอ
- 3) การคัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่างๆ กัน มีทางให้โมเลกุลของสารอื่นผ่านเข้าออกได้ เรียกว่า “ปากโพรง (aperture)” โดยที่โมเลกุลที่มีรูปร่างและขนาดพอเหมาะสำหรับปากโพรงเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุลได้ (molecular sieve)
- 4) สมบัติที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่นของตำแหน่งที่เป็นกรด (acid site density) ความรุนแรงของกรด (acid strength) และขนาดของรูพรุน (pore size) ภายในผลึก ซึ่งรวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของทางเข้าออกของรูพรุน (pore entrance)

2.1.6 ประโยชน์ของซีโอไลต์

จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ มากมายซึ่งพอจะรวบรวมได้ดังนี้ คือ

- 1) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิลเลชัน (Alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน (Isomerization) ปฏิกิริยาของเคลาส์ (Claus process) และปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermol cracking) เป็นต้น
- 2) ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorption) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
- 3) สารลดความกระด้าง (Water softener) ซีโอไลต์เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้ เนื่องจากในน้ำกระด้างมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงสร้างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออน
- 4) ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) จากสมบัติการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ ทำให้สามารถใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมไอออนไดวาเลนต์ (Divalent) ได้ การแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของแคลไออน
- อุณหภูมิที่ใช้
- ความเข้มข้นของแคลไออนในสารละลาย
- ชนิดของแอนไออนที่รวมตัวกับแคลไออนในสารละลาย
- ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน aqueous solution)
- ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์

5) ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (Capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคลไออนเกิดขึ้นได้มากและรวดเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหามลภาวะได้ คือ ฟอสเฟตทำให้พืชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เจริญเติบโตรวดเร็ว และเมื่อทับถมกันมากเข้าจะทำให้น้ำเน่าเสีย ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัด นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

6) ใช้ในการเลี้ยงปลา (Aquaculture) การเลี้ยงปลาส่วนมากจะเลี้ยงในบ่อ จึงมีปัญหาการกำจัดของเสียที่ปลาล่อยออกมา เนื่องจากของเสียที่ปลาล่อยออกมามีปริมาณแอมโมเนียมาก แอมโมเนียเพียงประมาณ 2-3 พีพีเอ็ม ในบ่อปลาก็สามารถทำให้ปลาเป็นโรคเหงือก หูดการเจริญเติบโต ทำลายสมอง เป็นหมันและตายในที่สุด การใส่ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite และ mordenite ลงในบ่อปลาเพียง 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตรของน้ำในบ่อปลา สามารถกำจัดแอมโมเนียได้ถึง 97-99 เปอร์เซ็นต์

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

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

ตัวอย่างการนำซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ (Breck, 1974)

1) การกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียชุมชน

การศึกษาช่วงเริ่มต้นในการใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดแอมโมเนีย ในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย พบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับแอมโมเนียได้ต่ำ ทำให้กำจัดแอมโมเนียได้น้อยและเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำเค็มตามมาด้วย

วิธีที่เหมาะสมที่คิดกว่าถูกเสนอเป็นรายงานโดย Ames ได้แสดงว่า มีการใช้ซีโอไลต์หลายชนิดที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ และให้ผลดีกว่าแบบดั้งเดิม ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite และ Union Carbide's 40 เป็นซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดหลังจากการทดสอบโดยใช้ในโรงงานต้นแบบ พบว่า แอมโมเนียมนั้นถูกกำจัดออกไปได้มากถึง 95 เปอร์เซ็นต์

2) การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอก

หน้าที่หลักของฟอสเฟตที่ผสมอยู่ในผงซักฟอก คือ ลดแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง โดยใช้ซีโอไลต์ชนิดผงที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ไปทำการกำจัดแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม โดยที่ผงซักฟอกเหล่านี้จะรับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมจะลดปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่ในน้ำในระดับต่ำหรือไม่มีอยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ในหลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรปและสถานที่อื่นๆ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบนี้มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ซีโอไลต์ในแต่ละปี พบว่ามีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้ในปริมาณหลายล้านปอนด์ทั่วโลก

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

3) การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากได้มีการตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคตจึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่ไม่ใช้ปิโตรเลียม และมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งพลังงานในอนาคต

เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นจากถ่านหิน และการสังเคราะห์แก๊สโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งโดยตรงหรือจะนำไปใช้เป็นแบบผสมกับน้ำมันเบนซินก่อนที่จะใช้กับเครื่องยนต์

กระบวนการแบบใหม่ที่ใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลให้ไปเป็นน้ำมันเบนซิน คือ การใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท โมบิลอยล์ ซึ่งได้ตั้งชื่อกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ MTG (Method To Gasoline)

บริษัท โมบิลอยล์ ได้สร้างโรงงานที่ใช้กระบวนการ MTG และใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นแห่งแรกที่โมทูเนีย ประเทศนิวซีแลนด์ และเริ่มต้นทำการผลิตในปี ค.ศ. 1985 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่นิ่ง (fixed-bed) และที่ประเทศเยอรมันตะวันตกก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่ต่างกันที่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิด ไคซ์เบด (fluidized-bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้าและสามารถประสบความสำเร็จ โดยได้มีการสร้างโรงงานต้นแบบไว้ที่เมืองเวสเซนลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้ fluidized-bed ได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบชนิดอื่นๆ เช่น แก๊สธรรมชาติมาใช้แทนเมทานอลได้

5) การแยกและนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

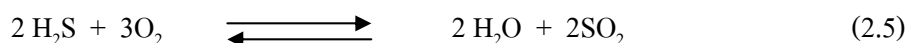
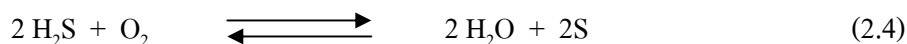
ซีโอไลต์หลายชนิดมีความสามารถในการคัดเลือกโลหะหนัก ทำให้สามารถนำโลหะที่มีค่าเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ หรือเอาไว้ใช้กำจัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากเกิดความคุ้มทุนในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ได้ ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite และ mordenite ถูกศึกษาเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักโดยเฉพาะ Cd Cu Pb และ Zn ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการคัดเลือกโลหะได้จะทำการเปลี่ยนไอออนของโลหะเงิน (Ag) เพื่อดึงเอาโลหะเงินออกจากน้ำเสีย

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

6) การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากฟลูแก๊ส

กระบวนการหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกเรียกว่าเป็นกระบวนการของเคลาส์ (Claus process) เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊ส H_2S กับ SO_2 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกำมะถันผง ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

- แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส และจำกัดปริมาณของอากาศที่ป้อน ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกำมะถันและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามสมการ



- แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เหลือ ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส บนตัวเร่งปฏิกิริยา bauxite หรือ alumina ได้กัมมะถัน ตามสมการ



สมการ (2.4) ถูกเรียกว่าเป็นปฏิกิริยาของเคลาส์ (Claus reaction) โดยกระบวนการของเคลาส์นี้สามารถได้กัมมะถันออกมาจากปฏิกิริยาถึง 96 เปอร์เซ็นต์

ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้ดี เนื่องจากโครงสร้างมีรูพรุนอยู่สูง และมีสภาพความเป็นกรด ซึ่งจะดูดซับโมเลกุลแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างของตัวมันเองได้ดี ในช่วงปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา ได้มีการศึกษาสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเคลาส์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้แก่ ทำให้สมบัติในการเร่งทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ปรับปรุงความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยในด้านการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเกิดขึ้นมา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการเคลาส์ ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม (alumina) เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมในการดูดซับและทำปฏิกิริยาได้ดี จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้สารดูดซับเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาหลายชนิด เช่น งานวิจัยของ Gasper-Galvin L. D. (1998) ทำการทดสอบสารดูดซับที่เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะหลายชนิดบนซีโอไลต์ในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 650-870 องศาเซลเซียส งานวิจัยของ Young-Soo, L., Hee, T. K., and Kyong-Ok, Y. (1995) ใช้ Fe_2O_3 ในปฏิกิริยา sulfidation ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส งานวิจัยของ Lin S. Y. และ คณะ (1995) ใช้ CaO ในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส สารเหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับไฮโดรเจนซัลไฟด์มาก และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยที่มีผู้รายงานไว้ พบว่า มีองค์ประกอบหลายชนิดที่เหมาะสมสามารถทำหน้าที่เป็นสารดูดซับ ดังมีผู้วิจัยไว้แล้วข้างต้น อาทิ เช่น SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นต้น จึงเป็นมูลเหตุที่จะเอาเถ้าลอยมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในอากาศเสียจากการเผาไหม้ได้

2.2 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash) (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538 และ อนิรุทธิ์ รัชไชย, 2528)

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

2.2.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจะประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งจากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3-30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วนจะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ระหว่างการเผาไหม้ เช่น ดินเหนียวและหินดินดานจะสูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนเนตจากการสลายตัวซึ่งจะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับตัวใหม่เกิดเป็นคาร์บอนเนต (CO_3^{2-}) ในถ่านหินจะมีสารแคลเซียมคาร์บอนเนต (CaCO_3) ส่วนในเถ้าลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เถ้าลอยเหล่านี้ประกอบไปด้วย ซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบแอสคาโลน นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอนเนตและซัลเฟต

ระดับปริมาณเถ้าลอยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ต่างๆ กันในโลก หรืออาจแตกต่างกันเนื่องจากระดับชั้นของพื้นผิวในพื้นที่เดียวกัน หรือมีความต่างกันในเมืองที่ต่างกัน

2.2.2 การจัดรูปของเถ้าลอยขณะทำการเผาไหม้

ขณะทำการเผาไหม้ เถ้าลอยจะเกิดการจัดรูปออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) เถ้าหนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของเถ้าหลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาไอน้ำ ซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีมุมหลายมุม เนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค เถ้าหนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อนให้เกิดสแลก (Slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุมและมีสมบัติของซิลิกาด้วย สำหรับขนาดของเถ้าหนักนั้นอยู่ระหว่าง 0.03-30 มิลลิเมตร แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร

2) ใส เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของไอนี้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของเถ้าลอยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับเถ้าลอย ปริมาณของไอนี้ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ความเข้มข้นและสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3) เถ้าลอย เป็นอนุภาคของแข็ง ซึ่งลอยอยู่ในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้และลอยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับแก๊สอื่นๆ เถ้าลอยส่วนใหญ่จะถูกเก็บโดยเครื่องดักทางกล (Mechanical collectors) หรือเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยจะผ่านเครื่องดักจับ และถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศไป เถ้าลอยจะมีปริมาณร้อยละ 10-85 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยา พบว่า เถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของเถ้าลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าเถ้าลอยที่มีผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ นั้น ได้แก่ อะลูมินา แมกเนไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มุลไลต์ และควอตซ์

สิ่งที่น่าสนใจของเถ้าลอย คือ ความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณกว่าร้อยละ 20 ของเถ้าลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีส่วนประกอบของซิลิกา ในไตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 20-200 ไมครอน เถ้าเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัด

2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักเก็บเถ้าลอยถ่านหิน

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

สำหรับการเก็บเถ้าลอย เครื่องมือที่ดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 เนื่องจากคุณภาพของถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าจะมีคุณภาพแย่งลงเนื่องจากมีปริมาณเถ้ามากขึ้น และเถ้านี้จะมีส่วนประกอบเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะฉะนั้นความสามารถในการทำงานของเครื่องตกตะกอนจะต้องเหมาะสมกับเถ้าลอยที่ถูกดักเก็บ เช่น มีความต้านทานไฟฟ้า แต่สมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถ่านหินที่ใช้หรือการทำงานของหม้อไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

2) ถุงกรอง (Baghouse) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคเถ้าลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงในโครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีพอๆ กับเครื่องตกตะกอน และถูกนำไปใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าบางแห่ง

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

2.2.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ

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

2.2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

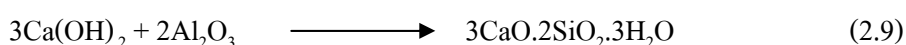
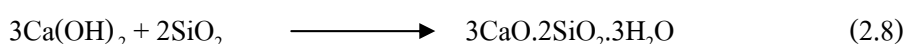
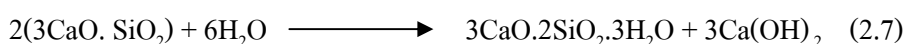
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินจะขึ้นกับปัจจัยทางด้านธรณีวิทยา และด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลัก แต่อาจขึ้นอยู่กับภาวะการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเถ้าลอยจะเป็นไปตามชนิดของหินและดิน คือ มีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม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

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในประเทศต่างๆ ตามที่ได้รวบรวมและสรุปไว้ พบว่าองค์ประกอบของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่างถ่านหินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง โดยเฉพาะแล้วเถ้าลอยจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังต่อไปนี้

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

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

เนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าลอยเป็นซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) เถ้าลอยจึงสามารถรวมตัวกับปูนขาว (Lime) ได้เมื่อมีน้ำอยู่ และทำให้เกิดสารเชื่อมประสาน (cementitious material) จึงถือได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุปซ์โซลาน (pozzolan) ชนิดหนึ่ง ปฏิกริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานที่แสดงโดย Mindess และ Young (วิชาญ ภูพัฒน์, 2526) แสดงได้ดังนี้คือ



2.2.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยถ่านหิน (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526)

ถ้ำลอยถ่านหินมีลักษณะพิเศษเฉพาะ คือ มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ มีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอและมีความชื้นเหนียว (plasticity) ต่ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของถ้ำลอยจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉลี่ยถ้ำลอยในประเทศญี่ปุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.14 ในประเทศอเมริกามีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 และในประเทศอังกฤษมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.10 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยนั้นต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินโดยทั่วไปที่ปรกติอยู่ในช่วง 2.60-2.80 จากการสังเกตโดยใช้กล้องขยาย พบว่า เม็ดถ้ำลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีหลักฐานที่ทำให้เชื่อว่าเม็ดกลมเหล่านี้ดัดในจะกลวง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ถ้ำลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดดินโดยทั่วไป

เนื่องด้วยถ้ำลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกบด ขนาดของเม็ดถ้ำลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่านหิน และอุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้ โดยทั่วไปพบว่าเม็ดถ้ำลอยมีขนาดอยู่ในช่วงขนาดกลางถึงหยาบ

ในสภาพปกติถ้ำลอยจะเป็นฝุ่นฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะแฉะเป็นเลนเมื่ออิมตัวด้วยไอน้ำ แต่ถ้าผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมและได้รับการบดอัดที่เพียงพอแล้วถ้ำลอยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (unconfined compressive strength) สูง

การจัดรูปของถ้ำถ่านหินระหว่างส่วนของถ้ำลอยกับถ้ำหนักจะขึ้นอยู่กับชนิดของเตาเผา ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิของการหลอมถ้ำ และชนิดของหม้อต้ม เตาเผาเป็นปัจจัยแรกที่สำคัญในการเกิดการแยกส่วนของถ้ำลอยและถ้ำหนัก เช่น เตาเผาชนิดสโตเกอร์ (Stoker) จะมีการปล่อยถ้ำลอยออกมาน้อยที่สุด

สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป

Specific Gravity	1.901-2.69
Specific Surface Area (cm ² /g)	1220-8100
Optimum Water Content (% , standard compaction test)	18-45
Maximum Dry Unit Weight (kN/m ³)	9-16

ในหน่วยไซโคลนอุณหภูมิของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ้ำประมาณร้อยละ 80-85 ของถ้ำที่จะหลอม และรวมตัวกันเกิดเป็นสแลก ส่วนหนึ่งของถ้ำลอยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในหน่วยพัลเวไรซ์ (Pulverized coal) มีถ้ำลอยเกิดขึ้นร้อยละ 65-80 และเกิดถ้ำหนักร้อยละ 20-35 สำหรับอุณหภูมิการ

หลอมของเถ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง เถ้าที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปของเถ้าหนักนั่นคือหม้อต้มไอน้ำที่กินเปียกจะก่อให้เกิดเถ้าหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่กินแห้ง

2.2.7 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบางประการที่เกิดจากเถ้าลอย

ผลกระทบต่อสุขภาพ สำหรับในเมืองถ่านหินนั้น สารที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ประกอบด้วย อะลูมิเนียมซิลิเกต และซิลิกาไดออกไซด์ รวมถึงสารประกอบออกไซด์ของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และในถ่านหินนั้นยังมีซิลิกาอิสระที่เรียกว่า α -quartz จากส่วนประกอบนี้อาจจะเป็นอันตรายต่อระบบหายใจได้ หากมีการเข้าไปสะสมภายในร่างกายมากๆ โดยส่วนของ α -quartz อาจเป็นสาเหตุให้เกิดโรคปอดอักเสบ ถ้าหากอยู่ในภาวะที่เสี่ยงคือ การทำงานอยู่ภายใต้สภาวะที่มี α -quartz เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

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

1) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุถม (Fill Material)

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

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

2) การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุโครงสร้างของถนน

ส่วนของถนนที่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ คือ ชั้นรองพื้นทาง (sub-base) และชั้นพื้นทาง (base) แม้ว่าเถ้าลอยที่บดอัดแล้วจะมีกำลังค่อนข้างสูงแต่คงยังมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสม

ในการนำไปใช้ในงาน โครงสร้างของถนนโดยลำพัง แต่จะสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาว บางครั้งอาจใช้เป็นสารสำหรับปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมือนกับปูนซีเมนต์หรือปูนขาวก็ได้

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เหมือนกับขอยแอกกริเกต (soil aggregate) โดยมีซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious material) กำลั้งอัดของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสมบัติของเถ้าลอย ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มความหนาแน่นจากการบดอัด และประสิทธิภาพในการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับเถ้าลอย ในการออกแบบ ส่วนผสมมักใช้กำลั้งอัด (unconfined compressive strength) เป็นเกณฑ์กำหนด ในประเทศอังกฤษ ใช้กำลั้งอัด 2.8 MN/m^2 ที่อายุ 7 วัน เป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการปรับปรุงสมบัติขอยแอกกริเกตต่างๆ ด้วยปูนซีเมนต์ พบว่า สำหรับเถ้าลอยต้องใช้ปูนซีเมนต์ผสมประมาณร้อยละ 5-15

- การปรับปรุงสมบัติของเถ้าลอยด้วยปูนขาว การผสมปูนขาว (lime) ในเถ้าลอยจะช่วยให้กำลั้งอัดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการเพิ่มกำลั้งอัดนั้นต่างจากการผสมปูนซีเมนต์คือ ในกรณีของปูนซีเมนต์นั้นจะมีสารเชื่อมประสานเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบของซีเมนต์เอง ส่วนในกรณีของปูนขาวสารเชื่อมประสานจะเกิดจากปฏิกิริยาปัสโซลานิก (puzzolanic reaction) ระหว่างปูนขาวกับซิลิกาในเถ้าลอย ในเกณฑ์กำลั้งอัดที่ใกล้เคียงกันมักจะใช้ปูนขาวผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์

- การใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงสมบัติของดิน ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้กำลั้งอัดของขอยแอกกริเกตเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่พบว่าจะต้องใช้ปูนขาวผสมกับเถ้าลอยในการใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติ ทั้งนี้เพื่อให้มีปฏิกิริยาปัสโซลานิกสร้างสารเชื่อมประสานได้มากขึ้น ขอยแอกกริเกตที่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ดีโดยใช้เถ้าลอยปูนขาวได้แก่ พวกทรายที่มีมวลละเอียดน้อย

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

3) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตสามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เป็นสารเพิ่ม (Admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้งานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้ คือ

ข้อดี

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

ข้อเสีย

- อัตราการเพิ่มของกำลังอัดช้า
- สมบัติของเถ้าลอยแปรปรวนไม่แน่นอน ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก

การใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์

วิชาญ ภูพัฒน์ (2526) กล่าวว่า การใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบผลิตซีเมนต์สามารถทำได้ เนื่องจากเถ้าลอยมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ด้วยจึงสามารถนำเถ้าลอยนี้ไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ได้

ไม่เฉพาะแต่งานคอนกรีตเท่านั้นที่สามารถนำเถ้าลอยมาผสมทดแทนในบางส่วนของปูนซีเมนต์ได้ งานเกือบทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบก็สามารถนำเถ้าลอยไปใช้ด้วยได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การผลิตคอนกรีตบล็อก การใช้ในการผลิตซีเมนต์กราวด์ (cement groundting) เป็นต้น การนำไปใช้อีกอย่างหนึ่งที่แตกต่างจากแนวทางที่กล่าวมาในข้างต้นคือ ใช้ทำมวลรวมเบา (light weight aggregate) ในกรณีนี้เถ้าลอยจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เม็ดเถ้าลอยเกาะตัวเป็นก้อนที่แข็งแรงมาก และสามารถใช้เป็นมวลรวมแทนหินย่อยได้ มวลรวมนี้จะเบากว่าหินย่อยธรรมดาอย่างมากซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตสำหรับงานอาคาร

2.3 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารที่บริเวณพื้นผิวกับพื้นผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ดูดติด เรียกว่า สารดูดติดผิว (adsorbent) สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้ มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ (ประวัชรกรณ สาทิตคุณ, 2546)

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

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

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

2.3.1 กลไกการดูดติดผิว (ประวัชรกรณ สาทิตคุณ, 2546)

เนื่องจากการดูดติดผิวเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวและของแข็ง หรือก๊าซและของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีขั้นตอนการเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk solution transport สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิว การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นโดยการแพร่

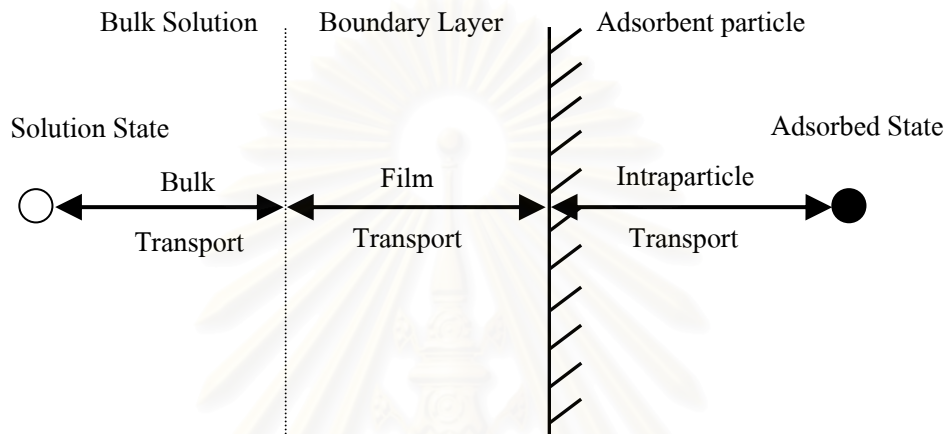
ขั้นตอนที่ 2 Film diffusion transport โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิว ระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราไหล ถ้าอัตราไหลสูง ระยะทางสั้น

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้นและถูกดูดติดผิวทางกายภาพ

ขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด เรียกว่า rate-limiting step ซึ่งจะควบคุมอัตราการกำจัดในถึงปฏิกิริยาที่มีความปั่นป่วนสูง film diffusion และ pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด film diffusion จะควบคุมในขั้นต้น หลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารดูดติดผิวในช่องภายในสารดูดติดผิว pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด

ขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว

ที่มา : Eckenfelder, 1966

2.3.2 การดูดติดผิว

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

ข้อแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพที่แตกต่างจากการดูดติดผิวทางเคมี มีดังต่อไปนี้

- 1) การดูดติดผิวทางกายภาพ ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน การดูดติดผิวทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ สารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับ (desorption) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผันกลับไม่ได้

2) การดูดซับของสารดูดซับทางกายภาพ ไม่มีความจำเพาะกับบริเวณโมเลกุลของสารดูดซับ สามารถดูดซับได้ทั่วบริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ ในทางด้านตรงกันข้าม การดูดซับทางเคมีมีความจำเพาะกับบริเวณที่สามารถดูดซับได้

3) ความร้อนในการดูดซับทางกายภาพน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี ความร้อนในการดูดซับทางกายภาพประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อโมล สำหรับการดูดซับที่มีโพรงภายในขนาดเล็ก ส่วนความร้อนของการดูดซับทางเคมีอยู่ในช่วง 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมล

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1) ความดัน อัตรารวดในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันของระบบ ถ้าน้ำมีความดันของระบบต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าความดันสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความดันในถังดูดซับ คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีแล้วถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้นเนื่องจากความดันสูง

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกล็ด (GAC)

3) ขนาดและลักษณะของสารดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดซับได้ดี นอกจากนี้ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลาย นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

4) พิเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถจะเกาะติดผิวของสารดูดซับได้ดี

5) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบ Exothermic

6) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับและอายุการใช้งานของถังดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

2.3.4 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

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

ระบบการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับไว้หลายประการ แต่ที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ Freundlich Adsorption Isotherm และ Langmuir Adsorption Isotherm

1) Freundlich Adsorption Isotherm

Freundlich Adsorption Isotherm จัดเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมากสมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว

สำหรับสมการของ Freundlich สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.10)

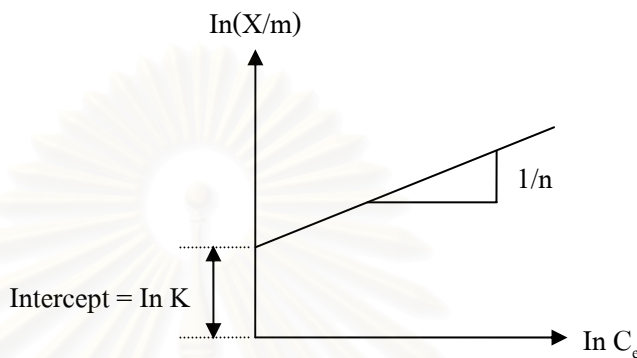
$$\frac{X}{m} = KC_c^{1/n} \quad (2.10)$$

โดยที่

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนัก; มิลลิกรัมต่อกรัม

- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มิลลิกรัมต่อลิตร
- K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ; ลิตรต่อกรัม
- $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ (2.10) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(X/m)$ และ $\ln C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich

จากรูปที่ 2.17 ค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln K$ สำหรับการดูดซับของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดซับส่วนใหญ่จะมีค่า $1/n$ ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่าความชันสูงคือ มีค่า $1/n$ เข้าใกล้ 1 นี้จะพบว่า ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีค่ามากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนี้มีค่าต่ำลง และในกรณีที่กราฟมีค่าความชันน้อยๆ ค่า $1/n$ จะน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะพบว่าความสามารถในการดูดซับนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลง จากสมการของ Freundlich นี้ได้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ หรือค่า (X/m) จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดซับจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้นด้วย

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

$$\ln \frac{(C_0 - C_e)}{m} = \ln K + \frac{1}{n} \ln C_e \tag{2.11}$$

สมการที่ (2.11) นี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดซับทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

2) Langmuir Adsorption Isotherm

Langmuir Adsorption Isotherm บางครั้งเรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model มีสมมติฐานที่สำคัญ ดังนี้

- มีพื้นที่สำหรับการดูดซับจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับจะอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน

- แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับผิวจะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่ามีการดูดซับเพียงชั้นเดียว

- ตรงบริเวณดูดซับผิวจะเกิดอัตราการดูดซับ และการคายสารออก ซึ่งอัตราการดูดซับมีมากกว่าอัตราการคายสารออกจนกระทั่งถึงภาวะสมดุล (อัตราการดูดซับเท่ากับการคายสารออก) พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุกๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้อย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิว หรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้

สำหรับสมการ Langmuir สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.12)

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

โดยที่

X = X/m , ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลาง; มิลลิกรัมต่อกรัม

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว; มิลลิกรัมต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มิลลิกรัมต่อลิตร

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ; ลิตรต่อมิลลิกรัม

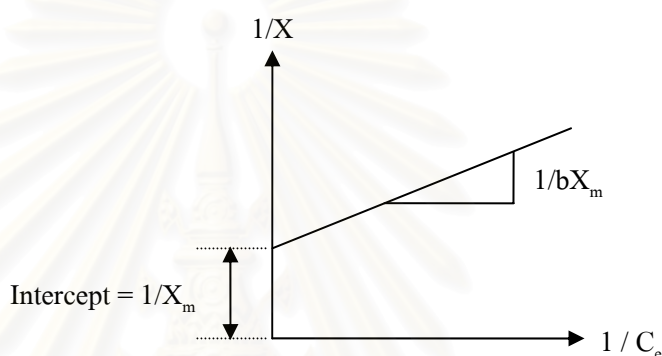
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ α จากสมการสามารถเขียนได้เป็น

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

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

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

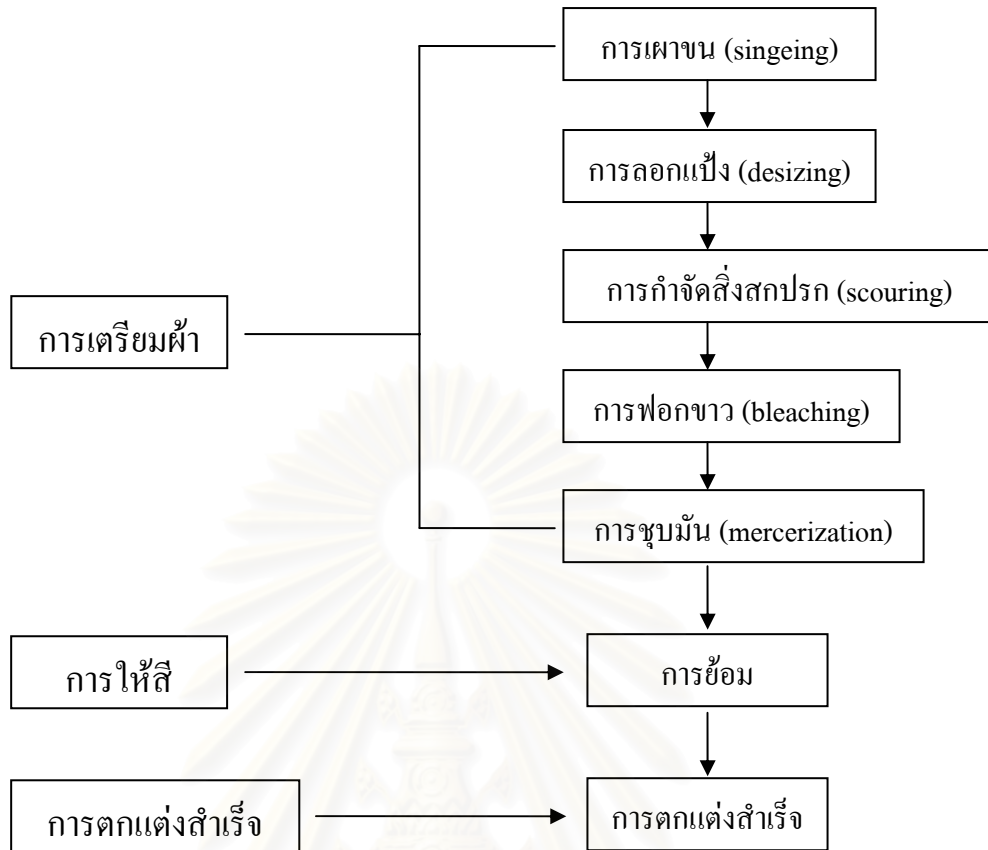
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/X$ และ $1/C_e$ ได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir

2.4 กระบวนการฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นใยหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรงหรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลายได้ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณภาพของเส้นใย โดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้น้ำมาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม
ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542

2.4.1 การเตรียมผ้าก่อนการย้อม

กระบวนการเตรียมผ้า นับว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากการฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบออกจากโรงปั่นหรือทอ มาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี

ขั้นตอนในการเตรียมผ้าโดยทั่วไปมี 5 ขั้นตอน คือ

- การเผาขน (singeing)
- การลอกแป้ง (desizing)
- การกำจัดสิ่งสกปรก (scouring)
- การฟอกขาว (bleaching)
- การชุบมัน (mercerization)

1) การเผาขน (singeing)

ปกติผ้าฝ้ายและผ้าเรยอนจะประกอบด้วยเส้นใยสั้น จึงมักพบว่ามีปลายเส้นใยโผล่ออกมาบนผิวผ้า และส่วนนี้เองที่มีผลทำให้ผ้าติดไม่สม่ำเสมอ และสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเผาขนหรือเส้นใยสั้นๆ ที่โผล่ออกมาบนผิวผ้า การเผาขนมี 3 วิธี ได้แก่ การใช้เปลวก๊าซ แผ่นโลหะ ความร้อน และไฟฟ้า (เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ, 2541) แต่การเผาขนด้วยเปลวก๊าซเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เพราะมีประสิทธิภาพสูงและการเดินเครื่องจักรก็ง่ายกว่าวิธีอื่น การเผาขนอาจเผาขนผ้าทั้งสองด้านหรือเผาแต่เพียงด้านเดียวก็ได้ การเผาขนขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของผ้า และจุดมุ่งหมายของการนำผ้านั้นไปใช้งาน อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญก็คือ ต้องเผาให้ขนไหม้สม่ำเสมอทั่วกันทั้งผืนผ้า และไม่ใช้ความร้อนสูงจนกระทั่งเส้นใยเสื่อมคุณภาพ นอกจากนี้ถ้าจะให้ได้ผลดีที่สุดต้องทำการเผาขนหลังจากการลอกแป้ง จึงจะกำจัดเส้นใยสั้นที่โผล่บนผิวผ้าได้สม่ำเสมอ แต่ในทางปฏิบัติมักทำการเผาขนก่อนการลอกแป้ง ทั้งนี้ถ้าที่เกิดจากการเผาขนจะมีผลต่อพีเอชของน้ำในขั้นตอนต่อไปที่มีการใช้น้ำในกระบวนการ เช่น การลอกแป้ง การกำจัดสิ่งสกปรก เป็นต้น

