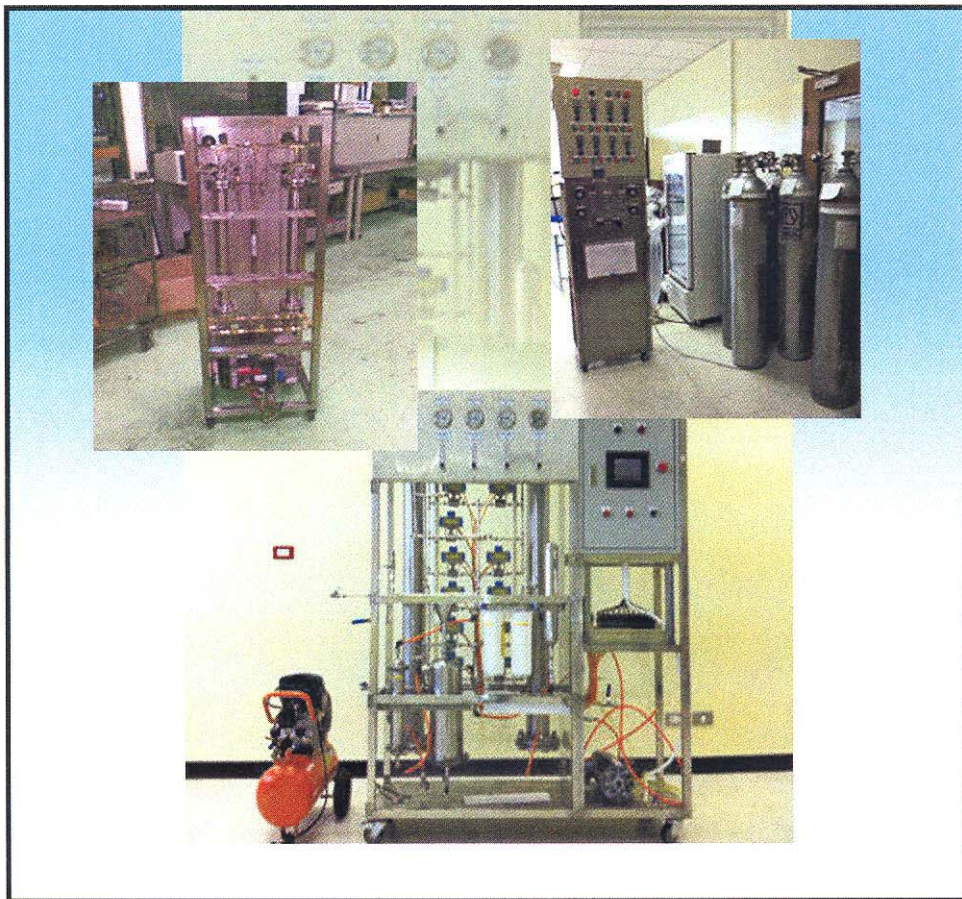




จ.จ.

โครงการวิจัยที่ ภ. 49-20 / ย. 6 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

# การพัฒนาเทคโนโลยี ในการแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย  
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 49-20

การจัดการมลพิษและการสร้างมูลค่าเพิ่มจากโรงงาน

กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนและชนบท

โครงการย่อยที่ 6

การพัฒนาเทคโนโลยีในการแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การพัฒนาเทคโนโลยีในการแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์

โดย

เรวดี อนุวัฒนา

ปรีชา พลอยภัทรภิญโญ

พัทธนันท์ นาทพินิจ

บรรณาธิการ

ลิขิต หาญจางสิทธิ์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

พิสุทธิ พลัสสวาท

วว., กรุงเทพฯ 2555

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย  
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นายขงวุฒิ เสาวพฤกษ์)

ผู้ว่าการ

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ไท้เฮงการช่าง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตะกรันเหล็กจากเตา  
คิวโปลา เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์สารดูดซับก๊าซของโครงการนี้,  
ขอขอบคุณบริษัท ไทยซิลิเกต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด 4A เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ  
เริ่มต้นเพื่อผลิตสารดูดซับก๊าซชนิด 5A และขอขอบคุณคณะร่วมทำงานรวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่ช่วย  
ให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี.

## คณะผู้วิจัย

ผู้อำนวยการโครงการ	นายปรีชา พลอยภัทรภิญโญ
หัวหน้าโครงการ	นางสาวเรวดี อนุวัฒนา
ผู้ช่วยหัวหน้าโครงการ	นางพัทธนันท์ นาดพิณิช นายแสวง เกิดประทุม
งานสังเคราะห์สารคูดซ์บัก้าช	นางสาวเรวดี อนุวัฒนา นางสาวภาวณี ตาลเถื่อน นายวรพงษ์ พัทยาวรรณ
งานควบคุมระบบ	นางสาวเรวดี อนุวัฒนา นางสาวภาวณี ตาลเถื่อน นายวรพงษ์ พัทยาวรรณ นายแสวง เกิดประทุม นายทรงเกียรติ รอดแดง
งานวิเคราะห์	นางสาวเรวดี อนุวัฒนา นางสาวภาวณี ตาลเถื่อน นายวรพงษ์ พัทยาวรรณ
งานเขียนรายงาน	นางสาวเรวดี อนุวัฒนา
งานพิมพ์	นางสาวเรวดี อนุวัฒนา

## คำย่อ

atm	หมายถึง	บรรยากาศ
H <sub>2</sub>	หมายถึง	ก๊าซไฮโดรเจน
CH <sub>4</sub>	หมายถึง	ก๊าซมีเทน
CO <sub>2</sub>	หมายถึง	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
N <sub>2</sub>	หมายถึง	ก๊าซไนโตรเจน
GC	หมายถึง	เครื่องวัดก๊าซโครมาโตกราฟี
SV	หมายถึง	วาล์วไฟฟ้า
P <sub>ads</sub>	หมายถึง	ความดันในการป้อน
V <sub>t</sub>	หมายถึง	อัตราการไหล
t	หมายถึง	เวลา
R	หมายถึง	ค่าคงที่ของก๊าซ
T	หมายถึง	อุณหภูมิหน่วยเคลวิน
°C	หมายถึง	หน่วยองศาเซลเซียส
K	หมายถึง	หน่วยเคลวิน
n <sub>feed</sub>	หมายถึง	จำนวนโมลก๊าซป้อน
P <sub>e</sub>	หมายถึง	ความดันสมบูรณ์
V <sub>column</sub>	หมายถึง	ปริมาตรคอลัมน์
n <sub>e</sub>	หมายถึง	จำนวนโมลก๊าซเข้าสู่สมดุล
n <sub>ads</sub>	หมายถึง	จำนวนโมลก๊าซที่ถูกดูดซับไว้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
คณะผู้วิจัย	ข
คำย่อ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	52
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	65
4. สรุปผลการทดลอง	85
5. ผลการศึกษาเบื้องต้นทางด้านการตลาดและผลกระทบของโครงการ	87
6. ข้อเสนอแนะ	92
7. เอกสารอ้างอิง	95

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. การใช้ระบบควบคุมแบบสลับความดันในอุตสาหกรรมต่างๆ	8
ตารางที่ 2. ตัวอย่างวัสดุควบคุมที่ใช้หลักการสมดุลและจลน์ศาสตร์	12
ตารางที่ 3. สรุปขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการควบคุมแบบสลับความดัน	14
ตารางที่ 4. ชนิดตัวควบคุม	15
ตารางที่ 5. การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทฤษฎี	23
ตารางที่ 6. สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ A	32
ตารางที่ 7. ขนาดของรูพรุนชนิด X ที่จุลประจุด้วยโลหะหมู่ I และหมู่ II	34
ตารางที่ 8. คุณสมบัติถ่านกัมมันต์	58
ตารางที่ 9. การเดินระบบวาล์วของเครื่องแยกก๊าซ	63
ตารางที่ 10. องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเริ่มต้นแต่ละชนิด	66
ตารางที่ 11. ชนิดและความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้และ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมที่สภาวะต่างๆ	70
ตารางที่ 12. ค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซแต่ละชนิดโดยใช้สาร ดูดซับก๊าซ	74
ตารางที่ 13. ระยะเวลาแต่ละขั้นตอน (Cycle Time) ในการทำงานด้วย ระบบแยกก๊าซสลับความดัน	82
ตารางที่ 14. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยซีโอไลต์มาตรฐานและซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก	84
ตารางที่ 15. ข้อมูลการนำเข้าวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ (ซีลิเกต) ในเดือน มกราคม-ธันวาคม 2543	88
ตารางที่ 16. มูลค่าซีโอไลต์มาตรฐานตามท้องตลาด	91



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1. กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากชีวมวล	6
รูปที่ 2. หลักการเบื้องต้นของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน	9
รูปที่ 3. รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม ในหน่วยเล็กๆ (sub unit) ของซีโอไลต์ในหน่วยโครงสร้างแบบปฐมภูมิ	17
รูปที่ 4. โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต	18
รูปที่ 5. ช่องว่างในโครงสร้างของอะแนลไซม์ซึ่งจะไม่ตัดกัน	20
รูปที่ 6. a) ช่องว่าง 2 มิติในมอร์เดนไนท์ โดยมีช่องว่างหลักอยู่ในระนาบ c และ เชื่อมต่อกันด้วยโพรงเล็กๆ b) ช่องว่างใน 2 มิติในซีโอไลต์ Natrolite	20
รูปที่ 7. a) ระบบช่องว่างใน 3 มิติ ของซีโอไลต์ A b) ช่องว่างใน 3 มิติสองระบบที่ไม่ขึ้นต่อกัน มีขนาดเท่ากันแต่ไม่ตัดกัน	21
รูปที่ 8. ระบบช่องว่าง 3 มิติที่มีการตัดกันของช่องว่าง	21
รูปที่ 9. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง ( $V_p$ ) กับความหนาแน่น ( $d_p$ )	22
รูปที่ 10. ลักษณะโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์	23
รูปที่ 11. ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า	24
รูปที่ 12. ขนาดรูพรุนที่ส่งผลต่อการดูดซับก๊าซ	27
รูปที่ 13. โครงสร้าง $D_4R$ ของซีโอไลต์ A	30
รูปที่ 14. การจับตัวเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้า (truncated octahedral) ในซีโอไลต์ A	30
รูปที่ 15. ภาพ scanning electron ของซีโอไลต์ 5A	32
รูปที่ 16. กลไกการเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ A	33
รูปที่ 17. กระบวนการดูดซับของสารดูดซับ	36
รูปที่ 18. การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต	37
รูปที่ 19. ขั้นตอนการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน	40
รูปที่ 20. ระบบดูดซับแบบสลับความดัน	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 21. ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา	56
รูปที่ 22. เครื่องกวนผสมแบบ Planetary mixer hebalt	57
รูปที่ 23. เครื่องอัดเม็ด	58
รูปที่ 24. เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี	59
รูปที่ 25. เตาเผาชนิด Turbular furnace	59
รูปที่ 26. เครื่องแยกก๊าซ	61
รูปที่ 27. ไอโซแกรมการทำงานระบบดูดซับก๊าซ	62
รูปที่ 28. ตะกรันที่เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นก่อนกำจัดสิ่งเจือปน	65
รูปที่ 29. ตะกรันที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปน	65
รูปที่ 30. ตะกรันที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนและเผา	66
รูปที่ 31. ตะกรันที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนที่เผาแล้วหลอมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์	66
รูปที่ 32. ผลการวิเคราะห์ตะกรันเหล็กคิวโปลาเริ่มต้นโดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	67
รูปที่ 33. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหลอมของตะกรันเหล็กคิวโปลา โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	68
รูปที่ 34. พื้นผิวของตะกรันคิวโปลาประเภทต่างๆ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	69
รูปที่ 35. ผลวิเคราะห์ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อเกิดผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	71
รูปที่ 36. ผลวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเกิดผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 1(A), 3 (B) และ 5(C) โมลต่อลิตรเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 37. ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กโดยกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 1 (A), 3(B), 5(C), 7(D) และ 9(E) ชั่วโมงตามลำดับ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	72
รูปที่ 38. ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กเทียบกับซีโอไลต์มาตรฐาน โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	73
รูปที่ 39. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยซีโอไลต์ Li-A	76
รูปที่ 40. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยซีโอไลต์ Li-A	77
รูปที่ 41. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารดูดซับและประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	78
รูปที่ 42. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ $N_2-CO_2-H_2$ (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A และ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ	80
รูปที่ 43. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ $N_2-CO_2-H_2$ (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A และ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ	80
รูปที่ 44. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไนโตรเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ $N_2-CO_2-H_2$ (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A และ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ	81
รูปที่ 45. ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะเวลาการรอบการดูดซับโดยซีโอไลต์และถ่านกัมมันต์	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 46. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ $H_2-CO_2-N_2$ (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A ด้วยอัตราการไหลเข้า ต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ	83
รูปที่ 47. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ $H_2-CO_2-N_2$ (15:50:35) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ด้วยอัตราการไหลเข้าต่อ อัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ	83

# **DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR HYDROGEN PURIFICATION**

**Rewadee Anuwattana, Preecha Ploypattarapinyo and Patthanant Natpinit.**

## **ABSTRACT**

The study is to synthesize zeolite from the cupola slag material and reform in granule shape for hydrogen gas purification. The synthesis conditions such as solution concentrations of 1, 3 and 5 M NaOH, reaction temperature of 105°C and reaction times of 1, 3, 5, 7 and 9 hours were examined. The optimum condition was evaluated by a CEC and percent yield of zeolite. The quality zeolite could be obtained from fusing the cupola slag with NaOH in a ratio of 1:3 by weight at 550 °C for 1 hour. The fused cupola slag was activated by 3M NaOH solution in a closed system at 105 °C for 3 hrs. The obtained product as Na-A had 87.6% zeolite with 507.6 mg CaCO<sub>3</sub>/g zeolite. It was exchanged with LiCl, KCl, MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> of 1 mol/lit for 24 hours before form the pellets by wet granulation technique. The pellets were used for gas separation by pressure swing adsorption. The optimum condition of pressure swing adsorption was a pressure of 3 atmosphere, a ratio of flow in / flow out of 2.0 by using the gas mixture of 15% of H<sub>2</sub>, 50% of CO<sub>2</sub> and 35% of N<sub>2</sub>. Li-A zeolite showed good adsorbent for CO<sub>2</sub> adsorption. The output gas product showed H<sub>2</sub> concentration was increased from 15% to 89-90% and CO<sub>2</sub> decreased from 50% to 0.5-1.0% (97.79% CO<sub>2</sub> removal). The zeolite products from slag could be alternative material for hydrogen purification.

# การพัฒนาเทคโนโลยีในการแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์

เรวัต อนุวัฒนา<sup>1</sup>, ปรีชา พลอยภัทรภิญโญ<sup>1</sup> และ พัชรนันท์ นาดพินิจ<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กพร้อมขึ้นรูปเม็ดเพื่อใช้ในการแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์. สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก คือ การหลอมตะกรันด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปัจจัยความเข้มข้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (1, 3 และ 5 โมลต่อลิตร) เป็นเวลา 1, 3, 5, 7 และ 9 ชั่วโมง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ การกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าสามารถสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ชนิด A ได้โดยให้ค่าความเป็นผลึกเท่ากับ 87.6% (Calcium exchange capacity of 507.6 mgCaCO<sub>3</sub>/g zeolite) และถูกแลกเปลี่ยนด้วยสารละลาย LiCl, KCl, MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub> of 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และถูกทำให้เป็นเม็ดเพื่อใช้กับเครื่องแยกก๊าซสลับความดัน โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความดัน, อัตราการไหลออกต่ออัตราการไหลเข้า ชนิดไอออนบวก และ ระยะเวลาครบรอบ พบว่า ความดันที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดได้แก่ ความดัน 3 บรรยากาศ. อัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกเท่ากับ 2 โดยการป้อนก๊าซผสมไฮโดรเจนที่มีองค์ประกอบ 15% of H<sub>2</sub>, 50% of CO<sub>2</sub> และ 35% of N<sub>2</sub>. พบว่า ซีโอไลต์ผ่านการแลกเปลี่ยนด้วยลิเทียม (Li-A) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด โดยก๊าซขาออกมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสูงจากเดิม 15% เป็น 89-90% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 50% เหลือ 0.5-1.0% (97.79% การกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub>). จากผลการศึกษาโดยการใช้ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก พบว่า สามารถทำก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากเดิม 15% เป็น 86-87%.

<sup>1</sup>ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

# 1. บทนำ

## 1.1 ที่มาโครงการ

ในภาวะปัจจุบันนี้ กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์เพื่อใช้ในการดำรงชีพต้องพึ่งพาการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง. ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีแหล่งพลังงานปิโตรเลียมไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงานภายในประเทศ จึงจำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศทุกๆ ปี ด้วยมูลค่าปีละหลายแสนล้านบาท. จากวิกฤตการณ์น้ำมันและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลโดยตรงต่อมนุษย์ จึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่มาใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิล และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงเริ่มมีการส่งเสริมอย่างจริงจัง.

พลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นพลังงานในอนาคตที่สะอาด และมีศักยภาพทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลได้ดี, เนื่องจากมีค่าความร้อนสูงมากกว่า 122,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และสูงกว่าเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ประมาณ 2.75 เท่า (Iligi and Fikret 2006). นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผาไหม้ ได้น้ำและพลังงานความร้อน ยังคงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน. แนวทางการใช้ประโยชน์ก๊าซไฮโดรเจนในปัจจุบัน พบว่า มีการนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ในการผลิตไฟฟ้า, เชื้อเพลิงความร้อน และเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น.

กระบวนการผลิตพลังงานไฮโดรเจนสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนรูปก๊าซธรรมชาติด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิง (Reforming), การอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis of water), ก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งใช้พลังงานในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงมาก. แต่ในปัจจุบันนี้พบว่า พลังงานไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากชีวมวลด้วยกระบวนการหมักแบบใช้แสงและไม่ใช้แสง (Photo and Dark fermentation) หรือ ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ (Biohydrogen) ซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน ประมาณร้อยละ 50-60, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30-40 และก๊าซไนโตรเจน ร้อยละ 10-20 เป็นต้น (Manich 2007). โดยข้อดีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในระบบหมัก พบว่า สามารถทำได้ในขนาดเล็กโดยใช้วัตถุดิบส่วนใหญ่เป็นของเสียภายในครัวเรือนในระดับชุมชน ที่มีการลงทุนทางด้านเครื่องมือ และสารเคมีในราคาต่ำ ซึ่งนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซไฮโดรเจนแล้ว ยังสามารถกำจัดของเสียได้ไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม. อย่างไรก็ตาม ก่อนนำก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพไปใช้งานควรมีการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซก่อน, โดยการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน, เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่มี

ความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น, เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน. การแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ในปัจจุบัน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแยกก๊าซด้วยเมมเบรน, การกลั่น และการดูดซับ เป็นต้น. วิธีการดูดซับจัดเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยม เนื่องจากง่ายต่อการลงทุนและการบำรุงรักษา ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ เพื่อทำให้เกิดผลต่างของความดันภายในหอดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เช่น การดูดซับด้วยระบบสลับความดัน. แต่อย่างไรก็ตาม มีขีดจำกัดของประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นกับสารดูดซับก๊าซ โดยพบว่าสารดูดซับก๊าซมีหลายชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์, ซิลิกาเจล, อะลูมินา, คาร์บอนโมเลกุลทาร์ซีฟ และซีโอไลต์. โดยซีโอไลต์จัดเป็นสารดูดซับทางการค้าที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นผลึกและมีขนาดรูพรุนสม่ำเสมอ และการควบคุมขนาดรูพรุนในการสังเคราะห์ทำได้ง่ายกว่าสารดูดซับก๊าซชนิดอื่นๆ และสามารถเลือกจำเพาะเจาะจงในการคัดแยกโมเลกุลก๊าซขนาดต่างๆ ได้ เช่น การแยกก๊าซ  $N_2/CH_4$  โดยใช้ Clinoptilolite (HEU) (Maple *et al.* 2007), การใช้ประโยชน์จาก ZSM-5 ที่มีการแลกเปลี่ยนมาใช้ประโยชน์ในการคัดแยกก๊าซผสม (Kikkides *et al.* 1993), การใช้ประโยชน์จาก mordenite (Dunne *et al.* 1996), การคัดแยกก๊าซ  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , และ  $CH_4$  โดยใช้  $\beta$ -zeolite. นอกจากนี้ ซีโอไลต์ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำ. นอกจากนี้ยังมีการใช้ประโยชน์สารดูดซับชนิดอื่นๆ เพื่อแยกก๊าซ  $CH_4$ -  $CO_2$  โดยใช้ carbon molecular sieve (Jose *et al.* 2006), การแยกก๊าซ  $CO_2$ - $N_2$ - $O_2$  โดยใช้ activated carbon (V.G. Gomes. *et al.* 2001).

จากประโยชน์ต่างๆ ที่กล่าวมาส่งผลให้ประเทศไทยมีการนำเข้าซีโอไลต์เพื่อใช้ประโยชน์ต่างๆ. จากข้อมูลการนำเข้า-ส่งออกของซีโอไลต์ในประเทศไทยนั้น พบว่า มีการนำเข้าซีโอไลต์มาจากหลาย ๆ ประเทศมีมูลค่าการนำเข้าถึง 100 กว่าล้านบาท เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม, โดยพบว่าในเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 มีมูลค่าการนำเข้าโดยรวมจากหลายประเทศมากถึง 138,237,863 บาท, เมื่อดูข้อมูลเฉพาะเดือน พบว่า เดือนธันวาคม พ.ศ. 2543 มีมูลค่าการนำเข้า 11,655,082 บาท. จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำของเสียจากแหล่งต่างๆ เช่น ขี้เถ้าแกลบ (H.Katsuki *et al.* 2005), fly ash (Querol *et al.* 2002), อะลูมิเนียม (La Iglesia, and Gonzalez. *et al.* 2001), ตะกรันเหล็ก (Rewadee *et al.* 2010) และ oil shale ash (Regina and Camargo *et al.* 2006) มาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์.

ตะกรันเหล็กจากการหลอมเหล็กจัดเป็นของเสียอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นในแต่ละปีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าใน พ.ศ. 2549 มีปริมาณตะกรันเหล็กมากถึง 23.5 ล้านตันต่อปี. การหาแนวทางในการกำจัดตะกรันเหล่านี้มักจะนำมาใช้เป็นวัสดุถม, วัสดุในโครงสร้าง และ



เป็นส่วนผสมในคอนกรีต เป็นต้น. แม้ว่าจะมีวิธีต่างๆ ในการนำตะกรันไปใช้ประโยชน์, แต่ปัญหาในการนำตะกรันมาทิ้งก็ยังคงมีอยู่, เนื่องจากในระดับอุตสาหกรรมการก่อสร้างยังคงใช้งานในปริมาณน้อย, และนอกจากนี้แหล่งของตะกรันหลักยังอยู่ห่างไกลจากแหล่งกำจัดทำให้ไม่คุ้มค่ากับการขนส่ง ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัด, ทำให้ความสนใจในการนำตะกรันที่เหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรมยังมีน้อย. แต่เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรันหลักพบว่า ส่วนใหญ่แล้วประกอบด้วยของแข็งออสซิลานของซิลิกาและอะลูมินา จึงมีความเหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการเตรียมเป็นสารประกอบออลูมิโนซิลิเกตประเภทซีโอไลต์ (Zeolite) ได้. จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีความเป็นไปได้ในการนำตะกรันหลักจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กหล่อเข้ามาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ (Rewadee *et al.* 2010) และสามารถพัฒนาเพื่อผลิตเป็นสารดูดซับก๊าซซีโอไลต์. จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าแนวทางในการนำกากของเสียสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในการผลิตเป็นซีโอไลต์ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เป็นจำนวนมากทั้งค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียและการนำเข้าซีโอไลต์ป้อนหมั่นล้างบาทได้. นอกจากนี้เพิ่มมูลค่าของเสียเหล่านี้แล้ว ยังเป็นแนวทางหนึ่งในการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเหล่านี้ อีกทางหนึ่งด้วย.

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการคัดเลือกสารดูดซับก๊าซที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์โดยเทคนิคแยกก๊าซสลับความดัน, โดยการเปรียบเทียบชนิดสารดูดซับก๊าซชนิดต่างๆ ได้แก่ ซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 5A, ซีโอไลต์สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก และถ่านกัมมันต์, เพื่อใช้ในการคัดแยกก๊าซให้บริสุทธิ์, ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดปัญหาในการกำจัดของเสียแล้วยังสามารถนำของเสียมาใช้ประโยชน์โดยการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม พร้อมกับแก้ปัญหาแหล่งในการกำจัด Solid Waste ได้ อีกทางหนึ่งด้วย.

## 1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุดูดซับจากกากของเสียอุตสาหกรรม มาประยุกต์ใช้งานเพื่อคัดแยกก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากก๊าซชีวภาพให้บริสุทธิ์จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสีย และวัสดุเหลือใช้การเกษตร.

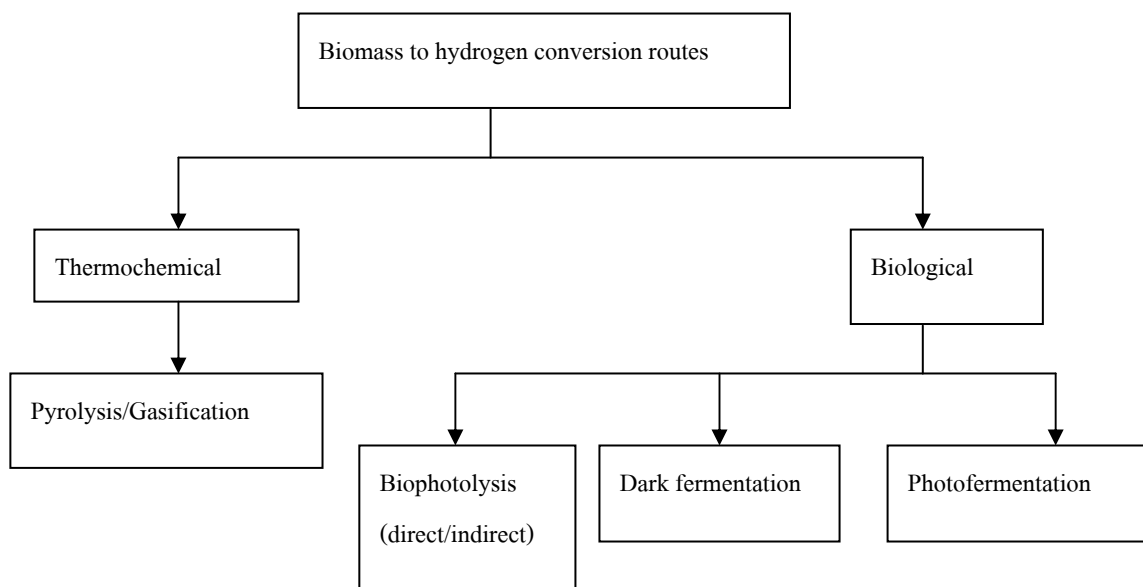
## 1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กเพื่อผลิตเป็นซีโอไลต์ชนิด 5A.

2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารดูดซับก๊าซแต่ละชนิด เช่น ซีโอไลต์ชนิด 5A, ซีโอไลต์สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก และถ่านกัมมันต์.
3. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการดูดซับด้วยระบบสลับความดัน เช่น ความดันระยะเวลา, อัตราการป้อนก๊าซขาเข้าต่ออัตราการป้อนก๊าซขาออก และระยะเวลาครบ 1 รอบ.
4. สรุปและประเมินผลการวิจัยและจัดทำรายงาน.

#### 1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารชีวมวล โดยวิธีทางชีววิทยาต้องได้รับแหล่งสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งพบว่า สามารถหาแหล่งคาร์บอน (Carbon source) จากของเสียทางการเกษตร หรือน้ำเสียได้, โดยทั่วไป พบว่า กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารชีวมวลเป็นดังแผนรูปที่ 1. (Manish *et.al.* 2007).



รูปที่ 1. กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากชีวมวล.

โดยทั่วไปพบว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ไฮโดรเจนจำนวน 1 กิโลกรัมสามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ 7.31-9.37 kg CO<sub>2</sub> (55-73%) (Manish *et al.* 2007) และนอกจากนี้ พบว่า ผลพลอยได้จากกระบวนการหมักยังมีก๊าซชนิดอื่นๆ ปนอยู่ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนเป็นต้น. โดยขั้นตอนในการ

นำก๊าซไฮโดรเจนมาใช้งานต้องทำก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ทำให้มีความบริสุทธิ์ก่อนนำมาใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิง หรือใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน เป็นต้น. ดังนั้นการแยกก๊าซ CO<sub>2</sub> และก๊าซชนิดอื่นๆ ออกจากก๊าซผสมจึงมีความสำคัญในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก, กระบวนการแยกเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความจำเป็นในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเคมี, เนื่องจากทำให้วัตถุดิบซึ่งเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ตามข้อกำหนด.

การดูดซับเป็นกระบวนการแยกอีกวิธีหนึ่งที่ใช้แยกของไหลผสมสถานะก๊าซให้อยู่บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นผิวของตัวดูดซับ, ดังนั้นตัวดูดซับที่ดีจึงต้องมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ โดยทั่วไปพบว่า การแยกของไหลที่เป็นก๊าซ มีจุดมุ่งหมายเพื่อกำจัดสารเจือปน (purification) และแยกก๊าซผสม (bulk separation) ซึ่งในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้วิธีต่างๆ เช่น การกลั่น, การดูดซับด้วยสารเคมี และการดูดซับแบบสลับความดัน, โดยกระบวนการดูดซับ แบบสลับความดัน ได้รับความนิยมนสูง เพราะเสียค่าใช้จ่ายน้อยและใช้พลังงานต่ำ.

**1. กระบวนการดูดซับสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption: PSA)** เป็นกระบวนการแยกสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังตารางที่ 1 โดยมีหลักการของการดูดซับ คือการที่วัสดุดูดซับสามารถดูดซับสารที่ถูกดูดซับออกจากสารผสมที่ป้อนเข้าไป โดยความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับขึ้นกับผลกระทบ 2 แบบ คือ ทางสมดุลและทางจลนศาสตร์. ผลกระทบทางสมดุล คือ ความแตกต่างของปริมาณที่วัสดุดูดซับสามารถดูดซับสารต่างๆ ในของผสม, ขั้นตอนการปฏิบัติการของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การดูดซับและการคืนสภาพวัสดุดูดซับ, การดูดซับคือสารที่ถูกดูดซับ ได้ดีกว่าจะถูกดูดซับออกจากสารผสมที่ป้อนเข้าไป, การคืนสภาพวัสดุดูดซับ คือ สารที่ถูกดูดซับจะทำการคลายตัวออกจากวัสดุดูดซับ เพื่อทำการดูดซับในขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 2. ขั้นตอนของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การดูดซับและการคืนสภาพของวัสดุดูดซับ ระหว่างขั้นตอนการคืนสภาพของวัสดุดูดซับ, สารที่ถูกดูดซับเอาไว้ในวัสดุดูดซับจะถูกกำจัดออกโดยการลดความดันหรืออาจจะใช้วิธีการเพิ่มอุณหภูมิหรือใช้สารไม่ถูกดูดซับป้อนเข้าไปในหอที่ความดันต่ำ และอาจจะทำการหยุดขั้นตอนการดูดซับเมื่อสารที่ถูกดูดซับถึงจุดอิ่มตัว (breakthrough).