2) การลอกแป้ง (desizing)

ในขั้นตอนการทอผ้าจำเป็นต้องมีการลงแป้งเพื่อให้ด้ายยืนแข็ง และทอได้ง่ายขึ้น นอกจากจะใช้แป้งแล้วยังมีการนำสารสังเคราะห์ซึ่งเรียกว่าสารไซซิง (sizing agent) เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol; PVA) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxyl methyl cellulose; CMC) โพลีอะคริลิก (polyacrylic) เป็นต้น แป้งหรือสารไซซิงข้างต้นจำเป็นต้องมีการกำจัดออกก่อนเพื่อทำให้การทำความสะอาดเส้นใยในขั้นตอนต่อไปได้ผลดี การลอกแป้งอาจทำโดยนำผ้าแช่น้ำร้อนให้เส้นใยพองตัว เพื่อให้สารช่วยย่อย (เอนไซม์) เข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้งบนเส้นใยได้ง่าย ซึ่งทำให้แป้งหลุดออกจากเส้นใยและอยู่ในน้ำทิ้งของกระบวนการ วิธีนี้จะทำให้การเอาแป้งออกได้ผลดีโดยเฉพาะเมื่อใช้วิธีเอาแป้งออกแบบต่อเนื่อง (เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ, 2541)

กระบวนการลอกแป้งสามารถกระทำได้ด้วยวิธีอื่นๆ อีก นอกจากวิธีการต้มด้วยสารช่วยย่อยดังที่ได้กล่าวข้างต้น คือ แช่และหมักด้วยกรด (acid-steeping) แช่และหมักด้วยเชื้อต่างๆ (rot-steeping) และ การใช้สารออกซิไดซ์ซิง (oxidizing agent) (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) ดังนั้นสารเคมีที่นิยมใช้ในการลอกแป้งมี 2 ประเภท คือ สารลอกแป้งประเภทเอนไซม์และสารลอกแป้งประเภทออกซิไดซ์ซิง สารลอกแป้งแต่ละประเภทมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ทั้งนี้ต้องเลือกให้เหมาะสมจึงจะทำการลอกแป้งได้ผลดีที่สุด ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้สารลอกแป้ง ได้แก่ ชนิดของสารไซซิง ชนิดของเครื่องจักร กรรมวิธีการผลิต สารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ร่วม เป็นต้น ประโยชน์ของการลอกแป้งมีดังนี้คือ ทำให้ผ้าเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอขึ้น เป็นผลให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่อไปมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประหยัดเวลาและสารเคมี และทำให้ผ้านุ่ม ไม่หยาบกระด้าง

3) การกำจัดสิ่งสกปรก (scouring)

การทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ติดบนเนื้อผ้าเป็นขั้นตอนที่จำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะผ้าฝ้ายหรือเส้นใยธรรมชาติ เพื่อให้เส้นใยสะอาดและบริสุทธิ์ ช่วยให้สีย้อมสามารถซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น วิธีการทำความสะอาดมีหลายวิธี เช่น การต้มในหม้อเคียร์ (kier boiling) การอัดสารเคมีแล้วอบไอน้ำ (pad steam) แบบต่อเนื่องโดยการรวมถังหลายๆ ถังและที่อบไอน้ำแบบถังรูปตัวเจ (j-box) หรือรูปตัวยู (u-box) เข้าด้วยกัน

การกำจัดสิ่งสกปรกในเส้นใยฝ้ายจะมีกรรมวิธียุ่งยากกว่าเส้นใยประดิษฐ์ เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีสิ่งสกปรกตามธรรมชาติปนเปื้อน ได้แก่ สารขี้ผึ้ง (wax) ขี้ผึ้งเทียม (wax-like substance) แพลติน โปรตีน เศษใบไม้ เปลือกเมล็ดฝ้าย เป็นต้น ส่วนเส้นใยประดิษฐ์ (เช่น โพลีเอสเตอร์ ไนลอน) มีความสกปรกน้อยกว่าเส้นใยฝ้าย และสิ่งสกปรกจากเส้นใยเหล่านี้ส่วนมากเป็นสารหล่อลื่นที่ถูกเติมเข้าไปในช่วงปั่นด้ายและทอเป็นผ้าผืน จึงสามารถกำจัดได้ง่ายกว่าเส้นใยฝ้าย เพียงแค่การต้มด้วยสบู่หรือเพิ่มโซดาแอซอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4) การฟอกขาว (bleaching)

เป็นขั้นตอนของการขจัดสีที่มีอยู่บนเส้นใย ส่วนใหญ่คิดมาตามธรรมชาติหรือจากการปนเปื้อนที่เกิดในขั้นตอนการปั่นหรือการทอ ซึ่งหลังจากทำความสะอาดแล้วจะยังคงมีสีและวัสดุเจือปนอื่นๆ เหลืออยู่ในผ้า การฟอกขาวจะทำให้สิ่งเหล่านั้นสลายตัวหรือลดน้อยลง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การฟอกขาวสมบูรณ์ การฟอกขาวเพื่อนำไปย้อมกึ่งฟอกขาว เป็นต้น

การฟอกขาวมีความจำเป็นเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาวและผ้าย้อมสีอ่อน เพื่อให้ได้ความขาวหรือได้สีที่สดใส สำหรับผ้าที่นำไปย้อมสีเข้มอาจไม่จำเป็นต้องฟอกขาวก็ได้ สำหรับเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งค่อนข้างสะอาดและขาวอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องฟอกขาวก็ได้ ยกเว้นกรณีที่ต้องการนำไปทำเป็นผ้าขาว

สารฟอกขาวที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide; H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium Hypochlorite; $NaOCl$) และโซเดียมคลอไรต์ (Sodium Chlorite; $NaClO_2$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคลอรีนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การใช้สารคลอรีนจะทำให้เส้นใยเปราะและเหลืองได้เพราะยังคงมีคลอรีนเหลือค้างอยู่ ตรงกันข้ามถ้าฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้เส้นใยเสียหายน้อย เส้นใยขาวสะอาดทนทานกว่า และวิธีฟอกก็ง่ายกว่าด้วย

การฟอกขาวที่สมบูรณ์ให้ผลดังนี้ คือ จะได้ผ้าที่มีความขาวอย่างสม่ำเสมอและถาวรเมื่อเก็บไว้นานๆ ผ้าไม่กลับเป็นสีเหลือง ผ้าที่ฟอกแล้วต้องมีการดูดซึมสีย้อมและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งต้องไม่ทำให้ผ้าเปื่อย การฟอกขาวเส้นใยให้ผลดีจะต้องมีสภาวะดังต่อไปนี้ คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานพอ มีการยึดตัวต่ำและสามารถหดตัวกลับได้อย่างอิสระในระหว่างการฟอก ผ้าจะต้องมีการคลี่ตัวออกเพื่อป้องกันการยับ (โดยเฉพาะเส้นใยโพลีเอสเตอร์) และจะต้องมีมาตรฐานเดียวกันในกระบวนการผลิตเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ

5) การชุบมัน (mercerization)

การชุบมันหรือเมอร์เซอไรซ์เป็นการเพิ่มความเงามันให้กับเส้นด้ายและผ้า ซึ่งส่วนใหญ่มักกระทำกับเส้นใยฝ้ายและลินินหลังขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกและฟอกขาวมาแล้ว โดยนำผ้ามาอัดด้วยสารละลายโซดาไฟเข้มข้น (ร้อยละ 15-30) ให้ซึมเข้าไปภายในทั้งที่ฝ้ายยังถูกดึงให้ตั้งอยู่ ซึ่งในทางปฏิบัติกระทำได้โดยแช่ผ้าให้จมอยู่ในสารละลายโซดาไฟ แล้วผ่านลูกกลิ้งบีบน้ำออก

หลังจากผ่านขั้นตอนการชุบมันแล้ว สมบัติทางเคมีของฝ้ายไม่เปลี่ยนแปลง แต่สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป คือ ทำให้ลักษณะบิดเป็นเกลียวของเส้นใยคลายตัวกลับมาเป็นเส้นเรียบ ระบายมีความเสถียรและมีความคงทนมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เส้นใยส่วนที่เป็นผลึกมีการขยายตัวและหลวมมากขึ้น มีผลทำให้การดูดซึมน้ำที่ข้อมและสารเคมีดีขึ้นในขั้นตอนต่อไป

สามารถสรุปจุดมุ่งหมาย วิธีการและสารเคมีของการเตรียมผ้าได้โดยแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 จุดมุ่งหมายของการเตรียมผ้า

ขั้นตอน	จุดมุ่งหมาย	วิธีการและสารเคมี
เผาขน	กำจัดขนหรือเส้นใยที่โผล่เหนือผ้า	เปลวไฟ แผ่นความร้อน
ลอกแป้ง	ย่อยและกำจัดแป้ง ทำให้เส้นใยพองตัว	เอนไซม์ สารออกซิไดซ์ซิง
กำจัดสิ่งสกปรก	กำจัดสิ่งสกปรก ทำให้สีซึมเข้าไปในเส้นใยมากขึ้น	น้ำสบู่
ฟอกขาว	กำจัดสารมีสี ทำให้ผ้าขาวขึ้น	โซดาไฟ น้ำสบู่
ชุบมัน	ทำให้เส้นใยพองตัวอย่างสม่ำเสมอ และสามารถดูดซึมน้ำที่ข้อมได้ดีขึ้น	สารออกซิไดซ์ซิง โซดาไฟเข้มข้น

ที่มา : เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ, 2541

2.4.2 กระบวนการย้อม

2.4.2.1 การย้อมสี

กรรมวิธีในการย้อมผ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การย้อมในหม้อย้อมแบบครั้งคราว และย้อมแบบต่อเนื่องในเครื่องย้อม การย้อมแบบเป็นครั้งคราวนั้นให้ปริมาณน้ำเสียน้อยแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนเครื่องย้อมแบบต่อเนื่องให้ผลตรงกันข้ามเนื่องจากกรรมวิธีการย้อมแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน ทางด้านตัวสีย้อม สารช่วยย้อม และความสามารถติดสีบนเนื้อผ้า

เป็นต้น จึงทำให้มีปริมาณสารมลพิษที่ติดมากับน้ำข้อมแตกต่างกัน การข้อมที่มีประสิทธิภาพ คือ การข้อมให้ผ้ามีสีสม่ำเสมอเท่ากันตลอด สีข้อมต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายในและต้องทนทานต่อการซักล้างไม่หลุดออกได้ง่าย

2.4.2.2 สีข้อม

สีข้อมมีหลายชนิด การนำสีข้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสภาวะนี้เกิดเมื่อโมเลกุลของสีข้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยได้ คือ

- 1) ไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond)
- 2) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's forces)
- 3) แรงไอออน (ionic forces)
- 4) โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond)

แรงดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีข้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แรงดึงดูดทางเคมีที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond) นอกจากนี้อิทธิพลของแรงทั้ง 4 ชนิดนี้แล้ว อิทธิพลของรูปร่างและขนาดโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อข้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีข้อมเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้นหรือถ้าโมเลกุลของสีข้อมมีลักษณะแบน และมีความกว้างความยาวมากๆ จะทำให้การติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น

สรุปได้ว่าการที่โมเลกุลของสีข้อมยึดติดกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและฟิสิกส์ โดยมีสารบางอย่างเข้าช่วยเพื่อที่จะทำให้โมเลกุลของสีข้อมและโมเลกุลของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดียิ่งขึ้น สารบางอย่างนี้คือ สารช่วยข้อม (additive)

2.4.2.3 สารช่วยข้อม

สารช่วยข้อม คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปในการข้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดติดสีได้มากขึ้น ทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความทนทานและสม่ำเสมอ

สารช่วยข้อมแบ่งเป็น 7 ประเภทด้วยกัน คือ

- 1) กรด ใช้สำหรับข้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอนเมื่อใช้สีข้อมเอซิด
- 2) ด่าง ใช้ข้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีข้อมอะโซอิก แวต และกำมะถัน
- 3) กลีโกลใช้ในการข้อมด้วยสีเอซิด และการข้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- 4) สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวต
- 5) สารนำ (carrier) ใช้เมื่อข้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- 6) สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อข้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด

7) สารรีดิวซิง ใช้สำหรับรีดิวซ์สีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูซึมเข้าไปในเส้นใย สารช่วยย้อมแต่ละประเภทนี้ยังแบ่งออกเป็นสารเคมีต่างๆ มากมาย ดังนั้นสีย้อมแต่ละชนิดมีสารช่วยย้อมแตกต่างกันไป เป็นผลทำให้น้ำเสียจากระบวนการย้อมแตกต่างกันไปด้วย

2.4.3 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานทอผ้ามีอยู่มากมายหลายชนิด ตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อม สีย้อมอาจจำแนกได้หลายประเภทตามลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งออกเป็นสารสีที่ละลายน้ำได้และสารสีที่ไม่ละลายน้ำ หรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งวิธีนี้ยุ่งยากด้วยอาศัยความรู้ทางเคมีและสูตรโครงสร้างของสีด้วย วิธีจำแนกสีย้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่าย ได้แก่ การจำแนกสีย้อมตามการใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภทด้วยกัน คือ

1) สีคิสเพิร์ส (disperse dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียด ละลายอยู่ในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจาย (dispersing agent) ที่เหมาะสม จะสามารถใส่ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วยนอกเสียจากสารพา (carrier) บางตัวที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

สีคิสเพิร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีเอโซ (azo dyes) และสีย้อม amino anthraquinone ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้ปกติจะประกอบด้วยอนุพันธ์ของ ethanoline-NH₂CH₂CH₂OH หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2) สีเอซิด (azid dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และ โพลีเอสเตอร์ ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน

3) สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งหนึ่งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า คัปลิง (coupling)

4) สีย้อมเบสิก (basic dyes)

ใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (chromofore) ให้แกทอออน

ทำให้เรียกสั้นๆ ว่า สีแคทอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

5) สีย้อมไคเรกต์ (direct dyes)

บางครั้งเรียกว่า สีย้อมฝ้าย เนื่องจากเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรก ที่สามารถย้อมติดเส้นใยได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันจะใช้เกลือเข้าช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเฮโซ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้

สีย้อมนี้ให้คุณสมบัติในการย้อมคงทนตลอด จนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่คงทนดีโครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิต และราคาจำหน่ายย้อมสูงขึ้นด้วย

6) สีย้อมเมอร์แดนท์ (merdant dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีย้อมเอซิดที่สามารถก่อเป็นสารเชิงซ้อนกับโลหะ แล้วจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำ (wet fastness) ได้ดีกว่าไม่ย้อมทับ

7) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยเฉพาะ ราคาค่อนข้างถูก แต่สีย้อมไม่สดใส ตามปกติแล้วสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้ได้ชื่อว่าสีซัลเฟอร์เพราะว่า สารที่นำรีดิวซ์เป็นสารละลายของโซเดียมซัลไฟด์ และโครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ ประกอบด้วยกลุ่มธาตุซัลเฟอร์ (sulfonic group) เมื่อสีย้อมละลายในน้ำแล้วจะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใยและสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดส์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ

8) สีย้อมเวต (vat dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลาย ที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ โซเดียมไฮโครซัลไฟด์ สีย้อมเมื่อถูกรีดิวซ์แล้วจะให้สารประกอบลิวโค (leuco compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดซ์กลับคืนสภาพเป็นสีแควดที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ดี สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 ชนิด คือ สีครามอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (anthraquinoid)

9) สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายน้ำได้คุณสมบัติเป็นแอนอออนเมื่ออยู่ใน

น้ำย้อมที่เป็นต่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วย โควาลেন্টบอนด์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่เซลลูโลส สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใย ของตัวสีจะทำให้สีเข้าอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดกับเส้นใย

10) สีย้อมโลหะ (metallic dyes)

สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิดใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส และให้สีต่างๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ยึดจับตัวในเส้นใย

11) สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

นิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสารสีที่สามารถทำให้ละลายน้ำได้รูปแบบการย้อมดำเนินคล้ายกับสีแวต ก็คือต้องทำให้ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมไม่ละลายน้ำด้วยการออกซิไดซ์กลับคืน

สามารถสรุปประเภทของสีย้อมได้โดยแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ประเภทสีย้อม

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
เอซิด (acid dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แห้งเส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
เมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (metal complex acid)	- กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แห้งเส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
ไดเรกต์ (direct dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ผ้า - วัสดุ	- พันธะไอออนิก	- แห้งในสารละลายต่างอ่อน - เดิมเอเลคโตรไลท์โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟตและสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.8 ประเภทสีย้อม (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
เบสิก (basic dye)	- กระจุกตัว - ละลายน้ำได้ดี	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 - เดิมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส
ดิสเพอร์ส (disperse dye)	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก - กระจายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - อะคริลิก - เซลลูโลส - อะซิเตด	- เนื่องจากเป็นคอลลอยด์จึงเป็นการดูดติดผิวเส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 - เดิมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิถึง 130 องศาเซลเซียส
รีแอคทีฟ (reactive acid)	- กระจุกตัว - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส - ขนสัตว์	- พันธะโควาเลนต์	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมเกลือเพื่อกระจายสีไปสู่เส้นใย - หลังจากนั้นเติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยกับสีย้อม
อะโซอิก (azoic dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยา - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- เกิดการตกผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียมซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
แวกต์ (vat dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยา - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- เกิดการตกผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียมซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
มอร์แดนต์หรือโครม (mordant or chrome)	- กระจุกตัว - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ขนสัตว์	- พันธะเชิงซ้อนของเส้นใย โครม และสีย้อม	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมโซเดียมไดโครเมต เดิมสีย้อมเพิ่มอุณหภูมิถึง 98 องศาเซลเซียส

ที่มา : Buckley, 1992

2.5 แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อม (รววิทย์ เหลืองคิลก, 2544)

แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อมนี้ นอกจากสารเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.20 – 2.22 แล้ว ยังรวมถึงสิ่งอื่นๆ ที่ปะปนกับเส้นใย เช่น น้ำมันและไขมัน เป็นต้น แหล่งต่างๆ ที่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้

1) น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนย้อม และขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ และน้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้าง แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยเป็นน้ำเสียออกมาเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในกระบวนการสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

- น้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง คือ กระบวนการต้มแป้ง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสี/การตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า น้ำที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสารมลพิษสูง และมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเส้นใยที่นำมาย้อมและกระบวนการย้อมที่ใช้

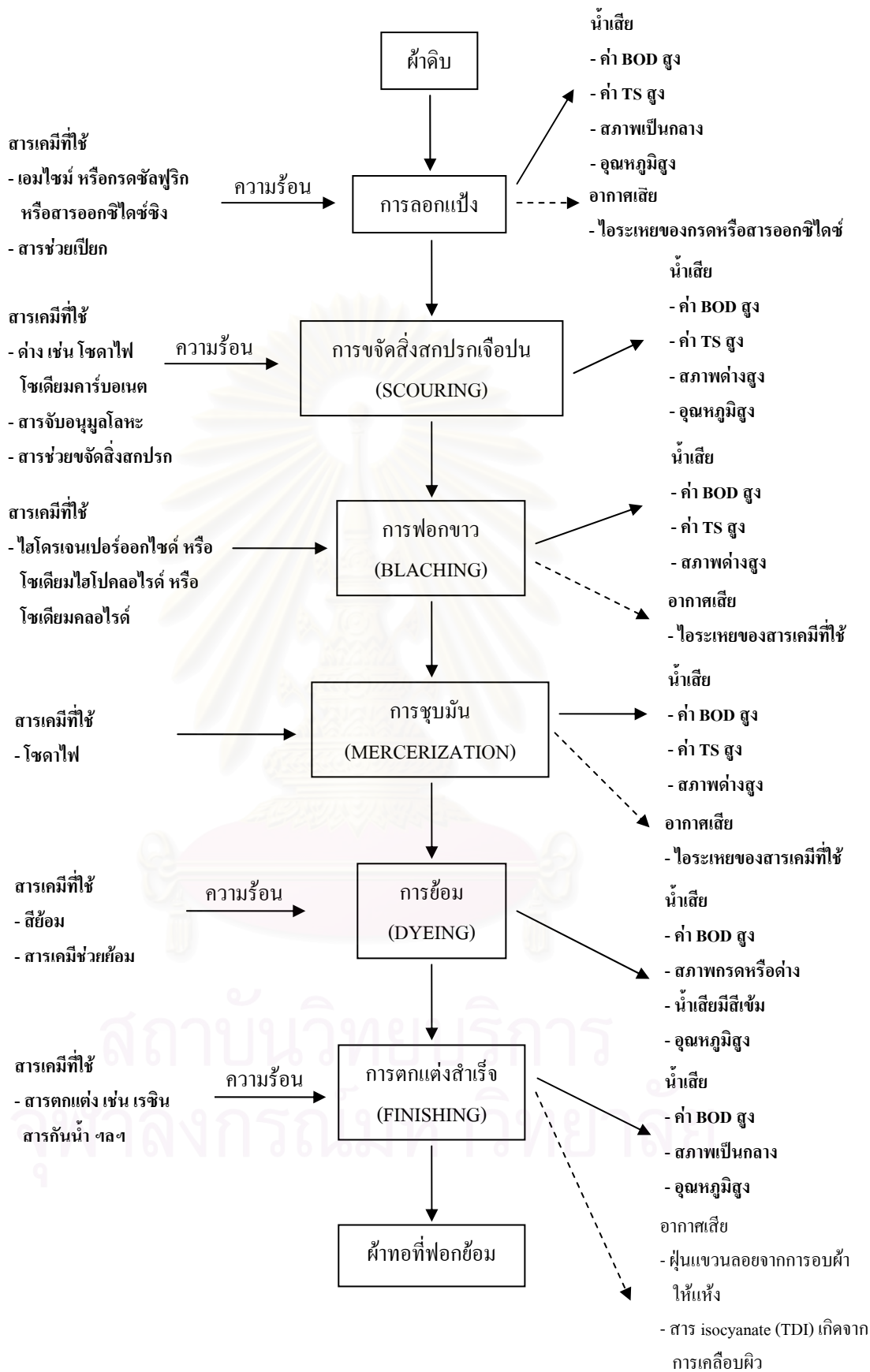
- น้ำที่ใช้ในการซักล้าง หลังจากการฟอกย้อมหรือการพิมพ์ น้ำที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำกว่าน้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง

2) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมักใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่ น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต หรือให้ความร้อนแก่ตู้อบไอน้ำ ไอน้ำนี้ถ้าปล่อยให้เย็นตัวลงและทำให้เกิดการกลั่นตัวในท่อก็จะได้น้ำสะอาดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้านำไอน้ำนี้ไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงก็เท่ากับไปเพิ่มปริมาณน้ำเสียให้มากขึ้น

3) น้ำหล่อเย็น ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องมีการลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้ลดลง ในระยะเวลาอันสั้น โดยการใช้ น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

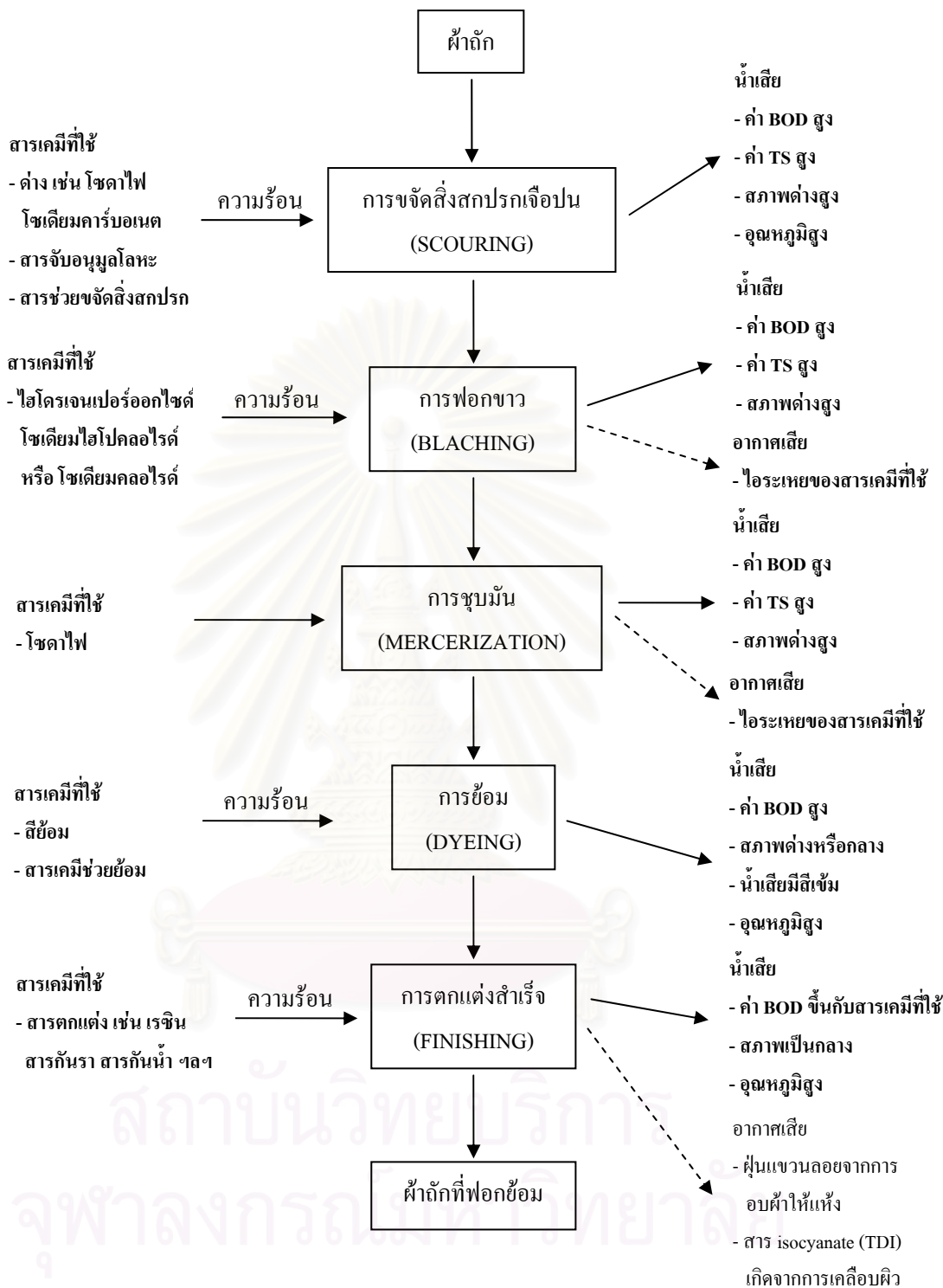
4) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและการทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ ในบางกรณีน้ำเสียชนิดนี้อาจมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่างๆ สูง ยกตัวอย่างเช่น น้ำที่ใช้ล้างสกรีนที่ใช้ในการพิมพ์ผ้า หรือน้ำจากการล้างถังเตรียมสี เป็นต้น

5) น้ำจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำโรงงาน เป็นต้น

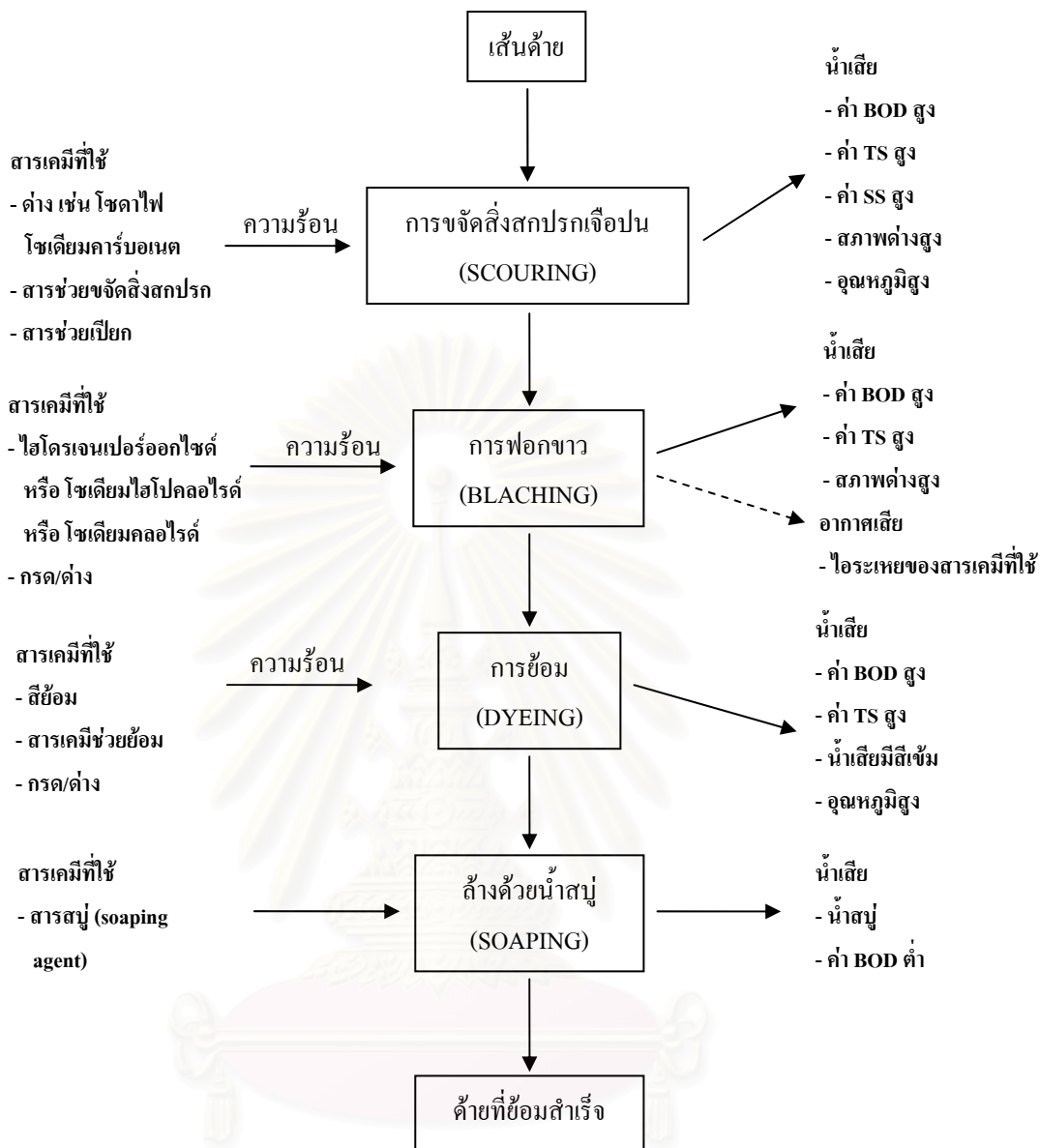


รูปที่ 2.20 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ

ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542



รูปที่ 2.21 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าฝ้าย
 ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542



รูปที่ 2.22 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย

ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542

2.5.1 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นดังนี้

- 1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วสารอินทรีย์อาจเกิดจากสบู่ ไขมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดที่มีลักษณะเป็น

ฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้มักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร (จารุทัศน์ มลินทะเลข, 2537)

2) มีค่าพีเอชและสภาพด่าง (alkalinity) สูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมักมีค่าพีเอช ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอช และค่าสภาพด่างสูงได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต

3) มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส

4) มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

5) มีความเข้มข้นสูง โดยเป็นสีที่ใช้ย้อมผ้า

6) มีโลหะหนักเจือปนอยู่ โลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้วได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

ตารางที่ 2.9 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด ¹					จำนวนข้อมูล
	พีเอช	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	สี (หน่วย Pt Co) ²	
ฟอกย้อมผ้า	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าสัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมผ้าและผ้า หรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

หมายเหตุ: 1 ค่าลักษณะของน้ำเสียที่ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับหรือน้อยกว่าร้อยละ 50

2 การวัดความเข้มข้นในหน่วย Pt Co เป็นวิธีที่ผิด เนื่องจากการวัดด้วยวิธีนี้จะวัดได้เฉพาะน้ำที่มีสีออกเหลือง

ที่มา : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542

2.5.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

2.5.2.1 สารอินทรีย์

- 1) ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ลดลง ซึ่งมีผลทำให้
 - แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเอง (self purification) ได้ทัน
 - เกิดกลิ่น
 - ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้
- 2) สารอินทรีย์บางตัวอาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีผลทำให้
 - เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
 - เกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ (bioaccumulation) หากสารนั้นเป็นสารที่สลายตัวได้ยาก
 - เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในกรณีที่ได้รับสารนั้นโดยตรง หากบริโภคสัตว์น้ำที่มีสารพิษเข้าไปจะได้รับสารทางอ้อมจากห่วงโซ่อาหาร หรือจากการที่สารนั้นสะสมอยู่ในระบบนิเวศ

2.5.2.2 อุณหภูมิ

น้ำเสียอุณหภูมิสูงมีผลทำให้

- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- ปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดลดลง
- เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์

2.5.2.3 ของแข็งแขวนลอย

- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ
- สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้
- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

2.5.2.4 ของแข็งละลายน้ำ

ถ้าหากความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำบางชนิดที่มีส่วนประกอบของโลหะหนัก เช่น เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม มีความเข้มข้นสูงกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นอันตรายต่อปลาหรือทองแดงมีความเข้มข้น 0.1-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในน้ำ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2525) ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

2.5.2.5 สี

- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
- ทำให้ปริมาณแสงที่จะผ่านสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำลดลง

2.5.2.6 โลหะหนัก

- ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรคที่ร้ายแรงได้
- โลหะหนักเป็นสารที่สะสมอยู่ในระบบนิเวศ
- เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

2.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ และคณะ, 2544)

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการบำบัดน้ำเสียวิธีต่างๆ เพื่อบำบัดน้ำเสียให้ได้น้ำทิ้งที่ออกปราศจากสารอินทรีย์ สีย้อมผ้า และของแข็งต่างๆ

ระบบบำบัดน้ำเสียจะประกอบด้วยหลายๆ กระบวนการกำจัด แต่ละกระบวนการบำบัดจะมีวัตถุประสงค์ในการใช้ต่างกันเนื่องจากสารมลพิษในน้ำเสียมีกว่าหนึ่งตัว การจำแนกชนิดของกระบวนการบำบัดอาจจำแนกตามกลไกการกำจัดสารมลพิษ ได้แก่ ทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวภาพ หรือจำแนกตามลำดับก่อนหลังในการบำบัด ได้แก่ การบำบัดขั้นเตรียมการ การบำบัดขั้นต้น การบำบัดขั้นที่สอง การบำบัดขั้นที่สาม

2.6.1 การบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ

วิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพสามารถกำจัดสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย ซึ่งจะเป็นของแข็งที่อยู่ในน้ำเสียได้แก่ ของแข็งแขวนลอย เศษผ้า กระดาษ อาหาร กรวด ทราช ไขมัน น้ำมัน เป็นต้น

น้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อมมีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ค่อนข้างสูง มีเศษผ้ามาก และมีเศษแป้ง จึงจำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ วิธีบำบัดน้ำเสียทางกายภาพมีวิธีต่างๆ ให้เลือกใช้กำจัดของแข็งดังกล่าวออกจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ดังนี้

- 1) ตะแกรง หน้าที่หลักคือ ดักเศษขยะต่างๆ
- 2) ถังดักกรวดทราช หน้าที่หลักคือ ทำการแยกตะกอนหนักต่างๆ
- 3) ถังกำจัดน้ำมันและไขมัน หน้าที่หลักคือ ทำการดักหรือกวาดพอกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดขั้นต่อไป
- 4) ถังตกตะกอน หน้าที่หลักคือ ตกตะกอนของแข็งแขวนลอยต่างๆ ออกจากน้ำเสีย
- 5) ดีเอเอฟหรือแอฟ (dissolved air flotation) หน้าที่หลักคือ แยกตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยวิธีทำให้ตะกอนลอย

6) ถังกรอง น้ำที่หลักคือ ทำการกรองน้ำเสียให้ได้น้ำใสมีค่าของแข็งแขวนลอยน้อยลงก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบถังกรองอาจใช้กรองน้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองแล้ว หรือก่อนปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

2.6.2 การบำบัดน้ำเสียทางเคมี

น้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีพารามิเตอร์หลายอย่างที่ไม่ผ่านมาตรฐาน เช่น พีเอช บีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย สี เป็นต้น แต่พารามิเตอร์ที่มักจะทำการบำบัดทางเคมีในอุตสาหกรรมฟอกย้อม คือ พีเอช และสี ปกติการเลือกใช้กระบวนการทางเคมีจะทำเมื่อพบว่าวิธีอื่นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากการบำบัดทางเคมีจะเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียวิธีอื่น

พีเอชในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นมักจะมีค่าสูงหรือเป็นด่าง การแก้ปัญหาเรื่องพีเอชเกินมาตรฐานนั้นทำได้โดยใช้ระบบปรับพีเอช

สีเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งด้วย การบำบัดสีที่ไม่ละลายในน้ำเสีย มักใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีประเภทต่างๆ สำหรับสีที่ละลายน้ำได้ดีนั้นอาจใช้การออกซิไดซ์ให้โครงสร้างสีเปลี่ยนไป หรือการทำปฏิกิริยากับสีที่ละลายน้ำแล้วสูญเสียความสามารถในการละลายน้ำ ทำให้สามารถตะกอนแยกออกได้และทำให้สีในน้ำหายไป

2.6.3 การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองหลังจากผ่านการบำบัดขั้นต้น มีหน้าที่หลักคือ กำจัดสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ โดยอาศัยจุลินทรีย์หลายชนิดทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพเป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากที่สุด เพราะเป็นวิธีบำบัดน้ำเสียที่ประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีบำบัดน้ำเสียวิธีอื่น

วิธีบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีวิธีการต่างๆ ให้พิจารณาเลือกดังนี้

1) ระบบโปรยกรอง

น้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อมจะสามารถถูกบำบัดได้มากด้วยวิธีโปรยกรอง แต่สีในน้ำเสียอาจถูกกำจัดออกได้บ้างด้วยระบบโปรยกรอง และน้ำทิ้งจากถังโปรยกรองยังคงมีสีอยู่ค่อนข้างมาก

2) ระบบชุดสัมผัสหมุนชีวภาพหรืออาร์บีซี

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบอาร์บีซีจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีค่อนข้างสูง แต่ระบบนี้จะมีเครื่องจักรกลมากกว่าระบบโปรยกรอง จึงทำให้การควบคุมระบบจำเป็นต้องเอาใจใส่มากกว่าด้วย ปัจจุบันไม่นิยมใช้ระบบนี้

3) ระบบเอเอส

ระบบเอเอสมีหลายรูปแบบที่มีกลไกการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

- กระบวนการเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Process)
- กระบวนการเติมอากาศแบบเรียวลง (Tapered Aeration Process)
- กระบวนการเติมอากาศแบบเป็นขั้น (Step-feed Aeration Process)
- กระบวนการผสมสมบูรณ์ (Completely Mixed Process)
- กระบวนการเติมอากาศยืดเวลา (Extended Aeration Process)
- กระบวนการปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Process)
- กระบวนการแอนอกซิก + แอนแอโรบิก/แอโรบิก (Anoxic + Anaerobic/Aerobic Process) ระบบบำบัดแบบนี้สามารถกำจัดบีโอดีได้อย่างรวดเร็วและได้มากกว่าระบบเอเอสทั่วไป สามารถออกแบบให้กำจัดไนโตรเจนได้หรืออาจกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ สามารถกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมได้มากในระดับหนึ่ง

- กระบวนการตั้งปฏิกรณ์สลับเป็นกะหรือเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor: SBR) ระบบบำบัดแบบนี้สามารถกำจัดบีโอดี ในโตรเจนและฟอสฟอรัสได้เหมือนกับระบบบำบัดแบบแอนอกซิก + แอนแอโรบิก/แอโรบิก และยังสามารถกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมได้อีกด้วย

- สระเติมอากาศ (Aerated Lagoon)

4) การบำบัดแบบไร้อากาศหรือแบบแอนแอโรบิก

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีหลายวิธีดังนี้

- ระบบเอเอสแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic Activated Sludge or Anaerobic Contact)
- ระบบถังโปรยกรองอากาศ (Anaerobic Filter: AF)
- ระบบถังไร้อากาศแบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Anaerobic Fluidized Bed Reactor) มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีได้มาก
- ระบบชั้นสแลคจ์แอโรบิกแบบไหลขึ้น หรือระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีสูง และสามารถกำจัดสีฟอกย้อมได้ด้วย

- ระบบถังไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (Anaerobic Baffled Reactor) มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีได้มาก
- ระบบบ่อไร้อากาศหรือบ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Pond)

การกำจัดสีข้อมด้วยกระบวนการทางชีวภาพให้มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องใช้ 2 กระบวนการหลักร่วมกัน กล่าวคือในขั้นตอนแรกกำจัดสีข้อมด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกก่อน และตามด้วยการกำจัดสารมลพิษที่เหลือด้วยกระบวนการแอโรบิกต่อไป ซึ่งสีข้อมโดยส่วนใหญ่จะถูกกำจัดในขั้นตอนแอนแอโรบิก

2.6.4 การจัดการสลัดจ์

สลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกข้อม เกิดจากระบบบำบัดทางชีวภาพและระบบบำบัดทางเคมี สลัดจ์จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเกิดจากจุลชีพที่อยู่ในระบบย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสียและเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ต้องทำการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินออกจากระบบบำบัดในที่สุด ส่วนสลัดจ์จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีเกิดจากสารเคมีที่เติมและตัวสีที่อยู่ในน้ำเสียเอง

ขั้นตอนการจัดการสลัดจ์

ขั้นตอนการจัดการสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เริ่มต้นตั้งแต่การทิ้งสลัดจ์ออกจากระบบบำบัด ซึ่งควรพยายามทำให้มีความเข้มข้นมากที่สุดเพื่อลดปริมาณสลัดจ์ ทำให้ง่ายต่อการจัดการต่อไปหรือมีความประหยัดในการขนส่ง ดังนั้นจึงควรทำสลัดจ์ให้เข้มข้นขึ้นด้วยกระบวนการทำขึ้นสลัดจ์ (thickening) เมื่อได้สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมแล้วควรนำสลัดจ์ไปผ่านกระบวนการปรับสภาพ เพื่อให้พร้อมสำหรับกระบวนการรีดน้ำออก เมื่อสลัดจ์ถูกรีดน้ำออกแล้วจะทำให้ได้สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น พร้อมทั้งจะนำไปกำจัดทิ้งต่อไป รายละเอียดของแต่ละกระบวนการแสดงดังต่อไปนี้

1) การทำขึ้นสลัดจ์

สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกข้อมที่มีกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีหรือทางชีวภาพทำได้ดังต่อไปนี้

- ถังทำขึ้นด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity thickener)
- เครื่องทำขึ้นแบบสายพานโน้มถ่วง (gravity belt thickener)

2) การปรับสภาพสลัดจ์

สลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียมักจะมีสภาพที่มีประจุลบอยู่รอบนอกของอนุภาคสลัดจ์ ทำให้การแยกน้ำออกจากตะกอนสลัดจ์ทำได้ยาก ดังนั้นการปรับสภาพสลัดจ์จึง

เป็นสิ่งที่จำเป็นและสารที่ช่วยในการปรับสภาพที่สำคัญคือโพลีเมอร์ โดยสารดังกล่าวสามารถช่วยในการทำละลายของอนุภาคสลัดจ์ และทำให้อนุภาคสลัดจ์ใหญ่ขึ้น

3) การแยกน้ำออกจากสลัดจ์

ควรพิจารณาให้สอดคล้องกับแต่ละโรงงาน ปัจจัยหลักๆ ที่ควรคำนึงถึง คืองบประมาณที่มีในการลงทุนเบื้องต้น ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ พื้นที่ที่มีสำหรับระบบจัดการสลัดจ์ ชนิดของสลัดจ์ ประสิทธิภาพของระบบแต่ละประเภท ปริมาณและความเข้มข้นของสลัดจ์ที่เกิดขึ้น จำนวนและความรู้ของพนักงานที่รับผิดชอบ

หน่วยบำบัดสำหรับการแยกน้ำออกจากสลัดจ์มีหลายประเภท หน่วยบำบัดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้

- ลานตากแห้งสลัดจ์ (sludge drying bed)
- เครื่องอัดกรอง (filter press)
- สายพานอัด (belt press)

4) ขั้นตอนการกำจัดกากสลัดจ์

กากสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมถูกควบคุมด้วยกฎหมาย ซึ่งมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นพิษของกากสลัดจ์เป็นหลัก สามารถตรวจสอบโดยการนำกากสลัดจ์ไปวิเคราะห์ด้วยการทดสอบชะละลาย (leachate test) แล้ววิเคราะห์น้ำชะละลายที่เกิดขึ้นต้องได้ค่าผ่านมาตรฐานที่ทางราชการกำหนด จึงจะกล่าวได้ว่าสลัดจ์ดังกล่าวไม่เป็นพิษ

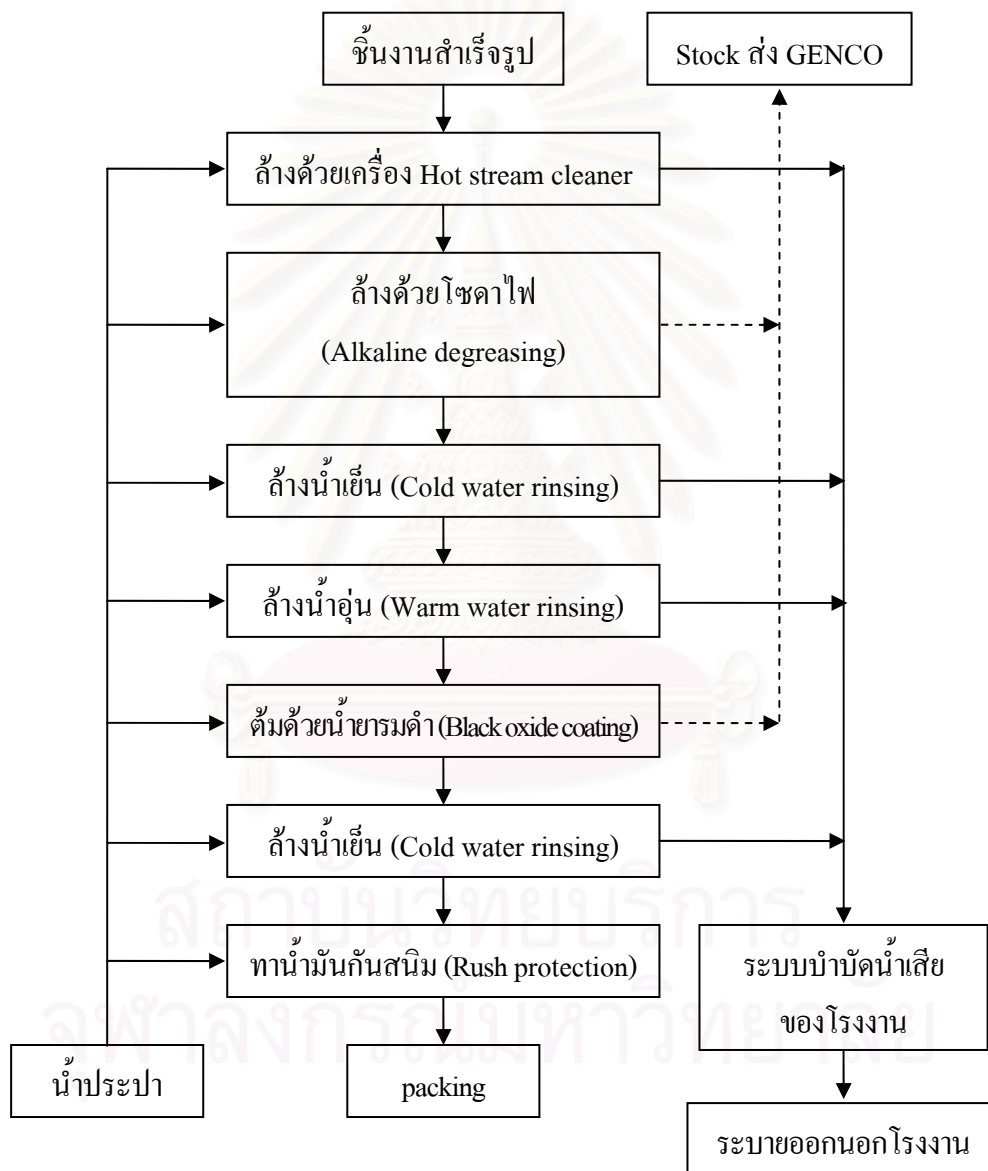
เมื่อทำการทดสอบความเป็นพิษของกากสลัดจ์แล้วพบว่าผ่านมาตรฐาน สามารถจัดการกากสลัดจ์ตามปกติได้ เช่น นำไปใช้ปรับปรุงดิน หรืออาจส่งไปกำจัดยังบริษัทที่ได้รับอนุญาตกำจัดสลัดจ์ที่ไม่เป็นพิษต่อไป

ถ้ากากสลัดจ์ไม่ผ่านมาตรฐานจะต้องส่งสลัดจ์ดังกล่าวไปยังบริษัทที่ได้รับอนุญาตในการบำบัดตะกอนที่เป็นพิษเพื่อการทำลายฤทธิ์ให้ถูกต้องต่อไป

2.7 การรมดำโลหะ

2.7.1 กระบวนการรมดำโลหะ

กระบวนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2.23



หมายเหตุ

- หมายถึง น้ำประปาและน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต
- หมายถึง น้ำค้างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline)

รูปที่ 2.23 ขั้นตอนการรมดำโลหะของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะ

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

2.7.2 น้ำเสียจากกระบวนการรมดำผิวโลหะ

น้ำเสียจากการรมดำผิวโลหะ โรงงานรมดำ มีน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

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

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

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัณษนาถ ลินชวาร์ และ สมชาย พานิชสาส์น (2540) ศึกษาอิทธิพลของเวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการเตรียมซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 วัน มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงที่สุด ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถดูดซับสารได้ช่วงหนึ่ง

Lin และคณะ (1998) ศึกษาผลของซีโอไลต์สังเคราะห์ต่อการทำเสถียรแควมเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ทำการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการทดลองจะใช้ตัวอย่างดิน 2 กลุ่ม คือ (1) เดิมแควมเมียมลงไปดินตัวอย่างจาก Pinchen, Jente, Erlin และ Chengchung และ (2) ดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแควมเมียมจาก Chungsing และ Tsasta ผลที่ได้จากการทดลองแบบที่ละเทแสดงให้เห็นว่า การเติมซีโอไลต์จะช่วยลดการชะละลายของแควมเมียมจากดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนทุกตัวอย่าง ในการทดลองแบบต่อเนื่องผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า แควมเมียมถูกทำให้เสถียรในดินที่มีซีโอไลต์ การวิเคราะห์การแพร่กระจายของแควมเมียมตามความลึกของคอลัมน์ที่บรรจุดิน พบว่า มีการแพร่กระจายของแควมเมียมเล็กน้อย ความเข้มข้นของแควมเมียมที่ยังตกค้างอยู่ในดินตัวอย่างจาก Pinchen และ Jente เป็น 12 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปัจจัยที่ทำให้แควมเมียมเสถียรอยู่ในดิน คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ต่อดิน การเจือจางดิน ค่าพีเอชที่สูงขึ้น และค่า hydraulic conductivity ในดิน โดยปริมาณของซีโอไลต์ที่แนะนำให้เติมคือ ประมาณ 0.1-0.2 กรัมต่อมิลลิกรัมแควมเมียม ต่อ 100 กรัมของดิน

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

มนตรี ทองคำ (2542) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง จากการสังเคราะห์ชนิดของซีโอไลต์ที่ได้ คือ Zeolite P, Chabazite, Nepheline,

Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบชนิดอื่น เช่น Silimanile, Willhendersonite, Gehlenite โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 619.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมซีโอไลต์

วิระพงษ์ นามโท (2543) ศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา สารโครงสร้าง (เตตระโพรฟิแลมโมเนียมโบรไมด์) ความดันเริ่มต้น อุณหภูมิและระยะเวลาที่มีผลต่อการเกิดซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ 3 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีซิลิกาเข้มข้น 27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารโครงสร้าง นำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน พบว่า ที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 20-100 อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ได้ 23-43 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะเดียวกันเมื่อไม่ใส่สารโครงสร้าง สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดพี ได้เพียงอย่างเดียว นำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ ได้ไปใช้เร่งปฏิกิริยาอีพอกซิฟอร์มมิงของก้ำขี้เป็ดโรเลียมเหลว พบว่า ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เกษม ไตรหิรัญ (2544) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 MPa ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ได้ซีโอไลต์ชนิดพี และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 MPa ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ได้เป็นซาบาไซต์ นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ในการขจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทดสอบกัมมันตภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์กับปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 200-600 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซาบาไซต์ให้ค่าการเปลี่ยนสูงสุด และศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ อันดับปฏิกิริยาของไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่า 0.8 และอันดับปฏิกิริยาของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่า 0 ค่าพลังงานกระตุ้น 2.0 กิโลแคลอรีต่อโมล

วิทยา เทียมสุข (2544) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียในโตรเจนและเจดาคาร์บอนในโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ Clinoptilolite, Smectite และ Pumice พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจน 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงพีเอชที่เหมาะสม ในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนโดยใช้ Clinoptilolite คือ 3-8 เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนของ Smectite และ Pumice จะแปรผันไปตามค่าพีเอช โดยที่พีเอช 9 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนเมื่อใช้ Clinoptilolite, Smectite และ Pumice ปริมาณสูงสุดที่ 120 กรัม ต่อน้ำเสีย 0.5 ลิตร คือ 85.63 เปอร์เซ็นต์ 35.13 เปอร์เซ็นต์

และ 36.84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจริงจากฟาร์มเลี้ยงหมูที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจน และทีเคเอ็น เป็น 230.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 250.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณ Clinoptilolite สูงสุดที่ 120 กรัม ต่อน้ำเสีย 0.5 ลิตร ปรับพีเอชเป็น 6 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนและทีเคเอ็นเท่ากับ 91.48 เปอร์เซ็นต์ และ 87.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เลิศ รักสันติชาติ (2545) ศึกษาหาวิธีการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ที่ผ่านการดูดซับเอทิลีนไกลคอลในขั้นตอนการอบแห้งของกระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ซึ่งมีวิธีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพดังนี้ คือ การให้ความร้อนในสภาพบรรยากาศที่มีแต่ไนโตรเจน การเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่ การล้างด้วยน้ำกลั่นและเผา วิธีสุดท้าย คือ การล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำกลั่นและเผา พบว่า การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์โดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่สามารถกำจัดโมเลกุลของคาร์บอนที่เหลืออยู่บนซีโอไลต์ได้สมบูรณ์ขึ้น สภาพที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพโดยการเผา ได้แก่ เผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์สามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 2 ครั้ง

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

ประวัชรกรณ สาทิตคุณ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสีออก โดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่า สภาพที่เหมาะสมต่อการกำจัดสี basic dye ในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ที่ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที เวลาในการสัมผัส 3 ชั่วโมง และปริมาณซีโอไลต์ธรรมชาติ 10 กรัมต่อลิตร สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานสีออก พบว่า ซีโอไลต์ชนิดผง ชนิดเม็ดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-3 มิลลิเมตร และชนิดเม็ดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีใกล้เคียงกัน คือ 90.31 เปอร์เซ็นต์ 89.76 เปอร์เซ็นต์ และ 84.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

อารักษ์ คำรังสัจย์ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักยูเอเอสบีโดยซีโอไลต์และทรายไม่คัดขนาดชั้นตอนแรกใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของซีโอไลต์ดีที่สุด จากนั้นทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองแบบต่อเนื่อง พบว่า เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในคอลัมน์ที่บรรจุซีโอไลต์ 80 เซนติเมตร สูงกว่าทุกคอลัมน์ คือ 74.04 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ช่วง 250 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงกว่าทุกช่วงปริมาณ ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะต่ำลงเมื่อสัดส่วนของซีโอไลต์ลดลงและปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น

จุฑาทิพย์ (2547) ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อย พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน คือ ที่ พีเอช 5 เวลาสัมผัส 120 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัด 98.59 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย คือ ที่พีเอช 5 เวลาสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัด 97.84 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียจริงโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยเท่ากับ 93.24 เปอร์เซ็นต์ และ 91.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สายฝน หาญโยธี (2547) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 บริสุทธิ์สูงจากเถ้าลอยของถ่านหินและชิลิกาจากเถ้าแกลบ สกัดแยกเหล็กออกไซด์โดยใช้สารละลายกรด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก กรดไนตริก และกรดออกซาลิก ชะละลายชิลิกาและอะลูมินาออกจากเถ้าลอยโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ศึกษาผลของเวลา ความเข้มข้นของกรดและค่าอุณหภูมิที่มีต่อการแยกเหล็กออกไซด์ หรือชะละลายชิลิกาและอะลูมินาออกมา พบว่า สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากการปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก กรดไนตริก และกรดออกซาลิก ร่วมกับการชะละลายชิลิกอนและอะลูมิเนียมโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 87.6 86.1 77.3 96.1 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ

Aiyuk และคณะ (2004) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเบ็ดเสร็จ โดยรวมวิธีการบำบัดทางเคมี กายภาพและชีวภาพเข้าด้วยกัน น้ำเสียชุมชนถูกบำบัดขั้นปฐมภูมิโดยใช้สารเคมีจะเติมโคแอกกูแลนต์ (FeCl₃) และฟล็อกคูแลนต์โอออนลบ สามารถกำจัดซีโอดีทั้งหมด (total COD) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสเฟตโอออนในน้ำเสียได้ 73 เปอร์เซ็นต์ 85 เปอร์เซ็นต์ และ 80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากนั้นบำบัดต่อในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี น้ำเสียที่เข้ามามีซีโอดีทั้งหมดประมาณ 140 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีโอดีทั้งหมดได้ประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีซีโอดีทั้งหมดต่ำประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นซีโอไลต์ถูกนำมาใช้ในการ

กำจัดแอมโมเนียมไอออนโดยสามารถกำจัดแอมโมเนียมไอออนได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของระบบรวมแบบเบ็ดเสร็จในการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ซีโอดีทั้งหมด ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เท่ากับ 88 เปอร์เซ็นต์ 90 เปอร์เซ็นต์ 99 เปอร์เซ็นต์ และ 94 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Otal และคณะ (2004) ศึกษาการลดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส บีโอดี และซีโอดีในของเหลว ผลชะละลายจากโรงบำบัดขยะมูลฝอยเทศบาลและน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงหมู โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน ซีโอไลต์ทางการค้าและซีโอไลต์สังเคราะห์อื่น ๆ พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในของเหลวผลชะละลายและน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงหมูได้ปริมาณมาก

ชัชวาล นัทรรัตน์นท (2549) ศึกษาการสังเคราะห์และลักษณะสมบัติของซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินสำหรับการจัดซัลเฟอร์ของเชื้อเพลิงเหลว จากผลของการสังเคราะห์ พบว่า ชนิดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ คือ sodalite, gismondine และ cancrinite ชนิดของซิลิกาที่เติมเพื่อปรับอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไม่มีผลต่อซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น เมื่ออัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่ามากกว่า 3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็น gismondine ถ้าอัตราส่วนนี้ต่ำกว่าจะเป็น sodalite และเมื่ออัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ มีค่าตั้งแต่ 40-80 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีความเป็นผลึกสูงขึ้น ขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $\text{NaOH}:\text{SiO}_2$ มากกว่า 4 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีความเป็นผลึกน้อยลง จากผลของอุณหภูมิ พบว่า ไม่สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เกิด gismondine และ sodalite ส่วน cancrinite เกิดได้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และพบว่า ภาวะที่ไม่กวนให้ซีโอไลต์ที่มีผลึกดีกว่าภาวะที่มีการกวน การศึกษาการดูดซับกำมะถันอินทรีย์ด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ความสามารถในการดูดซับเป็นดังนี้ คือ gismondine > sodalite ~ cancrinite > fly ash

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

Penilla และคณะ (2006) ศึกษาการทำให้ Cs, Cd, Pb และ Cr ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำ ใช้ถ่านหิน class F ใส่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ชนิดของซีโอไลต์หลักที่เกิดเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 150 องศาเซลเซียส คือ gismondin-type P1-Na ($\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 200 องศาเซลเซียส จะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime C ($\text{Na}(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$) ซึ่ง gismondin มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cd ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่า gismondin มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทำให้องเสียกัมมันตภาพไม่เคลื่อนที่ ทั้ง gismondin และ analcime-C มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cd สูง อัตราการคงอยู่ของ Pb^{2+} และ Cr^{3+} ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ จะตกตะกอนอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์

Querol และคณะ (2006) ศึกษาการทำให้โลหะหนักในดินที่ปนเปื้อนไม่มีการเคลื่อนที่โดยการเติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน ทดลองใน Guadiamor Valley (ประเทศสเปน) ซึ่งได้รับผลกระทบจากการรั่วไหลของ pyrite slurry ที่ยังคงค้างผสมอยู่กับดิน ใช้ถ้ำลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า Teruel เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ NaP1 นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 1,100 กิโลกรัม ไปใส่ในพื้นที่ปริมาณต่างๆ กัน (10,000-25,000 กิโลกรัมต่อเฮกเตอร์) โดยใส่เข้าไปในดินชั้นบนประมาณ 25 เซนติเมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หลังจากใส่ซีโอไลต์ในดินไปแล้ว 1-2 ปี ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์สามารถลดการชะละลายของแคลเซียม โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี สาเหตุหลักในการทำให้สารมลพิษไม่เคลื่อนที่ คือ มีการดูดซับโลหะในดินเหนียว (illite) การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชจาก 3.3 เป็น 7.6 เนื่องจากค่าสภาพความเป็นด่างของซีโอไลต์ที่เติมเข้าไป รวมทั้งเกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะร่วมด้วย เมื่อเติมซีโอไลต์ปริมาณ 25,000 กิโลกรัมต่อเฮกเตอร์ เข้าไปในดินความสามารถในการชะละลายของโลหะส่วนใหญ่ลดลงประมาณ 95-99 เปอร์เซ็นต์

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

Wu และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมและฟอสเฟตโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอย (Na-ZFA) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป Ca-, Mg-, Al- และ Fe-ZFA โดยใช้สารละลายเกลือ จากนั้นนำไปศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมและฟอสเฟต พบว่า Al^{3+} -ZFA มี

ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมสูงสุด คือ 80-98 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Mg^{2+} -ZFA, Ca^{2+} -ZFA -, Na^{+} -ZFA - และ Fe^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมเป็น 43-58 เปอร์เซ็นต์, 40-54 เปอร์เซ็นต์, < 20 เปอร์เซ็นต์ และ < 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในกรณีของ Na^{+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ค่าพีเอชที่เป็นค่า และในกรณีของ Fe^{3+} ค่าพีเอชที่เป็นกรดจะขัดขวางการกำจัดแอมโมเนียม ในส่วนของประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต Al^{3+} และ Fe^{3+} -ZFA มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต 100 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ Ca^{2+} , Na^{+} และ Mg^{2+} เป็น 60-85 เปอร์เซ็นต์ น้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ และ น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Luna และคณะ (2007) ศึกษาเบื้องต้นในการบำบัดน้ำชะขยะมูลฝอยโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำชะขยะมูลฝอย ซึ่งใช้การทดลอง 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการต่อเนื่องทางกายภาพ-เคมี และกระบวนการดูดซับโดยตัวดูดซับที่ใช้ คือ ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน พบว่า การบำบัดขั้นแรกสามารถกำจัดซีโอดี แอมโมเนียม ไนโตรเจน และของแข็งแขวนลอย ได้ 28 เปอร์เซ็นต์ 63 เปอร์เซ็นต์ และ 71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่การบำบัดขั้นที่สองสามารถกำจัดซีโอดี แอมโมเนียมไนโตรเจน และของแข็งแขวนลอย ได้ 49 เปอร์เซ็นต์ 68 เปอร์เซ็นต์ และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการและทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการขยะมูลฝอย หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 แผนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 10 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) จากกระบวนการรมดำโลหะเพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหิน โดยสมบัติทางกายภาพ จะทำการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตร โพรง และวิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึก ในขณะที่สมบัติทางเคมีจะทำการหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- 3) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ คือ ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์
- 4) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยจะหาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเช่นเดียวกับเถ้าลอยถ่านหิน รวมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี
- 5) ศึกษาสมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม คือ ค่าพีเอช ปริมาณซีโอไลต์ และสี

6) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน คือ ปริมาณซีโอไลต์ พีเอช และเวลาโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

7) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้ว คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เวลา และปริมาณของซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว และนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

8) ทำการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

9) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

10) ประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
- 3) โถดูดความชื้น (Desiccators)
- 4) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
- 5) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
- 6) ครุชีเบลפורซ์เลน พร้อมฝาปิด
- 7) เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
- 8) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA
- 9) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ AND รุ่น HM-300-Japan
- 10) เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ K รุ่น VRN-300
- 11) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ HACH รุ่น TJTTP JO 6749
- 12) ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ WTB Binding Germany
- 13) เตาเผา ยี่ห้อ Valeam box furnace รุ่น 3-1750.USA
- 14) ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด
- 15) ตะแกรงร้อนมาตรฐานเบอร์ 100 และ 325 เมช
- 16) เครื่อง Heating Water bath ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น Model WB 7/14/22/29/45
- 17) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน: Scanning Electron Microscope (SEM)