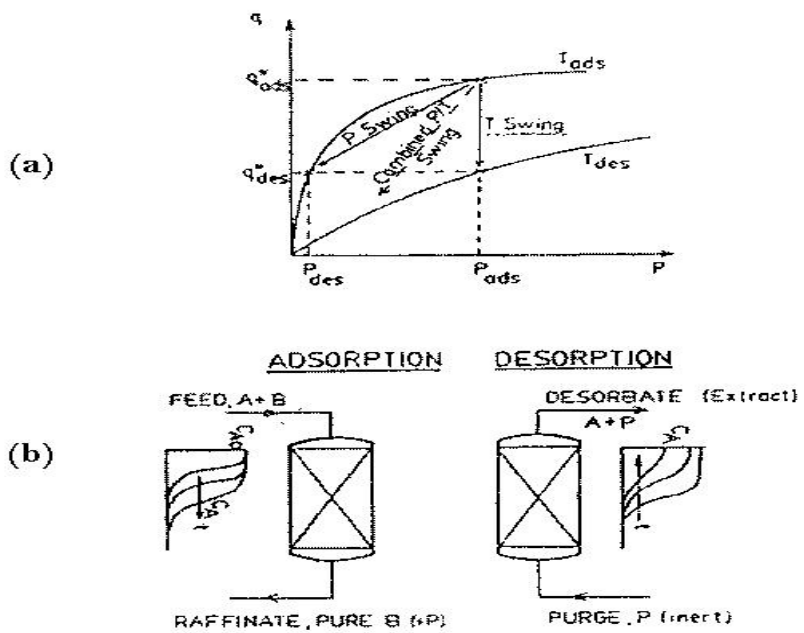
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการดูดซับจะมีความบริสุทธิ์สูง เรียกว่า ราฟฟินेट (Raffinate) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สารที่ถูกดูดซับได้มากกว่าถูกกำจัดออกไปแล้ว, ส่วนสารที่คายออกมาจากวัสดุดูดซับในขั้นตอนการคืนสภาพ เรียกว่า เอกซ์เทค (Extract) ซึ่งเฟสนี้ประกอบด้วยโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ในขั้นตอนการดูดซับ. สารที่ถูกดูดซับเอาไว้ในวัสดุดูดซับจะถูกกำจัดออกโดยการลดความดันหรืออาจใช้วิธีเพิ่มอุณหภูมิหรือใช้สารที่ไม่ถูกดูดซับป้อนเข้าไปในหอที่ความดันต่ำ เนื่องจากค่าคงที่ต่างๆ ในไอโซเทอมขึ้นกับอุณหภูมิ. การดำเนินการภายใต้อุณหภูมิลงที่จะสามารถใช้ประโยชน์จากความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับในขั้นตอนการดูดซับและการคืนสภาพ วัสดุดูดซับภายใต้ไอโซเทอมเดียวกัน ดังรูปที่ 2(a) และ 2(b) ซึ่งแสดงการกระจายตัวของความเข้มข้นในขั้นตอนการดูดซับที่ความดันสูง และการคืนสภาพวัสดุดูดซับที่ความดันต่ำ โดยจะหยุดขั้นตอนการดูดซับไว้เมื่อสารที่ถูกดูดซับถึงจุดอิ่มตัว (Breakthrough) ในขณะที่จะทำการหยุดขั้นตอนการคืนสภาพหอหลังจากวัสดุดูดซับได้คืนสภาพเต็มที่แล้ว.

ตารางที่ 1. การใช้ระบบดูดซับแบบสลับความดันในอุตสาหกรรมต่างๆ (Douglas 1994).

กระบวนการ	ผลิตภัณฑ์	วัสดุดูดซับ	ชนิดกระบวนการ
แยก H <sub>2</sub> ออกจากก๊าซเชื้อเพลิง	H <sub>2</sub> ที่มีความบริสุทธิ์สูง	ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หรือ ซีโอไลต์ (Zeolite)	ระบบดูดซับแบบหลายหอ
การอบแห้ง	อากาศแห้งสำหรับอุปกรณ์ควบคุม	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Activated Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	ระบบของสการ์สตอร์มแบบสองหอ
การแยกอากาศ	O <sub>2</sub> และ Ar	ซีโอไลต์ชนิด 5A	ระบบของสการ์สตอร์มแบบสองหอ
การแยกอากาศ	N <sub>2</sub> และ Ar	คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (CMS)	ระบบของสการ์สตอร์มแบบสองหอ
การแยกอากาศ	N <sub>2</sub> และ O <sub>2</sub>	ซีโอไลต์ชนิด 5A หรือ แคลเซียมเอกซ์ (CaX)	ระบบดูดซับแบบสลับสุญญากาศ
ไอโซซีฟ (Isosive)	ไฮโดรคาร์บอนแบบเส้นหรือกิ่ง	ซีโอไลต์ชนิด 5A	ระบบดูดซับแบบสลับสุญญากาศ
การแยกก๊าซเชื้อเพลิง	CO <sub>2</sub> และ CH <sub>4</sub>	คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (CMS)	ระบบดูดซับแบบสลับสุญญากาศ

ข้อได้เปรียบของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซับแบบอื่นๆ เช่น กระบวนการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ คือ ความดันสามารถเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิ ทำให้กระบวนการดูดซับแบบสลับความดันจึงมีวงรอบที่เร็วกว่า, ส่งผลต่อกำลังการผลิตโดยวิธีนี้สูงกว่าวิธีอื่นเมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากัน, โดยข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ สารที่ถูกดูดซับต้องไม่ถูกดูดซับติดแน่นจนเกินไป, เนื่องจากจะทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในขั้นตอนการคืนสภาพหอเพราะต้องใช้การคืนสภาพวัสดุดูดซับที่สูญญากาศ.

โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันมีปัจจัยหนึ่งที่แตกต่างกันออกไปจากกระบวนการแยกสารอื่นๆ เนื่องจากกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันดำเนินการภายใต้สภาวะที่ขึ้นกับเวลา, ในขณะที่กระบวนการแยกสารอื่นๆ เช่น กระบวนการดูดซึม, การสกัด และการกลั่นดำเนินการภายใต้สภาวะคงตัว.



รูปที่ 2. หลักการเบื้องต้นของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน.

- (a) การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับต่อค่าความดัน
  - (b) การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับภายในหอ
- (Douglas 1994)

## ข้อจำกัดของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน

### 1. ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ราฟไฟเนต (สารที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่าหรือแพร่ได้ช้ากว่า) สามารถผลิตได้ที่มีความบริสุทธิ์สูง, แต่ในขณะที่ผลิตภัณฑ์เอกแทค (สารที่ถูกดูดซับได้มากกว่าหรือแพร่ได้เร็วกว่า) ไม่สามารถผลิตได้ที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งต้องการปรับปรุงกระบวนการเป็นผลให้กระบวนการซับซ้อนขึ้น.

### 2. ผลได้หรืออัตราส่วนแยกกลับ

กระบวนการดูดซับแบบสลับความดันจะให้อัตราส่วนแยกกลับ (สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารป้อน) ต่ำกว่ากระบวนการแบบอื่นๆ โดยอัตราส่วนแยกกลับสามารถทำให้เพิ่มประสิทธิภาพได้โดยเพิ่มวงรอบการดำเนินการและเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับ, ดังนั้นกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันเหมาะสมเมื่อสารที่ป้อนมีราคาสูง.

### 3. พลังงานที่ต้องการ

กระบวนการดูดซับแบบสลับความดันมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ เช่น การกลั่น, การดูดซึม หรือการสกัด, โดยกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันใช้พลังงานกลในการเพิ่มความดันซึ่งมีราคาแพงกว่าพลังงานในรูปของความร้อน, แต่อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานจะลดลงได้หากสารป้อนมีความดันสูงอยู่แล้วทำให้พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มความดันในการดูดซับลดลง.

### 4. ราคาในการติดตั้งต่อกำลังการผลิต

กระบวนการดูดซับแบบสลับความดันเหมาะสมที่กำลังการผลิตไม่สูงมากและเหมาะสมกับงานแยกก๊าซที่ต้องการการบำรุงรักษาสูง.

### 5. แรงในการดูดซับ

เมื่อโมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่มายู่ใกล้พื้นผิวของวัสดุดูดซับจะส่งผลให้พลังงานศักย์ของโมเลกุลก๊าซลดลงทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิว, โดยโมเลกุลก๊าซที่พื้นผิวจะมีความเข้มข้นที่สูงกว่าที่เป็นก๊าซอิสระ โดยความแข็งแรงจะขึ้นกับคุณลักษณะวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ.

กระบวนการดูดซับแบบสลับความดันได้ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก เพื่อใช้ในการแยกความชื้นจากอากาศ. หอดูดซับความชื้นแบบสลับความดัน นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นหอดูดซับ 2 หอ การทำงานของหอดูดซับจะสลับกันทำงานโดยในขณะที่หอดูดซับหอแรกดำเนินการผลิตก๊าซ หอดูดซับหอที่สองก็จะถูกฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับซึ่งทำให้ดำเนินการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง, ต่อมาได้มีการวิจัยและพัฒนากระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ เช่น การแยกอากาศเพื่อผลิตก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซไนโตรเจนและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ เป็นต้น.

### ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน

ขั้นตอนการดำเนินการแบบพื้นฐาน เป็นขั้นตอนการดำเนินการที่ถูกออกแบบมาใช้สำหรับการกำจัดความชื้นในอากาศซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มความดัน (Pressurization) เป็นการเพิ่มความดันในหอดูดซับ โดยการอัดก๊าซผสมเข้าไปในหอดูดซับ ซึ่งในสภาวะความดันสูงจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น.

2. การดูดซับ (Adsorption) ก๊าซผสมจะถูกป้อนที่ความดันสูง และปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ไหลออกอีกทางด้านหนึ่ง. ดังนั้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบของก๊าซที่ไม่ถูกดูดซับเป็นส่วนมาก.

3. การลดความดัน (Blowdown) เป็นการปล่อยก๊าซที่อยู่ในหอดูดซับออก ทางด้านเดียวกับที่ป้อนก๊าซผสมเข้าไป ความดันภายในหอดูดซับจะลดลงซึ่งจะทำให้คลายปริมาณการดูดซับที่เกินกว่าสมดุลออกจากตัวดูดซับ.

4. การชะล้าง (Purge) เป็นการป้อนผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งเข้าสู่หอดูดซับที่ความดันต่ำในลักษณะการไหลกลับ เพื่อไล่องค์ประกอบที่ยังคงเหลืออยู่บนผิวของตัวดูดซับออกไป เพื่อให้ตัวดูดซับอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานต่อไป.

### ลักษณะการทำงานของระบบดูดซับแบบสลับความดันในอุตสาหกรรม

ขั้นตอนการดูดซับแบบสลับความดันมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้:

1. การเพิ่มความดันด้วยสารป้อนหรือผลิตภัณฑ์ร่าฟิเนต.
2. การดูดซับ.
3. การลดความดันหรือเป่าทิ้งโดยอาจไหลแบบสวนทิศทางหรือทิศทางเดียวกัน.
4. การคายสารดูดซับที่ความดันต่ำกว่าความดันในการดำเนินงาน อาจทำได้โดยการทำสุญญากาศ หรือเป่าทิ้งด้วยผลิตภัณฑ์ร่าฟิเนต.

5. การปรับความดัน โดยปล่อยความดันไปยังอีกหอก่อนทำการลดความดันเพื่อประหยัดพลังงาน.
6. การล้าง โดยการเป่าทิ้งด้วยผลิตภัณฑ์แอกซ์แทคที่ความดันสูง หลังการดูดซับ โดยขั้นตอนต่างๆ แตกต่างกันในแต่ละกระบวนการ โดยมีหลักการดังตารางที่ 2.

**ตารางที่ 2. สรุปขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน.**

ขั้นตอน	การดำเนินงาน	การใช้งาน
การเพิ่มความดัน	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เพิ่มความดันด้วยสารป้อน</li> <li>2. เพิ่มความดันด้วยผลิตภัณฑ์กราฟไฟเนต</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ทำให้ได้จากการเพิ่มความดันผลิตภัณฑ์ที่ปลายหอ</li> <li>2. เพิ่มความบริสุทธิ์และอัตราส่วนแยกกลับของผลิตภัณฑ์</li> </ol>
การดูดซับ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความดันคงที่</li> <li>2. ขอมให้ความดันลดลงได้</li> </ol>	ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ความดันสูง อัตราส่วนแยกกลับมีค่าสูงและผลิตภัณฑ์จะมีความดันต่ำ
การปล่อยทิ้ง	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ปล่อยทิ้งแบบไหลสวนทางกับสารป้อน</li> <li>2. ปล่อยทิ้งแบบไหลตามกันและตามด้วยแบบไหลสวนทางกับสารป้อน</li> </ol>	ผลิตภัณฑ์กราฟไฟเนตจะได้รับความจะได้ความบริสุทธิ์สูง ป้องกันการเจือปนจากสารที่ถูกดูดซับไว้ ผลิตภัณฑ์
การคายการดูดซับ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. คายการดูดซับด้วยกระแสเป่าทิ้ง</li> <li>2. คายการดูดซับโดยปราศจากกระแสเป่าทิ้ง</li> <li>3. การทำสุญญากาศ</li> </ol>	<p>เพิ่มความบริสุทธิ์แต่ละอัตราส่วนแยกกลับการเป่าทิ้งที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ จะช่วยลดการสูญเสียอัตราส่วนแยกกลับ แต่เพิ่มการใช้พลังงาน</p> <p>อัตราส่วนแยกกลับมีค่าสูงแต่เมื่อกระบวนการถูกควบคุมด้วยจลนศาสตร์เท่านั้น</p> <p>ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ทั้งกราฟไฟเนตและแอกซ์แทคมีค่าสูงในกรณีที่สารถูกดูดซับติดแน่นมาก</p>
การปรับความดัน	ส่งความดันสูงในขั้นตอนการดูดซับไปยังอีกหอ ก่อนการปล่อยทิ้ง	ประหยัดพลังงาน



## 2. การดูดซับและตัวดูดซับ

ในการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายก๊าซหรือของเหลว โดยอาศัยหลักการดูดซับบนของแข็งที่มีรูพรุน เมื่อก๊าซสัมผัสกับของแข็งสารจะถูกดูดซับเอาไว้ เช่น การดูดกลืนของถ่านกัมมันต์, การดูดน้ำซัลไฟเจล และการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศ เป็นต้น. ระบบดูดซับจะใช้งานได้ดีขึ้นกับตัวดูดซับ องค์ประกอบที่ต้องการแยก และระบบการดูดซับที่เหมาะสม.

**ประเภทของการดูดซับ** แบ่งตามลักษณะการยึดเกาะของสารที่ต้องการแยกบนตัวดูดซับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้:

1. การดูดซับทางฟิสิกส์ (Physical adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย, องค์ประกอบจะยึดแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในตัวดูดซับได้ แม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้น, เมื่อลดความดันลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้ เป็นการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การถ่ายสาร.

2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ปรากฏการณ์ที่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ, มีการยึดเกาะและทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีมากกว่าการดูดซับทางฟิสิกส์, การดูดซับนี้ไม่สามารถถ่ายสารได้ เนื่องจากองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมี และเป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้.

### ตัวดูดซับ

#### 1. หลักการการดูดซับของตัวดูดซับ

- ดูดซับโดยใช้หลักการสมดุล วัสดุดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน, สารที่ถูกดูดซับได้น้อยจะเป็นผลิตภัณฑ์ราฟิเนต, ส่วนสารที่ถูกดูดซับได้มากกว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทค. วัสดุดูดซับที่ใช้หลักการสมดุลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุดูดซับที่มีขั้วและวัสดุดูดซับไม่มีขั้ว. วัสดุดูดซับที่มีขั้วสูง เช่น ซีโอไลต์ และอะลูมิเนียมออกไซด์จะดูดซับน้ำที่มีขั้วได้มาก, ในขณะที่วัสดุดูดซับที่ไม่มีขั้ว เช่น คาร์บอนโมเลกุลกราฟีน จะดูดซับสารที่ไม่มีขั้ว เช่น มีเทนได้.

- ดูดซับโดยหลักการจลนศาสตร์ สารต่างๆ จะมีความเร็วในการแพร่เข้าไปในโมเลกุลของวัสดุดูดซับไม่เท่ากัน, สารที่แพร่ได้ช้ากว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์กราฟไฟเฟนิต, ส่วนสารที่แพร่ได้เร็วกว่าเป็นผลิตภัณฑ์เอกซ์แทค ซึ่งความสามารถในการแพร่ที่แตกต่างกันเกิดจากการกระจายตัวของขนาดโพรงวัสดุดูดซับ, โดยขนาดโพรงสามารถแบ่งได้เป็น สามประเภท ได้แก่ ไมโครพอร์ (Micropore) มีขนาดโพรงเล็กกว่า 20 °A, เมโซพอร์ (Mesopore) ขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 20-500 °A และมาโครพอร์ (Macropore) ขนาดโพรงใหญ่กว่า 500 °A โดยตัวอย่างวัสดุดูดซับที่ใช้หลักการสมดุลและจลนศาสตร์แสดงดังตารางที่ 3.

ตารางที่ 3. ตัวอย่างวัสดุดูดซับที่ใช้หลักการสมดุลและจลนศาสตร์ (Douglas 1994).

หลักการสมดุล	หลักการจลนศาสตร์
อะลูมิเนียมออกไซด์	คาร์บอน โมเลกุลาร์ซีฟ
ถ่านกัมมันต์	ซีโอไลต์ที่มีขนาดโพรงเล็ก
ซิลิกาเจล	
โพลีเมอร์เรซิน	
ซีโอไลต์	

**ตัวดูดซับ (Adsorbent)** ในสารละลายทั่วไปจะมีองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ตัวดูดซับจะดูดซับองค์ประกอบสารใดได้มากกว่ากันขึ้นกับสมบัติตัวดูดซับ เช่น อะลูมินา (Alumina) หรือ ซิลิกาเจล (Silica gel) สามารถดูดซับน้ำจากสารอินทรีย์ได้.

คุณสมบัติตัวดูดซับทั่วไปได้แก่ ความพรุน, ความหนาแน่น และพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับชนิดต่างๆ เช่น ปูนขาว, อะลูมินาและบอริกไซด์ และอะลูมิโนซิลิเกตหรือ โมเลกุลาร์ซีฟ ดังตารางที่ 4.

ตัวดูดซับแต่ละชนิดสามารถแยกสารที่เหมาะสมต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีต่างกัน. โมเลกุลาร์ซีฟ เป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่นิยมในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีขนาดรูพรุนแน่นอน และสามารถเลือกขนาดขององค์ประกอบที่ต้องการดูดซับให้มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวดูดซับ.

ตารางที่ 4. ชนิดตัวดูดซับ (พรศิริ 2529).

Composition	Internal porosity (%)	External Void-fraction (%)	Bulk dry density Kg/m <sup>3</sup>	Surface area, M <sup>2</sup> /g
Acid-treated clay	Ca 30	Ca40	560-880	100-300
Activated alumina and bauxite	30-40	40-50	720-880	200-300
Molecularsieve	45-55	Ca35	660-705	600-700
Bone char	50-55	18-20	640	Ca100
Carbons	55-75	35-40	160-480	600-1400
Fuller's earth	50-55	Ca40	480-640	130-250
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	22	37	1440	20
Magnesia	Ca 75	Ca45	Ca400	200
Silica gel	Ca70	Ca40	Ca400	Ca320

### สารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม

การเลือกใช้สารดูดซับสำหรับการแยกของผสม จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติเฉพาะของสารดูดซับแต่ละชนิดซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันเพื่อให้สามารถแยกได้อย่างเหมาะสม, ตัวอย่างตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่จะกล่าวถึงโดยสังเขปต่อไปนี้มีลักษณะแตกต่างกันทั้งกรรมวิธีการเตรียม, คุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้งาน.

#### 1. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุคาร์บอน เช่น วัตถุดิบจากการเกษตร, ถ่าน ไม้, ถ่านหิน เป็นต้น. กรรมวิธีการผลิตประกอบด้วย การเผาโล่งองค์ประกอบที่ระเหยง่าย ณ สภาวะอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส. ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน. ถ่านที่ได้จากการเผาแล้ว มีรูพรุนหรือพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น จึงต้องมีขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซออกซิไดซ์บางชนิด เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือน้ำ เป็นต้น. ถ่านกัมมันต์ที่ได้มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วง 300-2,500 m<sup>2</sup>/g (Yang, 1987) และพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้มักเป็นลักษณะไม่มีขั้ว จึงเหมาะสำหรับการดูดซับสารประกอบที่ไม่มีขั้ว, โดยมากใช้ดูดซับไอของสารประกอบอินทรีย์ในก๊าซหรืออากาศ หรือใช้ดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำ. นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์อาจผลิตให้มีรูพรุนขนาดเล็กเทียบเท่ากับขนาดโมเลกุลของสารบางชนิดและมีขนาดสม่ำเสมอได้, โดยปกติมักอยู่ในช่วง 4-9Å และเรียกถ่านกัมมันต์ประเภทนี้ว่า

คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (carbon molecular sieve) ซึ่งมักใช้แยกก๊าซผสมด้วยอัตราการดูดซับคงที่ ถ้าก๊าซผสมเหล่านั้นถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ได้ (Ruthven 1998).

## 2. อะลูมินา

อะลูมินาผลิตจากสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยการเผาไหม้โมเลกุลของน้ำออกจากสารประกอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส. ณ ความดันบรรยากาศ, เพื่อให้เกิดผลึกอะลูมินา ซึ่งมีพื้นที่ผิวประมาณ  $250 \text{ m}^2/\text{g}$  หรืออาจเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส. ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อให้ได้อะลูมินาที่มีพื้นที่ผิวประมาณ  $300-350 \text{ m}^2/\text{g}$  และรูพรุนมักมีขนาดใหญ่กว่า  $50\text{\AA}$ . นอกจากนี้ พื้นที่ผิวมีลักษณะความเป็นขั้วสูง จึงเหมาะสำหรับการดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น ให้น้ำ เป็นต้น (Yang 1987).

## 3. ซิลิกาเจล (Silica Gel)

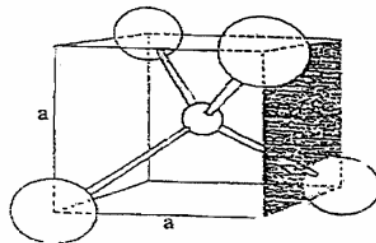
ซิลิกาเจลสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง สารประกอบโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) และกรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) หรือกรดเกลือ (HCl) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือผลึกซิลิกาที่รวมน้ำด้วย หรือ ไฮโดรซอล (hydrosol,  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งมีลักษณะคล้ายเจล เมื่ออบให้แห้งจะได้ผลึกของซิลิกาเจล ขึ้นกับความเข้มข้นของซิลิกา, อุณหภูมิ และความเป็นกรดต่างในกระบวนการผลิต. ดังนั้น ผลึกซิลิกาเจลจึงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ซิลิกาเจลชนิดธรรมดาที่มีพื้นที่ผิวประมาณ  $750-850 \text{ m}^2/\text{g}$  และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ  $22-26\text{\AA}$  และซิลิกาเจลชนิดที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งมีพื้นที่ผิวประมาณ  $100-150\text{\AA}$ , เนื่องจากลักษณะพื้นที่ผิวที่มีขั้วซิลิกาเจลจึงสามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วได้ดี เช่นเดียวกับอะลูมินา, แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น, ดังนั้นจึงนิยมใช้ดูดความชื้นในช่วงอุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าอุณหภูมิปกติเล็กน้อย, ในขณะที่เดียวกันพลังงานจากการดูดซับโมเลกุลของน้ำใกล้เคียงกับปริมาณความร้อนแฝงของการควบแน่น ให้น้ำที่สถานะเดียวกัน, จึงสามารถนำซิลิกาเจลกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย โดยการอบไล่โมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับไว้ ณ อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส. (Yang 1987).

#### 4. ซีโอไลต์ (Zeolite)

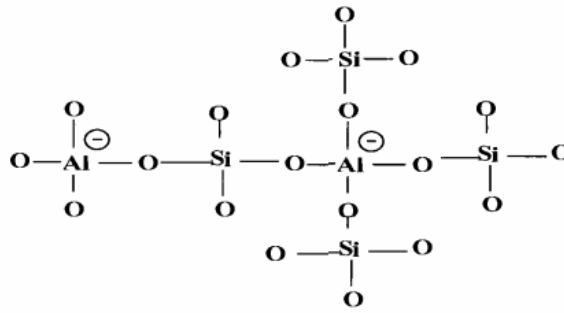
ซีโอไลต์ คือ ผลึกที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำและผลึกของโลหะอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งโดยมากมักจะเป็นโลหะหมู่ 1 และหมู่ 2 ได้แก่ โซเดียม (Na), โพแทสเซียม (K), แมกนีเซียม (Mg), แคลเซียม (Ca), ลิเทียม (Li), สตรอนเนียม (Sr) และแบเรียม (Br) ไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติของอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{AlO}_4$ ) และซิลิกอนออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{SiO}_4$ ) ซึ่งประกอบกันเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตโดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุด คือ เป็นโคโพลิเมอร์ (copolymer) (มนตรี 2542 และธีระพงษ์ 2543).

##### ก) โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

การจัดเรียงตัวของโครงสร้างซีโอไลต์ ชั้นเริ่มต้นนั้นจะเริ่มจากโครงสร้างปฐมภูมิ (รูปที่ 3) ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ของอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอลและซิลิกอนออกซิเจนเตตระฮีดรอล ซึ่งประกอบกันเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต. เมื่อโครงสร้างปฐมภูมิมีการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมก็จะจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (รูปที่ 4) และเมื่อมีการเชื่อมต่อกันแบบไม่สิ้นสุด จะเกิดเป็นโคโพลิเมอร์.

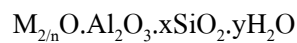


รูปที่ 3. รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยเล็กๆ (sub unit) ของซีโอไลต์ในหน่วยโครงสร้างแบบปฐมภูมิ (Breck 1974).



รูปที่ 4. โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต (Breck 1974).

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์เป็นดังนี้



โดย

M = คือ แคตไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ n

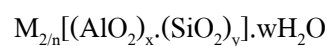
n = คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) โดยมาก เท่ากับ 1 และ 2 สำหรับโลหะอัลคาไลน์ หรือ

โลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ตามลำดับ

x = คือ จำนวน โมลของ  $SiO_2$  โดยมากจะมีค่า  $\geq 2$

y = คือ จำนวน โมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

Breck 1974 สรุปว่าสูตรและหน่วยเซลล์ (unit cell) ของซีโอไลต์ เป็นดังนี้



โดย

M = คือ แคตไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ n

n = คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M)

w = คือ จำนวน โมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์

x+y = จำนวนรูปของเตตระฮีดรอล ทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x = มีค่าตั้งแต่ 1-5 โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้าง

[ ] แสดงองค์ประกอบในโครงสร้างผลึก

ซิลิกอนออกซิเจนเตตระไฮดรอกไซด์ (SiO<sub>4</sub>) มีประจุลบสี่ และอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระไฮดรอกไซด์ (AlO<sub>4</sub>) มีประจุลบห้า. การเชื่อมต่อกันของซิลิกอนออกซิเจนเตตระไฮดรอกไซด์กับอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระไฮดรอกไซด์เป็นโครงร่างตาข่ายทำให้มีประจุลบเกิดขึ้น เนื่องจาก Al<sup>3+</sup> เข้าไปแทนที่ Si<sup>4+</sup> ในโครงสร้างซึ่งจะถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคตไอออนของโลหะแอลคาไลน์ หรือแอลคาไลน์เอิร์ธ ดังสมการ (Breck 1974).



โดย

- M = แคตไอออนของโลหะที่มีประจุ +m  
 X = จำนวนอะตอมของอะลูมิเนียม  
 n = จำนวนโมลของ SiO<sub>2</sub>

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์มีขนาดช่องว่างหรือโพรงที่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 3-10 Å ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน่วยโครงสร้างของผลึก. จากการที่ซีโอไลต์มีขนาดโพรงที่สม่ำเสมอ จึงทำให้ molecular sieve มีสมบัติคือซีโอไลต์ยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าโพรงเข้าไปในโครงสร้าง. ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าไม่สามารถผ่านเข้าได้. นอกจากซีโอไลต์แล้ว ถ่านหิน, แก้วที่มีรูพรุน (porous glass) activated carbons ก็มีสมบัตินี้เช่นกัน. อย่างไรก็ตามสมบัติของซีโอไลต์ขึ้นกับลักษณะโครงสร้าง, ขนาด, รูปร่าง และช่องว่างภายในโครงผลึก รวมไปถึงตำแหน่งของประจุและขนาดของแคตไอออนที่อยู่ในโครงสร้าง (Breck 1974)

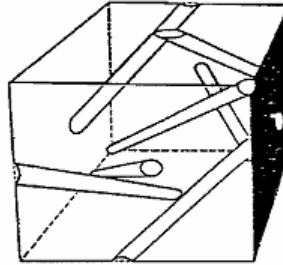
#### ข) สมบัติภายในโครงสร้างซีโอไลต์

ช่องว่างภายในโครงสร้างซีโอไลต์โดยธรรมชาติจะเชื่อมต่อกัน, ซีโอไลต์ที่ถูกไล่น้ำออกหมดแล้วจะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีโอไลต์ ซึ่งโครงสร้างซีโอไลต์สามารถกักเก็บน้ำได้สูง, มีความหนาแน่นต่ำ และปริมาตรช่องว่างจะมากเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง.

#### ค) ช่องว่างภายในโครงสร้างซีโอไลต์

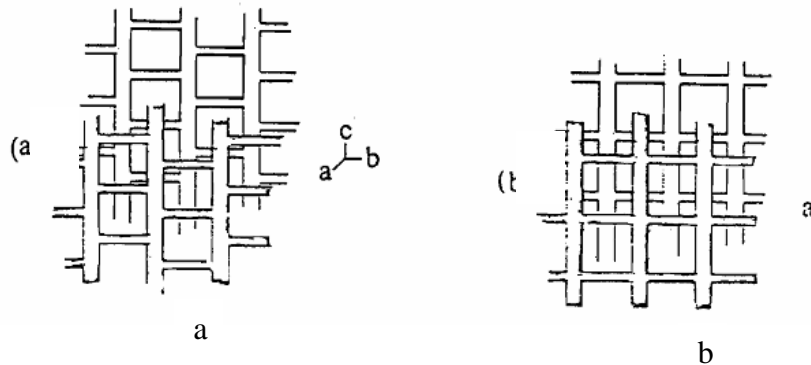
ธรรมชาติของช่องว่างที่เชื่อมต่อกันในซีโอไลต์ที่ถูกไล่น้ำออกหมดแล้วจะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ระบบช่องว่างในโครงสร้างมีอยู่ 3 ระบบดังนี้:

ระบบช่องว่างใน 1 มิติ (One-dimensional System) ช่องว่างในระบบนี้จะไม่ตัดกันเลย เช่น ช่องว่างใน Analcime ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.



รูปที่ 5. ช่องว่างในโครงสร้างของอะแนลไซม์ซึ่งจะไม่ตัดกัน (Breck 1974).

ระบบช่องว่างใน 2 มิติ (Two-dimensional System) จะพบในช่องว่างแบบนี้ใน ซีโอไลต์กลุ่ม Mordenite และ Natrolite โดยในกลุ่ม Mordenite จะมีช่องว่างหลักอยู่ในระนาบ c และเชื่อมโยงกันด้วยโพรงเล็กๆ ในระนาบ a ดังแสดงในรูป 6.

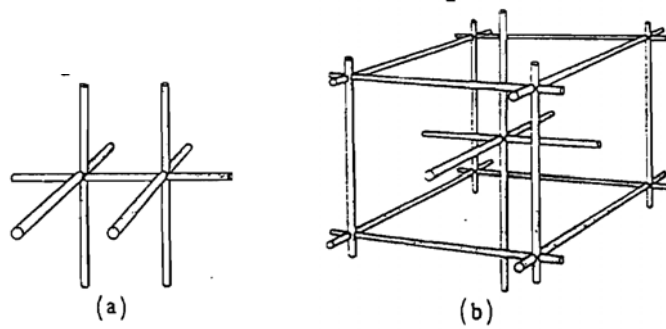


รูปที่ 6. a) ช่องว่าง 2 มิติในมอร์เดนไนต์โดยมีช่องว่างหลักอยู่ในระนาบ c และเชื่อมต่อกันด้วย โพรงเล็กๆ b) ช่องว่างใน 2 มิติในซีโอไลต์ Natrolite (มนตรี 2542).

ระบบช่องว่าง 3 มิติ (Three-dimensional System) ระบบนี้มีการตัดกันในช่องว่าง แบ่งย่อยได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ

ก. มีช่องว่างเท่ากันในทุกทิศทาง (Equidimensionals) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างเท่ากันหมด โดยไม่คำนึงถึงทิศทาง เช่น ซีโอไลต์ A เป็นต้น (รูปที่ 7).

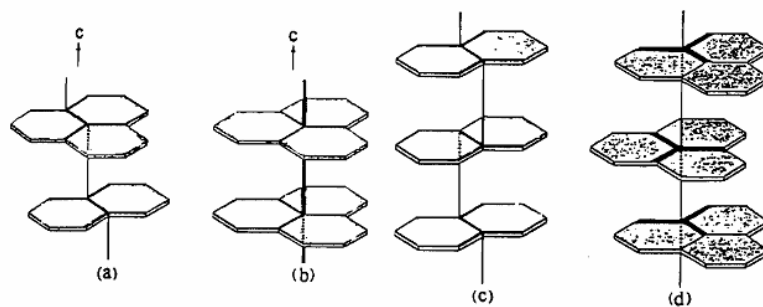




รูปที่ 7. a) ระบบช่องว่างใน 3 มิติ ของซีโอไลต์ A

b) ช่องว่างใน 3 มิติสองระบบที่ไม่ขึ้นต่อกัน มีขนาดเท่ากันแต่ไม่ตัดกัน (เรวดี 2544).

ข. มีการตัดของช่องว่าง แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องว่างไม่เท่ากันขึ้นกับทิศทางการเกิดผลึก เช่น Gmelinite (ภาพที่ 8 b), Levynite (รูปที่ 8 d).



รูปที่ 8. ระบบช่องว่าง 3 มิติที่มีการตัดกันของช่องว่าง

a) Chabazite, b) Gmelinite, c) Erionite และ d) Levynite (มนตรี 2542).

### ง) ความหนาแน่นของโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์

ลักษณะของน้ำผลึกของซีโอไลต์จะแปรผันได้มากมายตั้งแต่สภาพที่สามารถอธิบายได้ง่ายที่สุดคือ โมเลกุลเดี่ยวๆ จนกระทั่งในสภาพที่จับตัวกับประจุบวกและออกซิเจนในโครงสร้างผลึก โดยขึ้นกับขนาดของช่องว่างภายในโพรงที่มีอยู่ปริมาณในโครงสร้างผลึกจะถูกทำให้เต็มด้วยน้ำมากถึง ร้อยละ 50 ของปริมาณทั้งหมดของผลึก, เมื่อทำการไล่น้ำออกจากผลึกของซีโอไลต์จะได้ช่องว่างซึ่งสามารถบรรจุโมเลกุลสารชนิดอื่นเข้าไปได้ปริมาณช่องว่างในโครงสร้างผลึกสามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่อยู่ในโครงสร้าง, ความหนาแน่นโดยมากขึ้นอยู่กับปริมาณรูปทรงสี่หน้าใน

ผลึก, ความหนาแน่นของโครงสร้างผลึก (framework density,  $d_f$ ) ในหน่วย g/cc หาได้ดังสมการ (Breck 1974).

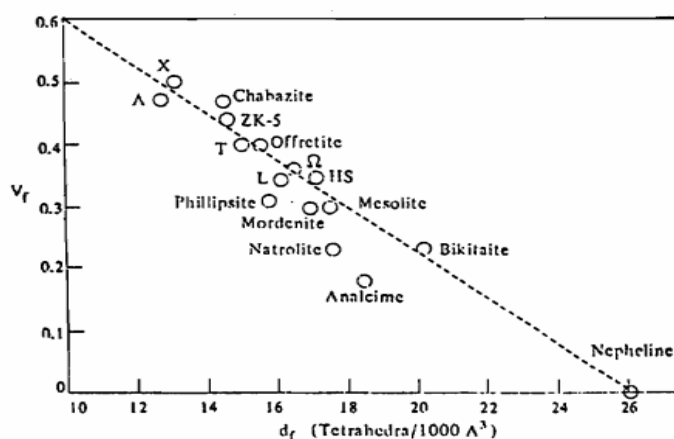
$$d_f = 1.66 [M] / V = 1.66 [59x + 60y] / V$$

โดยที่ M เป็นน้ำหนักโครงสร้างผลึก

x และ y เป็นจำนวนของ  $AlO_2$  และ  $SiO_2$  ในหนึ่งหน่วยเซลล์ ตามลำดับ

V เป็นปริมาตรของหน่วยเซลล์ที่มีหน่วยเป็น  $\text{\AA}^3$

ความหนาแน่นที่หาได้นี้มีค่าเกือบ 10 เท่าของจำนวนรูปทรงสี่หน้า/1000  $\text{\AA}^3$  นอกจากนี้ความหนาแน่นยังขึ้นกับเศษส่วนของช่องว่าง (void fraction  $V_p$ ) อีกด้วย ดังรูปที่ 9.



รูปที่ 9. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง ( $V_p$ ) กับความหนาแน่น ( $d_f$ ) (Breck 1974).

### จ) ประเภทของซีโอไลต์ตามหน่วยโครงสร้าง

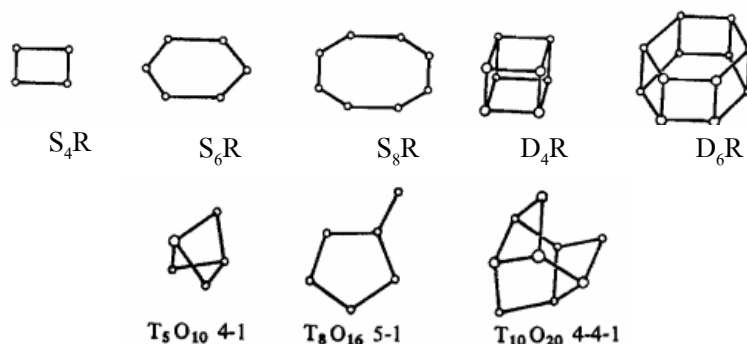
การแบ่งประเภทซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทดังนี้:

#### 1. หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Building Units)

โครงสร้างปฐมภูมิเป็นหน่วยพื้นฐานที่สุดของซีโอไลต์ มีลักษณะเป็นโครงสร้างสี่หน้าของซิลิกาหรืออะลูมินา, โดยความยาวของพันธะและมุมระหว่างพันธะของซิลิกอนกับออกซิเจนหรืออะลูมิเนียมกับออกซิเจนเป็นตัวกำหนดโครงสร้าง (structure) และชนิด (type) ของซีโอไลต์.

## 2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units)

โครงสร้างทุติยภูมิเกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิติดกันเป็นวงเหลี่ยม เช่น เป็นวงเดี่ยว (เช่น  $S_4R$ ,  $S_6R$ ) หรือต่อกันเป็นวงคู่ (เช่น  $D_4R$ ,  $D_6R$ ) ชนิดของซีโอไลต์แบ่งตามโครงสร้างทุติยภูมิได้ 8 ชนิด ดังรูปที่ 10 และตารางที่ 10.



รูปที่ 10. ลักษณะโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ (Breck 1974).

ตารางที่ 5. การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Breck 1974).

ชนิดของซีโอไลต์	ลักษณะหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ
1	วงเดี่ยว 4 มุม (Single 4 – ring, $S_4R$ )
2	วงเดี่ยว 6 มุม (Single 6 – ring, $S_6R$ )
3	วงเดี่ยว 8 มุม (Single 8 – ring, $S_8R$ )
4	วงคู่ 4 มุม (Double 4 – ring, $D_4R$ )
5	วงเดี่ยว 6 มุม (Single 6 – ring, $D_6R$ )
6	วงเชิงซ้อน 4 -1 (Complex 4-1 – $T_6O_{10} 4-1$ )
7	วงเชิงซ้อน 5 -1 (Complex 5-1 – $T_8O_{16} 5-1$ )
8	วงเชิงซ้อน 4 -1-1 (Complex 4-1-1 – $T_{10}O_{20} 4-1-1$ )

## 3. หน่วยโครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary Building Units)

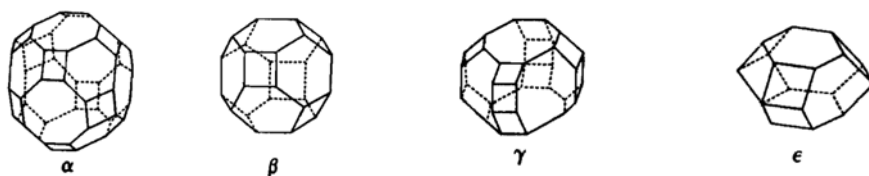
หน่วยโครงสร้างตติยภูมิเป็นหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า ซึ่งเป็นโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตของซีโอไลต์ โดยทั่วไปมักเกิดจากโครงสร้างทุติยภูมิตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ทำให้เกิดหน่วยย่อยของโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีรูปทรงต่างๆ รูปที่ 11 ดังนี้:

รูปทรงแปดหน้ามุมตัด หรือ (truncated octahedral type).

รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ (truncated cubooctahedron).

รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ (18-hedron).

รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ  $\mathcal{E}$  (11-hedron).



รูปที่ 11. ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (Breck 1974).

ลักษณะที่เป็นทรงเหลี่ยมหลายหน้า (polyhedral) ที่มีสมมาตรสูง เป็นทรงหลายเหลี่ยมชนิด ทรงโซดาไลต์ (sodalite cage) ที่มีรูปร่างแบบทรงสี่เหลี่ยมแปดหน้าที่ถูกตัดมุมออก และเกิดเป็น ทรงสี่เหลี่ยมสิบสองหน้า (octahedral).

### จ) ที่มาของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เกิดขึ้นได้ 2 วิธี

1. ซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติ (Mineral Zeolites or Naturally Occuring Zeolite) ซีโอไลต์ที่เกิดจากธรรมชาติถูกค้นพบจากการทำเหมืองแร่ซึ่งเป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของ โมโนหรือไดวาเลนต์เบส (mono or divalent base) อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วนหรือทั้งหมด โดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แก่ Erionite, Mordernite และ Gmelinite เป็นต้น.

### 2. ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic Zeolites)

ซีโอไลต์สังเคราะห์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของด่างออกไซด์ต่างๆ เช่น  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  และ  $K_2O$  ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำในผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ ทั้งที่เป็นเจล (gelation), เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะคล้ายเม็ดทราย (sandlike) ซึ่งการควบคุมปัจจัยจะทำให้เกิดผลึกจำนวนมากอย่างสม่ำเสมอ ได้แก่ zeolite A , X และ Y เพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน.

### ข) การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อิมตัวด้วยไอน้ำ (hydrothermal treatment) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส และความดันสูง การทำปฏิกิริยานี้จะถูกทิ้งไว้ตามระยะเวลา, ความดัน และอุณหภูมิที่กำหนดภายใต้ปริมาณน้ำที่มีมากเกินไป อย่างไรก็ตามได้มีวิธีการใหม่ๆ ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำ, โดยซีโอไลต์สามารถเกิดได้ตั้งแต่ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิน้ำเดือด (Breck 1974).

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้นจะทำให้แหล่งของซิลิกา, อะลูมินา และโลหะแอลคาไลน์รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา. อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่านั้นที่ความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น, ในบางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้ท้ายสุดจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์หลายอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2/\text{AlO}_2$  ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรด-เบส, ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป, ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา, อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของแคตไอออนของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่, โดยปกติการก่อตัวขึ้นของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักอยู่ที่ว่าแคตไอออนที่มีอยู่จะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ (templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบหรือแม่พิมพ์เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะ, ทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างคล้ายของแม่แบบนั้นๆ ในขั้นสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น.

## ข) ประโยชน์ของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์และถูกนำมาใช้มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติเนื่องจากองค์ประกอบที่สม่ำเสมอมีโครงสร้างแน่นอนและค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อนน้อย. ปัจจุบันซีโอไลต์มีประโยชน์และบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้านดังต่อไปนี้:

### 1. ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม

ใช้เป็น cracking catalyst ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยน methanol เป็น gasoline และยังใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิต polyethylene ให้มีสมบัติเฉพาะเจาะจงมากขึ้น.

### 2. ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก.

เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก (detergent builders) คือมีค่าความจุ (capacity) และจลศาสตร์ (kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีก, เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาลพิษได้ คือ ฟอสเฟตจะทำให้พีชน้ำหรือแพลงก์ตอนพีชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัด, เมื่อพีชน้ำหรือแพลงก์ตอนพีชเหล่านี้ตายลงและทับถมกันมากเข้าจะทำให้แม่น้ำเสีย และยังทำให้ปริมาณสัตว์ลดลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจน.

### 3. ใช้เป็นสารลดความกระด้าง

ซีโอไลต์เป็นสารลดความกระด้างของน้ำได้ (water softener) เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียม ไอออนและแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเหล่านี้ในโครงร่างผลึกได้.

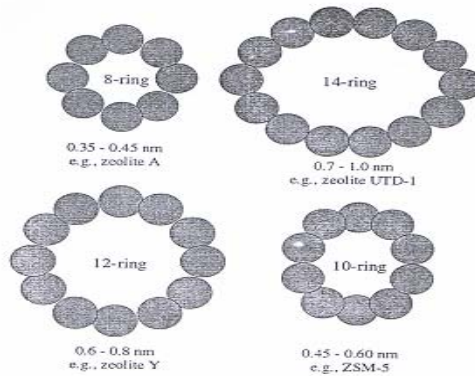
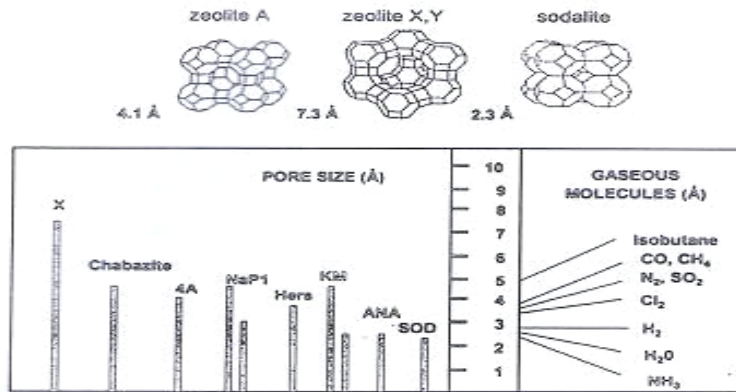
### 4. ใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน

ซีโอไลต์ใช้เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียม, ไอออนและแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (cation exchange) ในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออนได้.

### 5. ใช้เป็นสารดูดซับ

ใช้ในการแยกและทำให้บริสุทธิ์ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมี เช่น กระบวนการ drying ของ natural gas ซึ่งแยก  $\text{CO}_2$  และสารประกอบ sulfur ที่มาจากธรรมชาติ, ตลอดจนแยกก๊าซที่อาจก่อให้เกิดมลพิษ เช่น  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , และ  $\text{O}_2$  จากอากาศ เป็นต้น. เนื่องจากสมบัติที่มีความพรุนมากในโมเลกุลของซีโอไลต์ จึงสามารถดูดซับโมเลกุลอื่นๆ ได้ดีเยี่ยม โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุลในการแยกสารต่างๆ ออกจากกัน.

สำหรับการดูดซับก๊าซและไอน้ำ เมื่อทำการไล่น้ำออกจากโมเลกุลของซีโอไลต์โดยให้ความร้อนที่ 350-400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง รูพรุนในโมเลกุลของซีโอไลต์จะว่างเปล่า และสามารถดูดซับโมเลกุลอื่นๆ ได้ จากคุณสมบัตินี้จึงมีการนำไปใช้ในการแยกสารบางอย่างออกจากกัน โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุล ดังรูปที่ 12.



รูปที่ 12. ขนาดรูพรุนที่ส่งผลต่อการดูดซับก๊าซ (Szostak 1989).

จากรูปที่ 12 มีการนำขนาดรูพรุนที่สม่ำเสมอของซีโอไลต์ ไปใช้ในการดูดซับหรือคัดแยก โมเลกุลก๊าซ เช่น นิยมนำซีโอไลต์ X มาใช้ในการดูดซับก๊าซหรือคัดแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอน (Szostak 1989).

ณ) สมบัติซีโอไลต์

- ความเป็นขั้ว

โดยปกติความเป็นขั้วของสารสามารถพิจารณาได้จาก ความแตกต่างของ electron Density ในโมเลกุลของสารนั้น, หากมีการกระจายตัวในส่วใดส่วหนึ่งของโมเลกุล สารนั้นจะแสดงว่า dipole moment เช่นน้ำ มี dipole moment ไปตามทิศทางของออกซิเจน, หากสารที่มีการกระจายตัวของ electron density ที่แตกต่างกัน แต่ไม่มีทิศทางที่ชัดเจน จะพิจารณาจาก quadrapole moment ที่ จะแสดงความเป็นขั้วเมื่อถูกทำให้เป็นขั้ว เช่น dipole moment ของน้ำการวัดค่าของ dipole หรือ

quadrupole moment นั้นทำได้ยากในทางปฏิบัติ, จะพิจารณาความเป็นขั้วจากค่าคงที่คู่ไฟฟ้า ซึ่งวัดได้จากการทดลอง, ส่วนความเป็นขั้วของซีโอไลต์จะขึ้นกับสนามไฟฟ้าสถิตภายในรูพรุนที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างประจุโดยเราสามารถพิจารณาจัดระดับความเป็นขั้วของซีโอไลต์จาก Si/Al ที่แตกต่างกันได้ดังนี้:

Si/Al	ตั้งแต่	1-2	มีขั้วมาก.
Si/Al	ระหว่าง	3-7	มีขั้วปานกลาง.
Si/Al	ระหว่าง	8-15	มีขั้วต่ำ.
Si/Al	มากกว่า	15	ไม่มีขั้ว.

สารที่มีขั้วจะดูดซับได้ดีด้วยซีโอไลต์ที่มีขั้ว ในขณะที่สารที่ไม่มีขั้วจะถูกดูดซับได้ดีในสารที่ไม่มีขั้ว Site proximity ของซีโอไลต์เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ, โดยเฉพาะสำหรับสารที่มีความเป็นขั้วอันเนื่องมาจาก quadrupole moment หากการกระจายตัวของ electron density ในโมเลกุลของสารมีความเหมาะสมกับ site proximity ในรูพรุน จะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี Carbon dioxide, โดยปกติจะมีรูปร่างเป็นเส้นตรงจะถูก polarized บนพื้นผิวของซีโอไลต์ที่ถูกดูดซับทำให้มีโครงสร้างเป็นมุมงอ, เกิดได้ในรูพรุนที่มี site proximity ใกล้กันเท่านั้น, การดูดซับของสารบน site ของซีโอไลต์นี้จะเกิดการดูดซับที่แข็งแรงและแบ่งได้ดังนี้:

- การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จะเกิดขึ้นเพียงชั้นที่ติดกับผิว (monolayer) เท่านั้น ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับ interaction ของสารนั้นกับ site เป็นหลัก, ลักษณะใกล้เคียง site จะมีผลอย่างมาก ส่วนขนาดและปริมาณรูพรุนจะมีผลน้อยมาก.

- การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) อาจเกิดขึ้นได้เป็นหลายชั้น, ความแข็งแรงในการดูดซับจะต่ำกว่า chemisorption แต่ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นกับขนาดและปริมาตรรูพรุนเป็นหลัก. อย่างไรก็ตามการดูดซับแบบ chemisorption สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการดูดซับแบบ physisorption ในชั้นการดูดซับถัดมาได้ กล่าวคือ ในรูพรุนขนาดเล็กที่สารสามารถดูดซับได้เพียง monolayer จะมี adsorption strength ที่แข็งแรงกว่าอย่างมาก และในรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น adsorption strength จะลดลงแบบ exponential, เนื่องจากสัดส่วนของสารที่ถูกดูดซับแบบ physisorption เพิ่มขึ้นมากกว่าแบบ chemisorption เมื่อประกอบกับความสามารถในการคัดสรรการแยกด้วยขนาด, สามารถที่จะเลือกใช้ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนและความเป็นขั้วที่เหมาะสมในการแยกสารได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้น.



- อุณหภูมิ

โดยทั่วไปแล้วการดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีสมบัติทาง thermodynamic เป็นแบบ exothermic เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อัตราการดูดซับลดลง แต่การคายซับจะเพิ่มมากขึ้น. อย่างไรก็ตาม การแพร่ (diffusion) มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับในรูพรุนจุภาค อุณหภูมิจึงมีส่วนช่วยให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเช่นกัน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ไม่ดี หากโมเลกุลที่ดูดซับอยู่ก่อนไม่แพร่เข้าไปในรูพรุนด้านใน, การแพร่จึงเปรียบเสมือนการคายซับจากตำแหน่งหนึ่งไปดูดซับอีกตำแหน่งหนึ่งภายในรูพรุน.

โมเลกุลของสารก่อนถูกดูดซับจะมีพลังงานศักย์ที่สูงอยู่ค่าหนึ่ง เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นที่ pore mouth ทำให้สารมีพลังงานลดลงอย่างมาก, พลังงานที่คายออกมานี้เรียกว่า พลังงานการดูดซับ (adsorption energy), โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับนั้นจะมีความเสถียรมากขึ้น. การที่โมเลกุลของสารถัดไปจะเข้ามาดูดซับได้ โมเลกุลของสารจำเป็นจะต้องเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ส่วนที่ลึกเข้าไป เพื่อที่จะเกิดที่ว่างให้สารโมเลกุลต่อไปสามารถดูดซับได้ ซึ่งจำเป็นต้องให้พลังงานค่าหนึ่ง ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าค่าพลังงานการดูดซับ ณ ตำแหน่งนั้น, จึงจะสามารถทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ต่อไป. พลังงานที่ใช้ในการคายซับภายในรูพรุนเพื่อให้เกิดการแพร่นี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้นของการแพร่ (Activation Energy of diffusion) และพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแพร่ผ่านภายในรูพรุนจะสูงขึ้น เนื่องจากมีสัดส่วนของโมเลกุลที่มี kinetic energy มากกว่า activation energy of diffusion. อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลในซีโอไลต์ก็จะลดลง เนื่องจากมีการแข่งขันระหว่างการดูดซับและการคายซับนั่นเอง, เรียกกลไกการแพร่นี้ว่า การแพร่แบบดูดซับ (adsorption diffusion) ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลเป็นอย่างมากต่อ adsorption selectivity โดยจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงแคบๆ เท่านั้น ที่ทำให้เกิดการคัดสรรการดูดซับที่ดี.

นอกจากการแพร่ในรูพรุนแล้ว การแพร่ระหว่างอนุภาคซีโอไลต์ก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน เนื่องจากซีโอไลต์มีอนุภาคขนาดเล็ก (0.5-10  $\mu\text{m}$ ) จึงไม่สามารถใช้งานได้ในลักษณะอนุภาคเดี่ยว แต่ต้องขึ้นรูปเป็นเม็ดขนาดประมาณ 2-5 mm โดยอาศัยการเชื่อมยึดอนินทรีย์ (inorganic binder) ให้อนุภาครวมกันเป็นก้อนโดย pellet จะประกอบด้วยอนุภาคซีโอไลต์ที่ยึดกันด้วย binder ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคขึ้นใน pellet, การแพร่ในช่องว่างนี้จะมีผลต่ออัตราการดูดซับ โดยการแพร่ที่ดีจะช่วยให้การดูดซับเกิดได้เร็วขึ้นแต่จะไม่มีผลต่อการคัดสรรการดูดซับ กล่าวคือ การแพร่จะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และโมเลกุลขนาดเล็กจะแพร่ได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่. จะเห็นได้ว่าทั้งขนาดและรูปร่างโมเลกุลของสาร, ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการ

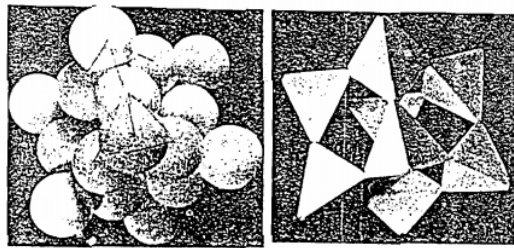
ดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับและการคัดสรรการดูดซับ ซึ่งจะต้องพิจารณาเป็นกรณีๆ ร่วมกับผลการทดลอง ซึ่งแสดงในลักษณะของสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ หรือที่เรียกว่า ไอโซเทอรัมของการดูดซับ (adsorption isotherm) นั้นเอง.

### ญ) ชนิดของซีโอไลต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซ

ตัวอย่างซีโอไลต์ที่นิยมใช้ในการดูดซับก๊าซ เช่น

#### 1. ซีโอไลต์ A

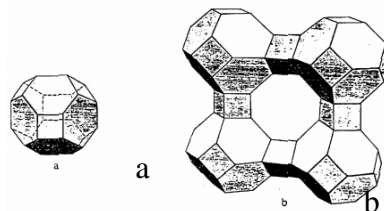
ซีโอไลต์ A เป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ในกลุ่มที่ 3 ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบ  $D_4R$  ตามการจัดจำแนก ดังรูปที่ 13.



รูปที่ 13. โครงสร้าง  $D_4R$  ของซีโอไลต์ A (อาณัติ และ ยุทธเกียรติ 2536).

ซีโอไลต์ A ประกอบด้วยรูปทรงหลายเหลี่ยม 2 ชนิด คือ

รูปทรงสี่หน้า หรือ  $D_4R$  2 โมเลกุล จับตัวกันเป็นรูปลูกบาศก์ดังแสดงในภาพที่ 13 และรูปทรงสี่หน้า 24 โมเลกุล จับตัวกันเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้าหรือทรง  $\beta$  รูปที่ 14.



รูปที่ 14. การจับตัวเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้า (truncated octahedral) ในซีโอไลต์ A (อาณัติ และ ยุทธเกียรติ 2536).

## 2. องค์ประกอบของซีโอไลต์ A

ตามปกติซีโอไลต์ A ประกอบด้วย 24 โมเลกุลของรูปทรงสี่หน้าโดยเป็น 12 โมเลกุลของ  $\text{AlO}_4$  และ 12 โมเลกุลของ  $\text{SiO}_4$  และมีน้ำประกอบอยู่ 27 โมเลกุลโดยมีการสลับกันไปมาของ  $\text{AlO}_4$  และ  $\text{SiO}_4$  ภายในโมเลกุลและอัตราส่วนของ Si/Al เป็น 1/1.

โดยปกติซีโอไลต์ A จะถูกสังเคราะห์อยู่ในรูปของโซเดียมไอออน ส่วนในรูปของแคตไอออนตัวอื่นสามารถเตรียมได้โดยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุในสารละลายของแคตไอออนนั้นๆ.

## 3. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ A

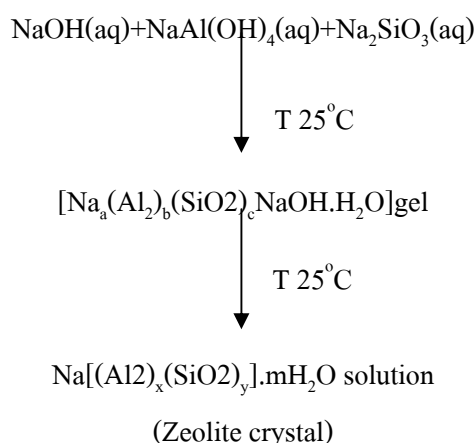
ซีโอไลต์ A จะถูกสังเคราะห์ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล โดยการตกผลึกซีโอไลต์ในระบบที่เป็นสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสม, โดยมีสภาวะทั่วไปของการสังเคราะห์ดังนี้:

มีสารตั้งต้นที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา.

ทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีค่า pH สูง.

อุณหภูมิต่ำและความดันในปฏิกิริยาต่ำ.

ส่วนประกอบของเจลมีความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวดเพื่อให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย เจลนี้คือสารประกอบโลหะของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำอยู่มากซึ่งเตรียมมาจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย สารตั้งต้นที่ว่องไว ของแข็งที่แขวนลอยหรือสารอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ว่องไว เช่น metacalin อาจเขียนสมการที่เกิดผลึกซีโอไลต์ได้ดังนี้:



อาจเตรียมเจลจากสารตั้งต้นที่ละลายน้ำ เช่น  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$  และ  $\text{NaOH}$  ซึ่งจะใช้ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในการเตรียมเจลที่จะเป็นซีโอไลต์ต่างๆ.