18) X-rays Diffraction Spectroscopy JOEL รุ่น JDX-8030, JAPAN

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

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) จากกระบวนการรมด้าโลหะ

หาค่าพารามิเตอร์ของสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (Spent alkaline) ดังนี้

- ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายด่างที่ใช้แล้ว (วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก)

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

- ปริมาณโลหะละลายและปริมาณโลหะทั้งหมด ได้แก่ As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni และ Pb

3.4.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของถ้ำลอยถ่านหิน

นำถ้ำลอยถ่านหินมาบดให้ละเอียดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรกร่อนมาตรฐานเบอร์ 100 เมช และ เบอร์ 325 เมช ได้ ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ให้เย็นในหม้อสุญญากาศ จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1) หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunance-Emmett-teller) โดยวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถ้ำลอยถ่านหินดูดซับไว้

2) วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM)

3) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer: XRF)

4) วิเคราะห์หาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity: CEC) (วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข)

3.4.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

3.4.3.1 การเตรียมเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

- 1) นำเถ้าลอยถ่านหินมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นปล่อยเถ้าลอยทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- 2) นำเถ้าลอยที่ผ่านการอบแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เมช และ 325 เมช ตามลำดับ
- 3) นำเถ้าลอยที่ผ่านการร่อนบรรจุลงในหม้อดิน และปิดฝา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยเถ้าลอยทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

3.4.3.2 การทำปฏิกิริยา

1) นำเถ้าลอยที่เผาแล้วซึ่งมาประมาณ 15 กรัม และนำสารละลายต่างที่ใช้แล้ว (spent alkaline) ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมรดำโลหะอุตสาหกรรม มาใช้ปริมาตร 120 มิลลิลิตร ใส่ในขวดที่ซึ่งเถ้าลอย แล้วนำไปเขย่าโดยใช้ Heating water bath (แสดงดังรูปที่ 3.1) ที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยแปรค่าปัจจัยต่างๆดังนี้

- สารละลายต่างที่ใช้แล้ว ความเข้มข้น 1.5, 2, 2.5 และ 3 โมลาร์
- อุณหภูมิที่ใช้ 80 และ 100 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ 24 48 72 96 ชั่วโมง

ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนจากสารละลายต่างที่ใช้แล้วเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2) นำเถ้าลอยที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่ภาวะต่างๆ มากรองแยกเถ้าลอยออก โดยล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยเถ้าลอยทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

3.4.4 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่สำคัญของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับวิธีดำเนินการวิจัยในข้อที่ 3.4.2 และวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคซ์โตรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD)

3.4.5 ทำการศึกษาสมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ดังนี้

- วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter
- วิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD: chemical oxygen demand) โดยใช้วิธีฟลักซ์แบบปิด
- วัดสีด้วยวิธี Spectrophotometric method (วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก) ด้วยเครื่อง spectrophotometer

3.4.6 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอดีที่สังเคราะห์จากเกลือยอนิน

3.4.6.1 การหาปริมาณซีโอดีที่เหมาะสม

- 1) นำน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)
- 2) เติมซีโอดีที่สังเคราะห์ได้ในช่วงน้ำหนักที่แน่นอนปริมาณ 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) รอให้ซีโอดีตกตะกอน นำส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี
- 5) แยกซีโอดีออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C
- 6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer

3.4.6.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

- 1) นำน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)
- 2) ปรับพีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม เป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3) เติมซีโอดีที่สังเคราะห์ได้ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.1) ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

- 5) รอให้ซีโอไลต์ตกตะกอน ดูดส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี
- 6) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C
- 7) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer

3.4.6.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม

- 1) นำน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง) ทำการปรับค่าพีเอชน้ำเสียให้เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.2)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.1) ลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30, 60, 120, 180, 240, 540 และ 840 นาที ตามลำดับ
- 4) รอให้ซีโอไลต์ตกตะกอน ดูดส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี
- 5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C
- 6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer

3.4.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

- 1) นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)
- 2) เติมซีโอไลต์ที่ใช้แล้วปริมาณ 5 กรัม และ 10 กรัม ลงในขวดแต่ละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 และ 180 นาที ตามลำดับ
- 4) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C
- 5) นำซีโอไลต์ที่กรองได้ไปอบให้แห้งและปล่อยให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- 6) นำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมาใช้กับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ค่าพีเอช ปริมาณซีโอไลต์ และระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.1 – 3.4.6.3

7) เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีของซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพกับซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์

3.4.8 ทำการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

1) นำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมย้อม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง) ทำการปรับค่าพีเอชน้ำเสียให้เหมาะสม (จากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.2)

2) เติมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0, 10.0, 20.0, และ 40.0 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ

3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.3

4) รอให้ซีโอไลต์ตกตะกอน คูด่วนใส่ไปทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี

5) แยกซีโอไลต์ออกโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer

6) นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช

3.4.9 ทำการขึ้นรูปซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้เป็นเม็ดเพื่อใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง (column test) (กงศักดิ์ วัฒนวงศ์พิทักษ์, 2543)

1) ผสมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้กับดินขาว (Kaolin) ในอัตราส่วน 1:0.2 ผสมน้ำพอให้เหนียวขึ้น

2) นำไปเทเข้าแม่พิมพ์ที่ทำจากยางซิลิโคนแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

3) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเม็ดซีโอไลต์ออกจากแม่พิมพ์

4) นำไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง นำไปเก็บในหม้อดูดความชื้น เพื่อนำไปใช้ต่อไป

5) นำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปขนาด 3 มิลลิเมตร มากำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสีย โดยใช้ปริมาณซีโอไลต์ ค่าพีเอช และระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.1 - 3.4.6.3 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด

3.4.10 ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแท่ง (Column test) (แสดงดังรูปที่ 3.2)

1) บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ลงในคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งที่เป็นท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร เจาะรูเพื่อเก็บน้ำตัวอย่างที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร ตามลำดับ ทำการชั่งน้ำหนักของซีโอไลต์ที่ใช้บรรจุในคอลัมน์สูง 120 เซนติเมตร

2) ป้อนน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ทราบค่าซีโอดีและสีที่แน่นอน และปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.2 เข้าสู่คอลัมน์ โดยปล่อยให้ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างด้วยอัตราการไหลที่คำนวณจากระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อที่ 3.4.6.3 เก็บตัวอย่างน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระดับความลึกที่ได้กำหนดไว้ จนกว่าค่าซีโอดีและสีที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าซีโอดีและสีของน้ำเข้า จึงยุติการทดลอง

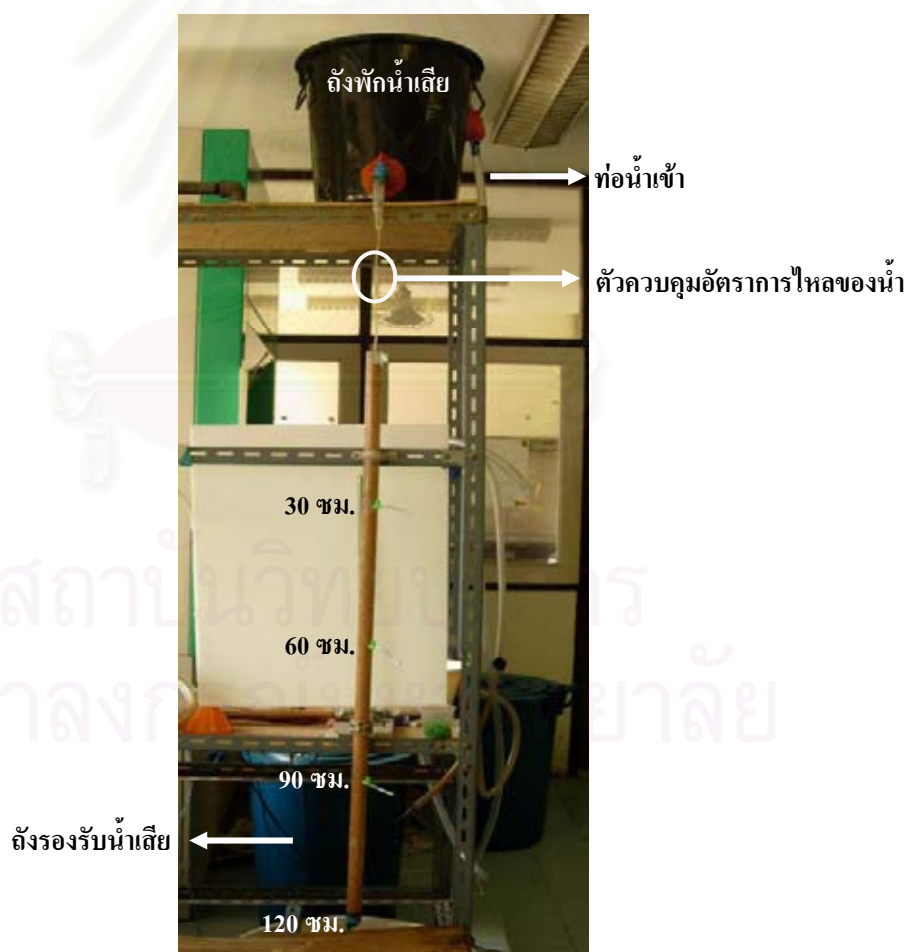
3) นำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีและวัดสี

4) คำนวณชั้นความลึกของซีโอไลต์ที่เหมาะสมและสร้าง Breakthrough curve ของซีโอไลต์

3.4.11 ประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้โดยคิดจากค่าวัตถุดิบ ค่าสารเคมี และค่าไฟฟ้า (ไม่คิดค่าแรงและค่าสถานที่)



รูปที่ 3.1 เครื่อง heating waterbath สำหรับทำปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์



รูปที่ 3.2 คอลัมน์ชุดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป และเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองศึกษาการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน แบ่งเป็นส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลของการศึกษาลักษณะเบื้องต้นและสมบัติของสารละลายด่างที่ใช้แล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline)

สารละลายด่างใช้แล้วที่ได้มาจากโรงงานรมดำโลหะอุตสาหกรรมนั้นเป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำยารมดำ SUGICUT CS-58 Y มีลักษณะเบื้องต้นจากการสังเกตเป็นดังนี้ คือ เป็นของเหลว สีเหลืองอ่อน หนืด มีกลิ่น มีเหล็กแขวนลอยและตกตะกอนผสมอยู่ ซึ่งผลของการศึกษาสมบัติและลักษณะเบื้องต้นของสารละลายด่างที่ใช้แล้ว แสดงดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนและค่าพีเอชของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว

วัน เดือน ปี	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่แน่นอนของ สารละลายต่างที่ใช้แล้ว (โมลาร์)	ค่าพีเอช
3 มี.ค. 2550	14.49	15.16
18 มี.ค. 2550	14.81	15.17
24 มี.ค. 2550	14.68	15.17
17 มี.ย. 2550	15.24	15.18
13 ก.ค. 2550	15.70	15.20
17 ส.ค. 2550	15.15	15.18
6 ก.ย. 2550	15.54	15.19
28 ก.ย. 2550	15.91	15.20
8 ต.ค. 2550	15.79	15.20
21 ต.ค. 2550	15.82	15.20
12 พ.ย. 2550	15.85	15.20

หมายเหตุ: สารละลายต่างที่ใช้แล้วตั้งแต่เดือนกรกฎาคมเป็นต้นมาเป็นสารละลายต่างเก่าที่ขอมาใหม่จากโรงงาน
รมคำโหลหะอุตสาหกรรม

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายต่างที่ใช้แล้วมีค่าประมาณ 14-16
โมลาร์ ในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายต่างที่ใช้แล้วจะมีค่าประมาณ 15.16-15.20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยปริมาณ โลหะหนักทั้งหมดและค่าเฉลี่ยโลหะที่ละลายได้ของสารละลายต่างที่ใช้แล้ว

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้	
ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณทั้งหมดเฉลี่ย	ปริมาณที่ละลายได้เฉลี่ย
- As	0.02 มก./ล.	0.02 มก./ล.
- Cd	ND	ND
- Cr	13.55 มก./ล.	12.24 มก./ล.
- Cu	0.56 มก./ล.	0.50 มก./ล.
- Fe	24.40 มก./ล.	19.40 มก./ล.
- Hg	ND	ND
- Ni	0.51 มก./ล.	0.49 มก./ล.
- Pb	0.28 มก./ล.	0.16 มก./ล.

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

4.2 ผลของการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash) เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาเผาให้ละเอียดและส่งเข้าเตาเผาที่มีอากาศเพียงพอ โดยเถ้าลอยเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน ซึ่งอาจถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต หรืออาจจะมาจากการดักจับด้วยถุงฝุ่นกรอง จะมีลักษณะเป็นผงละเอียด ร่วน เป็นสีเทาดำ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ้ำลอยถ้ำนหินที่ถูกจับไว้ด้วยเครื่องตักตะกอนไฟฟ้าสถิต

1) ลักษณะรูปร่างของถ้ำลอยถ้ำนหินและซีโอดีที่สังเคราะห์ได้

ถ้ำลอยถ้ำนหินที่ออกจากเตาเผาใหม่ๆ จะมีสีน้ำตาลแดง แต่เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น ส่วนซีโอดีที่สังเคราะห์ได้ จะมีสีน้ำตาลอ่อน แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างถ้ำลอยถ้ำนหินเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



(ก)



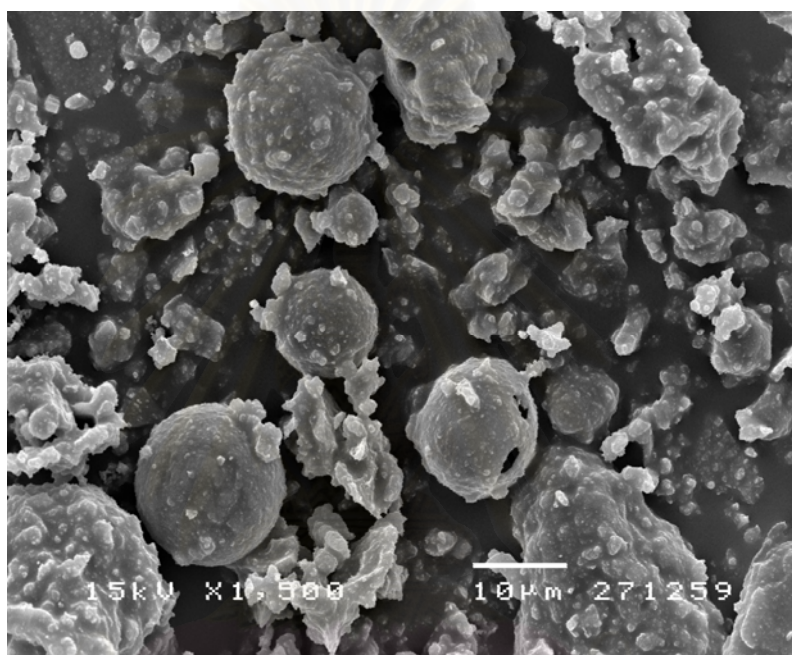
(ข)

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างซีโพลิต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

(ก) ตัวอย่างซีโพลิต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

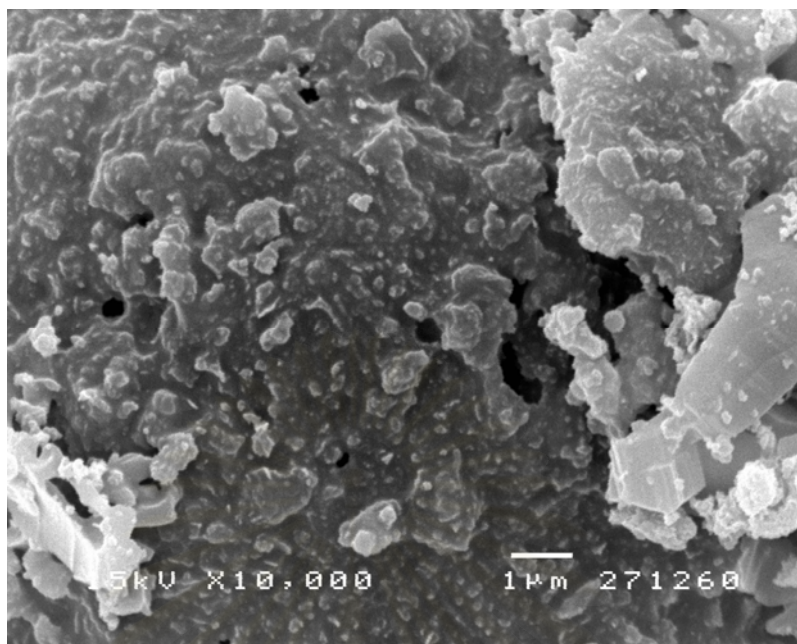
(ข) ตัวอย่างซีโพลิต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline

จากการวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า และกำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า รูปร่างของถ้ำลอยถ่านหินมีลักษณะค่อนข้างกลมถึงกลม (Sub-round to round) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ในขณะที่รูปร่างของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากถ้ำลอยถ่านหิน โดยรูปร่างมีลักษณะไม่เป็นทรงกลม พื้นที่ผิวมีความพรุนมากขึ้นและพบว่ามีผลึกของซีโอไลต์เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

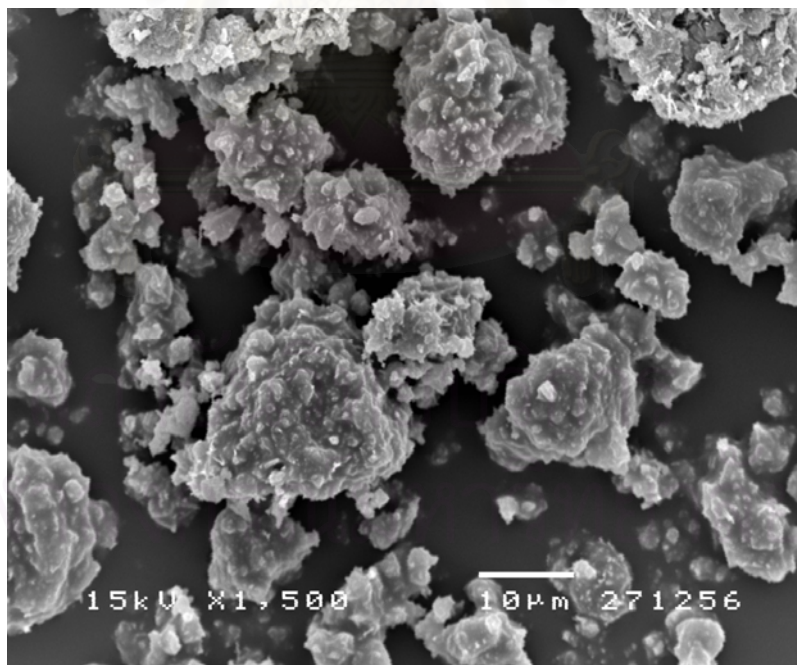


รูปที่ 4.4 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า

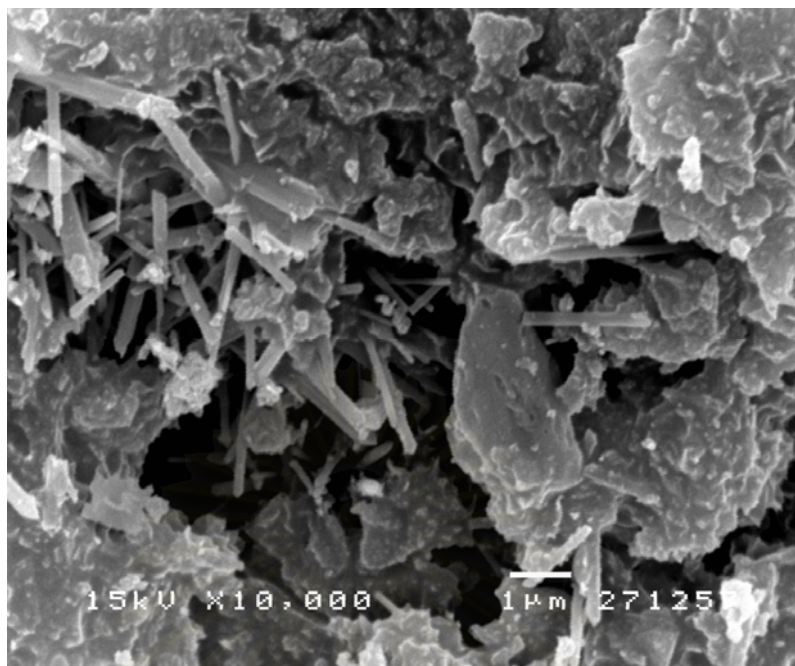
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.6 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินโดยกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.7 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า

2) ผลการหาพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของเถ้าลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาณโพรงของถ้ำลอยถ่านหิน และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ชนิดของตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ปริมาณโพรง (ลบ.ซม./กรัม)
ถ้ำลอยถ่านหิน	16.94	0.0083
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย NaOH	58.81	0.0294
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	54.47	0.0272

จากตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 16.94, 58.81 และ 54.47 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ

สำหรับปริมาณโพรงของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline มีค่าเท่ากับ 0.0083, 0.0294 และ 0.0272 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมตามลำดับ

พื้นที่ผิวและปริมาณโพรงเป็นลักษณะทางกายภาพที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ โดยซีโอไลต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับดีกว่า จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาณโพรงของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ดังนั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ้ำลอยที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

นอกจากนี้ยังพบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีพื้นที่ผิวและปริมาณโพรงมากกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ดังนั้น ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline

4.2.2 สมบัติทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน ทำได้โดยนำถ้ำลอยถ่านหินประมาณ 1 กิโลกรัม มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้ำลอยที่ผ่านการอบแล้วไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 100 เมช และเบอร์ 325 เมช ตามลำดับ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการเผาแล้วจะเปลี่ยนจากสีเทาดำเป็นสีน้ำตาลแดง จากนั้นนำถ้ำลอยที่ผ่านการเผาแล้วมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างเก่าจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline) ที่ความเข้มข้น 1.5, 2, 2.5 และ 3 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนถ้ำลอยต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย Spent alkaline เท่ากับ 1:8 นำไปให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 80 และ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 1, 2, 3 และ 4 วัน โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีสีอ่อนลงกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น เมื่อได้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ที่ทุกสภาวะแล้ว จึงนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เพื่อเลือกสภาวะที่ดีที่สุดมาทำการทดลองในขั้นต่อไป

1) ผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ

ผลการหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายต่างเก่าแล้วจากกระบวนการรมดำโลหะ (Spent alkaline) แสดงดังตารางที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC เหลือของถ้ำลอย ถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วย สารละลาย NaOH (cmol/kg zeolite)	ค่า CEC เหลือของถ้ำลอย ถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วย สารละลาย Spent alkaline (cmol/kg zeolite)
ความเข้มข้นของ สารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)		
1.5	80	1	454.70	431.93
		2	457.24	439.14
		3	459.92	442.64
		4	467.03	446.61
2.0	80	1	446.50	426.08
		2	449.27	429.27
		3	455.16	439.06
		4	470.47	450.62
2.5	80	1	446.66	423.46
		2	449.64	429.86
		3	459.82	445.82
		4	465.51	446.01
3.0	80	1	467.31	441.61
		2	477.66	453.85
		3	485.03	456.32
		4	517.49	473.74
1.5	100	1	433.47	422.64
		2	437.08	426.34
		3	440.96	427.62
		4	444.82	428.29
2.0	100	1	443.59	427.71
		2	444.35	427.82
		3	452.11	434.82
		4	453.99	435.45

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC เหลือของถ้ำลอย ถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วย สารละลาย NaOH (cmol/kg zeolite)	ค่า CEC เหลือของถ้ำลอย ถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วย สารละลาย Spent alkaline (cmol/kg zeolite)
ความเข้มข้นของ สารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)		
2.5	100	1	438.26	426.03
		2	438.99	427.66
		3	441.28	428.05
		4	456.75	433.64
3.0	100	1	450.97	437.35
		2	464.91	454.43
		3	469.93	454.91
		4	476.58	457.98

หมายเหตุ: ผลการทดลองที่ได้แสดงในภาคผนวก ง

จากตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบเวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของสารละลายต่างค่าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา พบว่า ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ซึ่งเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุด คือ 4 วัน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของสารละลายต่างค่าที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ พบว่า ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline คือ ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 วัน ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุด คือ 473.74 cmol/kg

ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ คือ 3 โมลาร์ เนื่องจากให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ซึ่งความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amrchein และคณะ (1996) และ Querol และคณะ (1997) กล่าวว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 0.5 โมลาร์ เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์มากที่สุด เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปย่อยสารประกอบควอตและมุลไลต์ในถ้ำลอยถ่านหินจนได้สารประกอบอะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ออกมา นอกจากนี้โซเดียมไอออน (Na^+) ยังทำให้โครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลของซิลิกาออกซิเจนเตตระไฮดรอล (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระไฮดรอล (Al_2O_3) อยู่ในสภาพเสถียรยิ่งขึ้น

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากการนำถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายทั้งสองชนิดมาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะทำให้สารละลายที่ใช้มีปริมาณลดลงเนื่องจากกลายเป็นไอแล้วมีการระเหยออกจากขวดที่ใช้ทำปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ลดลง ซึ่งปริมาณของสารละลายที่ใช้จะมีผลต่อซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ (Weitkamp, 1994)

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

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ของถ้ำลอยถ่านหิน และ ซีโอไลต์สังเคราะห์

ชนิดของตัวอย่าง	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cmol/kg)
ถ้ำลอยถ่านหิน	66.87
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย NaOH	517.49
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วย spent alkaline	473.74

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน 517.49 cmol/kg และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline ความเข้มข้น 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 วัน ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน 473.74 cmol/kg ซึ่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินโดยกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย spent alkaline มีสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เหมือนกัน โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนมากกว่าถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น ซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 66.87 cmol/kg

จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้สารละลาย spent alkaline ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทดแทนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอนรรฆอร พันธุ์ไพศาล (2549)

2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน

องค์ประกอบ	เถ้าลอยถ่านหิน (%)	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วย สารละลาย NaOH (%)	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วย สารละลาย Spent alkaline (%)
SiO ₂	49.070	46.947	47.200
CaO	17.060	18.001	16.550
Fe ₂ O ₃	3.890	6.880	5.260
Al ₂ O ₃	23.860	20.040	21.256
Na ₂ O	0.540	11.497	8.280
K ₂ O	0.850	0.178	0.257
MgO	0.060	0.089	0.145
MnO ₂	0.025	0.068	0.034
TiO ₂	1.859	1.390	1.070
ZrO ₂	0.073	0.047	0.101
NiO	0.022	0.020	0.026
SrO	0.151	0.081	0.204
ZnO	0.029	0.048	0.042
BaO	0.151	0.120	0.167
SO ₃	7.030	0.743	1.210
CuO	0.012	0.017	0.017
PbO	0.007	0.012	0.010
Rb ₂ O	0.005	0.005	0.005
P ₂ O ₅	0.390	0.233	0.155

จากตารางที่ 4.6 สารประกอบที่พบในเถ้าลอยถ่านหิน เป็นสารเริ่มต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินประกอบไปด้วย SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO ซึ่งเป็น

สารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดเป็นซีโอไลต์ ในถ้ำลอยถ่านหินมี SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เท่ากับ 49.070 เปอร์เซ็นต์ 23.860 เปอร์เซ็นต์ 3.890 เปอร์เซ็นต์ และ 17.060 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำถ้ำลอยถ่านหินมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย spent alkaline ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่ผ่านการใช้งานจากระบวนการรมดำโลหะอุตสาหกรรมจะสามารถทำให้เกิดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นมาได้

จากองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลาย spent alkaline พบว่า SiO_2 และ Al_2O_3 ของถ้ำลอยถ่านหินจะลดลงเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ โดยถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ลดลง จาก 49.070 เปอร์เซ็นต์ เป็น 46.947 เปอร์เซ็นต์ และ จาก 23.860 เปอร์เซ็นต์ เป็น 20.040 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ลดลง จาก 49.070 เปอร์เซ็นต์ เป็น 47.200 เปอร์เซ็นต์ และ จาก 23.860 เปอร์เซ็นต์ เป็น 21.256 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ Fe_2O_3 ของถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลาย spent alkaline จะเพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ จาก 3.890 เปอร์เซ็นต์ เป็น 6.880 เปอร์เซ็นต์ และ 5.260 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า Na_2O ของถ้ำลอยถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ทั้งที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลาย spent alkaline จาก 0.540 เปอร์เซ็นต์ เป็น 11.497 เปอร์เซ็นต์ และ 8.280 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการกระตุ้นถ้ำลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย spent alkaline ทำให้โซเดียมไอออน (Na^+) เข้าไปประกอบอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาออกซิเจนเตตระฮีดรอล และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ซึ่งทำให้อยู่ในสภาพที่เสถียรยิ่งขึ้น (มนตรี ทองคำ, 2542)

จากการที่อัตราส่วนของ Na_2O ในถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย spent alkaline เพิ่มขึ้นจึงทำให้ส่งผลต่ออัตราส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย spent alkaline โดยจะมีอัตราส่วนลดลงตามอัตราส่วนของ Na_2O ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของ Fe_2O_3 ในถ้ำลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการที่สารละลาย spent alkaline มีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ปริมาณมากจึงทำให้อัตราส่วนของ Fe_2O_3 เพิ่มขึ้นเมื่อถ้ำลอยถ่านหินถูกสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์

3) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

จากการนำตัวอย่างถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่า ซีโอไลต์ที่สามารถตรวจพบเมื่อนำตัวอย่างถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ Zeolite P1 และ Unnamed zeolite พบสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ คือ Quartz และ Mullite ส่วนซีโอไลต์ที่สามารถตรวจพบเมื่อนำตัวอย่างถ่านหินมาผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline คือ Zeolite P1 Hydroxycancrinite และ Unnamed zeolite และพบสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ คือ Quartz แสดงดังตารางที่ 4.7 (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกซ์โทมิเตอร์ แสดงในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.7 แสดงซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ่านหิน

ชนิดของตัวอย่าง	ชนิดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้	สูตรทั่วไปของซีโอไลต์	สารประกอบชนิดอื่น
ถ่านหินที่กระตุ้นด้วย NaOH	Zeolite P1	$[\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}]12\text{H}_2\text{O}$	Quartz
	Unnamed zeolite	$[1.08 (\text{Na}_2\text{O})(\text{Al}_2\text{O}_3)][1.68 (\text{SiO}_2)]1.8 \text{H}_2\text{O}$	Mullite
ถ่านหินที่กระตุ้นด้วย Spent alkaline	Zeolite P1	$[\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}]12\text{H}_2\text{O}$	Quartz
	Unnamed zeolite	$[1.08 (\text{Na}_2\text{O})(\text{Al}_2\text{O}_3)][1.68 (\text{SiO}_2)]1.8 \text{H}_2\text{O}$	
	Hydroxycancrinite	$[1.06 (\text{Na}_2\text{O})(\text{Al}_2\text{O}_3)][1.60 (\text{SiO}_2)]1.6 \text{H}_2\text{O}$	

4.3 ผลการศึกษาสมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่จะปล่อยลงสู่ทะเล นำน้ำเสียมาทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter วิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD: chemical oxygen demand) โดยใช้วิธีรีฟลักซ์แบบปิด และวัดความเข้มสี ด้วยเครื่อง spectrophotometer โดยผลการวัดและวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่าพีเอช ความเข้มข้น และวิเคราะห์ค่าซีไอคของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
พีเอช	8.62	8.84	8.88	8.78
ซีไอค (มก./ลิตร)	166.5647	165.2016	167.9278	165.2016
ความเข้มข้น (% transmittance)	89.400	89.300	89.767	89.489

จากตารางแสดงให้เห็นว่า น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 8.6-8.9 มีค่าซีไอคอยู่ระหว่าง 165-168 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์อยู่ระหว่าง 89.30-89.80

4.4 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดซีไอคและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีไอคที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซีไอคและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีไอคที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) ซึ่งจะพิจารณาการกำจัดซีไอคของซีไอคที่สังเคราะห์เป็นหลัก การทดลองจะแบ่งเป็น การหาปริมาณของซีไอคที่สังเคราะห์ที่เหมาะสม การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม และการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีไอคที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งในการหาสภาวะที่เหมาะสมจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของร้อยละการกำจัดซีไอค โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) หากพบว่ามีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

4.4.1 การหาปริมาณที่เหมาะสมของซีไอคที่สังเคราะห์

โดยการทดลองนี้จะนำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมมาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ไม่มีการปรับค่าพีเอช เดิมซีไอคที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 กรัม ตามลำดับ จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำน้ำเสีย

โรงงานฟอกย้อมไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีและความเข้มสีที่เหลืออยู่ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.8