#### 4. สมบัติของซีโอไลต์ A

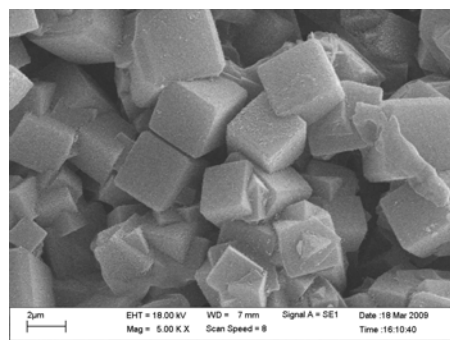
สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ A แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6. สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ A (Breck (1974)).

Parameter	Property
Form	Free flowing power
Color	White
Crystal shape	Cubic
Mean particle size	4-6 micron
Bulk density	25-30 lb/ft <sup>3</sup>
Weight loss at 800 °C	18-22%
pH of 1% dispersion	10.1-11.1
Ion exchange capacity	5.6 meq/g zeolite (7.0 meq/g anhydrous basis)
Calcium exchange capacity	3.0 mg $\text{CaCO}_3$ /g zeolite (anhydrous basis)

#### 5. สมบัติทางกายภาพ

รูปร่างผลึกจะมีรูปร่างเฉพาะ โดยปกติจะเป็นแบบ penetration twins ดังรูปที่ 15 ซีโอไลต์ A จะมีการกระจายอนุภาคอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอนโดยทั่วไปมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.9-2.3 g/ml ซึ่งความหนาแน่นของซีโอไลต์ A จะเปลี่ยนไปตามชนิดของไอออนของโลหะและปริมาตรรูพรุน.



รูปที่ 15. scanning electron ของซีโอไลต์ 5A (อาน์ติ และ ยุกทเกียรติ 2536).

## 6. สมบัติทางเคมี

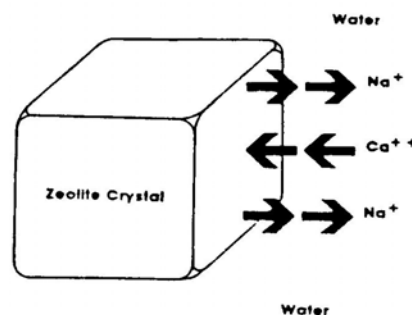
ซีโอไลต์ A สามารถเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ P ได้จากการทำปฏิกิริยากับด่างแก่ในสภาวะที่เหมาะสม และสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ไฮดรอกซีโซดาไลต์. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ A จะพบว่ามีซีโอไลต์ P ปนมาด้วยเสมอ, ซีโอไลต์ P ไม่สามารถเปลี่ยนกลับมาเป็นซีโอไลต์ A ได้อีก แต่จะเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกซีโซดาไลต์.

## 7. สมบัติในการดูดซับ

เมื่อทำการไล่น้ำออกจากโมเลกุลของซีโอไลต์โดยให้ความร้อนที่ 350-400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง รูพรุนในโมเลกุลซีโอไลต์จะว่างเปล่าและสามารถดูดซับโมเลกุลอื่นๆ ได้. จากสมบัตินี้จึงมีการนำไปใช้ในการแยกแยกสารบางอย่างออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุล.

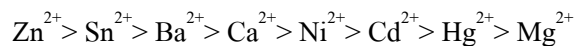
## 8. สมบัติในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน

แคตไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนกับซีโอไลต์ จะเกาะอยู่ที่โครงสร้างรูปทรงสี่หน้าของซีโอไลต์ ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายด้วยแคตไอออนตัวอื่นๆ ในสารละลายเข้มข้นซีโอไลต์มีความจุสูงถึง 3-4 meq/g (milliequivalents per gram) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณอะลูมินาในโครงสร้างผลึก. นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีก, โดยค่าความจุของการแลกเปลี่ยนแคตไอออนนั้นบอกรให้ทราบถึงจำนวนอะลูมิเนียมที่เข้าไปแทนที่ซิลิกอนในโครงสร้างรูปทรงสี่หน้า, การแลกเปลี่ยนประจุจะไม่ทำให้สมบัติของซีโอไลต์ A เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงนำซีโอไลต์ A มาใช้ประโยชน์ในการกำจัดความกระด้างของน้ำ โดยมีกลไกดังต่อไปนี้ (รูปที่ 16).



รูปที่ 16. กลไกการเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ A (อาณัติ และ ยุทธเกียรติ 2536).

มีการค้นพบสมบัติในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์มานานแล้ว ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ดี เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็น 3 มิติ ทำให้เกิดช่องว่างที่แคตไอออนเข้าไปอยู่ได้ โดยไม่เกิดการบวมหรือการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง. จากสมบัติในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์ ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนของไดวาเลนต์ (divalent) ได้ โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์สรุปได้ดังนี้:



การแลกเปลี่ยนประจุจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแคตไอออน เช่น ขนาดและประจุของแคตไอออน, อุณหภูมิที่ใช้, ความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย, ชนิดของแอนไอออนที่รวมตัวกับแคตไอออนในสารละลาย, ตัวทำละลาย. การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน aqueous solution ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ pH ของสารละลายที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออน และเวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน.

จำนวนแคตไอออน M ที่ใช้ในการดุลประจุของซีโอไลต์จะขึ้นกับจำนวน  $\text{AlO}_2^-$  ในโครงสร้างframework และจำนวนประจุ n ตัวอย่างเช่น จำนวน monovalent cation จะเท่ากับ จำนวน  $\text{AlO}_2^-$  ในซีโอไลต์และจำนวน divalent cation จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวน  $\text{AlO}_2^-$  เป็นต้น.

### ซีโอไลต์ X

ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่ประกอบด้วยผลึก  $\text{SiO}_4$  และผลึก  $\text{AlO}_4$  รวมทั้งสิ้น 192 หน่วย และมีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน ซึ่งประกอบด้วยโซคาไลต์จำนวน 9 หน่วย, เชื่อมต่อกันด้วยหน่วยโครงสร้างทรงเหลี่ยม D6R และรูพรุนของผลึกประกอบด้วยวงออกซิเจนของ  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  จำนวน 12 อะตอม, ขนาดของรูพรุนขึ้นกับชนิดของโลหะประจุบวกที่ใช้สำหรับดุลประจุลบบนอะตอมอะลูมิเนียม เช่นเดียวกับซีโอไลต์ชนิด, โดยจำนวนอะตอมอะลูมิเนียมต่อหน่วยผลึกอยู่ในช่วง 70-96 อะตอม สำหรับซีโอไลต์ชนิด X ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 7.

ตารางที่ 7. ขนาดของรูพรุนชนิด X ที่ดุลประจุด้วยโลหะหมู่ I และหมู่ II (Ruthven 1988).

ชนิด	อัตราส่วน Si/Al	ขนาดรูพรุน (Å)
NaX	1.0-1.5	8.4
CaX	1.0-1.5	8.0

โดยทั่วไปคุณสมบัติของพื้นผิวซีโอไลต์ขึ้นกับสัดส่วน Si/Al โดยความมีขั้วจะลดลงเมื่อสัดส่วน Si/Al เพิ่มขึ้น, เนื่องจากจำนวนประจุของอะลูมิเนียมลดลง, ดังนั้น สัดส่วน Si/Al จึงเป็นดัชนีหนึ่งที่กำหนดคุณสมบัติในการดูดซับของซีโอไลต์แต่ละชนิด ซึ่งการดูดซับบนพื้นผิวซีโอไลต์ที่มีสัดส่วน Si/Al น้อยกว่า 8-10 มักได้รับอิทธิพลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต, เนื่องจากประจุลบของอะตอมอะลูมิเนียมและคุณสมบัติการถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นขั้วของโมเลกุลสารประกอบแต่ละชนิด.

### การดูดซับก๊าซ

การดูดซับเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นผิวของของแข็งที่เรียกว่า ตัวดูดซับ, โดยโมเลกุลของก๊าซจะเกาะติดบนพื้นผิวและปลดปล่อยพลังงานออกมา, การเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวสามารถจำแนกได้เป็นการเกาะติดด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยพันธะเคมี ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของก๊าซที่ถูกดูดซับและสมบัติพื้นผิวของตัวดูดซับ, โดยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างมวลหรือระหว่างโมเลกุล, แรงดึงดูดระหว่างขั้ว โดยทั่วไปพบว่าความสามารถในการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพหรือที่เรียกว่า การดูดซับเชิงกายภาพ (physical adsorption) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น, ในขณะที่การดูดซับเนื่องจากพันธะเคมี หรือที่เรียกว่า การดูดซับเชิงเคมี (chemisorption) เป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน. อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้การดูดซับสำหรับการแยกก๊าซผสมโดยไม่เกิดปฏิกิริยา มักพิจารณาให้เป็นเพียงการดูดซับเชิงกายภาพเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นการแยกสารเจือปนออกเพื่อให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น หรือเป็นการแยกก๊าซผสมออกจากกัน, โดยเลือกใช้ลักษณะความแตกต่างของสมดุลการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และอัตราการดูดซับระหว่างแต่ละองค์ประกอบของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่เลือกไว้ ซึ่งกรณีที่สมดุลการดูดซับมีความใกล้เคียงกัน.

การแยกก๊าซผสมโดยตัวดูดซับชนิดนั้น ยังคงสามารถทำได้ถ้าอัตราการดูดซับของแต่ละองค์ประกอบของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของกระบวนการแยกก๊าซผสมโดยการดูดซับ, การดูดซับเป็นวิธีการที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ, มีผู้ให้คำนิยามของการดูดซับไว้มากมาย เช่น การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ, ไม่ว่าจะเป็สถานะก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง, โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวเป็นที่เกาะจับสารถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งการเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวสามารถจำแนก

ออกมาเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยพันธะเคมีซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวถูกดูดซับ และสมบัติของตัวพื้นผิวการดูดซับ (Eckenfelder 1981, McCabe 1993).

### กลไกการดูดซับ

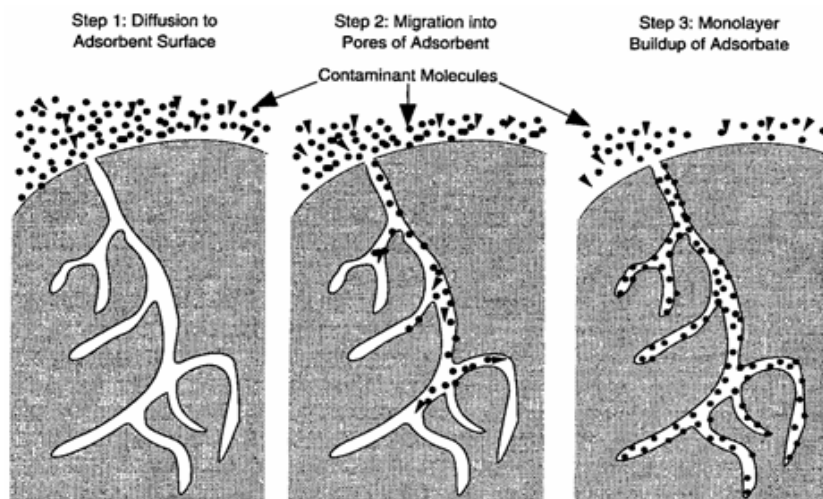
การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังรูปที่ 17 โดย

ระยะที่ 1 โมเลกุลของสิ่งสกปรกในสารละลายจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ.

ระยะที่ 2 โมเลกุลของสิ่งสกปรกจะแพร่กระจาย เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ.

ระยะที่ 3 เกิดการดูดติดผิวรูพรุน ระหว่างสิ่งสกปรกและพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจจะดูดติดด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน.

ลักษณะการดูดซับ มี 2 ลักษณะ ได้แก่:



รูปที่ 17. กระบวนการดูดซับของสารดูดซับ (กรองกาญจน์ 2530).

### แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption Force)

การดูดซับตัวถูกดูดซับจากสารละลายไม่ว่าสารละลายจะอยู่ในสถานะใดๆ จะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (physical force) และแรงทางเคมี (chemical force), แรงทางกายภาพได้แก่แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waal's force) รวมทั้งแรงไฟฟ้าเคมีจะเป็นผลมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) ในช่วงสั้นๆ รวมถึงแรงที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น ion exchange ส่วนแรงทางเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านหน้าจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) พันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) (รุ่งระวี และ นิสิตา 2536-2537).



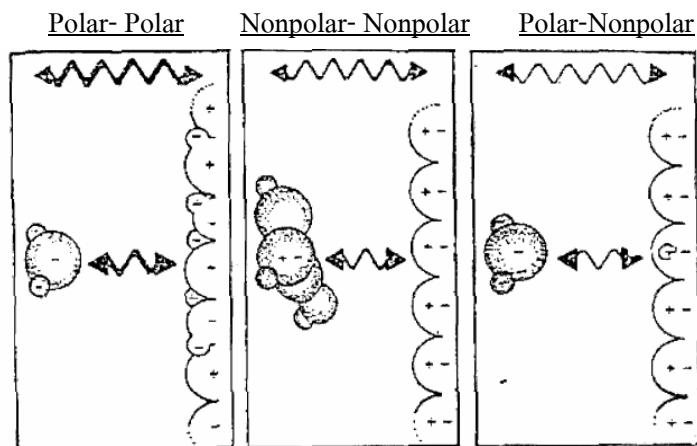
ตัวอย่างแรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ เช่น

- แรงวานเดอร์วาลส์ (van der Waal's Force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือ โมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่ระเบียบในอะตอมหรือ โมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น (Sposito 1989) และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้, การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับด้วยแรงอ่อนๆ , ดังนั้นการคายการดูดซับจะกระทำได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เนื่องจากสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย.

- แรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force)

เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว (รูปที่ 18).



รูปที่ 18. การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต (Szostak 1989).

ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน (Breck 1974).

แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (เช่น อินทรีย์สารและอานกัมมันต์) ที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน.

แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect), โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน.

#### - แรงทางเคมี

เป็นการยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน, แรงทางเคมีมีลักษณะที่สำคัญ คือ เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน, มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางกายภาพ. นอกจากนี้ แรงทางเคมียังไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบทางเคมี.

### ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1. ธรรมชาติของตัวดูดซับ

- พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ คือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น. อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี, โครงสร้างรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น, เนื่องจากถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น, แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง.

- ขนาดของวัตถุ

ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น, แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ที่รูพรุนนี้, ความสามารถในการดูดซับจึงไม่ขึ้นกับขนาดวัตถุ.

#### 2. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ธรรมชาติของสารถูกดูดซับก็มีความสำคัญเช่น ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย, เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน, เมื่อน้ำหนักและขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์, เมื่อจำนวน

คาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น, เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง, ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อตัวถูกดูดซับมีสภาพมีขั้ว (polarity) เพิ่มขึ้น, เนื่องจากการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น.

### 3. สภาพแวดล้อม

สภาพแวดล้อมก็สัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับ เช่น การยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน, ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยจึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย, กล่าวคือถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่วนกรณีที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน, ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น. อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลต่อการดูดซับ (Breck 1974).

### 4. จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุน เกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecule transfer) ของสารละลายสามารถอธิบายได้ดังนี้ (Eckenfelder 1996).

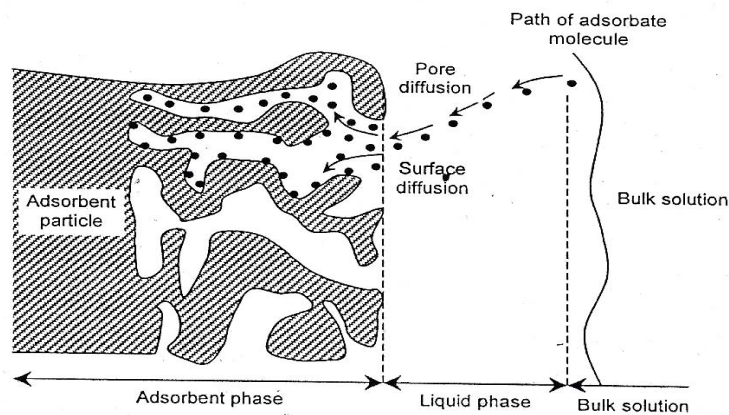
การดูดซับขั้นแรก เป็นการขนส่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจากสารละลายโดยวิธีการแพร่ไปยังพื้นผิวภายนอกของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับเรียกว่า การแพร่ภายนอก (external of film diffusion).

การดูดซับขั้นที่สอง เป็นการแพร่ภายใน (internal diffusion) เกี่ยวข้องกับการขนส่งผ่านชั้นฟิล์มของตัวถูกดูดซับจากผิวหน้าของอนุภาคของตัวดูดซับเข้าสู่พื้นผิวภายในของตัวดูดซับ (film transport), โดยวิธีการแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ และเคลื่อนที่ไปตลอดพื้นผิวรูพรุนของแข็งนั้น (surface diffusion).

การดูดซับขั้นที่สาม เป็นการดูดซับของตัวถูกดูดซับที่ถูกละลายอยู่ภายในพื้นผิวของรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดจากการแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (pore diffusion) กล่าวได้ว่าเป็นการ

ขนส่งภายในอนุภาคของตัวดูดซับ (intraparticle diffusion) การดูดซับในขั้นนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มากจึงไม่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่โดยรวม.

อัตราการดูดซับทั้งหมดควบคุมโดยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งการแพร่ภายใน และการแพร่ภายนอก, อย่างไรก็ตาม การควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาในบางระบบอาจเกิดขึ้น ระหว่างการขนส่งกันภายในอนุภาคของตัวดูดซับและการแพร่ภายนอก, ขั้นตอนการดูดซับที่ผิว ของตัวดูดซับที่มีรูพรุนแสดงดังรูปที่ 19.

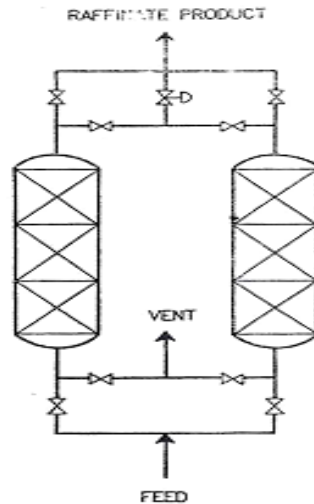


รูปที่ 19. ขั้นตอนการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน (Montgomery 1985).

Douglas (1994) ทำการศึกษากระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน เป็นกระบวนการในการ แยกองค์ประกอบของก๊าซผสม, โดยอาศัยคุณสมบัติการดูดซับองค์ประกอบบนตัวดูดซับที่แตกต่างกัน และสมดุลการดูดซับที่ความดันต่างกัน, การแยกองค์ประกอบของก๊าซผสมดังกล่าว จะอาศัย หลักการของการดูดซับบนของแข็งที่มีรูพรุนเมื่อก๊าซสัมผัสกับของแข็งก็จะถูกดูดซับเอาไว้ เช่น การดูดซับกลิ่นของถ่านกัมมันต์, การดูดซับน้ำของซิลิกาเจล และการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จาก อากาศ เป็นต้น. ระบบดูดซับจะใช้งานได้ดีจะต้องเลือกตัวดูดซับองค์ประกอบที่ต้องการแยก และ ระบบการดูดซับที่เหมาะสม.

การทำงานของหอดูดซับระบบสลับความดันประกอบด้วยหอ 2 หอ, ภายในบรรจุตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติสามารถดูดซับก๊าซที่ไม่ต้องการออกได้, เมื่อก๊าซถูกป้อนเข้ามา ผ่านวาล์วที่ความดันสูงเข้าหอ 1 ภายในหอจะเกิดการดูดซับขึ้น, เมื่อก๊าซผ่านออกทางด้านบนเข้าสู่

หอ 2 ที่ความดันบรรยากาศ, ทำให้เกิดการคายซับเมื่อถึงเวลาครบรอบ หอ 1 จะเปลี่ยนหน้าที่จากหอดูดซับมาเป็นหอคายซับ ส่วนหอ 2 จะทำหน้าที่เป็นหอดูดซับแทน ดังแสดงในรูปที่ 20.



รูปที่ 20. ระบบดูดซับแบบสลับความดัน.

Skarstrom (1959) ศึกษากระบวนการทำอากาศแห้ง และทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ ด้วยวิธีหอดูดซับระบบสลับความดัน, ต่อมา Stewart และ Heck (1969) ได้ชี้ให้เห็นว่าหอดูดซับระบบสลับความดันเป็นระบบที่ต้องการพลังงานสำหรับการแยกก๊าซและเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าหอดูดซับแบบอื่น, หลังจากนั้น Turnock และ Kadlec (1971) และ Kowlen และ Kadlec (1972) ศึกษากระบวนการแยกไนโตรเจน ร้อยละ 28.6 ของปริมาตรไนมีเทน ใช้ตัวดูดซับแบบโมเลกุลซีฟ ชนิด 5A ขนาด 42 ถึง 60 mesh และขนาด 20 ถึง 50 mesh พบว่า สามารถแยกได้บริสุทธิ์ตามต้องการ.

Bird and Granville (1973) ศึกษาการแยกไนโตรเจนออกจากไฮโดรเจนโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ, ผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารสามารถเพิ่มขึ้น โดยการลดอัตราการไหลหรือเวลาครบรอบของระบบ.

Vanghan (1987) ศึกษากระบวนการผลิตและการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A พบว่า ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูปทรงเรขาคณิตและมีรูพรุนแตกต่างกัน, อีกทั้งยังสามารถปรุงแต่งโครงสร้างให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ ซึ่งเป็นผลดีในการนำไปใช้เป็นสารดูดซับในกระบวนการแยกได้ดีโดยขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน ทำให้ซีโอไลต์แต่ละชนิดนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย

และแตกต่างกัน เช่น การแยกของผสมระหว่าง ฟรุกโตสและกลูโคส สามารถใช้ซีโอไลต์ชนิด  $\text{Ca}^{2+}$  Y การแยกพาราฟินใช้ซีโอไลต์ 5A เป็นต้น.

ยงยุทธ (2541) ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซมีเทน, อีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์ชนิด NaA, NaX และ NaY ที่อุณหภูมิระหว่าง 35-100 องศาเซลเซียส วัดได้โดยการไหลผ่านทะลุหลอดดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด แต่ละไอโซเทอมสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และฟรอนดิช ในช่วงความดันย่อย 20-160 กิโลปาสกาล. อย่างไรก็ตาม ไอโซเทอมมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับค่าคงที่ของการดูดซับของแลงเมียร์ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิสอดคล้องกับสมการของเวนต์ฮอฟฟ์ก๊าซโพรเพนถูกดูดซับได้ดีกว่าก๊าซอีเทนและมีเทน ตามลำดับ, ในขณะที่ ปริมาณการดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับก๊าซมีเทน มากกว่าการดูดซับก๊าซอีเทนและโพรเพนตามลำดับ. แม้ซีโอไลต์ชนิด NaY มีพื้นที่การดูดซับมากกว่าชนิด NaX และ NaA ตามลำดับ, แต่พื้นที่การดูดซับของซีโอไลต์ชนิด NaA ถูกใช้ประโยชน์ได้มากกว่าพื้นที่การดูดซับของซีโอไลต์ชนิด NaX และ NaY ตามลำดับ. ผลของการดูดซับเพียงชั้นเดียว ณ อุณหภูมิต่ำ สามารถแสดงด้วยภาพการดูดซับบนตำแหน่งไอออนบวกของภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์เป็นระนาบแบบสม่ำเสมอ เฉพาะปริมาณความร้อนของการดูดซับก๊าซมีเทนบนซีโอไลต์ชนิด NaA และ NaX น้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น ณ จุดเดือดปกติ.

Labasque *et al.* (2001) ศึกษาการใช้ซีโอไลต์รวมตัวกับตัวประสานอย่างน้อย 1 ชนิด ในการแยกก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนจากอากาศโดยใช้กระบวนการ VSA (Vacuum Swing Adsorption) เพื่อให้ได้ออกซิเจนบริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งออกซิเจนที่ได้มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 93.

วายุ และคณะ (2545) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาเม็ดซีโอไลต์และผสมตัวประสานชนิดที่มีผลต่อขนาดรูพรุน ความแข็งแรงของเม็ดซีโอไลต์, โดยทำการศึกษาโดยการกรองโมเลกุลก๊าซที่ได้ พบว่า เมื่อทำการเผาเม็ดซีโอไลต์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำลง และกักเก็บก๊าซออกซิเจนได้ร้อยละ 5.

Pacaud *et al.* (1944) ได้ทำการศึกษาถึงการใช้ตะแกรงโมเลกุลซีโอไลต์ 5A ที่เตรียมจากซีโอไลต์ 4A ด้วยการใส่ตัวประสานเช่น Kaolinite โดยใช้กระบวนการ PSA (pressure swing adsorption) และ TSA (temperature swing adsorption) เพื่อทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ), แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และไฮโดรคาร์บอน.

Rode *et al.* 2001 ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ LSF (Low Silica Faujasite) และซีโอไลต์เอ็กซ์ สำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำโดยการควบคุมสัดส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) และ อีออนของโพแทสเซียม.

Yang *et al.* 2002 ได้ทำการศึกษากระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัสดุดูดซับที่ อุณหภูมิสูง, โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลของวัสดุดูดซับ การดูดซับด้วย Carbon-based โดยประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ, ผลคือประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงแต่จะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง และผลกระทบของพื้นที่ผิวต่อ ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีความสำคัญมากนัก, เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ วัสดุ ที่ใช้ในการดูดซับออกไซด์ โดยปกตินิยมใช้ CaO และ Mg การใช้ ซีโอไลต์ ซึ่งสำคัญมากในการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ และการใช้สารประกอบ Hydrotalcitelike (HTLcs) ในการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงโดยงานวิจัยนี้มีความสำคัญอย่างมากในการศึกษาวิจัยการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ในอนาคตต่อไป.

Walton *et al.* 2006 ได้ทำการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ซีโอไลต์ Na-Y และ Na-Xn ในการแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นค่า ซึ่งได้แก่  $Li^+$ ,  $K^+$ ,  $Rb^+$  และ  $Cs^+$  เพื่อหาไอโซเทอมของการดูดซับ ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จะใช้อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 1.23 และซีโอไลต์ Na-Y เท่ากับ 2.35 ในการแลกเปลี่ยนไอออนจะใช้สารละลายต่างที่กำหนดไว้ที่ความเข้มข้น 1 M 20 ml, ผสมรวมกับซีโอไลต์ 2 กรัม กวนที่อุณหภูมิ 350 K ทำประมาณ 4 ครั้งจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้ว กรอง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 673 K จากนั้นนำไปดูดซับ  $CO_2$  ผลการทดลอง พบว่า ค่าความสามารถ ในการดูดซับ  $CO_2$  ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $Li^+$  จะทำการแลกเปลี่ยนได้ดีกว่าไอออนบวก ชนิดอื่นๆ ซึ่งตรงตามทฤษฎีของ Lewis โดยกล่าวว่าอะตอมของออกซิเจนในโครงข่ายของโลหะที่เป็นค่าที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนในซีโอไลต์จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของไอออนบวก.

Zhonglin *et al.* 2007 ศึกษาการปรับปรุงความสามารถในการดูดซับของ ซีโอไลต์ขึ้นรูปซึ่ง มี kaolin เป็นวัสดุประสานและแซในโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า kaolin สามารถเปลี่ยนเป็น zeolite ได้เนื่องจากการใช้เบส. การดัดแปลงตัวดูดซับนั้นจะให้ผลตามที่ต้องการ คือเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่มีการดัดแปลง พบว่า ตัวดูดซับที่ทำการเปลี่ยนแปลงนั้นมีความจุในการดูดซับที่สูงขึ้น และมีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น, เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่มาก แต่มีค่ากระจายที่ลดลง % เนื่องจากการเปลี่ยน kaolin เป็นซีโอไลต์.

อารีญา (2545) ศึกษาผลของตัวดูดซับชนิดถ่านที่เตรียมจากการต้มกะลามะพร้าวในสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้นร้อยละ 70, โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่ากะลามะพร้าวขนาด 8x8 ตารางเซนติเมตร จะเปลี่ยนเป็นถ่านหมดหลังต้มนาน 3 ชั่วโมงขึ้นไป, การดูดซับไอโอดีนของถ่านดูดซับมีค่า ระหว่าง 272-342 มิลลิกรัมต่อกรัม, สมดุลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของเฮนรี โดยที่ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรีมีค่า 0.0045, 0.0127 และ 0.0192 มิลลิโมลต่อกรัม บรรยากาศที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 องศาเซลเซียสตามลำดับ. ส่วนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยที่ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดมีค่า 0.0182 , 0.0308 และ 0.0340 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ -10, 0 และ 30 องศาเซลเซียสตามลำดับ.

ชันทอง (2553) ศึกษาผลของการเตรียมเมมเบรนไคโตซานเพื่อนำมาใช้ในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซมีเทนในระบบก๊าซชีวภาพ, ไคโตซานที่ใช้มีมวลโมเลกุลและร้อยละการกำจัดหมู่เอซีทิล เท่ากับ  $9.5 \times 10^7$  คอลตัน และ  $90 \pm 5$  ตามลำดับ. ซีโอไลต์ A ที่ใช้มีขนาดของรูพรุนพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ  $2551.6 \text{ \AA}$  13.9 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0137 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ. เมมเบรนที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ได้แก่ เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน, เมมเบรนไม่เชื่อมขวางไคโตซาน, เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์, เมมเบรนไม่เชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ และเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซานซีโอไลต์ชนิดบวมตัวด้วยน้ำ. ใน การเชื่อมขวางเมมเบรนไคโตซานใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ปริมาณการใช้ซีโอไลต์ A ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก พบว่า เมมเบรนที่มีศักยภาพมากที่สุดคือเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ เมื่อใช้เมมเบรนแห่งทดสอบกับก๊าซแห้งให้ค่าการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เท่ากับ  $66.8 \pm 6.4$ ,  $4.0 \pm 0.6$ ,  $387.5 \pm 26.1$  และ  $7.4 \pm 0.6$  แบนเนอร์ ตามลำดับ. ค่าการเลือกสรรก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน, ไฮโดรเจนต่อมีเทน และไนโตรเจนต่อ มีเทน เท่ากับ  $16.5 \pm 1.6$ ,  $96.9 \pm 1.5$  และ  $1.9 \pm 0.1$  ตามลำดับ, แต่ผลข้างต้นจะเปลี่ยนไปถ้า เมมเบรนและ/หรือก๊าซไม่แห้ง, โดยกรณีที่ใช้ก๊าซเปียกและเมมเบรนเปียก ค่าการซึมผ่านก๊าซและค่าการเลือกสรรคู่ก๊าซ จะเป็น  $788.0 \pm 17.8$  แบนเนอร์,  $20.6 \pm 2.2$  แบนเนอร์,  $2102.1 \pm 31.8$  แบนเนอร์,  $33.7 \pm 0.9$  แบนเนอร์,  $38.2 \pm 0.2$ ,  $101.9 \pm 0.3$  และ  $1.6 \pm 0.1$  ตามลำดับ. ผลการศึกษา สมรรถนะการแยกก๊าซของเมมเบรน 2 ชนิด คือเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซานและเมมเบรน เชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรกรณีศึกษา พบว่า เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ มีค่าสมรรถนะการแยกก๊าซสูงกว่า



เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน สอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอนุภาค และสอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอนุภาคจากเมมเบรนแห้ง/ก๊าซแห้ง.