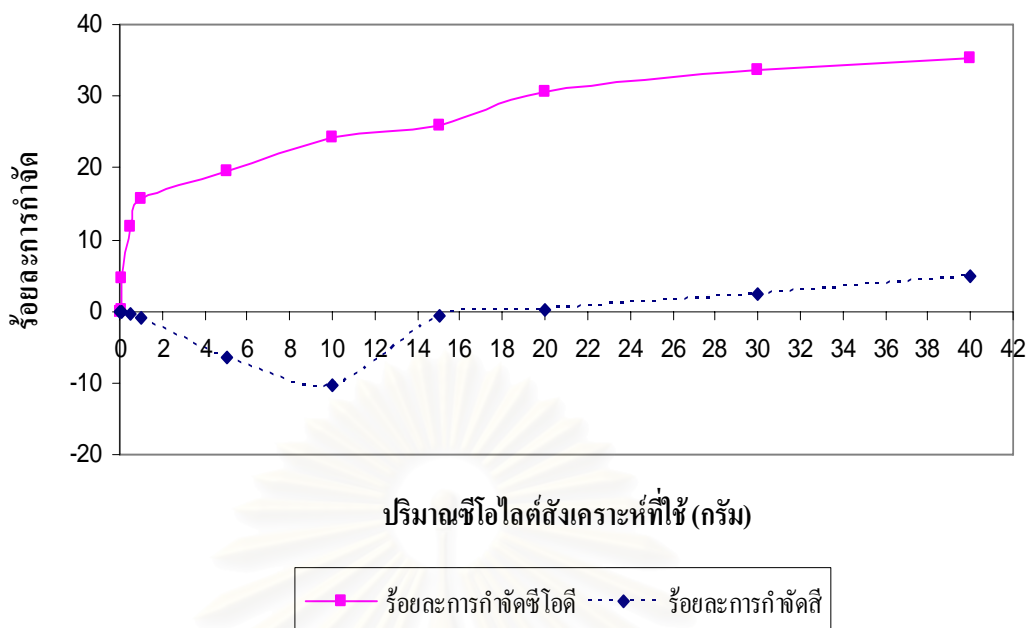
ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี ความเข้มสี และค่าพีเอชของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้ (กรัม)	พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น	พีเอชน้ำเสียสุดท้าย	ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มสีเฉลี่ยของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (% transmittance)	ร้อยละการกำจัดสี (%)
0.01	8.62	8.64	166.5647	0.00 ^h	89.40	0.00
0.05	8.62	8.67	166.3800	0.11 ^h	89.47	-0.04
0.10	8.62	8.84	158.6976	4.72 ^g	89.27	-0.15
0.50	8.62	9.16	146.9904	11.75 ^f	88.97	-0.48
1.00	8.62	9.41	140.4864	15.66 ^e	88.63	-0.86
5.00	8.62	10.23	133.9824	19.56 ^d	83.63	-6.45
10.00	8.62	10.51	126.1776	24.25 ^c	80.2	-10.29
15.00	8.62	10.65	123.5760	25.81 ^c	88.87	-0.60
20.00	8.62	10.75	115.7712	30.49^b	89.67	0.30
30.00	8.62	10.92	110.5680	33.62 ^{ab}	91.60	2.46
40.00	8.62	11.04	107.9664	35.18 ^a	93.73	4.85

หมายเหตุ: 1. ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 166.5647 มก./ล. ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 89.40 และค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.62

2. ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ.1-2

3. ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามวิธี DMRT (ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงในภาคผนวก ช)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้กับร้อยละการกำจัดซีโอคลอรีนและคลอรีน

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.8 เมื่อเติมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณต่างๆ ลงไปในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม พบว่า ร้อยละการกำจัดซีโอคลอรีนของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้ โดยซีโอไลต์ปริมาณ 40 กรัมสามารถกำจัดซีโอคลอรีนในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นปริมาณ 30 กรัม และ 20 กรัม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาทางสถิติ พบว่า ร้อยละการกำจัดซีโอคลอรีนของซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 40 กรัมมีความแตกต่างจากปริมาณอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ร้อยละการกำจัดซีโอคลอรีนของซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 30 กรัม ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับร้อยละการกำจัดซีโอคลอรีนของซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 20 กรัม จึงพิจารณาปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดซีโอคลอรีนและคลอรีน คือ ปริมาณซีโอไลต์ 40 และ 20 กรัม โดยจะเลือก 20 กรัมเป็นปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมต่อไป เนื่องจากปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น 2 เท่า สามารถกำจัดซีโอคลอรีนได้เพิ่มขึ้นเพียง 4.69 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการกำจัด พบว่าเมื่อใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณมากขึ้นจะเป็นการสิ้นเปลืองซีโอไลต์ และเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงขึ้น

โดยซีโอไลต์ปริมาณ 20 กรัม สามารถกำจัดซีโอคลอรีนและคลอรีนในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจากซีโอคลอรีนเริ่มต้น 166.5647 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือซีโอคลอรีนสุดท้ายเป็น 115.7712 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดซีโอคลอรีนเท่ากับ 30.49 ในขณะที่ความเข้มข้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์เริ่มต้นเท่ากับ 89.40 เปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์สุดท้ายเพิ่มขึ้นเป็น 89.67 ความเข้มข้นลดลงคิดเป็นร้อยละ 0.30

4.4.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

โดยการทดลองนี้จะนำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมมาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 3-12 เดิมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสมคือ 20 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่ 4.4.1 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีและความเข้มสีที่เหลืออยู่ ผลการทดลองที่ได้แสดงตารางที่ 4.10 และ รูปที่ 4.9

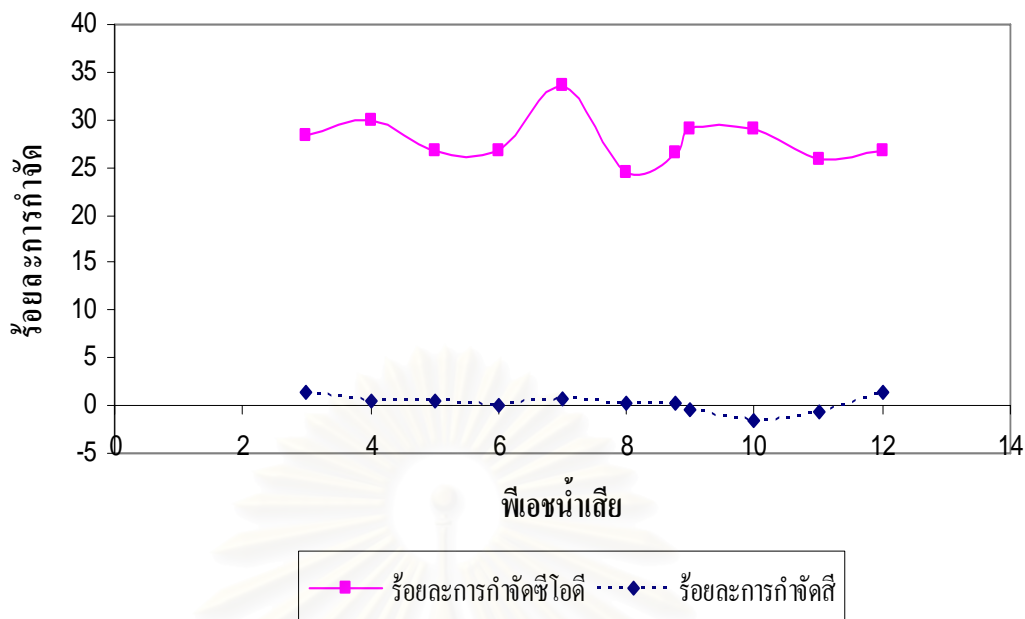
ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี และความเข้มสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่พีเอชต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้ (กรัม)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสุดท้าย	ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)	ค่าเฉลี่ยความเข้มสีน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (% transmittance)	ร้อยละการกำจัดสี (%)
20	ปกติ	11.32	121.3333	26.55 ^{bc}	89.43	0.15
20	3	10.99	118.3728	28.35 ^{bc}	90.50	1.34
20	4	11.07	115.7712	29.92 ^{ab}	89.77	0.52
20	5	11.10	120.9744	26.77 ^{bc}	89.73	0.48
20	6	11.13	120.9744	26.77 ^{bc}	89.37	0.07
20	7	11.19	109.8615	33.50^a	90.00	0.78
20	8	11.23	124.8768	24.41 ^c	85.77	0.34
20	9	11.25	117.0720	29.13 ^{ab}	88.87	-0.48
20	10	11.39	117.0720	29.13 ^{ab}	87.83	-1.64
20	11	11.64	124.8768	25.81 ^{bc}	88.77	-0.60
20	12	11.87	120.9744	26.77 ^{bc}	90.60	1.46

หมายเหตุ: 1. ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 165.2016 มก./ล. ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 89.30 และค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.75

2. ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ.3-4

3. ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามวิธี DMRT (ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงในภาคผนวก ช)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนไดออกไซด์สังเคราะห์ 20 กรัม กับร้อยละการกำจัดคลอรีนและคลอรีนไดออกไซด์ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ฟิเอชต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.10 และ รูปที่ 4.9 เมื่อแปรค่าฟิเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม 3-12 พบว่า ที่ฟิเอช 7 ให้ร้อยละการกำจัดคลอรีนไดออกไซด์มีแนวโน้มมาก เมื่อนำร้อยละการกำจัดคลอรีนไดออกไซด์ไปทดสอบทางสถิติพบว่า ที่ฟิเอช 7 มีร้อยละการกำจัดคลอรีนไดออกไซด์ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่ฟิเอช 4, 9 และ 10 แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นพบว่า ที่ฟิเอช 7 ให้ร้อยละการกำจัดคลอรีนไดออกไซด์ดีกว่าที่ฟิเอช 4, 9 และ 10 ดังนั้นจึงเลือกฟิเอช 7 เป็นฟิเอชที่เหมาะสมในการกำจัดคลอรีนไดออกไซด์และคลอรีนในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

โดยคลอรีนไดออกไซด์ปริมาณ 20 กรัม ใส่ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ปรับฟิเอชเป็น 7 สามารถกำจัดคลอรีนไดออกไซด์และคลอรีนในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจากคลอรีนเริ่มต้น 165.2016 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือคลอรีนไดออกไซด์สุดท้ายเป็น 109.8615 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ 33.50 ในขณะที่ความเข้มข้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้นเท่ากับ 89.30 เปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์สุดท้ายเพิ่มขึ้นเป็น 90.00 ความเข้มข้นลดลงคิดเป็นร้อยละ 0.78

4.4.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม

โดยการทดลองนี้จะนำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมมาปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมได้จากการทดลองที่ 4.4.2 เติมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสมคือ 20 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่ 4.4.1 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีและความขุ่นสีที่เหลืออยู่ ผลการทดลองที่ได้แสดงตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.10

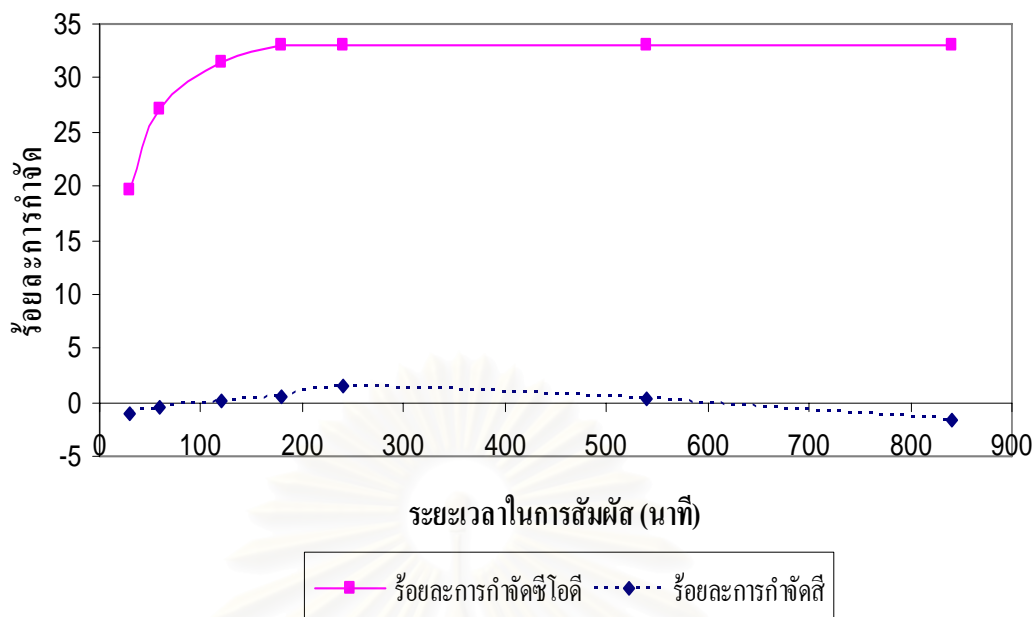
ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี และความขุ่นสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ระยะเวลาในการสัมผัส (นาท)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชสุดท้าย	ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)	ค่าเฉลี่ยความขุ่นสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (% transmittance)	ร้อยละการกำจัดสี (%)
30	7	10.49	134.8712	19.68 ^c	88.53	-0.97
60	7	10.59	121.6485	27.03 ^b	89.03	-0.41
120	7	10.51	115.0372	31.50^a	89.60	0.22
180	7	10.55	112.3926	33.07 ^a	89.90	0.56
240	7	10.49	112.3926	33.07 ^a	90.70	1.45
540	7	10.41	112.3926	33.07 ^a	89.70	0.34
840	7	10.52	112.3926	33.07 ^a	87.97	-1.60

หมายเหตุ: 1. ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 167.9278 มก./ล. ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 89.40 และค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.00

2. ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.5-6

3. ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตามวิธี DMRT (ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไซด์สังเคราะห์ 20 กรัม กับร้อยละการกำจัดซีโอไซด์และซิลิกาในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระยะเวลาในการสัมผัสต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.10 เมื่อแปรค่าระยะเวลาในการสัมผัสต่างๆ พบว่า ที่ระยะเวลาในการสัมผัส 30 นาที 60 นาที 120 นาที และ 180 นาที ร้อยละการกำจัดซีโอไซด์ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อใช้ระยะเวลาในการสัมผัสเกิน 180 นาที แนวโน้มเส้นกราฟจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการสัมผัสตั้งแต่ 180 นาทีขึ้นไป จะทำให้การกำจัดซีโอไซด์ในน้ำเสียเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยที่ระยะเวลาในการสัมผัสที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออนในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้ จะมีผลต่อการกำจัดซีโอไซด์น้อยมาก และเมื่อพิจารณาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม โดยพิจารณาร้อยละการกำจัดซีโอไซด์ที่ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที และ 180 นาที นำไปทดสอบทางสถิติ พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงเลือกระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมที่ 120 นาที ซึ่งจากรูปร้อยละการกำจัดซีโอไซด์และร้อยละการกำจัดซิลิกาในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมควรมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแต่เมื่อพิจารณาร้อยละการกำจัดซิลิกาเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสเกิน 240 นาที แนวโน้มเส้นกราฟที่ได้จะลดลงอาจเนื่องมาจากการรบกวนเกิดขึ้น โดยเกิดจากซีโอไซด์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นผง ซึ่งเมื่อใช้ระยะเวลาในการสัมผัสนานขึ้นจะกระทบกับความเข้มข้นของน้ำเสียมากขึ้น

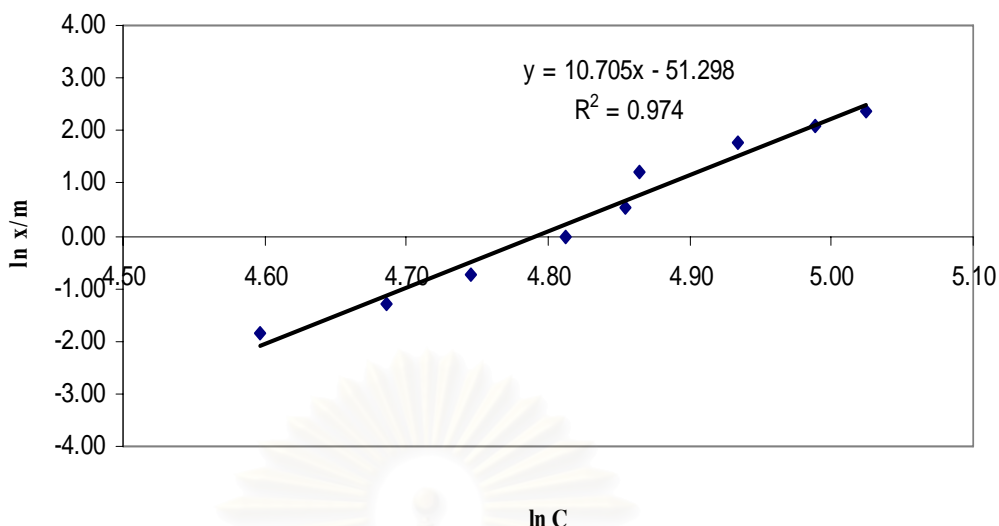
โดยซีโอไลต์ปริมาณ 20 กรัม ใส่ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ปรับพีเอชเป็น 7 ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที สามารถกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจากซีโอดีเริ่มต้น 167.9278 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือซีโอดีสุดท้ายเป็น 115.0372 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 31.50 ในขณะที่ความเข้มข้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์เริ่มต้นเท่ากับ 89.40 เปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์สุดท้ายเพิ่มขึ้นเป็น 89.60 ความเข้มข้นลดลงคิดเป็นร้อยละ 0.22

4.5 ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

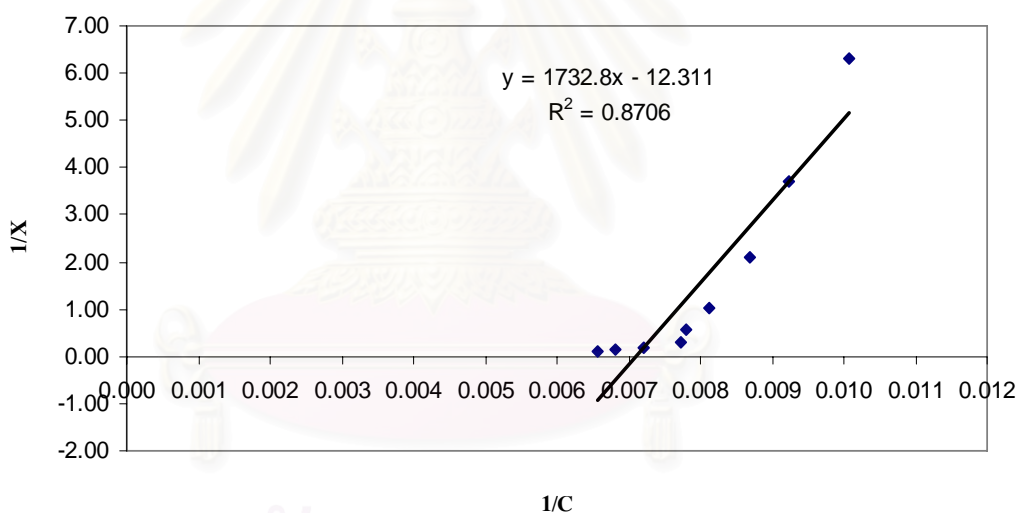
ในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหิน น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ใช้ถูกปรับพีเอชเป็น 7 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.42 ใส่ในน้ำเสียที่ปรับค่าพีเอช ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์อยู่ 0.1, 0.2, 0.4, 1, 2, 4, 10, 20 และ 40 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.43 จากนั้นนำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการดูดซับไปวิเคราะห์ค่าซีโอดี และความเข้มข้นที่เหลือ จะทำการทดสอบไอโซเทอมโดยพิจารณาที่ค่าซีโอดีเพียงอย่างเดียวเนื่องจากค่าความเข้มข้นวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์จึงไม่สามารถนำมาทดสอบไอโซเทอมได้ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

น้ำหนักซีโอไลต์ (กรัม)	ค่าเฉลี่ยซีโอดีที่เหลือ (มก./ล.)	c (mg)	x (mg)	x/m (mg/l)	ln C	ln x/m	1/C	1/X	ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)
0.0	162.639	16.264	0	-	-	-	-	-	-
0.1	152.061	15.206	1.058	10.58	5.024	2.359	0.0066	0.0945	6.50
0.2	146.772	14.677	1.587	7.935	4.988	2.071	0.0068	0.1260	9.76
0.4	138.838	13.884	2.380	5.95	4.933	1.783	0.0072	0.1681	14.63
1.0	129.582	12.958	3.306	3.31	4.864	1.197	0.0077	0.3021	20.33
2.0	128.260	12.826	3.438	1.72	4.854	0.542	0.0078	0.5814	21.14
4.0	122.971	12.297	3.967	0.99	4.811	-0.010	0.0081	1.0101	24.39
10.0	115.037	11.504	4.760	0.48	4.745	-0.734	0.0087	2.0833	29.27
20.0	108.426	10.843	5.421	0.27	4.686	-1.309	0.0092	3.7037	33.33
40.0	99.170	9.917	6.347	0.16	4.596	-1.833	0.0101	6.2500	39.02



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดติดแบบฟรอนดลิชของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้



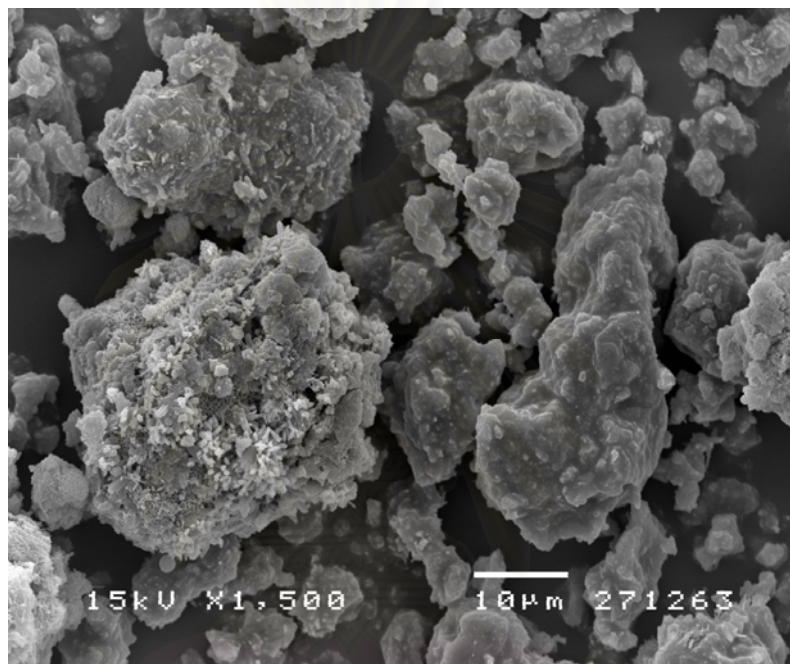
รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดติดแบบแลงมัวร์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.12 นำไปคำนวณเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดติดผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งสมการที่นิยมใช้ในการอธิบายไอโซเทอมการดูดติดผิวมีอยู่หลายสมการ แต่ในการศึกษานี้จะใช้สมการของ ฟรอนดลิชและแลงมัวร์มาอธิบายการดูดติดผิวจากรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นการทดสอบไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชและแลงมัวร์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถวิเคราะห์หาค่า R^2 (Coefficient of Determination) ของแต่ละไอโซเทอมสำหรับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้สำหรับสมการฟรอนดลิช คือ 0.9740 และ สมการแลงมัวร์ คือ

0.8706 ค่า R^2 ของสมการพหุนดลิตซ์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดติดผิวของ ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้สอดคล้องกับสมการดูดติดผิวแบบพหุนดลิตซ์มากกว่าแลงมัวร์ จึงเลือกสมการของพหุนดลิตซ์มาอธิบาย จากสมการของพหุนดลิตซ์ $y = 10.705x - 51.298$ ทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ในสมการได้ดังนี้ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 5.27×10^{-23} และ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานในการดูดติดผิว ($1/n$) เท่ากับ 10.705 จากค่า K ที่ต่ำมาก และ ค่า $1/n$ ที่มากกว่า 1 แสดงว่า ซีโอไลต์มีความสามารถในการดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีได้ไม่ดี อาจเนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์คือการแลกเปลี่ยนแคทไอออน และเลือกดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ จะปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ๆ ออกมา ซึ่งสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอดีอาจมีส่วนที่เป็น ไอออนบวกอยู่ปริมาณน้อย และน่าจะมีโมเลกุลใหญ่จึงเป็นสาเหตุทำให้ซีโอไลต์มีความสามารถในการดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอดีได้ไม่ดี จากค่าคงที่ที่ได้สามารถนำมาเขียนไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพหุนดลิตซ์ของซีโอไลต์สังเคราะห์ได้ดังนี้ คือ $x/m = 5.27 \times 10^{-23} C_e^{10.705}$ จากสมการเมื่อแทนค่า C_e เท่ากับ 162.639 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นจะได้ค่า x/m เท่ากับ 24.71 สามารถกล่าวได้ว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 24.71 มิลลิกรัม

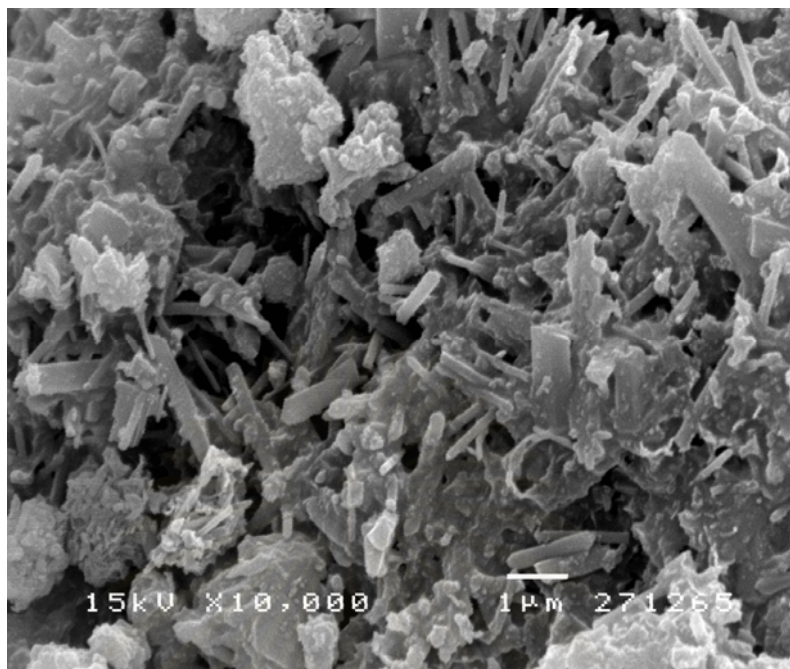
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีและผ่านการดูดติดผิวสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมไปวิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 10,000 เท่า พบว่า พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการบำบัดน้ำเสียเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยพื้นที่ผิวที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์จะถูกปิดจากอนุภาคของสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีและสีที่ถูกดูดติดผิว แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการดูดติดผิว เมื่อใช้กำลังขยาย 1,500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้หลังผ่านการดูดติดผิว เมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า

4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ

ขั้นตอนนี้นำซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้แล้วจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีมาทำการฟื้นฟูสภาพ โดยแปรค่าปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้แล้วเป็น 5 และ 10 กรัม มาล้างด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง นำซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพไปใช้ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ใหม่ คือ ปริมาณซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ 20 กรัม ปรับพีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเป็น 7 ระยะเวลาในการสัมผัส 2 ชั่วโมง ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดี และความเข้มสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)	ค่าเฉลี่ยความเข้มสีน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (% transmittance)	ร้อยละการกำจัดสี (%)
1.1	161.2992	1.59	80.80	-10.32
1.2	161.2992	1.59	80.87	-10.25
2.1	150.8928	7.94	80.40	-10.77
2.2	150.8928	7.94	80.47	-10.69
3.1	156.0960	4.76	84.90	-5.77
3.2	156.0960	4.76	85.03	-5.62
4.1	163.9008	0.00	84.10	-6.66
4.2	163.9008	0.00	84.33	-6.40
5.1	156.0960	4.76	80.33	-10.84
5.2	156.0960	4.76	80.50	-10.65
6.1	158.6976	3.18	80.20	-10.99
6.2	158.6976	3.18	80.43	-10.73

หมายเหตุ: 1. ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 163.9008 มก./ล. ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 90.10

2. ตัวอย่าง 1.1 และ 1.2 คือ นำซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว 5 กรัม มาใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1% ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง 2.1 และ 2.2 คือ นำซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว 5 กรัม มาใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5% ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง 3.1 และ 3.2 คือ นำซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว 5 กรัม มาใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10% ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง 4.1 และ 4.2 คือ นำซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว 10 กรัม มาใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1% ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง 5.1 และ 5.2 คือ นำซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว 10 กรัม มาใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5% ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง 6.1 และ 6.2 คือ นำซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว 10 กรัม มาใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 10% ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

จากตารางที่ 4.13 เป็นการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้วโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ให้ได้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้ พบว่า ปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้แล้ว 5 กรัม ใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง ให้ร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสูงสุด คือ 7.94 ซึ่งร้อยละการกำจัดซีโอดีที่ได้ไม่สูง มีสาเหตุมาจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีที่ถูกดูดซับไว้บนซีโอไลต์เพียงบางส่วน บางส่วนที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนออกมาได้อาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ ซึ่งไม่ใช่การแลกเปลี่ยนไอออนกับซีโอไลต์ จึงทำให้ซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพสามารถกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ต่ำ สำหรับความเข้มข้นซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพทุกสภาวะจะทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่ง

ก่อนการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป (แสดงดังรูปที่ 4.15) โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่ง จะทำการทดลองแบบ batch โดยนำสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผง คือ ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ 20 กรัม ปรับพีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเป็น 7 และระยะเวลาในการสัมผัส 120 ชั่วโมง มาใช้ในการทดลองซีโอไลต์ที่ผ่านการขึ้นรูป เพื่อเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดซีโอดีและสีของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผงกับซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.15 ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.14 ปริมาณซีโอดี และความเข้มสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัดด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผงและซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ณ สภาวะที่เหมาะสม

ชนิดของตัวอย่าง	ค่าซีโอดีน้ำเสีย โรงงานฟอกย้อม หลังการบำบัด (มก./ลิตร)	ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มสี น้ำเสียโรงงาน ฟอกย้อมหลัง การบำบัด (% transmittance)	ร้อยละการ กำจัดสี (%)
ซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่เป็นผง	219.6610	21.359	89.50	3.308
	219.6610	21.359	89.60	3.424
	219.6610	21.359	89.50	3.308
เฉลี่ย	219.6610	21.36	89.53	3.35
ซีโอไลต์ที่ผ่านการ ขึ้นรูป	227.7966	18.446	92.10	6.310
	219.6610	21.359	92.20	6.425
	227.7966	18.446	92.10	6.310
เฉลี่ย	225.0847	19.42	92.13	6.35

หมายเหตุ: 1. ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 279.3220 มก./ล. ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 86.63 และค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.00

2. น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่นำมาใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแบ่งเป็นน้ำเสียที่ได้ไปเก็บมาใหม่จากโรงงาน

จากตารางที่ 4.14 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผงกับซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป พบว่า ร้อยละการกำจัดซีโอดีของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผงมีค่าสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปเท่ากับ 21.36 และ 19.42 ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของซีโอไลต์ที่เป็นผงมีค่ามากกว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการขึ้นรูป โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผงเท่ากับ 54.47 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0272 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปเท่ากับ 35.46 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0175 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ซีโอไลต์ที่เป็นผงสามารถกำจัดซีโอดีได้ดีกว่า แต่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งการที่ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปมีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงลดลงเนื่องจากดินขาวที่ใช้เป็นตัว binder จะเข้าไปบังบริเวณผิวและโพรงของ

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ในขณะที่ร้อยละการกำจัดสีของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปมีค่าสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผง คือ เท่ากับ 6.35 และ 3.35 ตามลำดับ เนื่องจากซีโอไลต์ผงมีผลทำให้ความเข้มข้นสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเพิ่มมากขึ้น จากนั้นจะนำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปไปกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่ง

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่งที่เป็นท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.30 เซนติเมตร มีการเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เท่ากับ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดยทำการชั่งน้ำหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปก่อนการบรรจุ ผลของปริมาตรและน้ำหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่บรรจุในระดับความลึกต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.15 ทำการเติมน้ำกลั่นประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงท่อ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองอากาศ จากนั้นบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปลงในถังดูดซับแบบแบ่ง ทำการป้อนน้ำกลั่นผ่านถังดูดซับแบบแบ่งเพื่อไลฟองอากาศเป็นเวลาหนึ่งวันก่อนการป้อนน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

ตารางที่ 4.15 ปริมาตรและน้ำหนักของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่บรรจุในระดับความลึกต่างๆ