จิตตะเสน จรุงวัฒน์เลาะห์ (2541) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มและลดความดันที่ใช้แยกอากาศ, โดยกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน เพื่อแยกอากาศในการผลิตออกซิเจนได้มากกว่าร้อยละ 99, โดยเพิ่มความดันโดยก๊าซผลิตภัณฑ์สามารถทำให้ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น, โดยปริมาณก๊าซจะเพิ่มตามสัดส่วนความดันสูงและความดันต่ำเพิ่มขึ้น และเวลาที่ใช้เพิ่มความดัน เวลาที่ใช้ลดความดัน ตามลำดับ.

Warmuizinski และคณะ (1999) ได้ศึกษาจำลองกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันสำหรับแยกก๊าซมีเทนและก๊าซไนโตรเจน, โดยศึกษาผลของความดันต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ, โดยความบริสุทธิ์จะสูงสุดที่ความดันหนึ่ง และลดลงเมื่อเพิ่มความดันซึ่งส่งผลมาจากกระบวนการเลือก (Selectivity) เนื่องจากไอโซเทอมของมีเทนและไนโตรเจนเป็นแบบไม่เชิงเส้น.

Ko, D. และคณะ (2000) ทำการปรับปรุงกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันเพื่อผลิตออกซิเจนจากอากาศช่วงเริ่มต้นเพื่อลดการใช้พลังงานในการดำเนินการและลดเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว, โดยศึกษาเวลาที่ 14.46 วินาที ความดันกระแสน้ำ 597 kPa ได้ความบริสุทธิ์ร้อยละ 96.4 ดำเนินการ 405 วัฏจักรและใช้เวลา 5857 วินาทีก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว.

Mendes และคณะ (2000) จำลองกระบวนการผลิตออกซิเจนโดยหอดูดซับแบบสลับความดันโดยซีโอไลต์ชนิด 5A โดยพบว่าแรงขับเคลื่อนภายในวัสดุเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Driving force, LDF) โดยดำเนินการภายใต้สภาวะวัฏจักรสกร์สตอร์ม ที่มีการปรับความดัน (Equalization) และไม่ปรับความดัน เพื่อศึกษาตัวแปรความดันของผลิตภัณฑ์, อัตราการไหลของกระแสเป่าทิ้ง, อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ และความบริสุทธิ์ผลิตภัณฑ์. จากการศึกษาพบว่าระบบที่มีการปรับความดันจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าที่ดำเนินการในสภาวะเดียวกัน และเมื่อใช้เวลาในการดูดซับมากขึ้นความบริสุทธิ์จะลดลงแต่กระแสผลิตภัณฑ์สูงขึ้น.

Gomes และคณะ (2002) ศึกษาการแยกก๊าซมีเทนออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใหม่ถ่านหิน, โดยมีองค์ประกอบก๊าซ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน และไนโตรเจนโดยใช้ระบบสลับสัญญาณ, โดยใช้คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟเป็นวัสดุดูดซับซึ่งสามารถจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าและดูดซับได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมีเทนและไนโตรเจน, โดยมีความบริสุทธิ์และอัตราส่วน

แยกกลับสูงกว่าร้อยละ 90, เมื่อใช้กระบวนการดูดซับแบบสุญญากาศ ซึ่งให้ประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ที่ดีในการแยกก๊าซมีเทนเพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรมได้.

Yuwen และคณะ (2004) ทดลองผลิตออกซิเจนจากอากาศโดยใช้ซีโอไลต์และศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดอากาศและปริมาณกระแสเป่าที่ถึงต่อกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน เช่นความดันภายในหอดูดซับ โดยพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีผลต่อความดันในการดูดซับ, เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะทำให้มีความดันสูง, เวลาในการดูดซับลดลงทำให้ประหยัดพลังงานในการดำเนินการ และ ความดันที่เหมาะสมในระบบทำการทดลองคือ 0.18-0.25 MPa โดยได้ออกซิเจนร้อยละ 97, อัตราการผลิต 2.01 ลิตรต่อนาที สำหรับหอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 82 mm และความสูง 650 mm.

Simone และคณะ (2006) ทำการศึกษาการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระบบ Vacuum pressure swing adsorption (VSA-PSA) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด 13X โดยป้อนก๊าซผสมที่มีองค์ประกอบ มีเทนร้อยละ 60, คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20 และ ไนโตรเจนร้อยละ 20 พบว่า สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในระดับต่ำกว่าร้อยละ 2 เพื่อเป็นไปตามก๊าซมีเทนที่มีในก๊าซธรรมชาติ, ทำให้สามารถ recovery มากกว่าร้อยละ 80 โดยปราศจากการรีไซเคิล ทำให้สามารถแยกก๊าซมีเทน-ไนโตรเจนได้.

Saeed และคณะ (2002) ศึกษาการดูดซับก๊าซผสม  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  และ  $\text{C}_2\text{H}_4$  บนซีโอไลต์ชนิด 5เอ ที่อุณหภูมิ 303, 373, 573 เคลวิน และความดันเพิ่ม 1000 kPa ตรวจสอบการดูดซับก๊าซด้วย Simple Volumetric จากการศึกษาการดูดซับพบว่า เป็นไปตามสมการแลงเมียร์.

Alongso, V และคณะ (2010) ทำการศึกษาทำความเข้าใจชีวภาพโดยกำจัด  $\text{H}_2\text{S}$  เพื่อปรับอัตราส่วน  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  เพื่อให้ได้คุณภาพเหมือนก๊าซสังเคราะห์ด้วยระบบ PSA ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ทางธรรมชาติ ด้วยอัตราเร็วการไหลเท่ากับ 1 cm/s ความดัน 7 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยอัตราการไหลสารดูดซับก๊าซ  $\text{H}_2\text{S}$  1.39 ม.ก./กรัม ซีโอไลต์.

Amrhein และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาสมบัติของถ่านลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา และได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ่านลอย, โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์, สารละลายโพแทสเซียมไฮ

ดรอกไซด์ และสารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของสารละลายเบส, ความเข้มข้นของสารละลายเบส, ความดันและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน, ความเสถียรของซีโอไลต์, การดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย และวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer).

จากผลการวิเคราะห์พบว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์ Na-PI และซีโอไลต์โพแทสเซียมคาร์บาไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์, สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ตามลำดับ ส่วนสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่เกิดซีโอไลต์สำหรับที่ความดันสูงเกิดซีโอไลต์ Na-PI ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ และ ซีโอไลต์ X ได้จากการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส.

สัญญาภาณ สันธवार และสมชาย พานิชสาส์น (1997) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา, อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อการเตรียมซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินที่โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ, จังหวัดลำปาง. การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเกิดซีโอไลต์จากเถ้าลอย ซึ่งทำที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 3, 6 และ 10 วัน และศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดซีโอไลต์, โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3, 3.5 และ 4 โมลาร์ และทำการทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 วัน มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูงที่สุด, ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน และสามารถดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลช่วงหนึ่งได้.

Querol และคณะ (1997) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โดยทำปฏิกิริยาในระบบปิด มีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ (15-200 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (8-10 ชั่วโมง) และความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ใช้ (0.1-1 โมลาร์) ประมาณค่าความดันระหว่างการเกิดปฏิกิริยามีช่วงอยู่ระหว่าง 0.48 Mpa ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ถึง 1.55 MPa ที่อุณหภูมิ 200

องศาเซลเซียส, โดยใช้ความเข้มข้นของตัวอย่างเท่ากับ 0.055 กรัมต่อมิลลิกรัม ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่ คือ ซีโอไลต์ Na-PI.

Hollman, Steenburggen และ Janssen-Jurkovicova (1999) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายเบส, ความดัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์ Na-PI, Na-X และ Sodalite เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์, สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ระหว่าง 2.0-2.5 มิลลิคิววาเลนซ์ต่อกรัม.

มนตรี ทองคำ (2542) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารตั้งต้นที่ใช้ คือ เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, จังหวัดลำปาง. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเครื่องกวนที่มีการกวนตลอดเวลาที่ทำการทดลอง. ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer) พบซีโอไลต์ชนิดต่างๆ คือ Zeolite P, Chabazite, Nepheline และ Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่นๆ เช่น Sillimanite, Willhendersonite และ Gehlenite เป็นต้น. สภาวะในการสังเคราะห์ที่เหมาะสม คือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 619.44 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์ ซึ่งให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้นจากเถ้าลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 52.20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ซีโอไลต์.

เมตตา เจริญพานิช และ มาริสา สำราญ (2541) ทำการปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยให้เป็นสารประกอบซีโอไลต์, โดยนำเถ้าลอยจากแหล่งโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และ ทางเคมี เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้เป็นสารประกอบซีโอไลต์ด้วยกระบวนการ Alkaline hydrothermal activation ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 4.8 บรรยากาศ เป็นเวลา 24, 72 และ 120 ชั่วโมง ภายใต้การควบคุมสภาวะที่ pH 13.0 โดยพบว่า ในช่วงเวลา 72-120 ชั่วโมง ให้

ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์มากกว่าในการทดลองอื่นๆ โดยได้ซีโอไลต์เพียงชนิดเดียว ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด P.

ไพศาล คงกาญจนาย และ เมตตา เจริญพานิช (2542) ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยใช้เกลืออลิกไนต์จากแหล่งแม่เมาะเพื่อนำมาเป็นสารตั้งต้น, โดยควบคุมความเป็นกรด-ด่าง ที่ 10.0-11.5 ความดันเริ่มต้น 1-5 บรรยากาศ, โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 1.5 °C/min และตั้งอุณหภูมิสูงสุดที่ 180-210 องศาเซลเซียส โดยมีสารเตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นสารกำหนดโครงสร้าง, โดยพบว่า อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา เท่ากับ 100 สามารถสังเคราะห์เป็น ZSM-5 ที่ pH 11 ความดันเริ่มต้น 4 บรรยากาศ ให้ปริมาณซีโอไลต์ ZSM-5 สูงสุดร้อยละ 44 โดยน้ำหนัก, โดยอัตราส่วน ซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 40 พบว่าไม่สามารถผลิตเป็นซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส, แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 180 องศาเซลเซียส พบซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ P เกิดปะปนกัน แต่ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส พบแต่ผลึก ZSM-5 เพียงชนิดเดียว.

เรวดี อนุวัฒนา และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนของอุตสาหกรรมหล่อโลหะและตะกอนน้ำทิ้งอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 90±3 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1-9 ชั่วโมง, โดยศึกษาถึงอัตราส่วนของน้ำต่อซิลิกา และระยะเวลาที่อุณหภูมิถึงผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกซีโอไลต์ พบว่า เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อซิลิกาเพิ่มสูงขึ้น สามารถเร่งอัตราการเกิดผลึกซีโอไลต์, โดยพบว่าอัตราการเกิดผลึกซีโอไลต์ Na-A สูงสุด เมื่อทำปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง.

Katsuki และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาการเกิดสารประกอบซีโอไลต์ ZSM-5 จากการกระตุ้นด้วยซีเอ็นแอลบ, โดยทำการศึกษาในระบบไมโครเวฟและไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 140-160 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟจะมีความเร็วในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้ 3-4 เท่า, โดยมีขนาดผลึก 0.3-5 ไมครอนเมตร พื้นที่ผิวของ ZSM-5 มีค่าเท่ากับ 485.4 ตารางเมตรต่อกรัม.

A. La Iglesia และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ 4A, 13X, Y HZSM-5 จากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตอลูมิเนียม, โดยสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีพื้นที่ผิว 200-300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร.

Querol และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากจีไธลอยในประเทศสหรัฐอเมริกาและยุโรป, โดยสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีมูลค่าต่ำ โดยพบว่ามีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) เพิ่มขึ้น 3 มิลลิอิควิวาแลนต์, โดยได้ทำการทดสอบการดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากอากาศและดูดซับแอมโมเนียในน้ำเสีย, โดยพบว่ามีประสิทธิภาพสูงมาก.

Rajan K. Vempati และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ ZSM-5 จากจีไธลอบและนำมาศึกษาการกำจัด VOC จากน้ำเสีย และ ในอากาศ พบว่าผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่ได้สามารถกำจัดได้มากกว่าร้อยละ 70.

T.Wajima และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาโดยนำจีไธลจากอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษมากระตุ้นด้วย 3M NaOH ที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า สามารถผลิตเป็นซีโอไลต์ได้ 50 เซนติโมลต่อกิโลกรัม.

วายุ และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาเม็ดซีโอไลต์และสัดส่วนตัวประสานที่มีผลต่อขนาดรูพรุนและความแข็งของเม็ดซีโอไลต์, โดยทำการศึกษาในการกรองโมเลกุลก๊าซของเม็ดซีโอไลต์ที่ได้ พบว่า เมื่อทำการเผาเม็ดซีโอไลต์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง และกักเก็บก๊าซออกซิเจนได้ร้อยละ 5.

ไชยวัฒน์ รงค์สยามมานนท์ (2548) ได้ศึกษาการปรับปรุงเม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากจีไธลอลิกไนต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 96 ชั่วโมง, สามารถผลิตเป็น Na-PI ร้อยละ 54 มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 2.49 มิลลิกรัมสมมูล/กรัมซีโอไลต์สังเคราะห์ และนำมาขึ้นรูปเม็ดโดยใส่สารโพสโตนัลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักมีพื้นผิวจำเพาะ 24 ตารางเมตรต่อกรัมซีโอไลต์ สามารถกำจัดแคดเมียมด้วยระบบไม่ต่อเนื่องสูงกว่าร้อยละ 98 และมีสมมูลการดูดซับผิวแบบแลงเมียร์ไอโซเทอมโดยให้ค่าความสามารถในการดูดซับผิวสูงสุดเท่ากับ 3.14 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์.

ศิริพงษ์ มีมั่งคั่ง (2526) ศึกษาผลของปริมาณผงถ่านและอุณหภูมิในการเผาเซรามิกส์ประกอบด้วยส่วนผสมดินดำและควอตซ์ต่อความพรุน และค่าการซึมผ่านได้ของเซรามิกส์โดยแปร

ผันกับปริมาณผงถ่านก่อนขึ้นรูปร้อยละ 5-15 ที่อุณหภูมิ 800-1,200 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเผาประมาณ 6-8 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศ โดยอุณหภูมิให้ค่าความพรุนสูงสุด 1,000 องศาเซลเซียส.

Lin, C.F. และ His, H-C (1995) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยที่ได้จากการเผาลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าได้หวั่น พบว่า ค่าพื้นที่ผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3.5 นอร์มัล ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 94 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 นอร์มัล ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 52 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก แคดเมียมที่พีเอช 6 สามารถกำจัดได้ร้อยละ 65.

Murayama, N. *et al.* (2002) ศึกษากลไกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยลิกไนต์ พบว่าเมื่อกระตุ้นที่ความร้อน ค่าความสูงพิกของควอตซ์มีแนวโน้มลดลง, โดยที่อะลูมิเนียมไม่มีผลต่อการเพิ่มพลังงานความร้อน, เมื่อละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ซิลิกอนจะละลายออกมาเป็นเส้นตรง และลดลงเมื่อผ่านไป 0.5 ชั่วโมง, เมื่อเวลาผ่านไปซิลิกเกตและอะลูมิเนียมรวมตัวเป็นอะลูมิโนซิลิกเกตเจล และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอะลูมิโนซิลิกเกตจะเปลี่ยนเป็นผลึกซีโอไลต์.

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

### 2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ชุดเครื่องแก้วในระดับห้องปฏิบัติการ.
2. ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer), IKA 550, Germany.
3. หม้อดูดความชื้น (Desicator).
4. ครุชิลเปิดพร้อมฝาปิด.
5. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม.
6. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง.
7. เครื่องวัดพีเอช (pH meter); pH 1-20, DKK Corporation, Japan.
8. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง: AND HM-300 Japan.
9. ตู้อบความร้อน: WTB Binding, Germany.
10. เตาเผา: Turbular furnace รุ่น 3-1750, USA.
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน :Scanning electron microscope (SEM), รุ่น LEO 1530.
12. เครื่อง X-rays Diffraction Spectroscopy รุ่น Rigaku Ultima III with  $\text{CuK}\alpha$  Radiation.
13. เครื่อง X-rays Fluorescences Spectroscopy รุ่น XRFS APL 9400.
14. เครื่องวัด Gas Chromatography (GC) Shimadzu รุ่น 2014 .
15. เครื่องปฏิกรณ์เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา.
16. เครื่องอัดเม็ด.
17. เครื่องแยกก๊าซสลับความดัน.

### 2.2 แผนงานวิจัย

**ปีที่ 1** เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากของเสียอุตสาหกรรม เพื่อผลิตเป็นซีโอไลต์ชนิด 5A และศึกษาหาประสิทธิภาพในการคัดเลือกวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ โดยมีขั้นตอนดำเนินงานดังนี้:

- สังเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารดูดซับจากของเสียอุตสาหกรรม.



- ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคัดเลือกวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์, ซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 5A และซีโอไลต์สังเคราะห์จากตะกอนเหล็ก เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมในการแยกก๊าซให้บริสุทธิ์.

**ปีที่ 2** เป็นการทดลองแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ทดลองแนวทางในการแยกก๊าซให้บริสุทธิ์ โดยใช้ตัวดูดซับ (ซีโอไลต์)

- ออกแบบและสร้างเครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์.  
- ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ ได้แก่ โพรไฟล์ ความดันต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ, ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับก๊าซ, อัตราการไหล เข้าต่ออัตราการไหลออก และระยะเวลาต่อรอบ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.

### 2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองผลิตสารดูดซับจากของเสียอุตสาหกรรม ได้แก่ ตะกอนเหล็ก จากเตาเผาโพลี, โดยเก็บตัวอย่างจากบริษัทไท่เซงการช่าง จำกัด และกำจัดสารเจือปนโดยการแยก ด้วยแม่เหล็ก และย่อยด้วยสารละลายกรดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อดูดซับก๊าซ.

### 2.4 ก๊าซที่ใช้ในการศึกษา

- ก๊าซไฮโดรเจน ความบริสุทธิ์ (99.99%, Thonburiwattana Co.,Ltd, Thailand).
- ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ (99.99%, Thonburiwattana Co.,Ltd, Thailand).
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ (99.99%, Thonburiwattana Co.,Ltd, Thailand).
- ก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจนต่อไนโตรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (15:50: 35%

Thonburiwattana Co.,Ltd, Thailand).

### 2.5 การดำเนินงานวิจัย

#### 2.5.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนเหล็ก

## 1. ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของตะกรันเหล็ก

ตะกรันเหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับจากโรงหล่อไท่เฮงการช่าง จ. สมุทรปราการ ซึ่งเกิดจากเตาคิวโปลา โดยนำตะกรันต้มด้วยกรดผสม, กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร กรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง, จากนั้นเผาตะกรันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อต้องการกระตุ้นให้ผงตะกรันที่เผาอยู่ในสภาพเป็นสารประกอบควอตซ์, มุลไลต์ ที่จะทำปฏิกิริยา, หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรง 325 ไมครอน คงค้าง 50-70% ให้มีขนาดเล็กลงกว่า 45 ไมครอน เพื่อศึกษาองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของตะกรันเหล็ก, โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence Spectroscopy (XRFS) โครงสร้างความเป็นผลึกโดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) และพื้นผิวโดยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning electron microscope: SEM).

## 2. การเตรียมวัตถุดิบเริ่มต้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

### 2.1 การเตรียมโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต

การเตรียมวัตถุดิบเริ่มต้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์สามารถทำได้โดยการนำตะกรันเหล็กหลอมรวมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ผงในอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อผลิตภัณฑ์จากการหลอมเย็นลง นำไปเก็บไว้ในขวดพลาสติกที่ทำจากโพลีเอทิลีนปิดปากและนำไปใส่ในเคซิเคเตอร์.

### 2.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมอะลูมิเนียม

1. เตรียมสารละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยชั่งผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 10 กรัม เติมด้วยสารละลายร้อยละ 50 w/v NaOH ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจนสารละลายใส, หลังจากนั้น กรองสารละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 42.

2. เตรียมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร.

## 3. การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กแบบเม็ด

1. นำวัตถุดิบเริ่มต้นหลังจากการหลอมตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRFS) และวิเคราะห์ความเป็นผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ซึ่งวัตถุดิบที่ได้จากการหลอมโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตประมาณ 3 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด

250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 70 มิลลิลิตร ตั้งกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที.

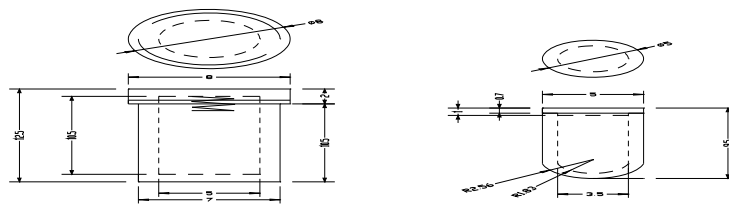
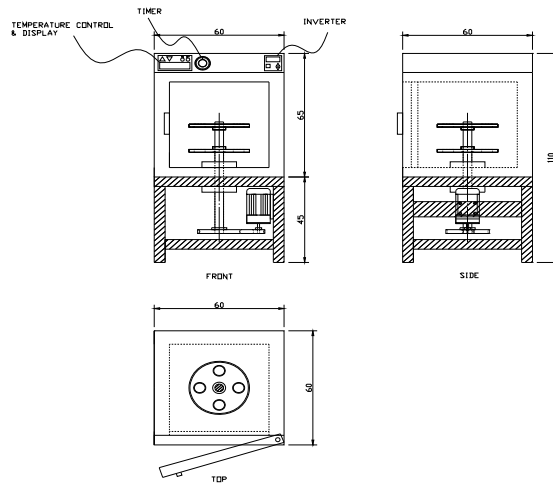
2. เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ตั้งกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที, เมื่อครบกำหนดเวลา ค่อยๆ เติมน้ำละลายโซเดียมออลูมิเนต (ข้อ 2.2) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร กวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาที, หลังจากครบกำหนดเวลา ถ่ายสารละลายผสมใส่ในถังปฏิกรณ์ดังรูปที่ 21, โดยทำการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่ 105 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 1, 3, 5, 7 และ 9 ชั่วโมง, โดยทำการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 โมลต่อลิตร, จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ล้างน้ำจืด ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7-8 และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง, เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความเป็นผลึกสูงสุด (% Crystallinity).

3. นำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้แลกเปลี่ยนด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ), แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ), ลิเทียมคลอไรด์ ( $\text{LiCl}$ ) และโพแทสเซียมคลอไรด์ ( $\text{KCl}$ ) ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างตะกอนจนน้ำล้างปราศจากคลอไรด์, โดยทดสอบด้วยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ถ้ามีคลอไรด์จะพบตะกอนขาวเกิดขึ้น.

#### 4 ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์

นำวัตถุดิบเริ่มต้นจากการหลอมตะกั่วเหล็กและผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากตะกั่วมาบดให้ละเอียด อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และเก็บในโถสุญญากาศ เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้:

- วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโทรโฟโตเมตรี (XRD) รุ่น Rigaku Ultima III with  $\text{CuK } \alpha$  radiation.
- วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM), Model LEO 1530.
- ทดสอบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.



รูปที่ 21. ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.

### 2.5.2 ศึกษาการขึ้นรูปซีโอไลต์

การศึกษาขั้นตอนการอัดเม็ดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก, โดยคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากขั้นตอน 2.5.1 (ข้อ4), โดยคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากความสมบูรณ์ของผลึกซีโอไลต์ และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุด พร้อมนำสภาวะที่เหมาะสมนี้มาผลิตเป็นสารซีโอไลต์เพื่อขึ้นรูปเม็ดต่อไป, โดยศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา (ไชยวัฒน์ 2548) ในการหาแนวทางที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดแบบเปียก.

### 2.5.3 การเตรียมสารช่วยพอรุน (pore forming agent) และสารยึดเกาะ (binder)

- ชั่งเกลือดี โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA 88% mol. Hydrolyzed grade) อัตราส่วนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ผสมให้เข้ากันเป็นสารช่วยพอรุน.
- ชั่งผงเบนโทไนต์ น้ำหนัก 15 กรัม ผสมกับสารช่วยพอรุนน้ำหนัก 100 กรัม, โดยผสมกับน้ำอุ่น ปริมาตร 120 มิลลิลิตร, โดยนำมาผสมกับเครื่องกวนแป้ง ดังรูปที่ 22.



รูปที่ 22. เครื่องกวนผสมแป้งแบบ planetary mixer Hobart.

- นำส่วนผสมเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อลดปริมาณน้ำ.
- เตรียมสารช่วยไหล โดยชั่ง Magnesium stearate 0.35%, โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด ผสมกับน้ำอุ่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมกับ talcum 0.15%, โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมทั้งหมด.
- ผสมสารช่วยพอรุน (ซีโอไลต์กับ PVA) สารยึดเกาะ (เบนโทไนต์) กับสารช่วยไหลเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องกวนแป้ง, โดยผสมใส่เครื่องอัดเม็ด โดยใช้แรงอัดไม่น้อยกว่า 400 psi เม็ดซีโอไลต์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร.
- นำผลิตภัณฑ์เม็ดซีโอไลต์ที่ได้เผาเพื่อไล่สารช่วยพอรุน (PVA) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง.



รูปที่ 23. เครื่องอัดเม็ด.

### 2.5.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดดังต่อไปนี้ ได้รับจาก บริษัท C. Gigantic Carbon Co.,Ltd. ประเทศไทยโดยมีคุณลักษณะดังตารางที่ 8.

ตารางที่ 8. คุณสมบัติถ่านกัมมันต์

Characteristics	Measurement method	Value
Bulk density	ASTM D2854	0.59 g/mL
Particle size distribution	ASTM D 2862	91% (PASS 200MESH)
Iodine absorption	ASTM D 4607	862.0 mg/gm
pH value	ASTM D3838	10.1
Ash content	ASTM D2863	6.1%

นำถ่านกัมมันต์อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายหลังจากการอบแห้งใส่ใน desicator เพื่อรอศึกษาการทดลอง.



รูปที่ 24. เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography: GC).



รูปที่ 25. เตาเผาชนิด Turbular Furnace.

#### 2.5.4 ซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 5A

ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยซิติเกต จำกัด และนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้แลกเปลี่ยนด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ), แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ), ลิเทียมคลอไรด์ ( $\text{LiCl}$ ) และโพแทสเซียมคลอไรด์ ( $\text{KCl}$ ) ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 24 ชั่วโมง, ล้างตะกอนจนน้ำล้างปราศจากคลอไรด์, โดยทดสอบด้วยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ถ้ามีคลอไรด์จะพบตะกอนขาวเกิดขึ้น.

## 2.6 การทดลองประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซแต่ละชนิดโดยเทคนิคผลต่างความดัน

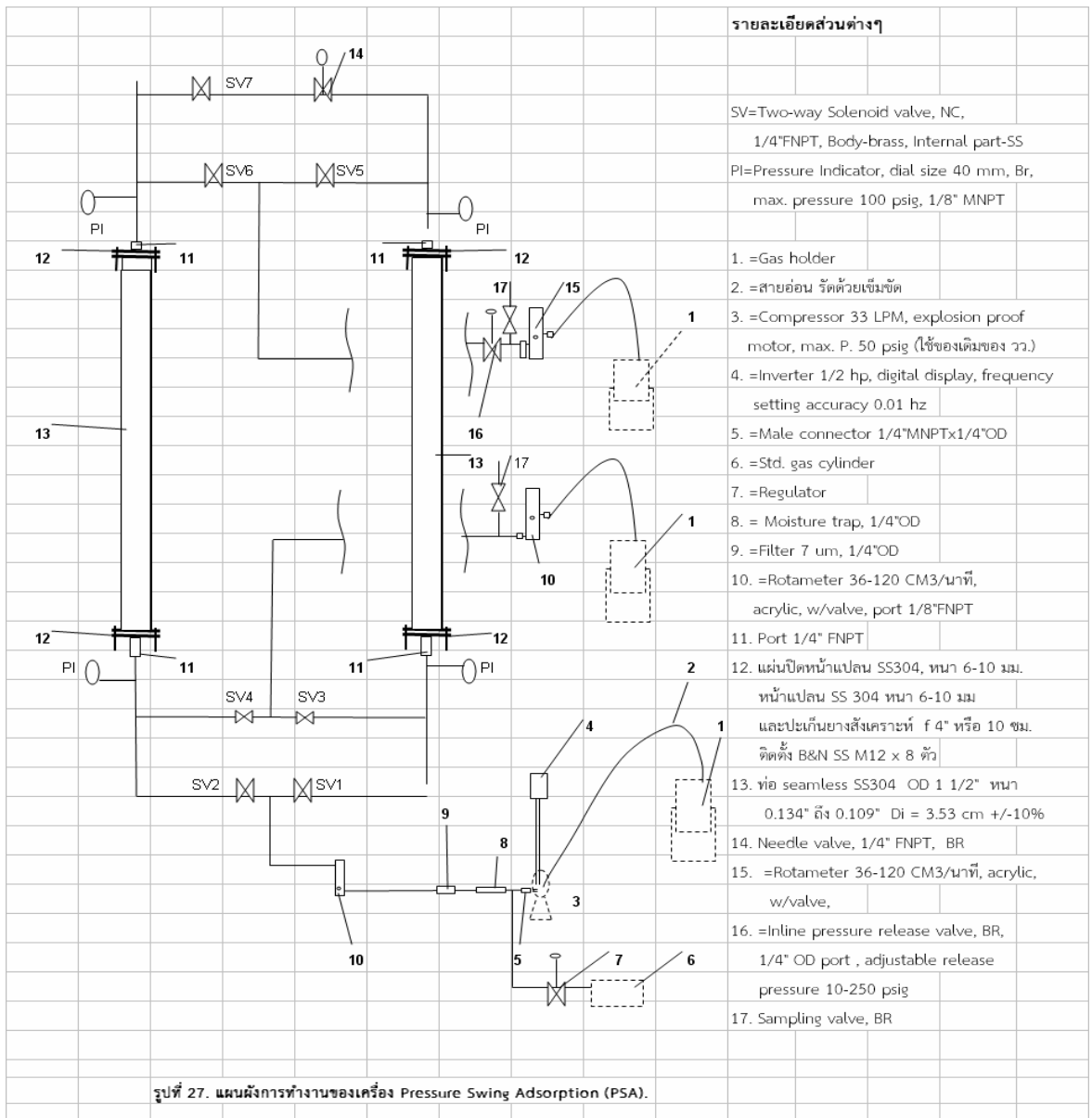
### (Pressure Profile)

จัดอุปกรณ์เครื่องมือการดูดซับเป็นดังรูปที่ 26 และ 27 ซึ่งประกอบด้วยคอลัมน์หรือดูดซับจำนวน 2 คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 3.45 เซนติเมตร ความยาวประมาณ 51 เซนติเมตร, เชื่อมต่อกับท่อสเตนเลส 304 ขนาด 1/4 นิ้ว และภายในบรรจุตัวดูดซับก๊าซแต่ละชนิด, โดยมีกาวปิดปิดด้วยวาล์วไฟฟ้า และมีหัววัดอุณหภูมิ Flow meter ชนิดปรับอัตราการไหลเข้าและออกได้ และ Pressure gauge ที่ความดันทั้งขาเข้าและออก โดยทำการทดลองแต่ละคอลัมน์ อุปกรณ์เชื่อมต่อกับท่อสเตนเลส โดยทำการศึกษาความดันที่สารดูดซับแต่ละชนิดดูดซับได้, โดยการจับเวลาที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์, กำหนดอัตราการไหลขาเข้าที่ 1, 2, 3, และ 4 ลิตรต่อนาทีโดยจับเวลาที่ความดันเพิ่มขึ้นถึงจุดที่กำหนด และความดันที่ลดลงจนเหลือความดันเท่ากับศูนย์ เพื่อหา Pressure profile และระยะเวลาในการดูดซับที่เข้าสู่สมดุลของสารดูดซับก๊าซแต่ละชนิดโดยป้อนก๊าซ  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  (99.99%) ก๊าซผสม  $H_2:CO_2:N_2$  (15:50:35%) โดยใช้ซีโอไลต์เอมาตรฐาน และถ่านกัมมันต์ รายละเอียดดังแผนรูปที่ 26 -27.