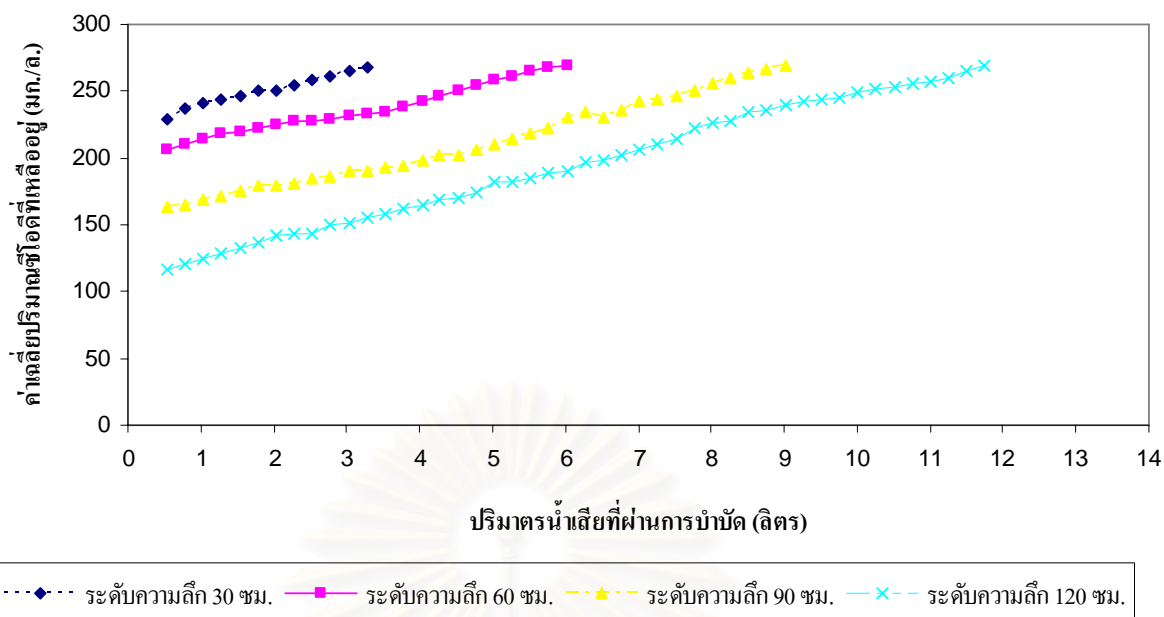
ความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ (เซนติเมตร)	ปริมาตรของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ (ลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)
30	0.1245	77.66
60	0.2490	155.32
90	0.3735	232.98
120	0.4983	310.64

ปรับพีเอชของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเป็น 7 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ เป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ 4.4.2 วิเคราะห์ค่าซีโอดี

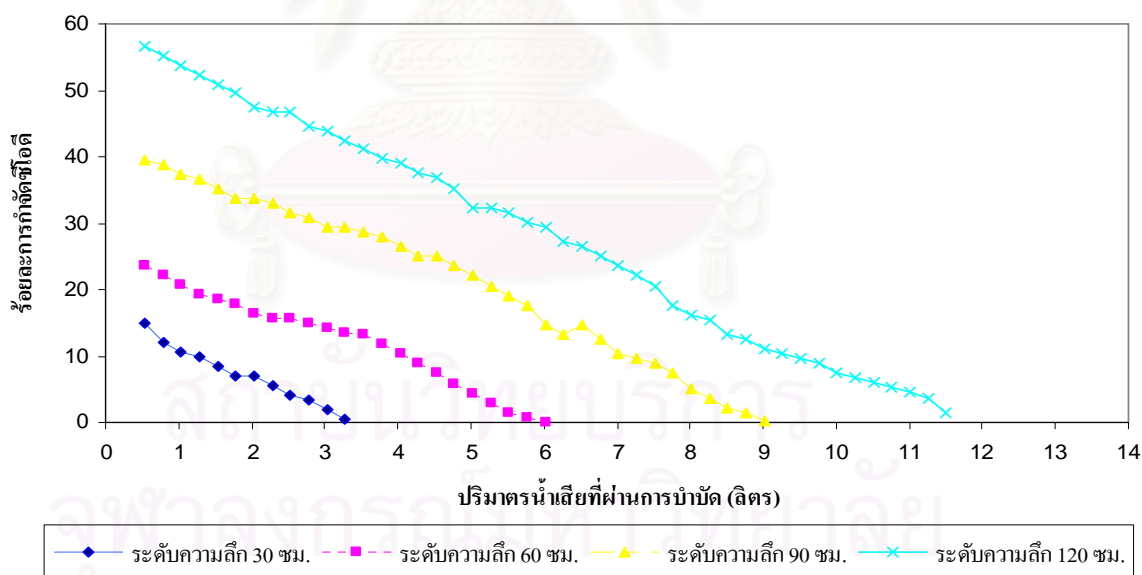
และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้เท่ากับ 269.7521 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 86.90 เปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์ ทำการป้อนน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเข้าสู่คอลัมน์ โดยการปล่อยให้ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ด้วยอัตราการไหล 0.249 ลิตรต่อชั่วโมง (วิธีในการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) หรือเวลากักเก็บในคอลัมน์คิดคิดผิวแบบแห้งเท่ากับ 120 นาที ซึ่งเป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.4.3 เก็บตัวอย่างน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระดับความลึกของชั้นซีโพลิต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ตามลำดับ ทุกๆ 1 ชั่วโมงสำหรับวิเคราะห์ซีโอดิ และวัดค่าพีเอช และ ทุก 1 ชั่วโมงในช่วงแรกและอีกทุกๆ 2-3 ชั่วโมงตามลำดับ สำหรับวัดความเข้มข้น

เนื่องจากมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ฉ) มีการกำหนดค่าซีโอดิไว้ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างน้ำเสียมีค่าซีโอดิเริ่มต้นเท่ากับ 269.7521 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด จึงกำหนดจุด Breakthrough เมื่อค่าซีโอดิในน้ำออกใกล้เคียงกับค่าซีโอดิน้ำเข้า แสดงดังรูปที่ 4.16-4.17 ส่วนค่าความเข้มข้นนั้น ไม่มีการกำหนดค่าความเข้มข้นในน้ำทิ้งไว้แน่นอน เพียงแต่บอกว่าต้องมีสีไม่เป็นที่พึงรังเกียจทำให้ไม่สามารถกำหนดจุด Breakthrough ได้ การยุติการทดลองจะหยุดเมื่อค่าความเข้มข้นในน้ำออกใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นน้ำเข้า แสดงดังรูปที่ 4.18-4.19

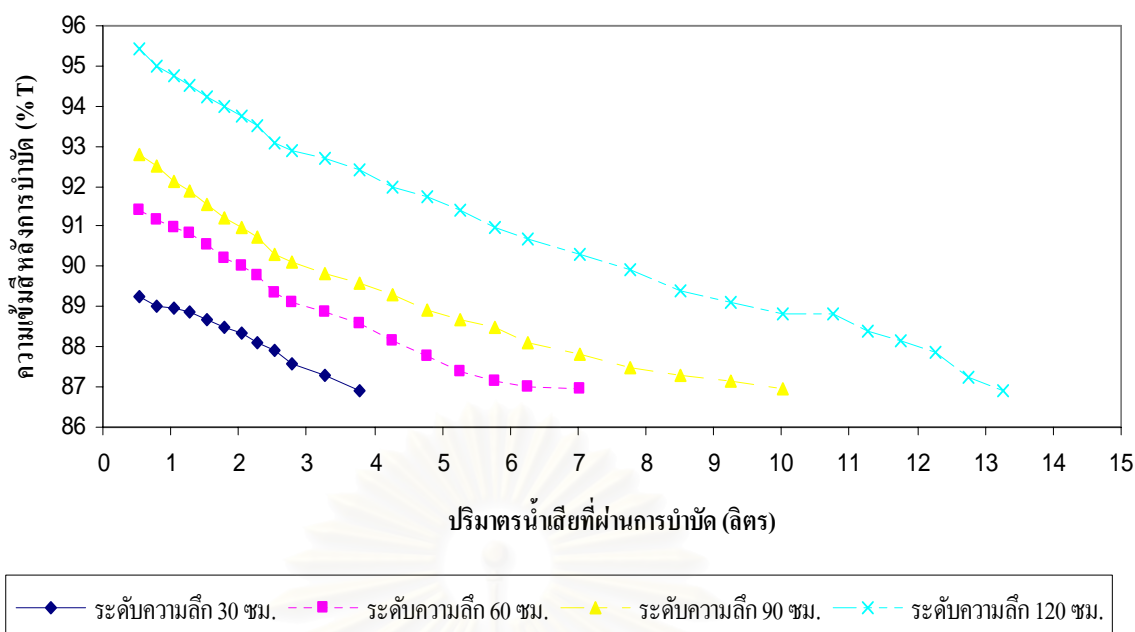
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



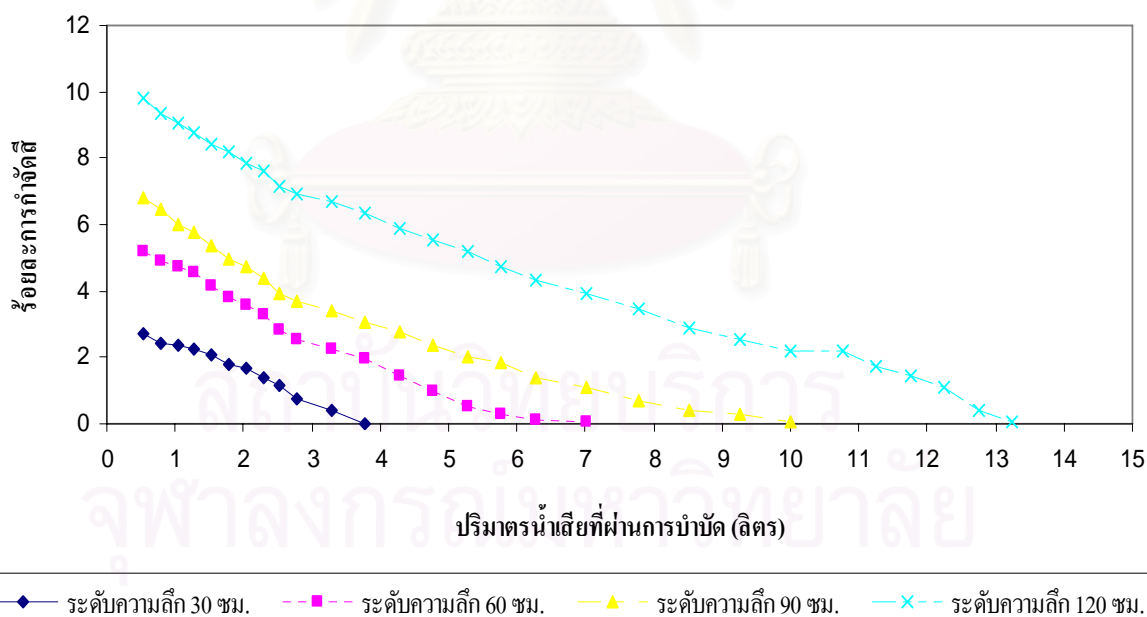
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด



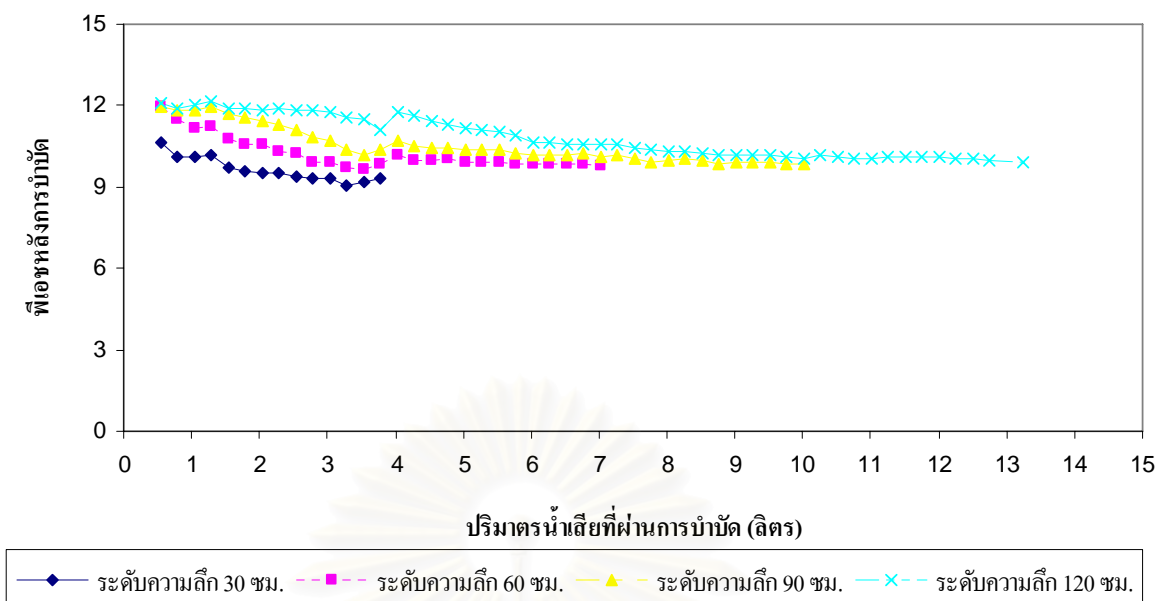
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร กับ ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

จากรูปที่ 4.16 ถึง 4.19 พบว่า ร้อยละการกำจัดซีโอดีและสีของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัด เนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปเริ่มอิ่มตัวจึงไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีและไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับสีในน้ำเสียออกได้ ร้อยละการกำจัดซีโอดีและสีจึงลดลง ในช่วงระยะแรกของการทดลองจะเห็นว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปมีความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีสูงเนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปยังมีโอกาสในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงและยังมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับสูงอยู่แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปโอกาสในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลงและพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับน้อยลงทำให้ความสามารถในการกำจัด ซีโอดีและสีลดลงจนเกือบคงที่

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมกับความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปจะสามารถกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสูงตามระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 พบว่าเส้นกราฟที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร อยู่เหนือเส้นกราฟที่ระดับความลึก 90 60 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปมากกว่า ก็สอดคล้องกับหลักการดูดซับคือ เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปหรือก็คือเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับก็จะสามารถทำให้การดูดซับสารอินทรีย์

ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีและคูลซ์บีสื่ออกจากน้ำเสียได้มากขึ้น ยังเพิ่มโอกาสในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น และชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่มีความลึกกว่ามีระยะเวลาในการสัมผัสน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่นานกว่า จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีดียิ่งขึ้น โดยความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีของคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ที่จุดยุติแสดงดังตารางที่ 4.18 และ 4.19

จากรูปที่ 4.20 พบว่า พีเอชของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่งในระยะเริ่มต้นค่าพีเอชที่ได้จะสูงเนื่องจากซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline จึงทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์มีค่าพีเอชสูง เมื่อเวลาผ่านไปและน้ำเสียที่ผ่านเข้ามาในคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นค่าพีเอชของน้ำเสียจะลดลงจนเกือบคงที่เนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์เริ่มหมดสภาพ เมื่อพิจารณาตามความลึกของชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป พบว่าเส้นกราฟที่ระดับความลึก 120 เซนติเมตร อยู่เหนือเส้นกราฟที่ระดับความลึก 90 60 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปมากกว่า จึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียสูงกว่า

ตารางที่ 4.16 ความสามารถในการกำจัดซีโอดีของคอลัมน์ดูดซับแบบแบ่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ณ จุดยุติ ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร

ความลึกซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ผ่านการขึ้นรูป (เซนติเมตร)	เวลาในการใช้งาน (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม	
		(ลิตร)	(BV)
30	13	3.28	26.35
60	24	6.02	24.19
90	36	9.01	24.13
120	47	11.76	23.59

หมายเหตุ: ผลการทดลองที่ได้แสดงในภาคผนวก ญ

ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการกำจัดสีของคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ผ่านการขึ้นรูป ณ จุดยุติ ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร

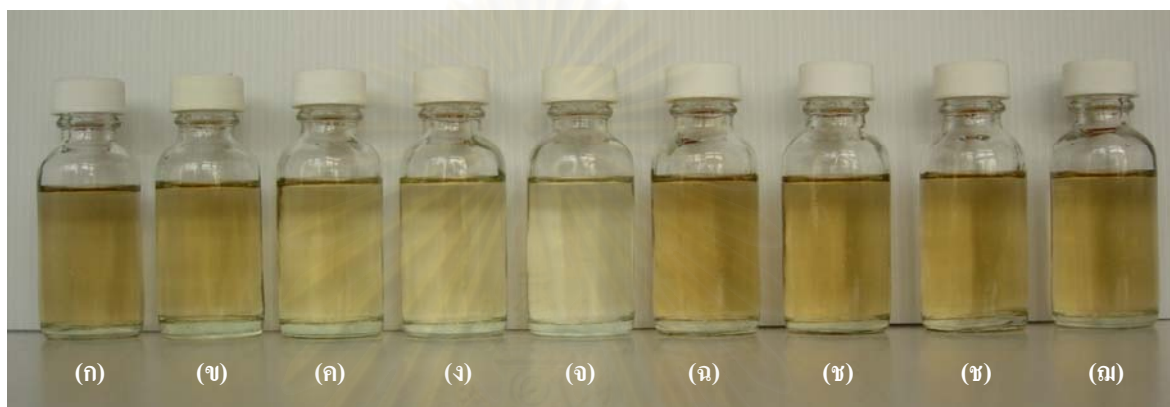
ความลึกซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ผ่านการขึ้นรูป (เซนติเมตร)	เวลาในการใช้งาน (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม	
		(ลิตร)	(BV)
30	15	3.78	30.36
60	28	7.02	28.19
90	40	10.01	26.80
120	53	13.25	26.59

หมายเหตุ: ผลการทดลองที่ได้แสดงในภาคผนวก ฅ

จากตารางที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสามารถในการกำจัดซีโอไลต์และสีของคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ณ จุดยุติ ที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่า ความสามารถในการกำจัดซีโอไลต์ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เท่ากับ 3.28 6.02 9.01 และ 11.76 ลิตร ตามลำดับ แสดงปริมาณของน้ำในหน่วย Bed Volume จะได้ 26.35 24.19 24.13 และ 23.59 BV ตามลำดับ ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ระดับความลึก 30 60 90 และ 120 เท่ากับ 3.78 7.02 10.01 และ 13.25 ลิตร ตามลำดับ แสดงปริมาณของน้ำในหน่วย Bed Volume จะได้ 30.36 28.19 26.80 และ 26.59 BV ตามลำดับ

สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งที่ได้ทำการทดลองนี้ได้นำระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองแบบ batch มาใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำเสียที่จะผ่านคอลัมน์ ซึ่งในการทดลองควรนำอัตราการไหลตามมาตรฐาน คือ อัตราการไหล 2-3 ลิตรต่อชั่วโมงมาใช้ในการทดลองแทน

เมื่อนำน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป ระดับความลึกของชั้น 30 เซนติเมตร 60 เซนติเมตร 90 เซนติเมตร และ 120 เซนติเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาพิจารณาความเข้มข้นในการเก็บน้ำเสียตัวอย่างครั้งแรกเปรียบเทียบกับน้ำเสียตัวอย่างที่จุด breakthrough พบว่า ความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจะลดลงตามระดับความลึกของชั้นซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป สำหรับการเก็บน้ำเสียตัวอย่างครั้งแรก ในขณะที่ความเข้มข้นน้ำเสียตัวอย่างที่จุด breakthrough จะใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมตามระดับความลึกของชั้นซีโอไลท์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปบรรจุในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง (ก) น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมก่อนผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง (ข) (ค) (ง) และ (จ) คือ น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งเก็บตัวอย่างครั้งแรก ที่ระดับความลึก 30 ซม. 60 ซม. 90 ซม. และ 120 ซม. ตามลำดับ (ฉ) (ช) (ซ) และ (ณ) คือ น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่ง เก็บตัวอย่างครั้งสุดท้าย ที่ระดับความลึก 30 ซม. 60 ซม. 90 ซม. และ 120 ซม. ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 ผลการประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตซีโอไลท์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยใช้สารละลาย spent alkaline

การผลิตซีโอไลท์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 3,000 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เตาอบและเตาเผาสามารถรองรับได้ในการอบและการเผา

ค่าใช้จ่ายในการผลิตประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบ และค่าไฟฟ้า

1) ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

- เถ้าลอยถ่านหินที่นำมาใช้ในการผลิตไม่เสียค่าใช้จ่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า

- สารละลาย spent alkaline ที่นำมาใช้ในการผลิตไม่เสียค่าใช้จ่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมรมดำโลหะอุตสาหกรรม

- น้ำกลั่นที่ใช้ราคาเฉลี่ย 2 บาท ใช้ในการเจือจางสารละลาย spent alkaline ในการผลิตซีโอไลท์ 3000 กรัม ใช้น้ำกลั่นประมาณ 19.5 ลิตร คิดเป็นราคาค่าใช้จ่าย 39.00 บาท

2) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบเถ้าลอยถ่านหิน

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

ค่าใช้จ่ายในการอบ

$$\text{ราคาค่าไฟฟ้า} = \text{KW} \times \text{H} \times 1.3576$$

$$= 2.2 \times 6 \times 1.3576$$

$$= 17.92 \text{ บาท}$$

3) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเผาเถ้าลอยถ่านหิน

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

ค่าใช้จ่ายในการเผา

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

4) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline เพื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์

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

ค่าใช้จ่ายในการทำปฏิกิริยา

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

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 3,000 กรัม ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีค่าเท่ากับ $39 + 17.92 + 14.33 + 260.65 = 331.90$ บาท

ดังนั้นการผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน 1,000 กรัม มีค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตเท่ากับ 110.63 บาท

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลาย spent alkaline มีสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์เช่นเดียวกัน คือ ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน ซึ่งจะให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน เท่ากับ 517.49 และ 473.74 cmol/kg ตามลำดับ

ชนิดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ Zeolite P1 และ Unnamed zeolite ในขณะที่ชนิดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline คือ Zeolite P1 Hydroxycancrinite และ Unnamed zeolite ซึ่งจะพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย spent alkaline มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันจึงสามารถนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากสารละลาย spent alkaline มาใช้แทนกันได้

5.1.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยถ่านหิน โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

5.1.2.1 การหาปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสม

ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม คือ 20 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดซีโอดีและสีได้ 30.49 เปอร์เซ็นต์ และ 0.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.1.2.2 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ที่พีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเท่ากับ 7 เป็นพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ 20 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดซีโอดีและสีได้ 33.50 เปอร์เซ็นต์ และ 0.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.1.2.3 การหาระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม

ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ปรับพีเอชเป็น 7 ใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ 20 กรัม คือ 120 นาที ซึ่งสามารถกำจัดซีโอดีและสีได้ 31.50 เปอร์เซ็นต์ และ 0.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.1.3 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่สภาวะที่เหมาะสม คือ พีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเท่ากับ 7 เวลาในการสัมผัส 120 นาที พบว่า ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีค่า R^2 มากกว่าสมการแบบแลงมัวร์ ดังนั้น ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชจึงเหมาะที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมมากกว่าไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ โดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้คือ $x/m = 5.27 \times 10^{-23} C_e^{10.705}$ จะพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 24.71 มิลลิกรัม

5.1.4 การศึกษาการฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ที่ใช้แล้วปริมาณ 5 กรัม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการสัมผัส 1 และ 3 ชั่วโมง หาร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสูงสุด คือ 7.94 ซึ่งซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพสามารถกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้ต่ำ สำหรับความเข้มข้นซีโอไลต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพทุกสภาวะจะทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น

5.1.5 การศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปเปรียบเทียบกับซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผง ที่สถานะที่เหมาะสมที่ได้จากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผง พบว่า ร้อยละการกำจัดซีโอดีของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผงมีค่าสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป คือเท่ากับ 21.36 และ 19.42 ตามลำดับ แต่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ร้อยละการกำจัดสีของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปมีค่าสูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เป็นผง คือเท่ากับ 6.35 และ 3.35 ตามลำดับ

เมื่อนำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูปไปกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ดูดซับแบบแท่งความสูง 120 เซนติเมตร โดยปรับพีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเป็น 7 ปล่อยน้ำเสียไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างด้วยอัตราการไหล 0.249 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระดับความลึกซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป 30 60 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่า เวลาในการใช้งานของซีโอไลต์ที่ผ่านการขึ้นรูปในการกำจัดซีโอดีที่จุดยุติ เท่ากับ 13, 24, 36 และ 47 ชั่วโมง ตามลำดับ และสามารถบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้เท่ากับ 26.35, 24.19, 24.13 และ 23.59 BV ตามลำดับ ในขณะที่เวลาในการใช้งานของซีโอไลต์ที่ผ่านการขึ้นรูปในการกำจัดสีที่จุดยุติ เท่ากับ 15, 28, 40 และ 53 ชั่วโมง ตามลำดับ และสามารถบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมได้เท่ากับ 30.36, 28.19, 26.80 และ 26.59 BV ตามลำดับ

5.1.6 การประเมินค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินปริมาณ 1,000 กรัม ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีค่าเท่ากับ 110.63 บาท

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

1) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ โดยนำมากระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline เช่น แกลบที่เหลือทิ้งจากการสีข้าว ดินเบา เป็นต้น

2) ควรมีการศึกษาการนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาใช้กำจัดแคดเมียมในดิน โดยนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับดินที่มีแคดเมียมปนเปื้อนแล้วนำไปปลูกพืชเพื่อดูประสิทธิภาพในการลดการดูดตรึงแคดเมียมของพืช

3) ควรมีการศึกษาการนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาใช้กำจัดแอมโมเนียในน้ำเสีย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท.).
- การไฟฟ้านครหลวง. 2543. อัตราค่าไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท.).
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2538. ถั่วลอยลิกไนต์. วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 47 (ตุลาคม): 224-236.
- เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ. 2541. การควบคุมคุณภาพงานเตรียมสิ่งทอเพื่อการย้อม. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- เกษม ไตรหิรัญ. 2544. การขจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สถ่านหินโดยการออกซิไดส์เชิงเร่งปฏิกิริยาบนซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, เฉลิมราช วันทวิน, วุฒิ วิพันธ์พงษ์ และอำพล เตโชวณิชย์. 2544. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.
- คงศักดิ์ วัฒนวงศ์พิทักษ์. 2543. การแยกไซลีนไอโซเมอร์ผสมโดยการดูดซับบนซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จารุทัศน์ มลินทะเลข. 2537. การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์. 2547. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากถั่วลอยถ่านหินและถั่วลอยชานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จำรัส ลิ้มตระกูล. 2540. เคมีของซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์ 51 (พฤศจิกายน-ธันวาคม): 420-423.
- ชัชวาล ฉัตรรัตนนท์. 2549. การสังเคราะห์และลักษณะสมบัติของซีโอไลต์จากถั่วลอยถ่านหินสำหรับการขจัดซัลเฟอร์ของเชื้อเพลิงเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ชงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า. เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2526. จีเถ้าลอยกับงานอุตสาหกรรม. ใน ประโยชน์ของกากของเสียจากโรงงานไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ. 2546. การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสีอ็อกโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เลิศ รักสันติชาติ. 2545. การฟื้นฟูซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ที่ใช้แล้วสำหรับการดูดซับเอทีเอ็นไกลคอลล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรวิทย์ เหลืองดิลก. 2544. ผลของโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟต่อการลดสีโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชาญ ภูพัฒน์. 2526. การใช้จีเถ้าลอยในงานผลิตปูนซีเมนต์. ใน อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- วิทยา เทียมสุข. 2544. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วิภาฯ บุญเจริญสุข. 2537. รายงานปัญหาพิเศษ เรื่อง ซีโอไลต์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีรพงษ์ นามโท. 2543. การผลิตซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเถ้าลอยของถ่านหินลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ. 2525. การกำจัดสีของน้ำเสียจากการย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮดรตเบสิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2542. คู่มือผู้ควบคุมและปฏิบัติงานระบบบำบัดมลพิษโรงงาน. กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท.).
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2544. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

- สัจจนาด สิทธิวารยัน และสมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สายฝน หาญโยธี. 2547. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 บริสุทธิ์สูงจากเถ้าลอยของลิกไนต์และชิลิกาจากเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร: (ม.ป.ท.).
- อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล. 2549. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยเพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนิรุทธ์ ชงชัย. 2528. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยในงานวิศวกรรม. ใน เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่ 3 เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบท. ขอนแก่น: (ม.ป.ท.).
- อารักษ์ คำรังสัดย์. 2546. การกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยซีโอไลต์และทรายไม่กัดขนาด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาษาอังกฤษ

- Aiyuk, S., Amoako, J., Raskin, L., Haandel, A. V., and Verstracte, W. 2004. Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept. Water Research 38: 3031-3042.
- Al-Degs, Y., Khraisheh, M. A. M., Allen, S. J., and Ahmad, M. N. 2000. Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactive dyes from textile effluent. Wat. Res. 34: 927-935.
- Amrhein, C., Haghnia, G. H., Kim, T. S., Morher, P. A., Amanios T., and Delta, T. L. 1996. Synthesis and properties of zeolites from coal fly ash. Environmental Science & Technology 30: 735-742.
- Baerlocher, Ch., Meier, W. M., and Olson, D. H. 2001. Atlas of Zeolite Framework Types. (n.p.): Elsevier Science.
- Breck, D. W. 1974. Zeolite molecular sieve : Structure, chemistry, and use. New York: John Wiley & Sons.
- Buckley, C. A. 1992. Membrane technology for the treatment of dryhouse effluent. Wat. Sci. Tech. 25: 203-209.
- Chern, J. M. and Huang, S. N. 1998. Study of nonlinear wave propagation theory: I. Dye adsorption by activated carbon. Ind. Eng. Chem. Res. 37: 253-257.
- Dyer, A. 1988. Introduction to zeolite molecular sieves. New York: John Wiley & Sons.
- Eckenfelder, W. W. 1966. Industrial water pollution control. New York: CBI Publishing Company.
- Gasper-Galvin, L. D. 1998. Zeolite-Supported metal oxide sorbents for hot-gas desulfurization. Ind. Eng. Chem. Res. 37: 4157-4166.
- Kikuchi, R. 1999. Application of coal ash to environmental improvement: Transformation into zeolite, potassium fertilizer, and FGD absorbent. Resources Conservation and Recycling 27: 333-346.
- Lin, F. C., Lo, S. S., Lin, Y. H., and Lee, Y. 1998. Stabilization of cadmium contaminated soils using synthesized zeolite. Journal of Hazardous Materials 60: 217-226.
- Lin, S. Y., Al-Shawabkeh, A., Horio, M., Matsuda, H., and Hasatani, M. 1995. Reaction of hydrogen sulfide with limestone particle. Coal Science and Technology 24: 1891-1894.

- Luna, Y., Otal, E., Vilches, L. F., Vale, J., Querol, X., and Fernandez Pereira, C. 2006. Use of zeolitised coal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study. Waste Management 27: 1877-1883.
- Murayama, N., Yamamoto, H., and Shibata, J. 2002. Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. International Journal Mineral Processing 64: 1-17.
- Otal, E., Vilches, F. L., Moreno, N., Querol, X., Vale, J., and Fernandez-Pereira, C. 2004. Application of zeolitised coal fly ashes to the depuration of liquid wastes. Fuel 84: 1440-1446.
- Penilla, P. R., Bustos, G. A., and Elizalde, G. S. 2006. Immobilization of Cs, Cd, Pb and Cr by synthetic zeolites from Spanish low-calcium coal fly ash. Fuel 85: 823-832.
- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, N., Alvarez-Ayuso, E., Garcia-Sanchez, A., Cama, J., Ayora, C., and Simon, M. 2006. Immobilization of heavy metal in polluted soils by the addition of zeolitic material synthesized from coal fly ash. Chemosphere 62: 171-180.
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., and Lopezsoyer, A. 1997. Synthesis of Na-Zeolites From fly ash. Fuel 76: 793-799.
- Reed, B. E., Jamil, M., and Thomas, B. 1966. Effect of pH, empty bed contact time and hydraulic loading rate on leading rate on lead removal by granular activated carbon columns. Water Environmental Research 68: 877-882.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., and Nigam, P. 2001. Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresource Technology 77: 247-255.
- Steenbruggen, G., and Hollman, G. G. 1998. The synthesis of zeolite from fry ash and the properties of the zeolite products. Journal of Geochemical Exploration 62: 305-309.
- Wang, S., Li, H., Xie, S., Liu, S., and Xu, L. 2006. Physical and chemical regeneration of zeolite absorbents for dye removal in wastewater treatment. Chemosphere 65: 82-87.
- Weitkamp, J., Karge, H. G., Pfeifer, H., and Holderich, W. 1994. Zeolites and related microporous materials: State of the art 1994. Studies in surface science and catalysis. U.S.A: Elsevier Science.
- Wu, D., Zhang, B., Li, C., Zhang, Z., and Kong, H. 2006. Simultaneous removal of ammoniam and phosphate by zeolite synthesized from fly ash as influenced by salt treatment. Journal of Colloid and Interface Science 304: 300-306.