รูปที่ 26. เครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจน.



รูปที่ 27. ไดอะแกรมการทำงานของระบบการดูดซับก๊าซ.

## 2.7 การหาระยะเวลาที่เหมาะสม (Breakthrough curves)

นำสารดูดซับที่ดีที่สุดดังข้อ 2.6 อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นป้อนก๊าซผสม ได้แก่ ก๊าซ 3 องค์ประกอบ ได้แก่ 15/35/50% H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิห้อง, โดยศึกษาผลของความบริสุทธิ์ก๊าซแต่ละชนิดที่ความดันต่างๆ ได้แก่ 1, 2, และ 3 บาร์ ระยะเวลา 5-150 นาที, โดยควบคุมอัตราการไหลเข้าและออก ระหว่าง 1, 2, 3, 4 และ 5 ลิตรต่อนาที เพื่อหาอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออก. ก๊าซที่ได้ถูกเก็บด้วยถุงเก็บก๊าซและวัดคุณภาพก๊าซด้วยเครื่อง gas chromatograph (GC-2014; SHIMADZU, Japan).

## 2.8 การศึกษาระยะเวลาครบรอบในการเดินเครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจน

จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังข้อ 2.7 ได้ทำการศึกษาระยะเวลาครบรอบ 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) pressurization, (2) adsorption and (3) depressurization และทำการศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำการเดินระบบด้วยเครื่องแยกก๊าซไฮโดรเจน, โดยมีขั้นตอนการกำหนดวาล์วของเครื่องแยกก๊าซในการเดินระบบดังตารางที่ 9, โดยการจับระยะเวลาที่ความดันที่ดีที่สุดในการดูดซับก๊าซ (Pressurization) ระยะเวลาการดูดซับ (Adsorption), ระยะเวลาที่ปล่อยความดันเพื่อคายซับ (Depressurization) และขั้นการดึงก๊าซออก (Blow down) เพื่อหาระยะเวลาครบรอบ (Cycle time).

ตารางที่ 9. การเดินระบบวาล์วของเครื่องแยกก๊าซ

Valve	SV2	SV6	SV3
Operation			
Pressurization	Open	Close	Close
Adsorption	Close	Close	Close
Depressurization	Close	Open	Close
Blow	Close	Close	Open

ค่าการดูดซับถูกนำมาวิเคราะห์หาความดันการป้อน (สมการที่ 2.1) และความดันภายใน (2.2) และจำนวนโมลก๊าซที่ถูกการดูดซับ ดังสมการที่ 2.3.

$$n_{feed} = \frac{P_{ads} \int \dot{V}_t dt}{RT} \quad \text{สมการ 2.1}$$

- โดยที่  $P_{ads}$  = ความดันในการป้อน (bar)
- $\dot{V}_t$  is = อัตราการไหล (L/min),
- $t$  = เวลาที่ SV1 เปิด (วินาที/นาที)
- $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 m<sup>3</sup>Pa/mol K or 0.08314 Lbar/molK),
- $T$  = อุณหภูมิในการทดลอง (K)
- $n_{feed}$  = จำนวนโมลก๊าซป้อนทั้งหมด (mole).
- $P_e$  = ความดันสมบูรณ์ (Pa or bar)
- $V_{column}$  = ปริมาตรคอลัมน์ (ลิตร) was achieved, the quantity of gas
- $n_e$  = จำนวนโมลก๊าซที่เข้าสู่สมดุลซึ่งอยู่ในสถานะก๊าซ (mol)
- $n_{ads}$  = จำนวนโมลก๊าซที่ถูกดูดซับไว้ (mol)

$$n_e = \frac{P_e V_{column}}{RT} \quad \text{สมการ 2.2}$$

$$n_{ads} = n_{feed} - n_e \quad \text{สมการ 2.3}$$

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทดลองแยกก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์, โดยการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพสังเคราะห์, โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการที่ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารดูดซับก๊าซชนิด 5A จากตะกรันเหล็ก และการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้:

**ตอนที่ 1** การศึกษาสมบัติเบื้องต้นและหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก

#### 3.1 สมบัติเบื้องต้นของตะกรันเหล็ก

ตะกรันที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นตะกรันที่ได้จากการหล่อเหล็กด้วยเตาควิปอลา โดยได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานไต้เซงการหล่อจำกัด ซึ่งมีลักษณะสีเขียวปนน้ำตาล ดังรูปที่ (28), ตะกรันถูกบดให้ละเอียดและผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 325 ไมครอน, หลังจากนั้นถูกกำจัดสารเจือปนด้วยสารละลายกรดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และผ่านการล้างตะกอนให้ปราศจากความเป็นกรด ดังรูปที่ (29) และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง, ตะกรันที่ได้มีลักษณะสีขาวนวล ดังรูปที่ (30), เมื่อผ่านการหลอมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 พบว่า สีตะกรันมีลักษณะเป็นสีฟ้านวล ดังรูปที่ (31).



รูปที่ 28. ตะกรันที่เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นก่อนกำจัดสิ่งเจือปน.



รูปที่ 29. ตะกรันที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปน.



รูปที่ 30. ตะกรันที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนและเผา.



รูปที่ 31. ตะกรันที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนที่เผาแล้วหลอมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์.

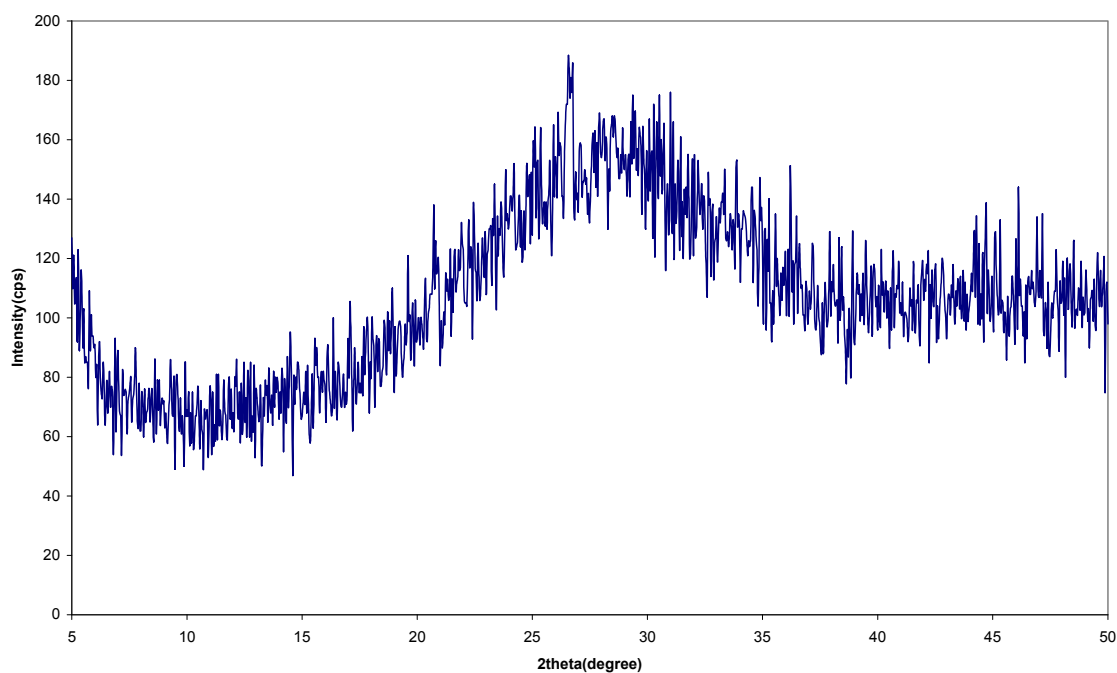
จากผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ดังตารางที่ 10 พบว่า ตะกรันเหล็กมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และ โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 7.11 และถูกปรับอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1-2 โดยการเติมสารละลายโซเดียมอลูมิเนต.

ตารางที่ 10. องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเริ่มต้นแต่ละชนิด.

ธาตุ ในองค์ประกอบ	ร้อยละโดยมวลของธาตุในสารประกอบ (%)*			
	เตาถลุงโปลาติบ	ตะกรันผ่าน การต้มกรด	ตะกรันที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 700°ซ. เวลา 3 ชั่วโมง	ตะกรันที่ผ่านการ หลอม (1:3)
Na	0.27	<0.01	<0.01	42.64
Mg	6.81	1.12	0.99	2.28
Al	5.44	2.11	1.96	4.35
Si	22.76	81.09	72.51	22.48
K	0.63	0.3	0.28	0.90
Ca	14.32	7.70	11.01	14.58
Ti	0.51	0.68	0.93	0.87
V	0.12	-	-	-
Cr	2.01	0.17	0.11	0.11
Mn	2.01	1.84	1.80	3.37
Fe	3.85	3.19	3.19	6.18
Zn	0.06	0.02	<0.01	0.06
Mole ration of Si/Al	7.11	65.33	62.89	8.76

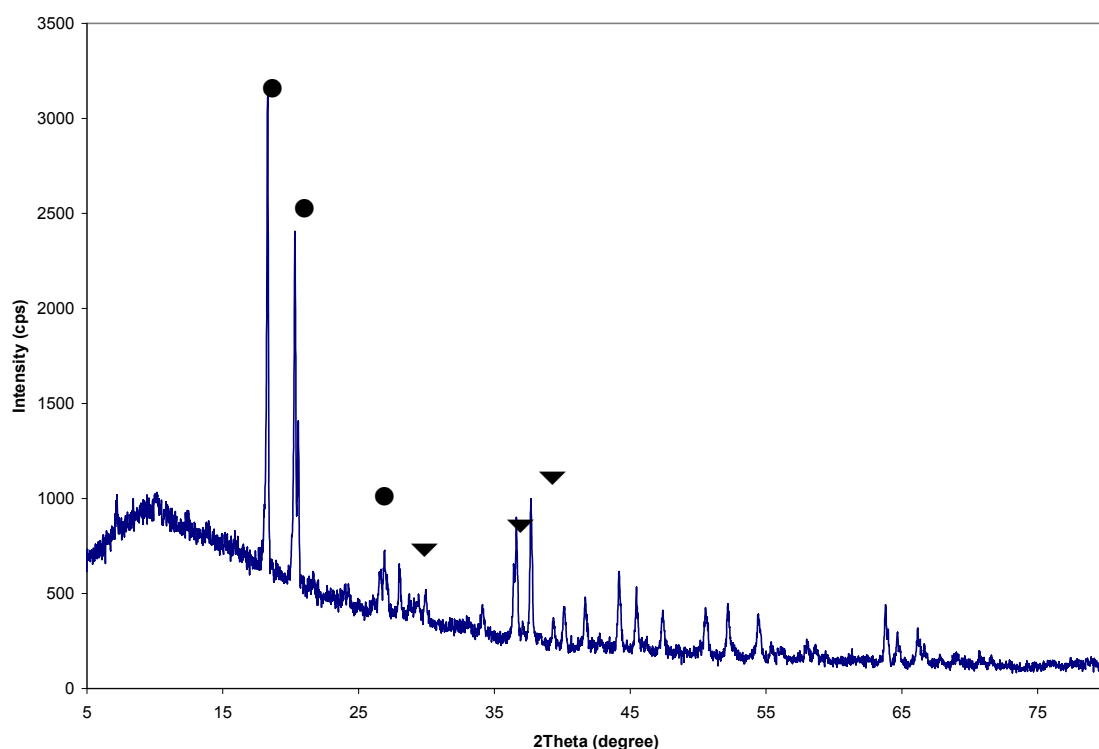
\*<sup>1</sup> ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, "fundamental parameter calculations"

<sup>2</sup> ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าในรูป oxide ธาตุนี้ๆ



รูปที่ 32. ผลการวิเคราะห์ตะกอนเหล็กคิวโปลาเริ่มต้นโดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD), ● SiO<sub>2</sub> และ ▼ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่อง เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า ที่มุม 2-Theta เท่ากับ 26 ซึ่งตรงกับพีกหลักของ SiO<sub>2</sub> และมุม 2-Theta เท่ากับ 27 ซึ่งตรงกับ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยมีความเป็นอัญฐานซึ่งง่ายต่อการใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นเพื่อผลิตเป็นสารประกอบซีโอไลต์ ดังรูปที่ 32.

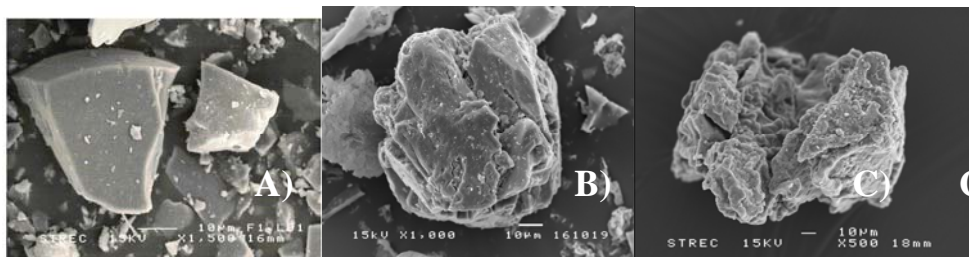


รูปที่ 33. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหลอมของตะกรันเหล็กคิวโปลา โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD), ●  $\text{SiO}_2$  และ ▼  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

จากผลการศึกษการเตรียมวัตถุดิบเริ่มต้น พบว่า อัตราส่วนการหลอมระหว่างตะกรันเหล็กคิวโปลาต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 1: 3 สามารถเตรียมเป็นสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีสูตรโครงสร้าง  $[\text{Na}_{1.45}\text{Al}_{1.45}\text{Si}_{0.55}\text{O}_4]$  ซึ่งสอดคล้องกับ JCPDS49-0002. เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์เนื่องจากสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำ.

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เมื่อใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่า พื้นผิวของตะกรันดิบมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ไม่มีรูพรุน ดังรูปที่ 34A, โดยตะกรันที่ผ่านการย่อยด้วยสารละลายกรด พบว่า พื้นผิวก่อนข้างขรุขระ (34B) เมื่อนำตะกรันผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาานาน 3 ชั่วโมง พบว่า ตะกรันมีขนาดเล็กกล (34C) และเมื่อนำตะกรันมาหลอมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า มีการเกาะกลุ่มกัน ดังรูป 34D.





รูปที่ 34. พื้นผิวของตะกั่วคาร์บอนประเภทต่างๆ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

A) ตะกั่วคาร์บอนดิบ. B) ตะกั่วคาร์บอนที่ผ่านการย่อยด้วยสารละลายกรด.

C) ตะกั่วคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการหลอมที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง.

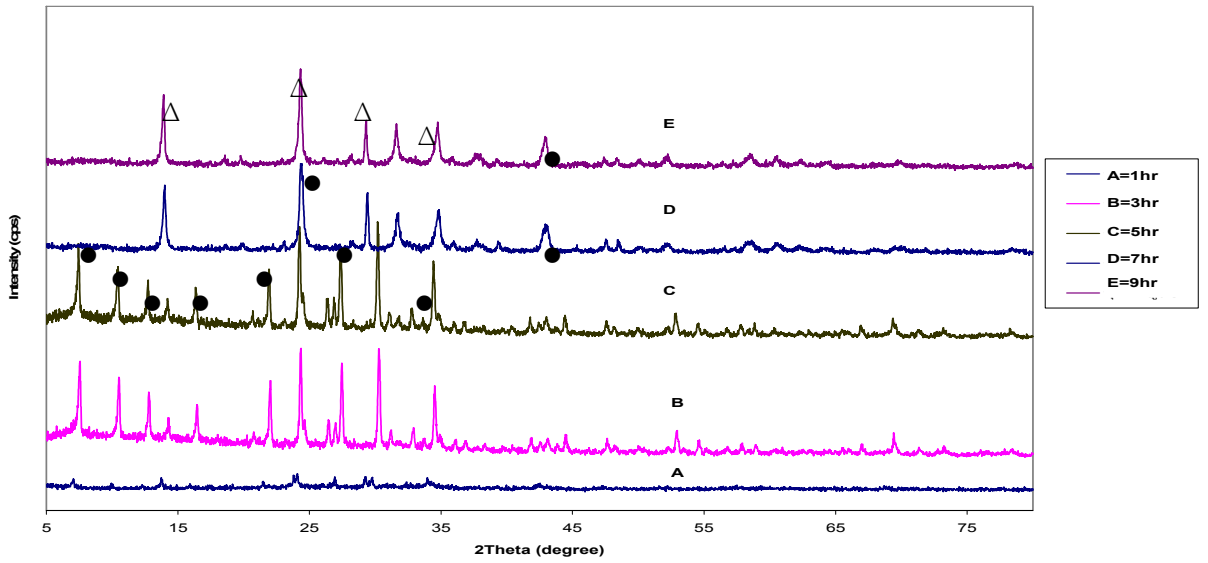
### 3.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกั่วคาร์บอน

จากผลการศึกษาการเตรียมวัสดุคาร์บอนเริ่มต้นประเภทโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตโดยนำตะกั่วคาร์บอนผ่านการกำจัดปริมาณคาร์บอนในองค์ประกอบโดยการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า สามารถกำจัดคาร์บอนในองค์ประกอบมากที่สุดและเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในสารละลายต่างได้เร็วขึ้น, นอกจากนี้สามารถลดระยะเวลาในการละลายซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการเกิดผลึกซีโอไลต์แล้วยังสามารถจำกัดเฟสซีโอไลต์ได้เมื่อกระตุ้นด้วยสภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสม. งานวิจัยนี้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (1, 3, 5, 7 และ 9 ชั่วโมง) และความเข้มข้นของสารละลายต่าง (1,3 และ 5 โมลต่อลิตร) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ซึ่งเป็นตัวแทนในการพิจารณาในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก และ ความสมบูรณ์ของผลึก (%) พบว่า ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 11 โดยผลการทดลองมีดังนี้:

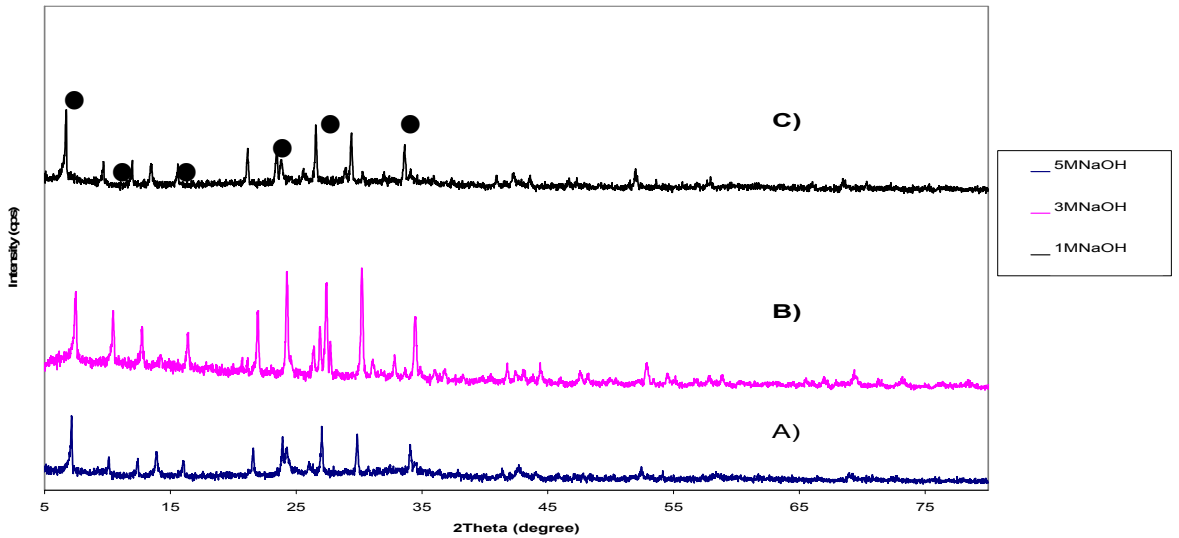
- สภาวะที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูงสุดคือ การกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตในอัตราส่วน 1:3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตรที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงเท่ากับ 507.6 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอนเนตต่อกรัม ซีโอไลต์และให้ร้อยละความสมบูรณ์ของผลึกซีโอไลต์ชนิด A (JCPDS 430142) สูงเท่ากับ 87.6.

ตารางที่ 11. ชนิดและความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมที่สภาวะต่างๆ.

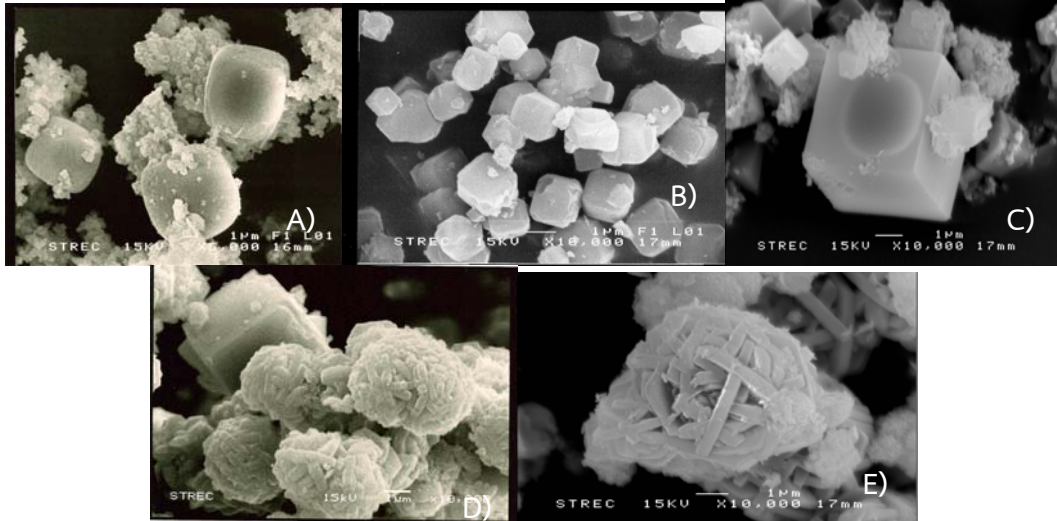
ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายเบส	อุณหภูมิ (°ซ.)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ชนิดของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์	ความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ (%)	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม (mgCaCO <sub>3</sub> / g zeolite)
1:3					
1M NaOH	105	1	Amorphous+A	13.4	83.5
		3	A	15.41	84.2
		5	A	18.3	114.6
		7	A	57.8	363
		9	A+HS	42.8	250
3M NaOH	105	1	Amorphous+A	12.87	80.8
		3	A	87.6	507.6
		5	A	80.6	490
		7	A+HS	27.8	80.4
		9	A+HS	10.8	31.5
5M NaOH	105	1	Amorphous+A	40.6	254.9
		3	A	47.7	487.7
		5	A	69.4	480.2
		7	A	73.8	496.1
		9	A+HS	53.9	338.4
STD zeolite			A	100	627.8



รูปที่ 35. ผลวิเคราะห์ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อเกิดผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD), ● NaA Zeolite △ HS Zeolite.



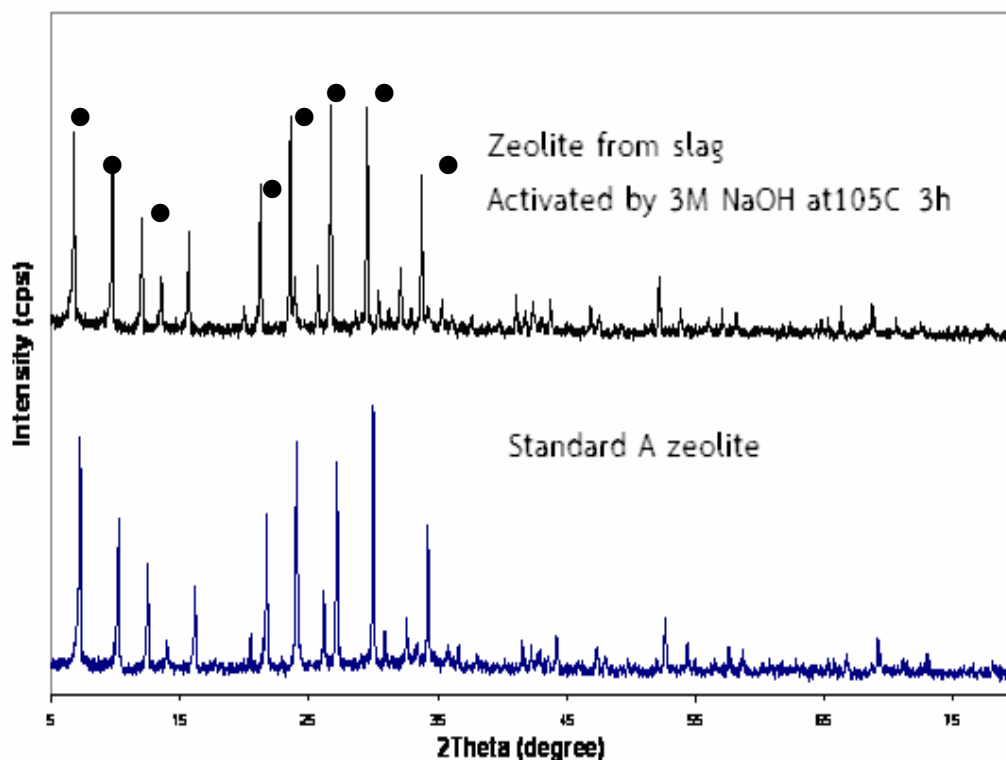
รูปที่ 36. ผลวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเกิดผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 1(A), 3 (B) และ 5(C) โมลต่อลิตรเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD), ● NaA Zeolite.



รูปที่ 37. ถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กโดยกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 1 (A), 3(B), 5(C), 7(D) และ 9(E) ชั่วโมง ตามลำดับ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.

จากรูปที่ 35-37 เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อร้อยละความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์, โดยการกระตุ้นตะกรันเหล็กกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ความเข้มข้นที่ 3 โมลต่อลิตรให้ความเป็นผลิตภัณฑ์สูงสุด, โดยความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะมีผลต่อความสมบูรณ์ที่ลดลงและมีโอกาสเปลี่ยนรูปแบบผลิตภัณฑ์เป็นซีโอไลต์ชนิดอื่นๆ ได้ที่มีความเสถียรสูงแต่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนลดลง, โดยสามารถตรวจสอบได้จากความสูงของพีคที่ลดลง เนื่องจากในขั้นตอนการหลอมที่ 1:3 มีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง. ดังนั้นการกระตุ้นด้วยสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำ จึงมีความเหมาะสมในการเกิดผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ชนิด NaA ได้.

งานวิจัยนี้พบว่าการกระตุ้นตะกรันเหล็กโดยการหลอมตะกรันเหล็กในอัตราส่วนโดยมวล 1 ต่อ 3 สามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตได้ และการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงสามารถผลิตซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 507.6 มิลลิกรัม แคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์ คิดเป็นความสมบูรณ์ร้อยละ 87.6. จากผลการศึกษาการวิเคราะห์พื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า ซีโอไลต์ NaA มีพื้นผิวเป็นทรงลูกบาศก์ดังรูปที่ 37.



รูปที่ 38. ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กเทียบกับซีโอไลต์มาตรฐาน โดย เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD), ● NaA Zeolite.

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็กเทียบกับซีโอไลต์มาตรฐาน พบว่าสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด 5 เอ ได้ ดังรูปที่ 38 และสามารถสรุปผลการศึกษาว่า ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กคือผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ชนิด 5 เอ ตาม JCPDS 430142 พร้อมนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพสังเคราะห์.

### 3.3 การทดลองประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซแต่ละชนิดโดยเทคนิคผลต่างความดัน (Pressure Profile)

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซแต่ละชนิด ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน โดยใช้สารดูดซับซีโอไลต์ชนิด 5A มาตรฐานและถ่านกัมมันต์โดยการศึกษาผลของความดันที่เหมาะสม, ผลของไอออนบวก, อัตราการไหลเข้าต่ออัตราการ

ไหลออก และระยะเวลาที่สารแต่ละชนิดดูดซับก๊าซได้โดยการศึกษาจาก pressure profile ของก๊าซแต่ละชนิด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 12.

ตารางที่ 12. ค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซแต่ละชนิดโดยใช้สารดูดซับก๊าซ.

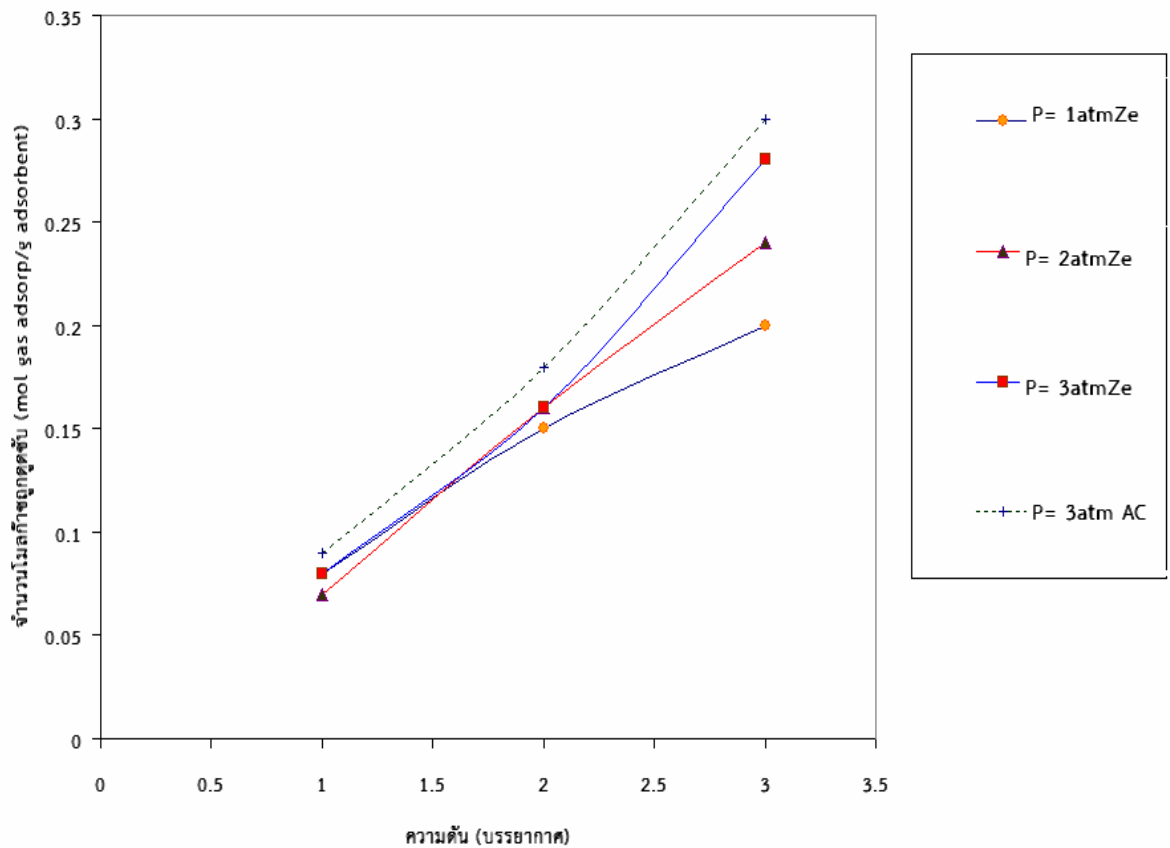
ชนิดก๊าซ	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการ ไหล (lit/min)	ซีโอไลต์		ถ่านกัมมันต์	
			จำนวนโมล ก๊าซถูกดูด ซับ(mol/g)	ระยะเวลาเข้า สู่สมดุล (วินาที)	จำนวนโมล ก๊าซถูกดูด ซับ(mol/g)	ระยะเวลาเข้า สู่สมดุล (วินาที)
			ก๊าซ H <sub>2</sub>	1	1	0.04
		2	0.08	350	0.085	420
		3	0.12	250	0.13	350
		4	0.16	200	0.16	320
	2	1	0.06	350	0.075	700
		2	0.15	500	0.16	600
		3	0.23	300	0.25	500
		4	0.32	280	0.34	400
	3	1	0.1	360	0.08	450
		2	0.2	300	0.25	420
		3	0.32	210	0.35	400
		4	0.48	240	0.49	300
ก๊าซ N <sub>2</sub>	1	1	0.04	1,400	0.035	1,000
		2	0.07	1,600	0.08	1,100
		3	0.12	1,200	0.12	1,000
		4	0.16	500	0.16	900
	2	1	0.05	280	0.05	800
		2	0.16	250	0.15	1,200
		3	0.23	240	0.25	1,300
		4	0.32	210	0.34	1,000
	3	1	0.08	260	0.1	1,200
		2	0.24	450	0.25	1,000
		3	0.3	420	0.38	900
		4	0.5	400	0.54	520
ก๊าซ CO <sub>2</sub>	1	1	0.04	800	0.04	800

ตารางที่ 12. (ต่อ)

ชนิดก๊าซ	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหล (lit/min)	ซีโอไลต์		ถ่านกัมมันต์	
			จำนวนโมล ก๊าซถูกดูด ซับ(mol/g)	ระยะเวลาเข้า สู่สมดุล (วินาที)	จำนวนโมล ก๊าซถูกดูด ซับ(mol/g)	ระยะเวลาเข้า สู่สมดุล (วินาที)
		2	0.08	250	0.06	600
		3	0.12	220	0.12	400
		4	0.17	200	0.16	200
	2	1	0.075	500	0.08	1,000
		2	0.16	225	0.16	900
		3	0.23	210	0.3	800
		4	0.32	800	0.32	700

### 3.4 ผลของความดันที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการศึกษาเพื่อหาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ซึ่งจัดเป็นก๊าซที่ต้องการกำจัดในก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพสังเคราะห์ พบว่า ได้ผล การศึกษาดังรูปที่ 39.



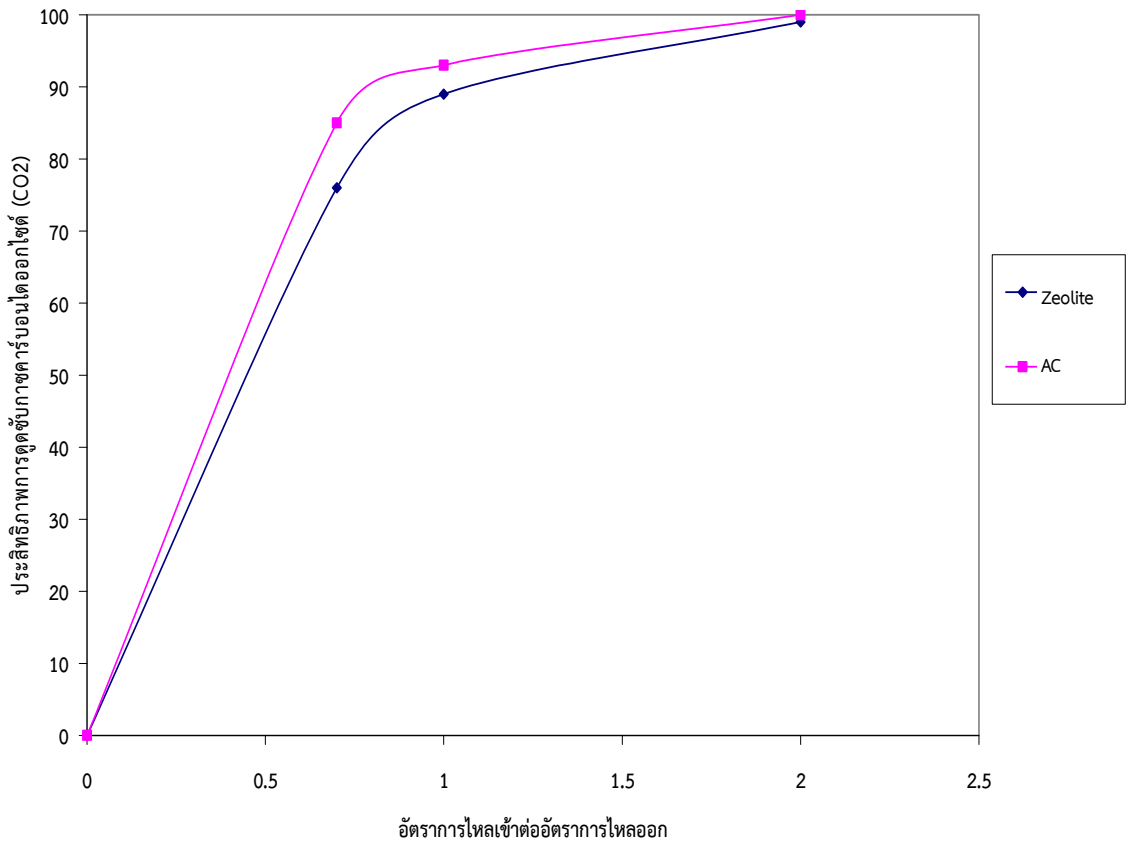
รูปที่ 39. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยซีโอไลต์ A (Ze) และถ่านกัมมันต์ (AC).

จากผลการทดลองหาความดันที่เหมาะสมต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการศึกษาผลของดันต่างๆ ได้แก่ ความดัน 1, 2 และ 3 บรรยากาศ ตามลำดับ, โดยใช้อัตราการไหลก๊าซเข้าต่ออัตราการไหลก๊าซออกเท่ากับ 2 พบว่า เมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับเพิ่มสูงขึ้น.

จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ความดันที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ได้แก่ ที่ความดัน 3 บรรยากาศ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่า ความดันที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการสัมผัสระหว่างสารดูดซับก๊าซและก๊าซที่ต้องการดูดซับ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสสารดูดซับ โดยเฉพาะปริมาตรโพรงในผลึกของซีโอไลต์ทำให้ก๊าซสามารถเข้าไปกักเก็บเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น (Vermesse *et al.* 1996).



### 3.5 ผลของอัตราการใช้กากขาเข้าต่ออัตราการใช้กากขาออก



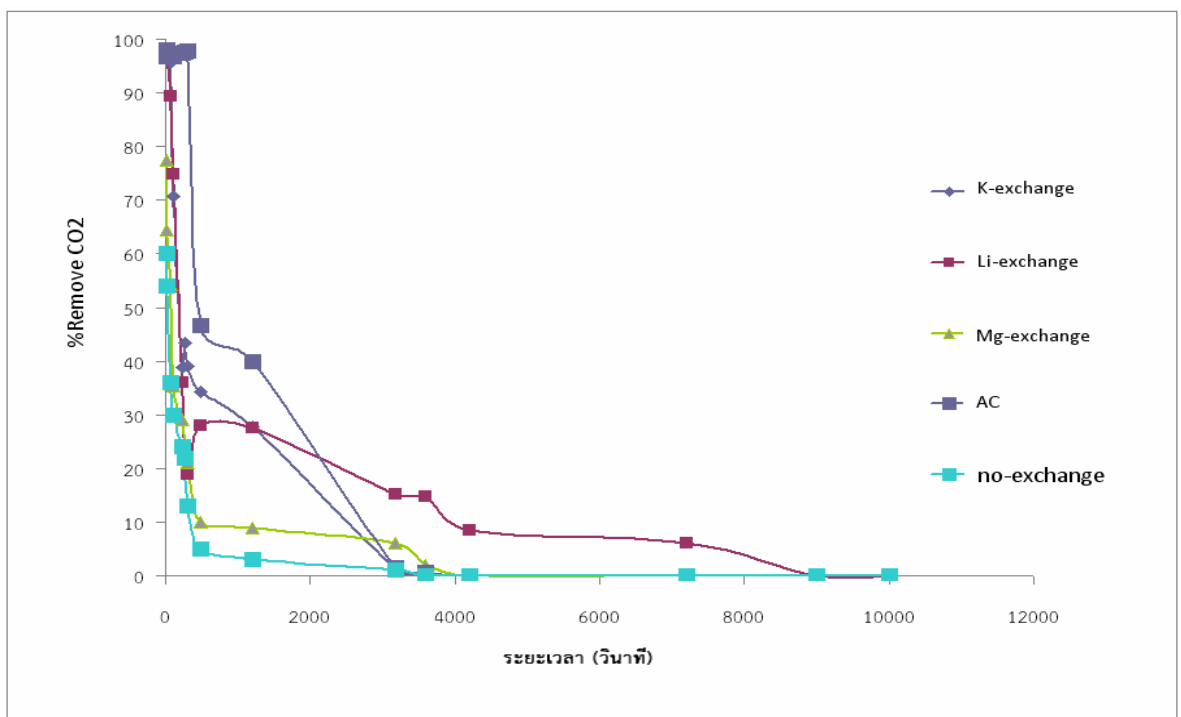
รูปที่ 40. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้กากขาเข้าต่ออัตราการใช้กากขาออกต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยซีโอไลต์ A และถ่านกัมมันต์.

เมื่อศึกษาผลของอัตราการใช้กากขาเข้าต่ออัตราการใช้กากขาออก ดังรูปที่ 40 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการใช้กากขาเข้าต่ออัตราการใช้กากขาออกสูงขึ้นที่ (2:4 = 0.5, 2:3 = 0.7, 2:2 = 1 และ 2:1=2 ตามลำดับ), ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น, เนื่องจากอัตราการใช้กากขาออกน้อยจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาสัมผัสที่สารดูดซับก๊าซสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น, เมื่อทำการศึกษาโดยให้อัตราการใช้กากขาออกสูงกว่าขาเข้า พบว่า สารดูดซับก๊าซจะมีระยะเวลาสัมผัสที่สารดูดซับก๊าซสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง และทำให้ ระยะเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น ซึ่งทำให้สารดูดซับอิ่มตัว ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำลง. จากผลการศึกษาพบ ว่า อัตราการใช้กากขาเข้าที่เหมาะสมได้แก่ อัตราการใช้กากขาเข้า 2 ลิตรต่อนาฬิกาจะสามารถเพิ่มระยะเวลาที่เข้าสู่จุดสมดุลได้. จากผลการศึกษาจึง

สรุปได้ว่า อัตราการไหลก๊าซขาเข้าต่ออัตราการไหลก๊าซขาออกที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คืออัตราการไหลก๊าซขาเข้าต่ออัตราการไหลก๊าซขาออกที่ 2.0.

### 3.6 ผลของไอออนบวกต่อค่าความสามารถในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการศึกษาเพื่อหาแนวทางการในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเพิ่มค่าความสามารถในการจำเพาะเจาะจงต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการแลกเปลี่ยนซีโอไลต์ชนิด เอ ด้วยสารละลายเกลือที่มีไอออนบวกต่างๆ เป็นส่วนประกอบ ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl), ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl<sub>2</sub>) เปรียบเทียบกับ ซีโอไลต์ชนิดเอที่ไม่ผ่านการแลกเปลี่ยน และถ่านกัมมันต์ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแลกเปลี่ยนลิเทียมคลอไรด์บนสารดูดซับก๊าซซีโอไลต์ และถ่านกัมมันต์ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีกว่าสารดูดซับชนิดอื่นๆ ดังรูปที่ 41.



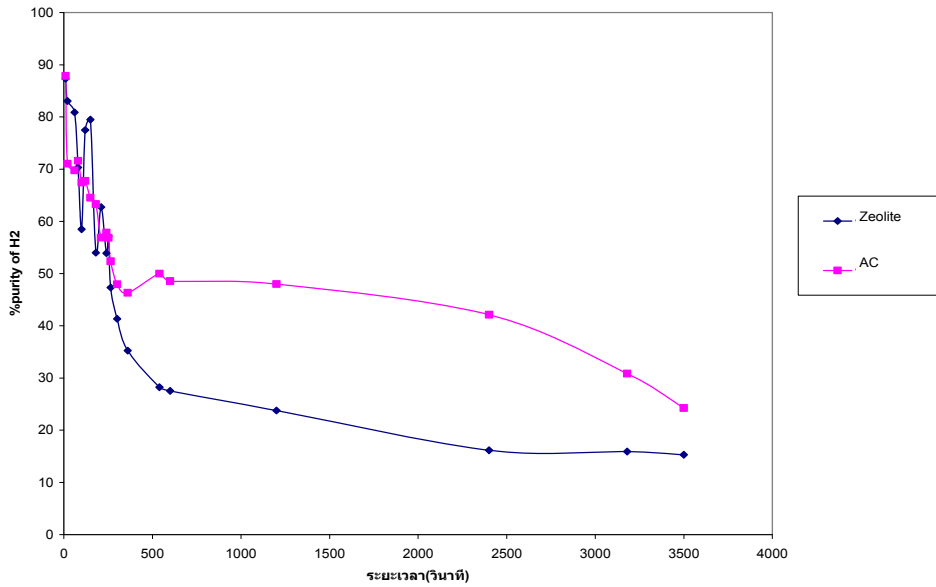
รูปที่ 41. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารดูดซับและประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยความดัน 3 บรรยากาศ อัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกเท่ากับ 2.

จากผลการศึกษาดังรูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารดูดซับและประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยความดัน 3 บรรยากาศ อัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกเท่ากับ 2 พบว่า การแลกเปลี่ยนด้วยลิเทียมคลอไรด์ที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด, โดยพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยใช้ Li-A ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 97.79% K-A เท่ากับ 97.56% Mg-A เท่ากับ 77.38% ซีโอไลต์ที่ไม่แลกเปลี่ยน เท่ากับ 63.1% และถ่านกัมมันต์เท่ากับ 97.96%, เนื่องจากลิเทียมคลอไรด์มีขนาดอนุภาคโดยประมาณ 3.4 อังสตรอม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดโมเลกุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด.

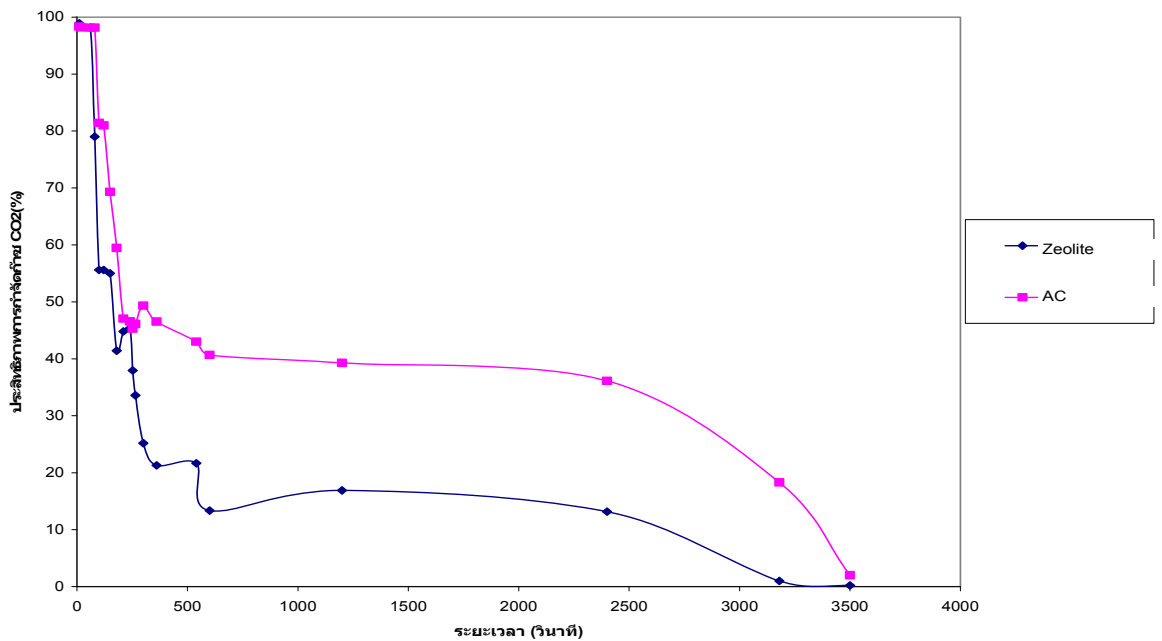
นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Krista และคณะ (2006) พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นกับขนาดของไอออนบวกที่มีขนาดเล็ก ซึ่งได้แก่ สารละลายลิเทียมคลอไรด์, เนื่องจากมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวชนิดควมมีขั้ว (ion-quadrupole) ระหว่างไอออนบวกกับก๊าซชนิดคาร์บอนไดออกไซด์, ทำให้ซีโอไลต์ที่เกิดการแลกเปลี่ยนเพิ่มขนาดไอออนบวก ทำให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น จึงส่งผลให้การปรับปรุงคุณภาพซีโอไลต์โดยการแลกเปลี่ยนด้วยประจุบวกเช่นลิเทียมจึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด. ในขณะที่เดียวกันถ่านกัมมันต์ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดเนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่นเดียวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีขั้วเช่นกัน, ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างการดูดซับเป็นแรงยึดเหนี่ยวต่ำๆ เช่น แรงลอนดอน เป็นต้น. การวิจัยนี้พบว่า วัสดุดูดซับที่ใช้เป็นตัวแทนได้แก่ ซีโอไลต์ปรับปรุงด้วยลิเทียมและถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการศึกษา pressure profile สำหรับก๊าซแต่ละชนิด.

### 3.7 ผลของระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

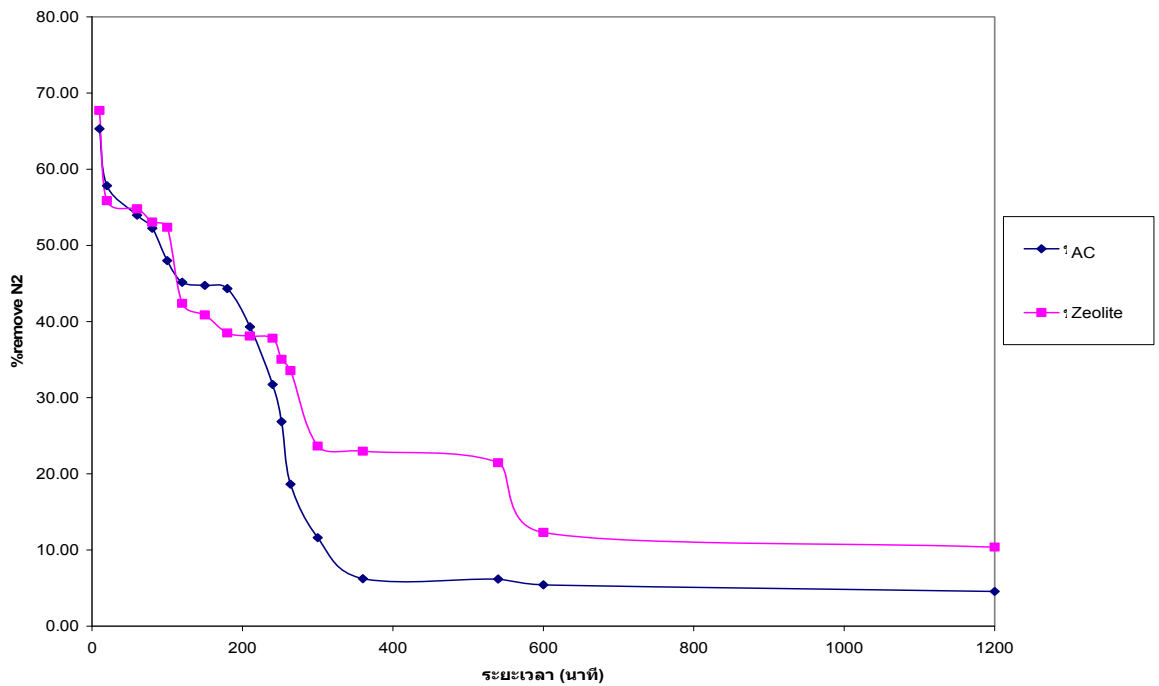
เมื่อทำการศึกษาดูดซับ Li-A และ ถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 50, ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 15 และก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 35, ด้วยความดันหอดูดซับที่ความดัน 3 บรรยากาศ อัตราการไหลก๊าซเข้าต่อขาออกเท่ากับ 2 พบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 42.



รูปที่ 42. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจนที่ระยะเวลาต่างๆในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ  $N_2$ - $CO_2$ - $H_2$  (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A และ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ.



รูปที่ 43. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลาต่างๆในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ  $N_2$ - $CO_2$ - $H_2$  (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A และ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ.



รูปที่ 44. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไนโตรเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อน ก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ  $N_2$ - $CO_2$ - $H_2$  (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A และ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ.

จากกราฟรูปที่ 42-44 พบว่า เมื่อศึกษาความสัมพันธ์การเปรียบเทียบวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์แลกเปลี่ยนลิเทียม พบว่า สามารถทำความสะอาดก๊าซไฮโดรเจน บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 87.87 และ 87.31 ตามลำดับ และสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ได้ร้อยละ 98.34 และ 98.9 ตามลำดับ, โดยถ่านกัมมันต์ใช้ระยะเวลาการดูดซับเข้าสู่สมดุลการดูดซับนานกว่าการใช้ซีโอไลต์. ขณะที่ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไนโตรเจน พบว่า ซีโอไลต์มีประสิทธิภาพ ในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนสูงกว่า ถ่านกัมมันต์ โดยซีโอไลต์มีประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ ไนโตรเจนได้ร้อยละ 68 และ 65.3 ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (จิตตะเสนม 2541), เนื่องจากซีโอไลต์มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมต่อการดูดซับก๊าซไนโตรเจน และสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลดูดซับต่ำกว่าหรือมีเร็วกว่าถ่านกัมมันต์ ซึ่งใช้เวลาในการดูดซับเพื่อเข้าสู่สมดุลได้นานกว่า.

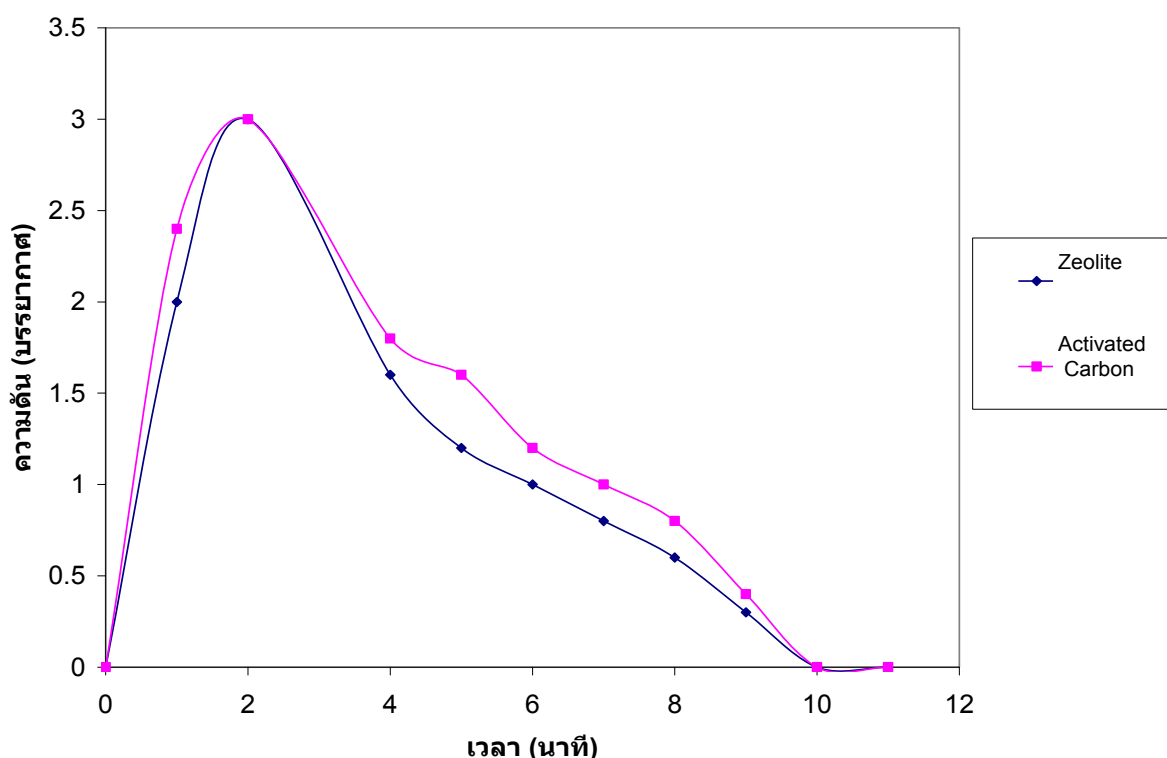
### 3.8 ผลการศึกษาระยะเวลาครบรอบต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการศึกษาระยะเวลาที่ครบรอบต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาระยะเวลาในการเดินระบบพร้อมวัดองค์ประกอบก๊าซแต่ละชนิดจากก๊าซ 3 องค์ประกอบ เริ่มต้น ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 15, ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 35 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 50 พบว่า ผลการศึกษาโดยกำหนดระยะเวลาแต่ละขั้นตอนการทำงานในระบบแยกก๊าซสลับ ความดันสามารถแสดงผลได้ ดังตารางที่ 13 และรูปที่ 45.

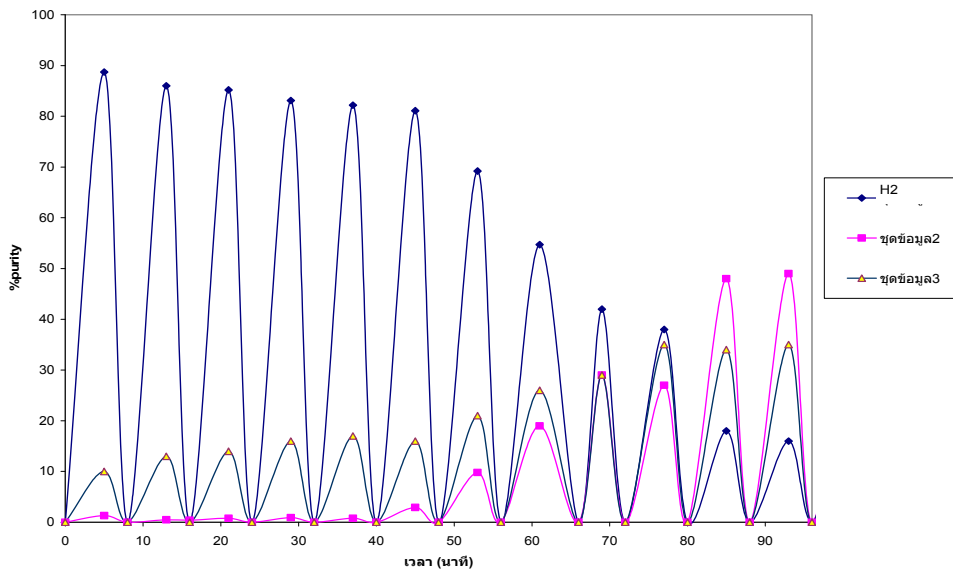
ตารางที่ 13. ระยะเวลาแต่ละขั้นตอนการทำงานด้วยระบบแยกก๊าซสลับความดัน

ขั้นตอน	เวลาในการกำหนด (นาที)
1. Pressurization (เพิ่มแรงดัน)	2
2. Adsorption (ดูดซับ)	3
3. Purge (การปล่อยออก)*	3
4. Blow down (การเป่าทิ้ง)*	1

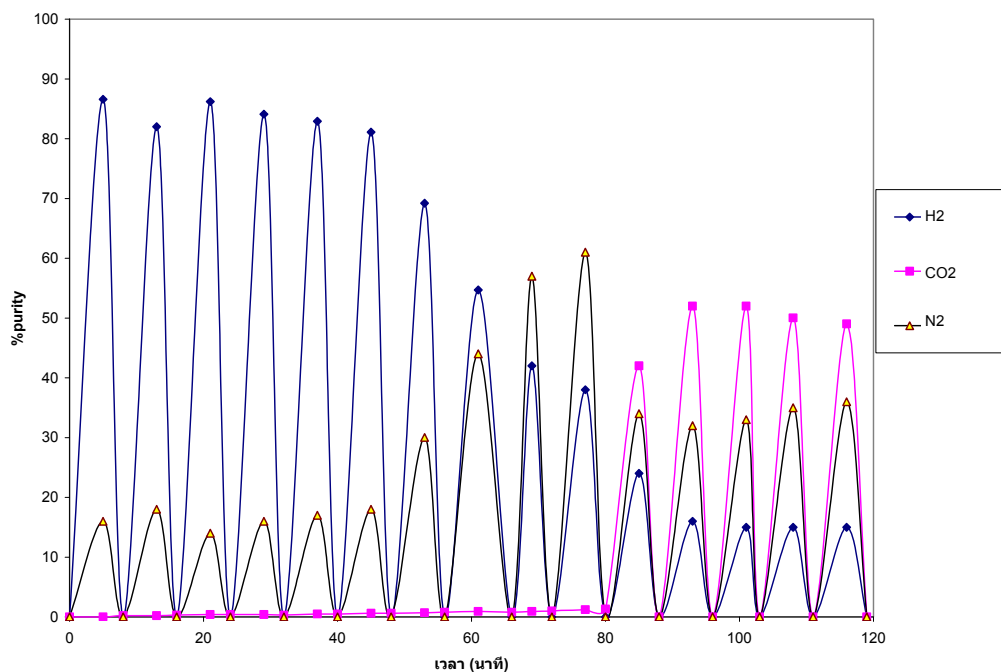
ขั้นที่ 3,4 เป็นขั้นตอนการลดความดันลง (Depressurization)



รูปที่ 45. ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะเวลาครบรอบการดูดซับโดยซีโอไลต์ และถ่านกัมมันต์.