Young-Soo, L., Hee, T. K., and Kyong-Ok, Y. 1995. Effect of ferric oxide on the high temperature removal of hydrogen sulfide over ZnO-Fe₂O₃ mixed metal oxide sorbent. Ind. Eng. Chem. Res. 34: 1181-1188.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline

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

วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (potassium hydrogen phthalate, KHP)

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

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

เมื่อ m คือ มวลของ KHP เป็นกรัม

204.23 คือ มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต

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

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

วิธีการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ spent alkaline

1. บรรจุสารละลาย spent alkaline ที่เตรียมไว้ลงในบิวเรต บันทึกระดับของสารละลาย บนสเกลก่อนการไทเทรต

2. ใช้ปิเปตขนาด 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดูดสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนลงไป 2-3 หยด เขย่าสารละลายที่ได้ แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลาย spent alkaline จากบิวเรตจนได้สีชมพูอ่อนเกิดขึ้น บันทึกระดับของสารละลาย spent alkaline บนสเกลของบิวเรตอีกครั้ง และหาปริมาตรของสารละลาย spent alkaline ที่ใช้

3. ทำการไทเทรตซ้ำอีกครั้ง หาปริมาณของสารละลาย spent alkaline ที่ใช้จะต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าเกินต้องทำการไทเทรตซ้ำอีกครั้ง นำปริมาณของสารละลาย spent alkaline ที่ใกล้เคียงกันสองค่ามาหาค่าเฉลี่ย นำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline จากสูตร

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

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของ KHP (โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)

V คือ ปริมาณของ spent alkaline ที่ใช้ในการไทเทรต (ลูกบาศก์เดซิเมตร)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม (มนตรี ทองคำ, 2542)

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

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

วิธีเตรียมสารละลาย

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

สอบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ โดย

ซังแคลเซียมคาร์บอเนต (ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์) ประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอนถึง 0.0001 กรัม ใส่งในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ปริมาตร 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร ใช้ปิเปตดูดสารละลายนี้ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใสในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ปริมาตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัฟเฟอร์ปริมาตร 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ จากสูตร

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

เมื่อ m คือ มวลของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นมิลลิกรัม

V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. ซังตัวอย่าง 0.5 กรัม ใส่งในครุชเชิลพร้อมฝา ให้ทราบมวลที่แน่นอน แล้วนำครุชเชิลและฝาไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปิดฝาครุชเชิล นำออกจากเตาเผา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์จนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่ง คำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา จากสูตร

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

เมื่อ m_1 คือ มวลของตัวอย่างก่อนเผา เป็นกรัม

m_2 คือ มวลของตัวอย่างหลังเผา เป็นกรัม

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

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

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

5. ทำแบบลค์เปรียบเทียบ ถ้าปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 2 ครั้ง ต่างกันเกิน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ทำแบบลค์เปรียบเทียบใหม่

การคำนวณ

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

(มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์)

เมื่อ	V_1	คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร
	V_2	คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรตกับแบบลค์ เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร
	C	คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ เป็น โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
	100.09	คือ มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต
	m	คือ มวลของตัวอย่าง เป็นกรัม
	L	คือ น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา เป็นร้อยละ

หมายเหตุ: ตัวอย่างที่ใช้ก่อนนำมาวิเคราะห์ ต้องเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (ที่ปราศจากซิลิกาเจล) ที่มีภาชนะบรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปวิเคราะห์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค
วิธีวิเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาความยาวคลื่นเพื่อวิเคราะห์สี

การหาความยาวคลื่นเพื่อวิเคราะห์ความเข้มสี ตาม Standard method of water and wastewater treatment (1995) โดยวิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างแล้วด้วยเครื่อง Spectrophotometer ซึ่งวิธีการหาความยาวคลื่นเพื่อวิเคราะห์สีมีดังนี้

นำน้ำเสียตัวอย่างมาวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หาค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์ในแต่ละค่าความยาวคลื่นของตัวอย่างน้ำที่มีการกำจัดความขุ่นแล้ว ตามที่แสดงในตารางที่ ค.1 สำหรับการวัดที่ต้องการความถูกต้องในระดับปานกลางให้เลือกใช้แบบ 10 ordinate no. (ที่มีเครื่องหมาย *) แต่สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องในระดับที่สูงขึ้น ก็ใช้ทั้ง 30 ordinate no. โดยทำการสอบเทียบของเครื่องมือให้อ่านค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์ของน้ำกลั่นได้ 100 เปอร์เซ็นต์

จากนั้นทำการรวมค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์ในแต่ละคอลัมน์ออกมาเป็นค่า A, B, C ตามลำดับ แล้วนำมาคูณด้วยค่าคงที่ที่กำหนด (ดังแสดงในท้ายตารางที่ ค.1) ออกมาเป็นค่า Tristimulus X, Y, Z ตามลำดับ

ค่า Tristimulus Y สามารถนำมารายงานเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ลูมิแนนซ์ได้เลย จากนั้นคำนวณค่า trichromatic coefficient x, y ได้จากสมการ

$$x = X / (X+Y+Z)$$

$$y = Y / (X+Y+Z)$$

นำค่า x , y ที่คำนวณได้มาพล็อตบนไดอะแกรม (chromaticity diagram) ในรูปที่ ค.1 หาความยาวคลื่นเด่น (dominant wavelength) และความบริสุทธิ์ (purity) ได้จากไดอะแกรม ตรวจสอบโทนสีได้จากตารางที่ ค.2

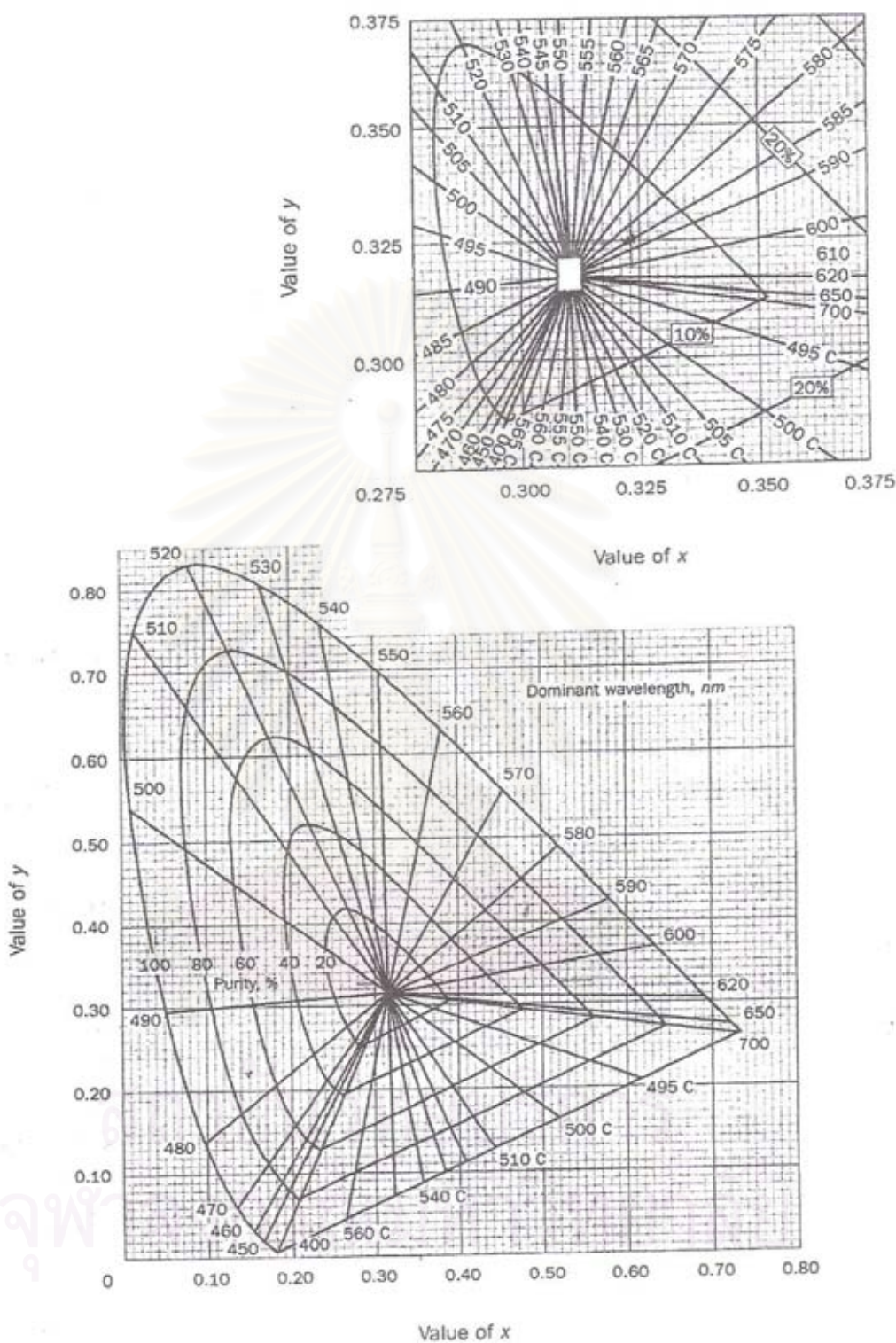
ตารางที่ ค.1 จุดกำหนดความยาวคลื่นต่างๆ ในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์สำหรับการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับน้ำตัวอย่างด้วยเครื่อง Spectrophotometer

Ordinate No.	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance
1	424.4		465.9		414.1	
2*	435.5		489.5		422.2	
3	443.9		500.4		426.3	
4	452.1		508.7		429.4	
5*	461.2		515.2		432.0	
6	474.0		520.6		434.3	
7	531.2		525.4		436.5	
8*	544.3		529.8		438.6	
9	552.4		533.9		440.6	
10	558.7		537.7		442.5	
11*	564.1		541.4		444.4	
12	568.9		544.9		446.3	
13	573.2		548.4		448.2	
14*	577.4		551.8		450.1	
15	581.3		555.1		452.1	
16	585.0		558.5		454.0	
17*	588.7		561.9		455.9	
18	592.4		565.3		457.9	
19	596.0		568.9		459.9	
20*	599.6		572.5		462.0	
21	603.3		576.4		464.1	
22	607.0		580.4		466.3	
23*	610.9		584.8		468.7	
24	615.0		589.6		471.4	
25	619.4		594.8		474.3	
26*	624.2		600.8		477.7	

ตารางที่ ค.1 จุดกำหนดความยาวคลื่นต่างๆ ในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์สำหรับการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับน้ำตัวอย่างด้วยเครื่อง Spectrophotometer (ต่อ)

Ordinate No.	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance
27	629.8		607.7		481.8	
28	636.6		616.1		487.2	
29*	645.9		627.3		495.2	
30	663.0		647.4		511.2	
total transmittance	A		B		C	
เมื่อใช้ 30 ordinate no.	$X = A \times 0.03269$		$Y = B \times 0.03333$		$Z = C \times 0.03938$	
เมื่อใช้ 10 ordinate no.	$X = A \times 0.09806$		$Y = B \times 0.10000$		$Z = C \times 0.11814$	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑.1 chromaticity diagram

ตารางที่ ค.2 โทนสีสำหรับช่วงของความยาวคลื่นเด่นที่หาได้

ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	โทนสี
400-465	ม่วง
465-482	ฟ้า
482-497	ฟ้าอมเขียว
497-530	เขียว
530-575	เหลืองอมเขียว
575-580	เหลือง
580-587	ส้มเหลือง
587-598	ส้ม
598-620	ส้มแดง
620-700	แดง

ตัวอย่างการคำนวณ ใช้น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเป็นตัวอย่างในการหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวัดสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ใช้สำหรับการทดลอง โดยนำไปวิเคราะห์หา % transmittance ที่แต่ละความยาวคลื่น ตามตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ ค.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 % ทรานสมิตแตนซ์ ของ 30 ลำดับ ของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ที่ความยาวคลื่นต่างๆ
ตามตาราง ค.1

Ordinate No.	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance
1	424.4	59.3	465.9	72.2	414.1	56.6
2*	435.5	62.7	489.5	76.9	422.2	59.2
3	443.9	66.9	500.4	78.7	426.3	59.7
4	452.1	68.5	508.7	79.8	429.4	61.6
5*	461.2	70.7	515.2	81.2	432.0	61.7
6	474.0	73.9	520.6	81.7	434.3	62.5
7	531.2	82.4	525.4	82.1	436.5	62.5
8*	544.3	84.0	529.8	82.2	438.6	63.8
9	552.4	85.0	533.9	83.2	440.6	65.0
10	558.7	85.1	537.7	83.1	442.5	66.2
11*	564.1	86.4	541.4	83.8	444.4	66.7
12	568.9	86.4	544.9	83.7	446.3	66.9
13	573.2	86.5	548.4	84.2	448.2	67.8
14*	577.4	87.4	551.8	84.6	450.1	67.5
15	581.3	86.9	555.1	85.1	452.1	68.2
16	585.0	87.9	558.5	85.2	454.0	68.7
17*	588.7	87.9	561.9	85.9	455.9	69.3
18	592.4	88.5	565.3	85.6	457.9	69.6
19	596.0	88.5	568.9	86.5	459.9	70.4
20*	599.6	89.3	572.5	86.6	462.0	70.4
21	603.3	89.1	576.4	87.2	464.1	71.4
22	607.0	89.6	580.4	87.5	466.3	71.3
23*	610.9	89.6	584.8	87.4	468.7	72.5
24	615.0	90.6	589.6	88.1	471.4	72.6
25	619.4	90.5	594.8	88.2	474.3	73.6
26*	624.2	90.9	600.8	89.0	477.7	74.1

ตารางที่ ค.3 % ทรานสมิตแตนซ์ ของ 30 ลำดับ ของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตามตาราง ค.1 (ต่อ)

Ordinate No.	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance	Wavelength (nm.)	% transmittance
27	629.8	91.6	607.7	89.4	481.8	74.9
28	636.6	91.3	616.1	90.6	487.2	75.7
29*	645.9	92.7	627.3	90.8	495.2	77.4
30	663.0	92.9	647.4	92.4	511.2	79.4
total transmittance	A	2523.00	B	2542.90	C	2047.20
เมื่อใช้ 30 ordinate no.	X = A x 0.03269 X = 2523 x 0.03269 X = 82.476870		Y = B x 0.03333 Y = 2542.9 x 0.03333 Y = 84.754857		Z = C x 0.03938 Z = 2047.2 x 0.03938 Z = 80.618736	
X + Y + Z = 247.850463						

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{82.476870}{247.850463} = 0.3327$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{84.754857}{247.850463} = 0.3419$$

ดังนั้น $(x,y) = (0.3327,0.3419)$ นำไปกำหนดจุดบนไดอะแกรม ดังรูปที่ ค.1 จะได้ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม คือ 575 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับสีเหลือง ดังตารางที่ ค.2



ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 1 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่สภาวะต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC ของถ้ำลอยถ่านหิน ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (cmol/kg zeolite)			
ความเข้มข้นของ สารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)				
			1	2	3	เฉลี่ย
1.5	80	1	453.989	458.350	451.749	454.70
		2	454.168	458.072	459.465	457.24
		3	457.913	461.067	460.791	459.92
		4	468.677	466.166	466.260	467.03
2.0	80	1	448.892	445.255	445.344	446.50
		2	446.245	449.475	452.081	449.27
		3	454.176	454.630	456.687	455.16
		4	468.643	471.435	471.341	470.47
2.5	80	1	445.331	448.204	446.454	446.66
		2	449.642	449.642	449.642	449.64
		3	458.420	459.172	461.866	459.82
		4	463.799	466.498	466.218	465.51
3.0	80	1	468.330	467.589	466.007	467.31
		2	479.008	476.500	476.309	477.66
		3	487.131	484.429	482.934	485.03
		4	519.189	515.484	517.785	517.49
1.5	100	1	436.624	433.757	430.021	433.47
		2	438.819	440.297	432.135	437.08
		3	442.994	439.860	440.036	440.96
		4	444.824	444.824	444.824	444.82
2.0	100	1	442.900	445.416	442.458	443.59
		2	445.451	442.669	444.917	444.35
		3	452.702	451.942	451.672	452.11
		4	453.218	453.581	455.157	453.99

ตารางที่ ง. 1 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC ของถ้ำลอยถ่านหิน ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (cmol/kg zeolite)			
ความเข้มข้นของ สารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)				
			1	2	3	เฉลี่ย
2.5	100	1	437.391	439.819	437.566	438.26
		2	435.517	440.909	440.556	438.99
		3	440.408	440.408	443.014	441.28
		4	455.612	455.976	458.673	456.75
3.0	100	1	450.967	450.967	450.967	450.97
		2	463.854	464.692	466.180	464.91
		3	471.323	467.137	471.323	469.93
		4	479.188	476.299	474.264	476.58

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 2 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่สภาวะต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC ของถ้ำลอยถ่านหิน ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline (cmol/kg zeolite)			
ความเข้มข้นของ สารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)				
			1	2	3	เฉลี่ย
1.5	80	1	428.543	434.829	432.412	431.93
		2	437.659	440.188	439.574	439.14
		3	443.500	441.920	442.499	442.64
		4	446.575	447.013	446.251	446.61
2.0	80	1	426.078	426.078	426.078	426.08
		2	432.356	426.696	428.745	429.27
		3	436.451	441.669	439.060	439.06
		4	451.288	449.961	450.625	450.62
2.5	80	1	423.463	423.463	423.463	423.46
		2	429.862	427.380	432.343	429.86
		3	444.421	447.006	446.025	445.82
		4	444.860	448.368	444.980	446.01
3.0	80	1	440.948	442.176	441.699	441.61
		2	453.846	452.700	454.991	453.85
		3	454.994	456.320	457.647	456.32
		4	477.207	470.673	473.325	473.74
1.5	100	1	422.892	422.385	422.639	422.64
		2	426.747	425.225	427.054	426.34
		3	425.898	429.988	426.980	427.62
		4	428.291	428.291	428.291	428.29
2.0	100	1	429.793	427.712	425.631	427.71
		2	428.286	425.159	430.008	427.82
		3	437.421	432.033	435.015	434.82
		4	436.748	435.445	434.141	435.45

ตารางที่ ง. 2 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์จาก
 ถ้ำลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

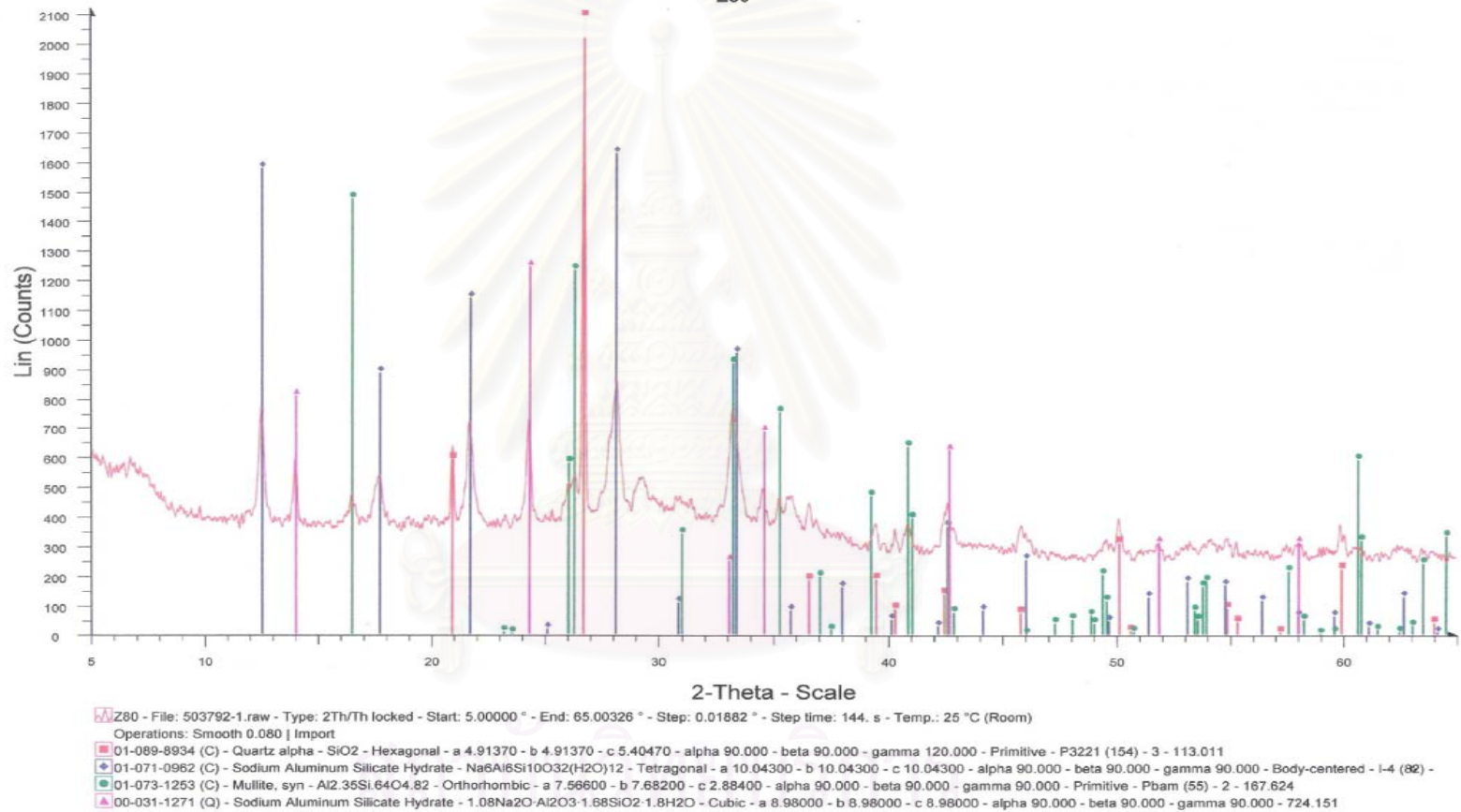
สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ค่า CEC ของถ้ำลอยถ่านหิน ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (cmol/kg zeolite)			
ความเข้มข้นของ สารละลาย (โมลาร์)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)				
			1	2	3	เฉลี่ย
2.5	100	1	427.149	424.001	426.931	426.03
		2	430.285	424.577	428.131	427.66
		3	429.122	425.000	430.019	428.05
		4	435.005	431.900	434.02	433.64
3.0	100	1	438.078	436.626	437.352	437.35
		2	454.428	454.428	454.428	454.43
		3	452.960	454.859	456.915	454.91
		4	457.827	459.586	456.526	457.98



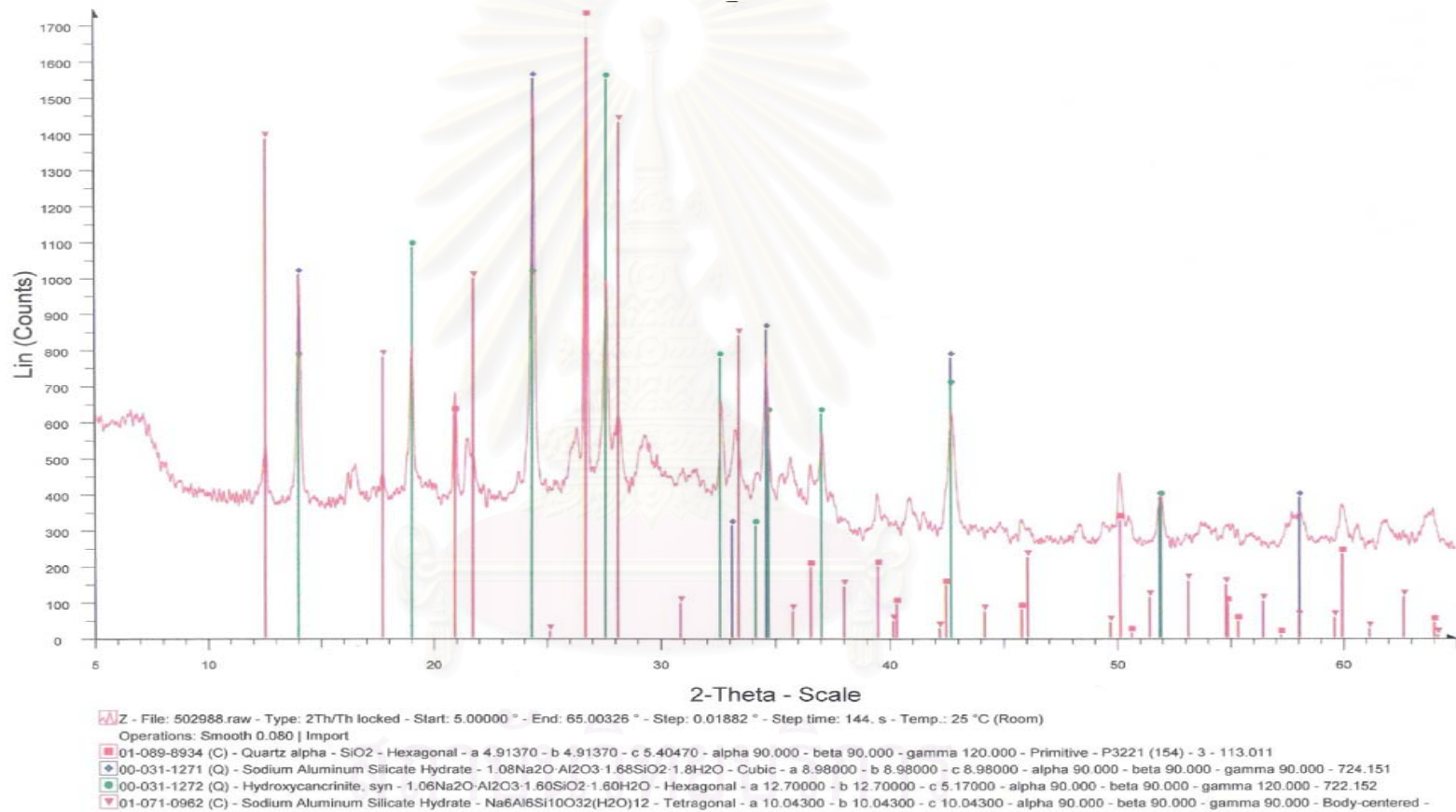
ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ซีไอโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน

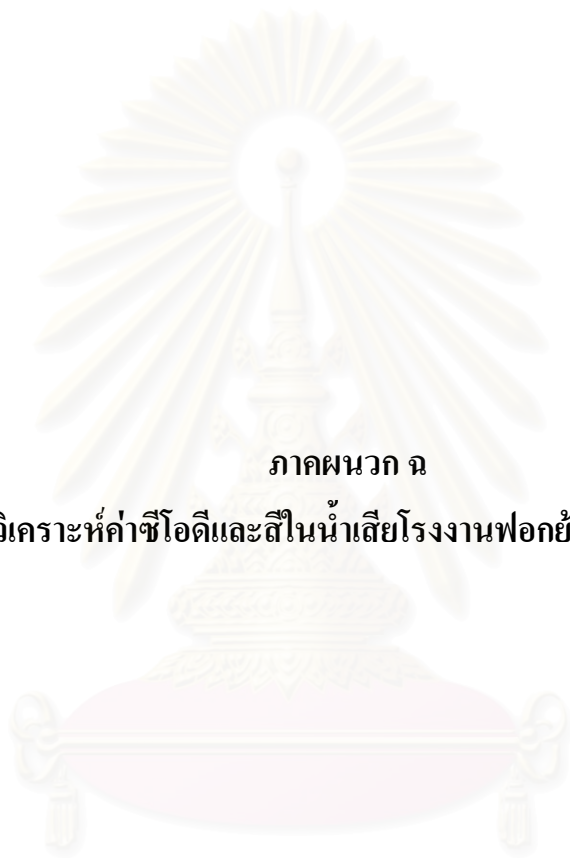
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ 80 องศาเซลเซียส 4 วัน



รูปที่ จ.2 ผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย Spent alkaline 3.0 โมลาร์ 80 องศาเซลเซียส 4 วัน



ภาคผนวก ฉ

ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 ปริมาณซีโอดี และค่าพีเอชของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์
ที่สังเคราะห์ได้

ปริมาณ ซีโอไลต์ ที่ใช้ (กรัม)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ค่าซีโอดีน้ำเสีย โรงงานฟอกย้อมหลัง การบำบัด (มก./ลิตร)				ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)			
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.01	8.62	8.64	166.5647	166.5647	166.5647	166.5647	0.000	0.000	0.000	0.00
0.05	8.62	8.67	166.3800	166.3800	166.3800	166.3800	0.111	0.111	0.111	0.11
0.10	8.62	8.84	156.0960	159.9984	159.9984	158.6976	6.285	3.942	3.942	4.72
0.50	8.62	9.16	152.1936	144.3888	144.3888	146.9904	8.628	13.314	13.314	11.75
1.00	8.62	9.41	140.4864	136.5840	144.3888	140.4864	15.657	17.999	13.314	15.66
5.00	8.62	10.23	128.7792	136.5840	136.5840	133.9824	22.685	17.999	17.999	19.56
10.00	8.62	10.51	120.9744	128.7792	128.7792	126.1776	27.371	22.685	22.685	24.25
15.00	8.62	10.65	120.9744	124.8768	124.8768	123.5760	27.371	25.028	25.028	25.81
20.00	8.62	10.75	117.0720	113.1696	117.0720	115.7712	29.714	32.057	29.714	30.49
30.00	8.62	10.92	113.1696	105.3648	113.1696	110.5680	32.057	36.742	32.057	33.62
40.00	8.62	11.04	105.3648	105.3648	113.1696	107.9664	36.742	36.742	32.057	35.18

หมายเหตุ: ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 166.5647 มก./ล.