รูปที่ 46. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ  $H_2-CO_2-N_2$  (15:50:35) โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด Li-A) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ.



รูปที่ 47. กราฟแสดงความสัมพันธ์ความบริสุทธิ์ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ในการป้อนก๊าซผสม 3 องค์ประกอบ  $H_2-CO_2-N_2$  (15:50:35) โดยใช้ถ่านกัมมันต์) ด้วยอัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกที่ 2 ความดัน 3 บรรยากาศ.

จากผลการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาครบรอบในการเดินระบบเครื่องแยกก๊าซสลับความดัน, โดยใช้ระยะเวลาแต่ละขั้นตอนตามที่กำหนดดังตารางที่ 13 พบว่า ซีโอไลต์สามารถแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนโดยใช้จำนวนรอบ 8 และมีประสิทธิภาพทำก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ได้สูงถึงร้อยละ 89.6, โดยรอบที่ 9 พบว่า ไม่สามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซไนโตรเจน ได้ดังรูปที่ 46, แต่เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่า ต้องใช้ระยะเวลาครบรอบ จำนวน 11 รอบและมีประสิทธิภาพในการในการทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์เท่ากับ, โดยร้อยละ 86.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์สามารถใช้งานได้นานกว่าเนื่องจากอึดตัวใช้เวลานานกว่าซีโอไลต์, แต่ประสิทธิภาพในการทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ไม่ดีเท่าซีโอไลต์ และนอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ไม่สามารถแยกก๊าซไนโตรเจนออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ในรอบที่ 8 ดังรูปที่ 47.

**ตารางที่ 14. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐานและซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กโดยการแลกเปลี่ยนด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ที่ความดัน 3 บรรยากาศ อัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลออกเท่ากับ 3**

ชนิดก๊าซที่ทำให้บริสุทธิ์	ซีโอไลต์มาตรฐาน(%)	ซีโอไลต์จากตะกรัน (%)
H <sub>2</sub>	89.6	87.3

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ระหว่างซีโอไลต์มาตรฐานแลกเปลี่ยนลิเทียมคลอไรด์และซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กดังตารางที่ 14 สามารถทำก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ได้ร้อยละ 89.6 จากเดิมที่มีเพียงร้อยละ 15, ในขณะที่ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กสามารถทำก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ได้ร้อยละ 87.3, เนื่องจากซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กมีองค์ประกอบของไอออนบวกตัวอื่นๆ ปนอยู่ซึ่งจะมีผลต่อการแลกเปลี่ยนลิเทียมภายในโพรงได้น้อยลง, ประสิทธิภาพในการทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จึงต่ำลง.



## 4. สรุปผลการทดลอง

โครงการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้:

### 1) การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กจากเตาคิวโปลาเพื่อผลิตเป็นซีโอไลต์ชนิด เอ คือ การนำตะกรันเหล็กกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตซีโอไลต์ โดยการย่อยด้วยสารละลายกรดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก. ภายหลังจากย่อยตะกรันถูกเผาเพื่อย่อยให้เกิดสารประกอบซิลิกาและอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง, ภายหลังจากหลอมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1: 3 ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้คือ ซีโอไลต์ชนิด A โดยผลิตภัณฑ์ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 507.6 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีโอไลต์ ให้ค่าความเป็นผลึก เท่ากับ ร้อยละ 87.6. นอกจากนี้การเตรียมเป็นสารประกอบ ซีโอไลต์ชนิด 5A จากตะกรันเหล็ก โดยการนำผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์กวนด้วยสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องในอัตราส่วนโดยมวลต่อปริมาตรเท่ากับ 1 ต่อ 10 สามารถผลิตเป็นซีโอไลต์ชนิด 5A ได้.

2) การศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารดูดซับต่างๆ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด 5A โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ผลของความดันที่เหมาะสม, อัตราการไหลเข้าต่ออัตราการไหลก๊าซขาออก ผลของไอออนบวก, ระยะเวลาต่อประสิทธิภาพ และระยะเวลาครบรอบที่ดูดซับพบว่าได้ผลการศึกษาดังนี้:

ความดันที่เหมาะสม ได้แก่ ความดันที่ 3 บรรยากาศซึ่งสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.27 โมลต่อกรัมสารดูดซับประเภทซีโอไลต์, เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพซีโอไลต์โดยการแลกเปลี่ยนด้วยสารละลายเกลือชนิดต่างๆ ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์, ลิเทียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่า การแลกเปลี่ยนด้วยลิเทียมคลอไรด์กับซีโอไลต์ให้ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 100 %, ในขณะที่ซีโอไลต์ที่ไม่ได้ผ่านการแลกเปลี่ยนมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงร้อยละ 87 ที่อัตราการไหลก๊าซขาเข้าต่ออัตราการไหลก๊าซขาออกที่ 2.0.

3) การศึกษาระยะเวลาครบรอบต่อการเดินระบบเครื่องแยกก๊าซสลับความดัน, โดยระยะเวลาครบรอบใช้เวลานาน 9 นาที โดยแบ่งเป็นเป็นขั้นตอนได้ 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเพิ่มความดัน ซึ่งใช้เวลานาน 2 นาที, การดูดซับ 3 นาที, การปล่อยออก 3 นาที และการเป่าทิ้ง เป็นเวลา 1 นาที และพบว่า เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับก๊าซสามารถดูดซับโดยเครื่องแยกก๊าซสลับความดันได้ 11 รอบ และให้ประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดได้ ในขณะที่ซีโอไลต์มาตรฐาน สามารถแยกก๊าซ  $N_2$  ได้ได้รอบที่ 7 แต่ให้ประสิทธิภาพการทำ  $H_2$  ให้บริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 89.6.

4) จากผลการเปรียบเทียบซีโอไลต์ชนิด A มาตรฐานและจากตะกรันเหล็ก พบว่าสามารถทำ  $H_2$  ให้บริสุทธิ์ได้ร้อยละ 89.6 และ 87.3 ตามลำดับ.

## 5. ผลการศึกษาเบื้องต้นทางด้านการตลาดและผลกระทบของโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยขั้นพื้นฐานซึ่งเป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์โดยคัดเลือกสารดูดซับก๊าซที่สามารถคัดแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนได้ด้วยระบบแยกก๊าซสลับความดัน. โดยทั่วไปสารดูดซับก๊าซหรือโมเลกูลาร์ซีฟนั้น มีการผลิตจากแถบประเทศทางอเมริกาและยุโรป ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการนำเข้าสารเคมีประเภทนี้สูงขึ้นทุกปี, เนื่องจากปัจจุบันมีการนำพลังงานทดแทนประเภทก๊าซเข้ามาใช้ทดแทนน้ำมัน จึงทำให้หลายประเทศรวมถึงประเทศไทยนำเข้าสารประเภทนี้จากต่างประเทศ, เกิดการสูญเสียเงินตราจากการนำเข้าเป็นจำนวนมาก, สารดูดซับก๊าซมีหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมเพื่อแยกก๊าซนิยมใช้สาร โมเลกูลาร์ซีฟชนิดซีโอไลต์ในการทำงาน ทำความสะอาดเอทานอลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน, การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือรวมถึงการแยกก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนจากอากาศ เป็นต้น.

จากข้อมูลการนำเข้า-ส่งออกของซีโอไลต์ในประเทศไทยนั้น พบว่า มีการนำเข้าซีโอไลต์มาจากหลาย ๆ ประเทศมีมูลค่าการนำเข้าถึง 100 กว่าล้านบาท เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม. จากตารางที่ 15 พบว่าในเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 มีมูลค่าการนำเข้าโดยรวมจากหลายประเทศมากถึง 138,237,863 บาท, เมื่อดูข้อมูลเฉพาะเดือนพบว่าเดือนธันวาคม พ.ศ. 2543 มีมูลค่าการนำเข้า 11,655,082 บาท. จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าถ้าได้มีการนำกากของเสียมาใช้ประโยชน์ใหม่ในการผลิตเป็นซีโอไลต์ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เป็นจำนวนมากทั้งค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียและการนำเข้าซีโอไลต์ปีละหมื่นล้านบาทได้.

ตารางที่ 15. ข้อมูลการนำเข้าวัตถุดิบ- ผลิตภัณฑ์ ซีโอไลต์ (ซิลิเกต)ในเดือนมกราคม-ธันวาคม 2543

	ธันวาคม 2543		มกราคม-ธันวาคม 2543	
	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)
ออสเตรเลีย	21,000	562,747	134,250	7,796,236
เบลเยียม	21,000	281,966	21,000	281,966
แคนาดา	10,000	226,350	605,165	4,302,402
คองโก	20,100	379,535	20,150	379,535
เดนมาร์ก	0	0	21,000	211,697
ฝรั่งเศส	0	0	126,000	2,383,065
เยอรมัน	60,600	655,202	226,288	3,199,283
อินเดีย	0	0	8,100	261,833
อิตาลี	147,000	3,873,222	1,041,245	25,313,746
ญี่ปุ่น	28,370	686,730	831,803	24,595,454
เกาหลีเหนือ	1,000	45,160	13,700	1,000,372
มาเลเซีย	44,000	1,013,583	2,231,361	16,421,478
เนเธอร์แลนด์	83,000	1,969,054	730,880	20,003,458
สวีเดน	40,280	697,459	334,039	6,117,651
สหรัฐอเมริกา	47,622	873,954	770,565	17,956,364
<b>รวม</b>	<b>537,692</b>	<b>11,655,082</b>	<b>7,446,529</b>	<b>138,237,863</b>

ที่มา : กระทรวงพาณิชย์ (2543)

จากข้อมูลการนำเข้า-ส่งออก ของซีโอไลต์ในประเทศไทยนั้น พบว่า มีการนำเข้าซีโอไลต์ (สารประกอบ aluminosilicate) เป็นจำนวนมาก ทั้งในรูปของสารตั้งต้นที่จะใช้ในการทำปฏิกิริยาในการเกิดซีโอไลต์ ซึ่งได้แก่ สารโซเดียมซิลิเกตและสารอะลูมิเนียมซิลิเกต และทั้งในรูปสารผลิตภัณฑ์เองโดยทำการแลกเปลี่ยนให้ได้ในรูปแบบสารเคมีต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไป, โดยพบว่า ได้มีการนำเข้าสารเคมีมาจากหลายๆ ประเทศ ซึ่งมีมูลค่าการนำเข้าโดยรวมมากถึง 100 กว่าล้านบาท, โดยความต้องการโดยเฉลี่ยในแต่ละเดือนของการนำเข้าของสารเคมีทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ มีถึงร้อยละ 5-10 ซึ่งมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย.

- ใช้ในอุตสาหกรรมสารซักฟอก โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.5 ของผลิตภัณฑ์นำเข้า.
- ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรและเลี้ยงสัตว์ โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 ของผลิตภัณฑ์

นำเข้า

- ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันและอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ฯลฯ โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 79.5 ของผลิตภัณฑ์นำเข้า (Breck 1974).

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีความเป็นไปได้ในการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ และไฮดรอกซีโซดาไลต์ (Subotic *et al.* 1997) ซึ่งเป็นซีโอไลต์ที่มีการใช้งานหลากหลาย เช่น ใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน และใช้เป็นสารดูดซับเป็นต้น. แต่อย่างไรก็ตาม ซีโอไลต์ที่มีสมบัติในการดูดซับก๊าซได้ยังคงไม่มีผู้วิจัยใดสามารถผลิตได้ ซึ่งถ้าสามารถผลิตสารดูดซับก๊าซจากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดปัญหาในการกำจัดของเสียแล้วยังสามารถนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่และเป็นการเพิ่มมูลค่าของเสียได้อีกด้วย และสามารถนำไปปรับปรุงเพื่อผลิตขายได้ในทางการค้า เป็นการสร้างงานให้เกิดแก่ชุมชนได้ในอนาคต.

## ประมาณค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก

ค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ประกอบด้วย

ค่าวัตถุดิบ สารเคมีที่ใช้ในการผลิต

ค่าไฟฟ้า

ค่าแรงงาน

### 1. ค่าวัตถุดิบ สารเคมีที่ใช้ในการผลิต

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ปริมาณ 1 กิโลกรัม เป็นปริมาณที่ได้จากการเผา ซึ่งประกอบด้วย

- ตะกรันเหล็ก ไม่เสียค่าใช้จ่ายใดๆ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานหล่อเหล็ก ถ้าต้องการผลิตซีโอไลต์ 1 กิโลกรัมต้องใช้ตะกรันเหล็ก จำนวน 2,260 กรัม.

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ประมาณ 3,082 กรัม โดย NaOH การค้า 50 กิโลกรัมราคา 900 บาท คิดเป็นเงินเท่ากับ 54 บาท.

- น้ำกลั่นใช้ประมาณ 79 ลิตร ราคาลิตรละ 4 บาท คิดเป็นเงินเท่ากับ 316 บาท.

### 2. ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต

- ค่าไฟในการอบ: ใช้เตาอบที่มีกำลังไฟฟ้า คิดเป็น โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยกิจการขนาดเล็กที่ใช้ไฟไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อเดือน ที่ 1.8047 ทำการอบที่อุณหภูมิ 105

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบซีโอไลต์เป็นเวลา 8 ชั่วโมง คิดเป็น

คำนวณค่าใช้จ่าย

$$\begin{aligned}\text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW/H} \times (1.8047 + Ft) \\ &= 2.8 \times 13 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 75.20 \text{ บาท}\end{aligned}$$

- ค่าไฟในการเผา: ใช้เตาเผาหือ มีกำลังไฟฟ้าเตาเผาเป็น 3,100 วัตต์ หรือ 3.1 กิโลวัตต์, โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยกิจการขนาดเล็กที่ใช้ไฟไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อเดือน ที่ 1.8047 โดยทำการเผาที่ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และหลอมที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง.

คำนวณค่าใช้จ่าย

$$\begin{aligned}\text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW/H} \times (1.8047 + Ft) \\ &= [3.1 \times 3 \times (1.8047 + 0.2612)] + [3.1 \times 1 \times (1.8047 + 0.2612)] \\ &= 25.61 \text{ บาท}\end{aligned}$$

- ค่าไฟในการให้ความร้อนในการกวนกับ NaOH : ใช้เครื่องกวนหือ IKA มีกำลังไฟฟ้าเครื่องกวนเป็น 2,000 วัตต์ หรือ 2.0 กิโลวัตต์, โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยกิจการขนาดเล็กที่ใช้ไฟไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อเดือน ที่ 1.8047 เป็นระยะเวลา 0.5 ชั่วโมง.

คำนวณค่าใช้จ่าย

$$\begin{aligned}\text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW/H} \times (1.8047 + Ft) \\ &= [2.0 \times 0.5 \times (1.8047 + 0.2612)] \\ &= 57.85 \text{ บาท}\end{aligned}$$

### 3. ค่าแรงที่ใช้ในการผลิต

ค่าแรงที่ใช้เตรียมวัตถุดิบ เช่น การย่อยด้วยสารละลายกรดผสม, การร่อน, การเผา, การเตรียมสารละลาย ในการผลิตซีโอไลต์ 1,000 กรัม ใช้เวลาเตรียม 1 ชั่วโมง คิดค่าแรง 40 บาท/ชั่วโมง.

รวมค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ปริมาณ 1,000 กรัม.

มีค่า = 54 + 316 + 75.20 + 25.61 + 57.85 + 40 = 568.66 บาท.

จากการประเมินต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก พบว่า ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็กมีราคาต้นทุน คือ 568.88 บาท ต่อซีโอไลต์ 1,000 กรัม.

#### 4. ราคาซีโอไลต์มาตรฐาน

สำหรับซีโอไลต์ใช้เป็นสารดูดซับก๊าซและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีมูลค่าสูง, เนื่องจากใช้ในภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น ซีโอไลต์ชนิด X, Y และ ZSM-5 โดยมีมูลค่าดังตารางที่ 16 ดังนี้:

ตารางที่ 16. มูลค่าซีโอไลต์มาตรฐานตามท้องตลาด

ชนิดซีโอไลต์	ปริมาณ (กรัม)	ราคา(บาท)
3A	50	3,576
5A	50	1,964
X	50	5,168
Y	50	6,013
ZSM-5	50	7,025

จากมูลค่าของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากตะกรันเหล็ก พบว่า สามารถผลิตได้ในราคา 568.66 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่มีการนำเข้าผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ชนิด 5เอ มีค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมเท่ากับ 39,280 บาท.

## 6. ข้อเสนอแนะ

พลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นพลังงานสะอาด ซึ่งสามารถผลิตได้จากกระบวนการต่างๆ มากมาย โดยพบว่า กระบวนการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปต้องมีการกำจัดก๊าซปนเปื้อนเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออก, โดยใช้สารละลายประเภทต่าง ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากการแทนที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายต่าง. ดังนั้นแนวทางการใช้สารดูดซับก๊าซ เช่น การใช้เครื่องแยกก๊าซสลับความดัน จึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการทำความสะอาดก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์รวมถึง สามารถปรับอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไนโตรเจนเพื่อใช้งานได้มากขึ้น ซึ่งพบว่า เครื่องดังกล่าวต้องมีการใช้สมบัติเด่นของสารดูดซับก๊าซที่เหมาะสมในการแยกก๊าซแต่ละชนิด.

จากผลการศึกษาปริมาณการใช้ซีโอไลต์เพื่อดูดซับก๊าซต่างๆ ด้วยเครื่องแยกก๊าซสลับความดัน พบว่า 1 โรงงานต้องมีการนำเข้าสู่สารดูดซับก๊าซมากกว่า 100 ล้านบาทโดยมีอายุการใช้งานนานเพียง 3 เดือนและสามารถทำความสะอาดก๊าซได้ไม่เกิน 5 รอบต่อการทำงานของเครื่อง, ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพสารดูดซับก๊าซจากตะกอนจึงมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้:

- 1) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้ว หรือจากตะกอนน้ำทิ้งอะลูมิเนียมที่มีปริมาณอลูมินาสูง เพื่อศึกษาความคุ้มค่าในการนำสารละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าต่อขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์.
- 2) ควรมีการหาของเสียเหลือทิ้งประเภทอื่นๆ เช่น เถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล เถ้าแกลบ หรือเพอร์ไรต์เป็นต้น เพื่อพัฒนาซีโอไลต์ให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น.
- 3) ควรมีการทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซปนเปื้อนโดยการใช้.
- 4) ระบบสุญญากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซ.

### 6.1 ศักยภาพในกลุ่มอุตสาหกรรมหรือชนบท

1. ความต้องการภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่มีวัตถุประสงค์ประเภทโรงหล่อเหล็ก หรือโรงถลุง เพื่อเพิ่มมูลค่าของเสียเหลือทิ้งเหล่านี้ให้สามารถพัฒนาเป็นสารดูดซับก๊าซ.



2. ความต้องการภาคชุมชน เช่น ภัตตาคารหรือฟาร์มปศุสัตว์ ที่มีของเสียหรือขยะอินทรีย์จำนวนมากผลิตเป็นก๊าซชีวภาพและนำกระบวนการดูดซับนี้ในการพัฒนาพลังงานทดแทนให้สะอาดและสามารถใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้น.

## 6.2 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. ภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมหล่อโลหะ, อุตสาหกรรมเอทานอลในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและทำความสะอาดก่อนนำมาใช้งาน.

2. กรมควบคุมโรงงาน เพื่อสามารถตอบสนองนโยบายในการลดของเสียจากแหล่งกำเนิดเพื่อเป็นแนวทางในการนำของเสียดังกล่าวมาเพิ่มมูลค่าอีกทั้งสามารถควบคุมปริมาณตะกอนเหล็กได้.

3. กรมพัฒนาพลังงานทดแทน เพื่อเป็นแนวทางในการทำความสะอาดก๊าซไฮโดรเจนก่อนใช้งานต่างๆ.

## 6.3 การนำไปใช้ประโยชน์

1. ถ่ายทอดเทคโนโลยีองค์ความรู้พื้นฐานการวิจัยเพื่อพัฒนาพลังงานทดแทนในอนาคตโดยการเผยแพร่ในรูปแบบบทความวิชาการและวารสาร.

2. ถ่ายทอดเทคโนโลยีในการเพิ่มมูลค่าของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเพื่อไปสู่เชิงพาณิชย์.

## 6.4 ผลลัพธ์และผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในทางเศรษฐกิจและสังคม

### ด้านเศรษฐกิจ

1. ประหยัดเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าสารดูดซับก๊าซ.
2. สามารถพัฒนาสารดูดซับก๊าซที่ผลิตได้ในประเทศ โดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ.
3. สามารถพัฒนากระบวนการทำความสะอาดก๊าซไฮโดรเจนก่อนใช้งาน เพื่อเพิ่มศักยภาพของพลังงานทดแทนดังกล่าว เช่น การใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ เป็นต้น.

### ด้านสังคม

1. สามารถพึ่งพาตนเองได้โดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ.
2. รักษาทัศนียภาพบริเวณโรงงานหล่อเหล็ก เนื่องจากตะกอนเหล็กจัดเป็นของเสียอันตรายที่ต้องมีการกำจัดซึ่งมักเป็นการกองบริเวณด้านข้างโรงงาน ซึ่งถ้ามีการพัฒนาสารดูดซับก๊าซจากตะกอนเหล็กจะทำให้ไม่เกิดการกองของเสียเหลือทิ้งเหล่านี้.

### ด้านสิ่งแวดล้อม

1. ลดการทิ้งของเสียภาคโรงงานอุตสาหกรรมหล่อโลหะ หรือ อุตสาหกรรมประเภทถลุง.
2. ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในการเกิดภาวะเรือนกระจกเนื่องจากสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และสามารถนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้ประโยชน์ได้จากทางอื่น.

### 6.5 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับทั้งโครงการ (ระบุมูลค่าเป็นตัวเงิน)

1. ทดแทนการนำเข้าสารดูดซับก๊าซ คิดเป็นเงิน 38,711 บาทต่อกิโลกรัมซีโอไลท์.
2. ประหยัดเงินตราในการฝังกลบขยะจากโรงงานหล่อเหล็กไม่น้อยกว่า 8,000 บาทต่อเดือนต่อเที่ยว
3. ทดแทนการนำเข้าก๊าซไฮโดรเจน คิดเป็นเงินไม่น้อยกว่า 400 บาทต่อกิโลกรัมไฮโดรเจน.

## 7. เอกสารอ้างอิง

- จรรยาวัฒน์เลาหะ, จิตตะเสน. 2541. การจำลองผลกระทบของวิธีการเพิ่มและลดความดันต่อการแยกอากาศโดยกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- American Foundry men's Society, 1975. Cupola furnace. New York: Cupola hand book/AFS, Illinois, pp.64-183.
- Breck D.W., 1974. Zeolite Molecular sieves :Structure, Chemistry, and use. New York: **Zeolite**, Wiley.
- Chang H.L. and Shih W.H., 1995. Conversion of fly ash to zeolites for waste treatment. Ceramic Transaction, **61**, pp. 81-88.
- Chareonpanich .M *et al.*, 2004. Synthesis of ZSM-5 zeolite from lignite fly ash and rice husk ash. Fuel Processing Technology , **85**, pp. 1623-1634.
- Clyde R. David E. Goldbery., 1971. Chemistry Reaction, Structure and properties. New York: Macmillan, pp. 100-201.
- Conventional-and microwave-hydrothermal synthesis from carbonized rice husk.\_Microporous and Mesoporous Materials, **86**, pp. 145-151.
- Dufour J., Gonzalez V. and Iglesia A. La., 2001. Optimization of 4A Zeolite Synthesis as Recovery of Wastes from Aluminium Finishing. Journal of Environmental Science and Health, A **36**, pp. 1257-1269.
- Dufour J., Gonzalez V. and A.La Iglesia, 2001. Synthesis of 13X Zeolite from Alkaline Waste Streams in the Aluminium Anodizing Industry. Industrial Engineering Chemical Research, **40**, pp. 1140-1145.
- Dufour J. *et al.*, 1997. Viability of the use of pickling baths from aluminum surface treatment for synthesizing low Si/ Al zeolites. Journal Environmental Science Health , A. **32**, pp. 1807-1825.
- Dufour J. *et al.*, 2001. Optimization of the synthesis of zeolite 4A from waste of aluminium profile production. Journal Environmental Science Health, A. **36**, pp. 1257-1270.
- Gilbert J.E.and Mosset A., 1998. Preparation of Impurity-Free Zeolites from Coal-Mine Schists. European Journal of the Solid State Inorganic Chemistry. **35**, pp. 447-458.

- Gualtieri A. *et al.*, 1997. Kinetic Study of Hydroxysodalite Formation from Natural Kaolinites by Time-Resolved Synchrotron Powder Diffraction. *Microporous Materials*. **8**, pp. 189-201.
- Hollman G.G., Steenbruggen. G. and Jurkovicova M., 1999. A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. *Fuel*, **78**, pp. 1225-1230.
- Holler H., Wirsching U., 1985. Zeolite formation from fly ash, *Fortschr. Mineral*, **63**, pp.21-43.
- Hemni T., 1987. Synthesis of hydroxyl-sodalite (zeolite) from waste coal ash. *Soil Science. Plant nutrient*, **33**, pp. 517-521.
- Krista S. and Morgan B., 2005. CO<sub>2</sub> adsorption in Y and X zeolites modified by alkali metal cation exchange. *Microporous and Mesoporous Materials*. **91**, pp.78-84.
- Katsuki H. *et al.*, 2005. ZSM-5 zeolite/ porous carbon composite:
- Lglesia A. La, Gonzalez M.V., and Dufour J., 2001. Zeolite synthesis employing Alkaline waste Effluents from the aluminium industry. *Environmental Progress*, **21**, pp. 105-110.
- Machinaga O., *et al.*, 1999. Manufacture of zeolites from aluminium sludge. Japanese patent, NO.11314, pp. 912, 1999.
- Melian-Cabrera I *et al.*, 2006. Alkaline leaching for synthesis of improved Fe-ZSM-5 catalyst, *Catalysis Communications*, **7**, pp.100-103.
- Mokhtar Mohamed M., Othman Ali I. and Eissa N.A., 2005. Effect of thermal treatment on surface and bulk properties of Fe/ZSM-5 zeolites prepared by different methods. *Microporous and Mesoporous Materials*. **87**, pp. 93-102.
- N Regina Camargo, F. Machado and D.M Malachini Miotto. , 2006. Synthesis of Na-A and X zeolites from Oil shale ash. *Fuel*. **84**, pp. 2289-2294.
- Querol X. *et al.*, 2002. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. *International Journal Coal Geology*. **50**, pp. 413-423.
- Rajan K. *et al.*, 2006. Template free ZSM-5 from siliceous rice hull ash with varying C contents. *Microporous and Mesoporous Materials*, pp. 134-140.
- Rayalu S., Meshram S.U., and Hasan M.Z., 2000. Highly Crystalline Faujasitic Zeolites from Flyash. *Journal of Hazardous Materials* , **B77**, pp. 123-131.

- Shigemoto N., Hayashi H. and Miyaura K., 1993. Selective formation of Na-X, zeolite from coal fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction. *Journal Material Science*. **28**, pp.4781-4786.
- Singer A., Berggaut V., 1995. Cation exchange properties of hydrothermally treated coal fly ash. *Environmental Science Technology*. **29**, pp. 1748-1753.
- Srinivasan A., Grutzech M.W., 1999. The adsorption of SO<sub>2</sub> by zeolite synthesized from fly ash. *Environmental Science Technology*. **33**, pp. 1464-1469.
- Szostak. R.,1989. **Molecular sieve principles of synthesis and identification**. New York: Van Nostrand reinhold.
- Subotic B. *et al.*, 1997 Influence of Physicochemical and Structural Properties of Aluminosilicate Gel Precursors on the Kinetics of Crystallization of Zeolites A and X. *Synthesis of Porous Materials: Zeolites, Clays and Nanostructures*. New York: Marcel Dekker Inc., pp. 35-58.
- Sanhueza V., Kelm U., and Cid R., 1999. Synthesis of Molecular Sieves from Chilean Kaolinites: 1. Synthesis of NaA Type Zeolites. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. **74**, pp. 358-363.
- Querol X. *et al.*, 1997. A Fast Method for Recycling Fly Ash: Microwave-Assisted Zeolite Synthesis. *Environmental Science and Technology*. **31**, pp. 2527-2533.
- Somerset S. V. *et al.*, 2005. Alkaline hydrothermal zeolites synthesized from high SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> co-disposal fly ash filtrates, *Fuel*. **84**,pp. 2324-2329.
- Shiyun S. *et al.*, 2004. Difference of ZSM-5 zeolites synthesized with various templates, *Catalysis Today*, 93-95, pp. 729-734.
- Van Bekkum H., 2001. **Introduction to zeolite science and practice**. New York: Elsevier.
- Zhdanov S.P., 1971. Some Problems of Zeolite Crystallization, *Adv. Chem.*, Ser. **101**, pp. 20-43.