ตารางที่ น.2 ความเข้มสี และค่าพีเอชของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่
สังเคราะห์ได้

ปริมาณ ซีโอไลต์ ที่ใช้ (กรัม)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ค่าความเข้มสีน้ำเสีย โรงงานฟอกย้อมหลัง การบำบัด (% transmittance)				ร้อยละการกำจัดสี (%)			
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.01	8.62	8.64	89.400	89.400	89.400	89.400	0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	8.62	8.67	89.400	89.400	89.300	89.367	0.00	0.00	-0.037	-0.04
0.10	8.62	8.84	89.200	89.300	89.300	83.267	-0.223	-0.111	-0.111	-0.15
0.50	8.62	9.16	89.000	89.000	88.900	88.967	-0.447	-0.477	-0.559	-0.48
1.00	8.62	9.41	88.600	88.700	88.600	88.633	-0.894	-0.782	-0.894	-0.86
5.00	8.62	10.23	89.700	83.600	83.600	83.633	-6.375	-6.487	-6.487	-6.45
10.00	8.62	10.51	80.100	80.300	80.200	80.200	-10.402	-10.178	-10.290	-10.29
15.00	8.62	10.65	88.800	88.900	88.900	88.867	-0.671	-0.559	-0.559	-0.60
20.00	8.62	10.75	89.600	89.700	89.700	89.667	0.223	0.335	0.335	0.30
30.00	8.62	10.92	91.600	91.600	91.600	91.600	2.460	2.460	2.460	2.46
40.00	8.62	11.04	93.700	93.700	93.800	93.733	4.809	4.809	4.921	4.85

หมายเหตุ: ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 89.40

ตารางที่ ๓.3 ปริมาณซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่พีเอชต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้

ปริมาณซีโอไลท์ที่ใช้ (กรัม)	พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น	พีเอชน้ำเสียสุดท้าย	ค่าซีโอดีน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (มก./ลิตร)				ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)			
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
20	ปกติ	11.32	124.0000	116.0000	124.0000	121.3333	24.940	29.782	24.940	26.55
20	3	10.99	113.1696	120.9744	120.9744	118.3728	31.496	26.771	26.771	28.35
20	4	11.07	113.1696	113.1696	120.9744	115.7712	31.496	31.496	26.771	29.92
20	5	11.10	120.9744	120.9744	120.9744	120.9744	26.771	26.771	26.771	26.77
20	6	11.13	120.9744	113.1696	128.7792	120.9744	26.771	31.496	22.047	26.77
20	7	11.19	109.2454	110.1696	110.1696	109.8615	33.871	33.312	33.312	33.50
20	8	11.23	120.9744	128.7792	124.8768	124.8768	26.771	22.047	24.409	24.41
20	9	11.25	113.1696	117.0720	120.9744	117.0720	31.496	29.133	26.771	29.13
20	10	11.39	120.9744	117.0720	113.1696	117.0720	26.771	29.133	31.496	29.13
20	11	11.64	120.9744	121.8526	124.8768	124.8768	26.771	26.240	24.409	25.81
20	12	11.87	120.9744	120.9744	120.9744	120.9744	26.771	26.771	26.771	26.77

หมายเหตุ: ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 165.2016 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.4 ความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่พีเอชต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

ปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้ (กรัม)	พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น	พีเอชน้ำเสียสุดท้าย	ค่าความเข้มข้นน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (% transmittance)				ร้อยละการกำจัดสี (%)			
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
20	ปกติ	11.32	89.500	89.400	89.400	89.433	0.223	0.111	0.111	0.15
20	3	10.99	90.500	90.500	90.500	90.500	1.343	1.343	1.343	1.34
20	4	11.07	89.800	89.800	89.700	89.767	0.559	0.559	0.447	0.52
20	5	11.10	89.700	89.700	89.800	89.733	0.447	0.447	0.559	0.48
20	6	11.13	89.300	89.400	89.400	89.370	0.00	0.111	0.111	0.07
20	7	11.19	90.000	90.000	90.000	90.000	0.780	0.780	0.780	0.78
20	8	11.23	89.600	89.600	89.600	89.600	0.335	0.335	0.335	0.34
20	9	11.25	88.900	88.800	88.900	88.867	-0.447	-0.559	-0.447	-0.48
20	10	11.39	87.900	87.800	87.800	87.833	-1.567	-1.679	-1.679	-1.64
20	11	11.64	88.800	88.800	88.700	88.767	-0.559	-0.599	-0.671	-0.60
20	12	11.87	90.600	90.600	90.600	90.600	1.455	1.455	1.455	1.46

หมายเหตุ: ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 89.30 ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.75

ตารางที่ ๓.5 ปริมาณซีโอดีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

เวลาในการสัมผัส (นาท)	พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น	พีเอชน้ำเสียสุดท้าย	ค่าซีโอดีน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (มก./ลิตร)				ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%)			
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	7	10.49	130.9044	138.8380	134.8712	134.8712	22.047	17.322	19.684	19.68
60	7	10.59	121.6485	122.9708	122.9708	121.6485	27.559	26.771	26.771	27.03
120	7	10.51	115.0372	115.0372	115.0372	115.0372	31.496	31.496	31.496	31.50
180	7	10.55	107.1036	115.0372	115.0372	112.3926	36.220	31.496	31.496	33.07
240	7	10.49	107.1036	115.0372	115.0372	112.3926	36.220	31.496	31.496	33.07
540	7	10.41	115.0372	115.0372	107.1036	112.3926	31.496	31.496	36.220	33.07
840	7	10.52	107.1036	115.0372	115.0372	112.3926	36.220	31.496	31.496	33.07

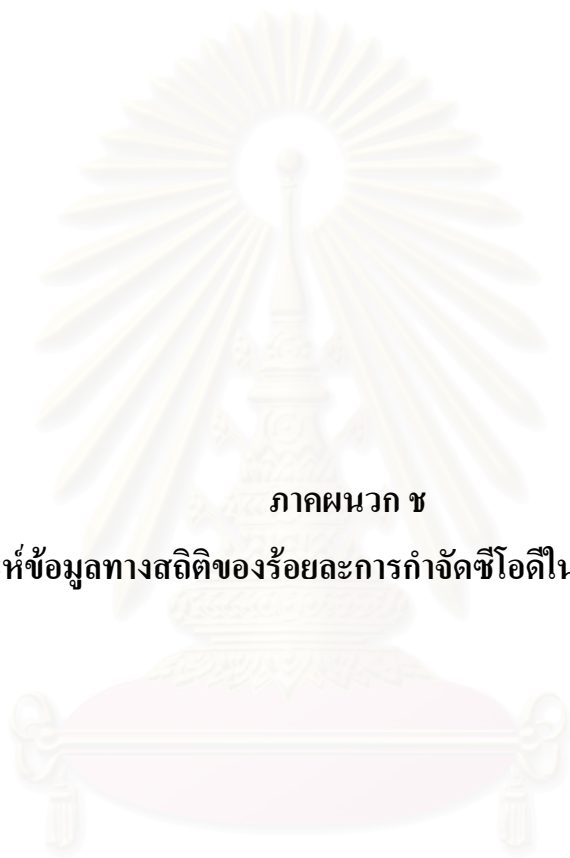
หมายเหตุ: ค่าซีโอดีน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 167.9278 มก./ล.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๖.6 ความเข้มสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลท์ที่สังเคราะห์ได้

เวลาในการสัมผัส (นาท)	พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น	พีเอชน้ำเสียสุดท้าย	ค่าความเข้มสีน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังการบำบัด (% transmittance)				ร้อยละการกำจัดสี (%)			
			1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
30	7	10.49	88.500	88.600	88.500	88.533	-1.006	-0.894	-1.006	-0.97
60	7	10.59	89.100	89.000	89.000	89.033	-0.335	-0.447	-0.477	-0.41
120	7	10.51	89.600	89.600	89.600	89.600	0.223	0.223	0.223	0.22
180	7	10.55	89.900	89.900	89.900	89.900	0.559	0.559	0.559	0.56
240	7	10.49	90.700	90.700	90.700	90.700	1.454	1.454	1.454	1.45
540	7	10.41	89.700	89.700	89.700	89.700	0.335	0.335	0.335	0.34
840	7	10.52	87.900	88.000	88.000	87.966	-1.677	-1.565	-1.565	-1.60

หมายเหตุ: ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เริ่มต้น เท่ากับ 89.40



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของร้อยละการกำจัดซีไอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของร้อยละการกำจัดซีโอดี

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ปริมาณต่าง ๆ

Oneway

ANOVA

% COD removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4984.790	10	498.479	115.263	0.000
Within Groups	95.144	22	4.325		
Total	5079.933	32			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

% COD removal

Duncan^a

Quantity	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0.01	3	.00000							
0.05	3	.11089							
0.10	3		4.72315						
0.50	3			11.75177					
1.00	3				15.65656				
5.00	3					19.56135			
10.00	3						24.24709		
15.00	3						25.80901		
20.00	3							30.49476	
30.00	3								33.61859
40.00	3								35.18050
Sig.		0.949	1.000	1.000	1.000	1.000	0.368	0.079	0.368

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่พีเอชต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

Oneway

ANOVA

% COD removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	182.600	10	18.260	3.168	0.012
Within Groups	126.802	22	5.764		
Total	309.403	32			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

% COD removal

Duncan ^a

pH	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
8.00	3	24.40900		
11.00	3	25.80667	25.80667	
8.75	3	26.55400	26.55400	
5.00	3	26.77100	26.77100	
12.00	3	26.77100	26.77100	
6.00	3	26.77133	26.77133	
3.00	3	28.34600	28.34600	
10.00	3		29.13333	29.13333
9.00	3		29.13333	29.13333
4.00	3		29.92100	29.92100
7.00	3			33.49833
Sig.		0.091	0.083	0.052

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

^a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของร้อยละการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังผ่านการบำบัดด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

Oneway

ANOVA

% COD removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	465.393	6	77.565	15.276	.000
Within Groups	71.087	14	5.078		
Total	536.479	20			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

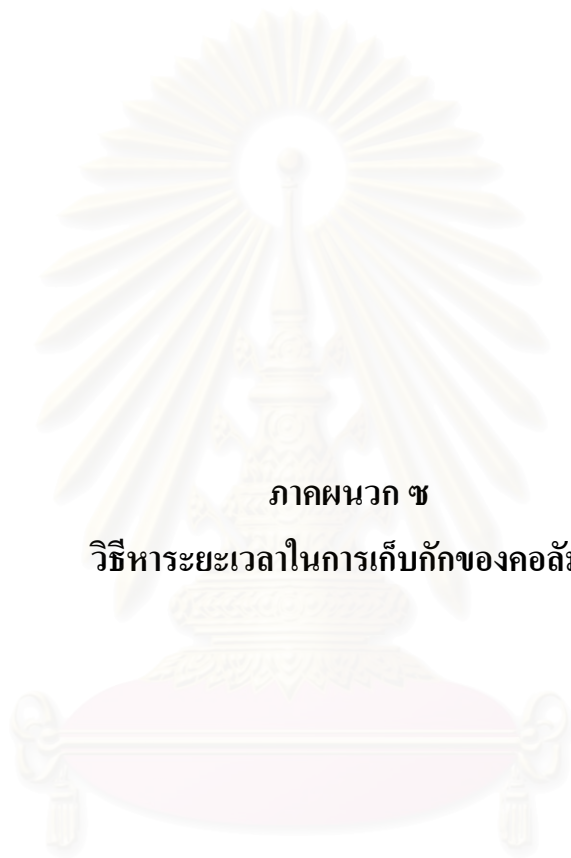
% COD removal

Duncan ^a

Time	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
30.00	3	19.68433		
60.00	3		27.03367	
120.00	3			31.49600
180.00	3			33.07067
240.00	3			33.07067
540.00	3			33.07067
840.00	3			33.07067
Sig.		1.000	1.000	0.449

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000



ภาคผนวก ช

วิธีหาระยะเวลาในการเก็บกักของคอสมัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาระยะเวลาในการเก็บกักของคอลัมน์

จากผลการทดลองแบบ batch พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน คือ เวลา 2 ชั่วโมง นำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาในการเก็บกักของคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.3 เซนติเมตร ความยาว 120 เซนติเมตร โดยคำนวณได้ดังนี้

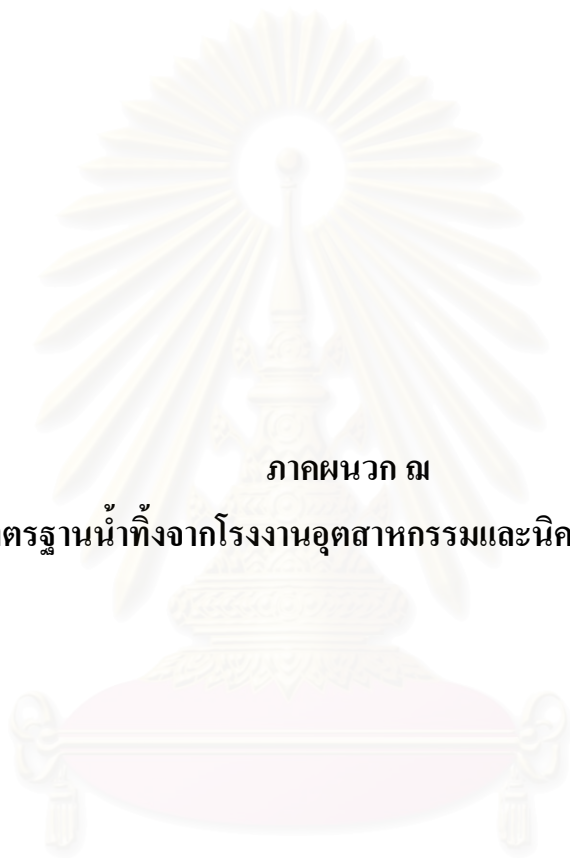
$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A)} &= \pi D^2/4 \quad \text{m}^2 \\ \text{ปริมาตรของคอลัมน์ (V)} &= A \times h \\ &= \pi D^2/4 \times h \quad \text{m}^3 \\ \text{อัตราการไหล (Q)} &= \text{อัตราการกรอง (v)} \times \text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A)} \\ Q &= v \times \pi D^2/4 \\ &=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

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

$$\begin{aligned} 2 \text{ hr} &= \frac{A \times h}{(\pi D^2/4) \times v} \\ v &= \frac{\pi D^2/4 \times h}{\pi D^2/4 \times 2} \\ &= 1.2/2 \\ &= 0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากอัตราการไหล (Q)} &= \text{อัตราการกรอง (v)} \times \text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A)} \\ Q &= 0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \times \pi (0.023)^2/4 \text{ m}^2 \\ &= 2.49285 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{hr} \\ \text{หรือ} &= 0.00415 \text{ L/min} \end{aligned}$$

ดังนั้นวัดอัตราการไหลโดยใช้กระบอกตวง ใน 1 นาที น้ำต้องไหลเป็นปริมาตร 4.15 มิลลิลิตร



ภาคผนวก ฅ

คำมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ ๑. ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าที่ละลาย (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	<ul style="list-style-type: none"> ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือ ลงสู่ทะเล ค่าที่ละลายในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่า ค่าที่ละลายที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล. 	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Disc)
4. อุณหภูมิ	ไม่เกิน 40 °ซ	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนด์ (cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. ไขมัน น้ำมัน และไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry

ตารางที่ ๑. ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

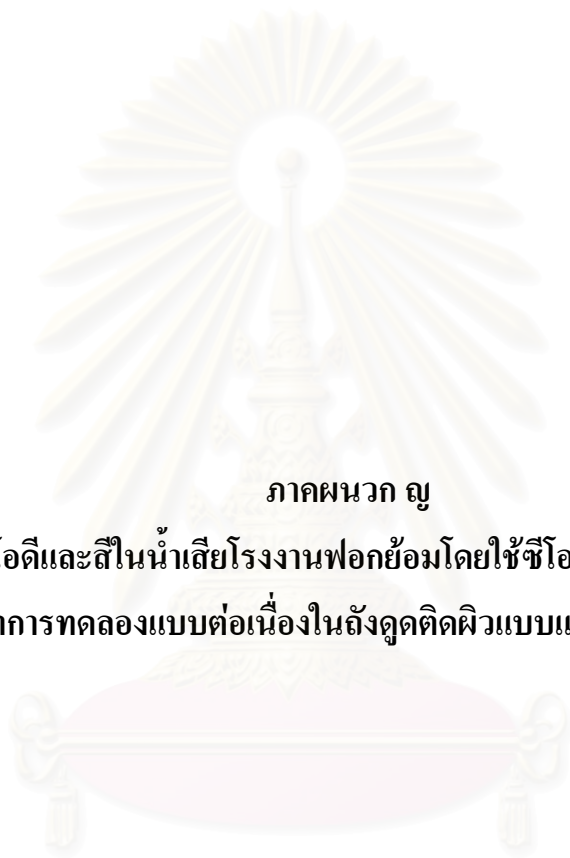
ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
10. สารประกอบฟีนอล (phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (free chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	ที่อุณหภูมิ 20 °ซ เป็นเวลา 5 วัน และวัดออกซิเจนละลายโดย Azide Modification
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก		
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
2. โครเมียมชนิดเฮกซาวาเลนต์ (hexavalent chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (trivalent chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	

ตารางที่ ๑. ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma: ICP Atomic Absorption Cold Vapour Technique
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
10. สารหนู (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	
12.ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	

ที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ญ

ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการ
ขึ้นรูป ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฅ.1 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึ้นรูป 30 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้นสี น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละ การ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
2	0.539	4.33	7	10.61	269.7521	225.6580	233.4393	229.5486	14.90	86.90	89.2	89.3	89.2	89.23	2.69
3	0.788	6.33	7	10.09	269.7521	237.3299	237.3299	237.3299	12.02	86.90	89.0	89.0	89.0	89.00	2.42
4	1.037	8.33	7	10.12	269.7521	241.2206	241.2206	241.2206	10.58	86.90	89.0	89.0	88.9	88.97	2.38
5	1.28	10.33	7	10.15	269.7521	241.2206	245.1113	243.1659	9.86	86.90	88.9	88.9	88.8	88.87	2.26
6	1.536	12.34	7	9.71	269.7521	245.1113	249.0019	247.0566	8.41	86.90	88.7	88.7	88.7	88.70	2.07
7	1.785	14.34	7	9.61	269.7521	249.0019	252.8926	250.9472	6.97	86.90	88.5	88.5	88.4	88.47	1.80
8	2.034	16.34	7	9.51	269.7521	249.0019	252.8926	250.9472	6.97	86.90	88.4	88.3	88.3	88.33	1.65
9	2.284	18.34	7	9.49	269.7521	256.7832	252.8926	254.8379	5.53	86.90	88.1	88.1	88.1	88.10	1.38
10	2.533	20.34	7	9.36	269.7521	260.6739	256.7832	258.7285	4.09	86.90	87.9	87.9	87.9	87.90	1.15
11	2.782	22.35	7	9.32	269.7521	252.8926	268.4552	260.6739	3.37	86.90	87.6	87.6	87.5	87.57	0.77
12	3.031	24.35	7	9.35	269.7521	260.6739	268.4552	264.5645	1.92	86.90	-	-	-	-	-

ตารางที่ ฅ.1 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป 30 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละ การ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
13	3.280	26.35	7	9.05	269.7521	268.4552	268.4552	268.4552	0.48	86.90	87.3	87.3	87.2	87.27	0.42
15	3.779	30.36	7	9.29	-	-	-	-	-	86.90	86.9	86.9	87.0	86.93	0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๒.2 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึนรูป 60 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
2	0.539	2.16	7	11.93	269.7521	202.3140	210.0954	206.2047	23.56	86.90	91.4	91.4	91.4	91.40	5.18
3	0.788	3.16	7	11.50	269.7521	210.0954	210.0954	210.0954	22.12	86.90	91.2	91.1	91.2	91.17	4.91
4	1.037	4.17	7	11.17	269.7521	213.9860	213.9860	213.9860	20.67	86.90	91.0	91.0	91.0	91.00	4.72
5	1.28	5.17	7	11.23	269.7521	217.8767	217.8767	217.8767	19.23	86.90	90.8	90.9	90.8	90.83	4.53
6	1.536	6.17	7	10.79	269.7521	221.7673	217.8767	219.8220	18.51	86.90	90.5	90.5	90.6	90.53	4.18
7	1.785	7.17	7	10.55	269.7521	221.7673	221.7673	221.7673	17.79	86.90	90.3	90.1	90.2	90.20	3.80
8	2.034	8.17	7	10.60	269.7521	221.7673	229.5486	225.6580	16.35	86.90	90.0	90.0	90.0	90.00	3.57
9	2.284	9.17	7	10.29	269.7521	229.5486	225.6580	227.6033	15.63	86.90	89.7	89.8	89.8	89.76	3.30
10	2.533	10.17	7	10.21	269.7521	225.6580	229.5486	227.6033	15.63	86.90	89.5	89.3	89.3	89.37	2.84
11	2.782	11.17	7	9.94	269.7521	221.7673	237.3299	229.5486	14.90	86.90	89.1	89.1	89.1	89.10	2.53
12	3.031	12.17	7	9.89	269.7521	233.4393	229.5486	231.4940	14.18	86.90	-	-	-	-	-
13	3.280	13.18	7	9.73	269.7521	233.4393	233.4393	233.4393	13.46	86.90	88.9	88.9	88.8	88.87	2.26

ตารางที่ ฅ.2 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึ้นรูป 60 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มสี น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มสี น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
14	3.530	14.18	7	9.65	269.7521	230.0826	238.0165	234.0496	13.24	86.90	-	-	-	-	-
15	3.779	15.18	7	9.86	269.7521	238.0165	238.0165	238.0165	11.77	86.90	88.6	88.6	88.6	88.60	1.96
16	4.038	16.18	7	10.19	269.7521	245.9504	238.0165	241.9835	10.29	86.90	-	-	-	-	-
17	4.278	17.18	7	9.97	269.7521	245.9504	245.9504	245.9504	8.82	86.90	88.1	88.1	88.2	88.13	1.42
18	4.527	18.18	7	9.97	269.7521	245.9504	253.8843	249.9173	7.35	86.90	-	-	-	-	-
19	4.776	19.18	7	10.06	269.7521	253.8843	253.8843	253.8843	5.88	86.90	87.9	87.7	87.7	87.77	1.00
20	5.026	20.18	7	9.88	269.7521	261.8181	253.8843	257.8512	4.41	86.90	-	-	-	-	-
21	5.275	21.18	7	9.92	269.7521	269.7520	253.8843	261.8181	2.94	86.90	87.4	87.3	87.4	87.37	0.54
22	5.524	22.19	7	9.94	269.7521	261.8181	269.7520	265.7851	1.47	86.90	-	-	-	-	-
23	5.773	23.19	7	9.83	269.7521	269.7521	265.7851	267.7686	0.74	86.90	87.2	87.1	87.2	87.17	0.31
24	6.023	24.19	7	9.82	269.7521	269.7521	269.7521	269.7521	0.00	86.90	-	-	-	-	-

ตารางที่ ฅ.2 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึ้นรูป 60 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
25	6.272	25.19	7	9.86	-	-	-	-	-	86.90	87.1	87.0	86.9	87.00	0.12
28	7.020	28.19	7	9.80	-	-	-	-	-	86.90	87.0	86.9	87.0	86.97	0.08

ตารางที่ ๓.3 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึนรูป 90 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มสี น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มสี น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
2	0.539	1.44	7	11.97	269.7521	163.4075	163.4075	163.4075	39.42	86.90	92.8	92.8	92.8	92.80	6.79
3	0.788	2.11	7	11.85	269.7521	159.5168	171.1888	165.3528	38.70	86.90	92.6	92.4	92.5	92.50	6.44
4	1.037	2.78	7	11.86	269.7521	167.2981	171.1888	169.2435	37.26	86.90	92.1	92.1	92.2	92.13	6.02
5	1.28	3.44	7	11.97	269.7521	171.1888	171.1888	171.1888	36.54	86.90	91.9	91.9	91.9	91.90	5.75
6	1.536	4.11	7	11.71	269.7521	175.0795	175.0795	175.0795	35.10	86.90	91.5	91.6	91.6	91.57	5.37
7	1.785	4.78	7	11.57	269.7521	178.9701	178.9701	178.9701	33.65	86.90	91.2	91.2	91.3	91.23	4.99
8	2.034	5.45	7	11.42	269.7521	178.9701	178.9701	178.9701	33.65	86.90	91.0	91.0	91.0	91.00	4.72
9	2.284	6.11	7	11.32	269.7521	186.7514	175.0795	180.9154	32.93	86.90	90.8	90.7	90.7	90.73	4.41
10	2.533	6.78	7	11.09	269.7521	186.7514	182.8608	184.8061	31.49	86.90	90.4	90.3	90.3	90.33	3.95
11	2.782	7.45	7	10.87	269.7521	182.8608	190.6421	186.7514	30.77	86.90	90.1	90.1	90.1	90.10	3.68
12	3.031	8.12	7	10.72	269.7521	190.6421	190.6421	190.6421	29.33	86.90	-	-	-	-	-
13	3.280	8.78	7	10.35	269.7521	190.6421	190.6421	190.6421	29.33	86.90	89.8	89.8	89.9	89.83	3.38

ตารางที่ ฅ.3 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึ้นรูป 90 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มสี น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มสี น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
14	3.530	9.45	7	10.19	269.7521	190.4132	194.3801	192.3967	28.68	86.90	-	-	-	-	-
15	3.779	10.12	7	10.37	269.7521	198.3471	190.4132	194.3802	27.94	86.90	89.5	89.6	89.6	89.57	3.07
16	4.038	10.79	7	10.70	269.7521	198.3471	198.3471	198.3471	26.47	86.90	-	-	-	-	-
17	4.278	11.45	7	10.51	269.7521	206.2809	198.3471	202.314	25.00	86.90	89.3	89.3	89.3	89.30	2.76
18	4.527	12.12	7	10.43	269.7521	198.3471	206.2809	202.3140	25.00	86.90	-	-	-	-	-
19	4.776	12.79	7	10.44	269.7521	198.3471	214.2148	206.281	23.53	86.90	88.9	89.0	88.9	88.93	2.34
20	5.026	13.46	7	10.35	269.7521	206.2809	214.2148	210.2479	22.06	86.90	-	-	-	-	-
21	5.275	14.12	7	10.35	269.7521	214.2148	214.2148	214.2148	20.59	86.90	88.7	88.7	88.6	88.67	2.03
22	5.524	14.79	7	10.37	269.7521	222.1487	214.2148	218.1818	19.12	86.90	-	-	-	-	-
23	5.773	15.46	7	10.25	269.7521	222.1487	222.1487	222.1487	17.65	86.90	88.5	88.5	88.5	88.50	1.84
24	6.023	16.13	7	10.15	269.7521	230.0826	230.0826	230.0826	14.71	86.90	-	-	-	-	-

ตารางที่ ฅ.3 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึ้นรูป 90 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มสี น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มสี น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
25	6.272	16.79	7	10.20	269.7521	238.0165	230.0826	234.0495	13.24	86.90	88.1	88.1	88.1	88.10	1.38
26	6.521	17.46	7	10.20	269.7521	230.0826	230.0826	230.0826	14.71	86.90	-	-	-	-	-
27	6.771	18.13	7	10.22	269.7521	241.9834	230.0826	236.0330	12.50	86.90	-	-	-	-	-
28	7.020	18.80	7	10.14	269.7521	245.9504	238.0165	241.9834	10.29	86.90	87.9	87.8	87.8	87.83	1.07
29	7.269	19.46	7	10.15	269.7521	241.9834	245.9504	243.9669	9.56	86.90	-	-	-	-	-
30	7.518	20.13	7	10.06	269.7521	245.9504	245.9504	245.9504	8.82	86.90	-	-	-	-	-
31	7.768	20.80	7	9.90	269.7521	245.9504	253.8843	249.9173	7.35	86.90	87.5	87.5	87.5	87.50	0.69
32	8.017	21.46	7	9.98	269.7521	256.0000	256.0000	256.0000	5.10	86.90	-	-	-	-	-
33	8.266	22.13	7	10.03	269.7521	264.0000	256.0000	260.0000	3.62	86.90	-	-	-	-	-
34	8.516	22.80	7	9.96	269.7521	264.0000	264.0000	264.0000	2.13	86.90	87.2	87.3	87.3	87.27	0.42
35	8.765	23.47	7	9.85	269.7521	268.0000	264.0000	266.0000	1.39	86.90	-	-	-	-	-
36	9.014	24.13	7	9.93	269.7521	269.6000	268.0000	268.8000	0.35	86.90	-	-	-	-	-

ตารางที่ ฅ.3 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการจึ้นรูป 90 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
37	9.263	24.80	7	9.91	-	-	-	-	-	86.90	87.2	87.1	87.2	87.17	0.31
40	10.011	26.80	7	9.82	-	-	-	-	-	86.90	86.9	86.9	87.1	86.97	0.07

ตารางที่ ๓.4 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป 120 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
2	0.539	1.08	7	12.08	269.7521	116.7196	116.7196	116.7196	56.73	86.90	95.4	95.5	95.4	95.43	9.82
3	0.788	1.58	7	11.87	269.7521	116.7196	124.5009	120.6103	55.29	86.90	95.0	95.0	95.0	95.00	9.32
4	1.037	2.08	7	12.02	269.7521	124.5009	124.5009	124.5009	53.85	86.90	94.7	94.8	94.8	94.77	9.05
5	1.28	2.58	7	12.13	269.7521	124.5009	132.2822	128.3916	52.40	86.90	94.5	94.5	94.5	94.50	8.75
6	1.536	3.08	7	11.91	269.7521	132.2822	132.2822	132.2822	50.96	86.90	94.2	94.2	94.3	94.23	8.45
7	1.785	3.58	7	11.90	269.7521	136.1729	136.1729	136.1729	49.52	86.90	94.0	94.0	94.0	94.00	8.17
8	2.034	4.08	7	11.85	269.7521	140.0636	143.9542	142.0089	47.36	86.90	93.7	93.8	93.7	93.73	7.86
9	2.284	4.58	7	11.90	269.7521	143.9542	143.9542	143.9542	46.63	86.90	93.5	93.5	93.5	93.50	7.59
10	2.533	5.08	7	11.85	269.7521	143.9542	143.9542	143.9542	46.63	86.90	93.1	93.1	93.1	93.10	7.13
11	2.782	5.58	7	11.81	269.7521	151.7355	147.8449	149.7902	44.47	86.90	92.9	92.9	92.9	92.90	6.90
12	3.031	6.08	7	11.76	269.7521	151.7355	151.7355	151.7355	43.75	86.90	-	-	-	-	-
13	3.280	6.58	7	11.59	269.7521	151.7355	159.5168	155.6262	42.31	86.90	92.7	92.7	92.7	92.70	6.67

ตารางที่ ๘.4 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป 120 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
14	3.530	7.08	7	11.48	269.7521	158.6776	158.6776	158.6776	41.18	86.90	-	-	-	-	-
15	3.779	7.58	7	11.08	269.7521	158.6776	166.6115	162.6446	39.71	86.90	92.4	92.4	92.4	92.40	6.33
16	4.038	8.08	7	11.77	269.7521	162.6446	166.6115	164.6281	38.97	86.90	-	-	-	-	-
17	4.278	8.58	7	11.62	269.7521	170.5785	166.6115	168.595	37.50	86.90	92.0	92.0	92.0	92.00	5.87
18	4.527	9.09	7	11.40	269.7521	170.5785	170.5785	170.5785	36.76	86.90	-	-	-	-	-
19	4.776	9.59	7	11.32	269.7521	174.5454	174.5454	174.5454	35.29	86.90	91.7	91.7	91.8	91.73	5.56
20	5.026	10.09	7	11.14	269.7521	182.4793	182.4793	182.4793	32.35	86.90	-	-	-	-	-
21	5.275	10.59	7	11.07	269.7521	182.4793	182.4793	182.4793	32.35	86.90	91.5	91.4	91.3	91.40	5.18
22	5.524	11.09	7	11.01	269.7521	182.4793	186.4462	184.4628	31.62	86.90	-	-	-	-	-
23	5.773	11.59	7	10.88	269.7521	190.4132	186.4462	188.4297	30.15	86.90	91.0	91.0	91.0	91.00	4.72
24	6.023	12.09	7	10.63	269.7521	190.4132	190.4132	190.4132	29.41	86.90	-	-	-	-	-

ตารางที่ ๘.4 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป 120 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
25	6.272	12.59	7	10.64	269.7521	198.3471	194.3801	196.3636	27.21	86.90	90.6	90.7	90.7	90.67	4.33
26	6.521	13.09	7	10.55	269.7521	198.3471	198.3471	198.3471	26.47	86.90	-	-	-	-	-
27	6.771	13.59	7	10.60	269.7521	198.3471	206.2809	202.3140	25.00	86.90	-	-	-	-	-
28	7.020	14.09	7	10.58	269.7521	214.2148	198.3471	206.2809	23.53	86.90	90.3	90.3	90.3	90.30	3.91
29	7.269	14.59	7	10.54	269.7521	206.2809	214.2148	210.2479	22.06	86.90	-	-	-	-	-
30	7.518	15.09	7	10.42	269.7521	214.2148	214.2148	214.2148	20.59	86.90	-	-	-	-	-
31	7.768	15.59	7	10.39	269.7521	214.2148	230.0826	222.1487	17.65	86.90	89.9	89.9	89.9	89.90	3.45
32	8.017	16.09	7	10.34	269.7521	228.000	224.000	226.000	16.22	86.90	-	-	-	-	-
33	8.266	16.59	7	10.29	269.7521	232.000	224.000	228.000	15.48	86.90	-	-	-	-	-
34	8.516	17.09	7	10.25	269.7521	236.000	232.000	234.000	13.25	86.90	89.4	89.4	89.4	89.40	2.88
35	8.765	17.59	7	10.18	269.7521	240.000	232.000	236.000	12.51	86.90	-	-	-	-	-
36	9.014	18.09	7	10.18	269.7521	240.000	240.000	240.000	11.03	86.90	-	-	-	-	-

ตารางที่ ๘.4 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป 120 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
37	9.263	18.59	7	10.19	269.7521	240.000	244.000	242.000	10.29	86.90	89.1	89.1	89.1	89.10	2.53
38	9.513	19.09	7	10.18	269.7521	240.000	248.000	244.000	9.55	86.90	-	-	-	-	-
39	9.762	19.59	7	10.11	269.7521	241.5690	249.6213	245.5951	8.96	86.90	-	-	-	-	-
40	10.011	20.09	7	10.05	269.7521	249.6213	249.6213	249.6213	7.46	86.90	88.8	88.8	88.8	88.80	2.19
41	10.260	20.59	7	10.16	269.7521	249.6213	253.6474	251.6344	6.72	86.90	-	-	-	-	-
42	10.510	21.09	7	10.11	269.7521	257.6736	249.6213	253.6474	5.97	86.90	-	-	-	-	-
43	10.759	21.59	7	10.03	269.7521	253.6474	257.6736	255.6605	5.22	86.90	88.8	88.8	88.8	88.80	2.19
44	11.008	22.09	7	10.07	269.7521	257.6736	257.6736	257.6736	4.48	86.90	-	-	-	-	-
45	11.258	22.59	7	10.13	269.7521	261.6997	257.6736	259.6867	3.73	86.90	88.4	88.4	88.4	88.40	1.73
46	11.507	23.09	7	10.12	269.7521	261.6997	269.7521	265.7259	1.49	86.90	-	-	-	-	-
47	11.756	23.59	7	10.12	269.7521	269.7521	269.7521	269.7521	0.00	86.90	88.1	88.2	88.1	88.13	1.42
48	12.005	24.09	7	10.12	-	-	-	-	-	86.90	-	-	-	-	-

ตารางที่ ๓.4 ผลการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่ระดับความลึกชั้นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการขึ้นรูป 120 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัด (ลิตร)	Bed Volumn (BV)	พีเอช น้ำเสีย เริ่มต้น	พีเอช น้ำเสีย สุดท้าย	ซีโอดีน้ำเสีย ก่อนการดูดซับ (มก./ลิตร)	ค่าซีโอดีน้ำเสีย หลังการดูดซับ (มก./ลิตร)			ร้อยละการ กำจัดซีโอดี (%)	ความเข้มข้น น้ำเสียก่อน การดูดซับ (% T)	ค่าความเข้มข้น น้ำเสียหลัง การดูดซับ (% T)				ร้อยละการ กำจัดสี (%)
						1	2	เฉลี่ย			1	2	3	เฉลี่ย	
49	12.255	24.59	7	10.07	-	-	-	-	-	86.90	87.9	87.9	87.8	87.87	1.11
50	12.504	25.09	7	10.02	-	-	-	-	-	86.90	-	-	-	-	-
51	12.753	25.59	7	9.97	-	-	-	-	-	86.90	87.2	87.2	87.3	87.23	0.38
53	13.252	26.59	7	9.92	-	-	-	-	-	86.90	87.0	86.9	86.9	86.93	0.04

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิรินันท์ กันศิริ เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาเคมี สาขาวิชาเคมีทรัพยากร สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย