



การพัฒนาตัวคุณซึ่งเพื่อกำจัดก้าชไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากกระบวนการผลิตก้าชธรรมชาติ

โดย
นายวรวิทย์ สีหอนุกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาตัวคุณภาพเพื่อกำจัดก้าชไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากกระบวนการผลิตก้าชธรรมชาติ

โดย

นายรวิทย์ สีห่อนุกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**ADSORBENT' S DEVELOPMENT FOR HYDROGEN SULFIDE REMOVAL FROM
NATURAL GAS PROCESSING**

By

Warrawit Seeanukul

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
MASTER OF ENGINEERING
Department of Chemical Engineering
Graduate School
SILPAKORN UNIVERSITY
2008**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การพัฒนาตัวคูดชับเพื่อกำจัดก้าชไชโตรเจนชัลไฟฟ์ ” ออกจากการกระบวนการผลิตก้าชธรรมชาติ ” เสนอโดย นายวรวิทย์ สีหอนุกูล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาบริการและเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ เดือน พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวัฒน์ ปัตทวีคงคาน

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกร แมมาสุวรรณดำรง)

...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุ่งใจ ปั้นประณต)

...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)

...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวัฒน์ ปัตทวีคงคาน)

...../...../.....

49404210 : สาขาวิศวกรรมเคมี

คำสำคัญ : การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์/ ก๊าซธรรมชาติ/ ตัวคูดซับ/ คอมเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชิลิกา/ เฟรมสเปรย์

erwity สีห่อนุกุล: การพัฒนาตัวคูดซับเพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: พศ.ดร.วีรวัฒน์ ปัตทวีวงศาก. 85 หน้า

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซธรรมชาติ จากตัวคูดซับชนิดคอมเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และคอมเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ และโซลเจล เพื่อเปรียบเทียบชนิดตัวคูดซับและวิธีการเตรียมตัวคูดซับ แล้วนำตัวคูดซับที่ดีที่สุดไปเติมด้วยชิลิกาที่ปริมาณ 5-25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยตัวคูดซับที่สังเคราะห์ได้จะทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค การคูดซับของก๊าซในโตรเจน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพการคูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สังเคราะห์ ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ เพื่อเปรียบเทียบกับตัวคูดซับทางการค้า

จากการทดสอบทดสอบประสิทธิภาพการคูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สังเคราะห์ พบว่า คอมเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ให้ปริมาณการคูดซับมากที่สุด เท่ากับ 10.56 กรัมซัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ เมื่อนำคอมเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ไปเติมด้วยชิลิกา พบว่าการเติมชิลิกาที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ให้ปริมาณการคูดซับมากที่สุด เท่ากับ 33.18 กรัมซัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ โดยตัวคูดซับทางการค้า (COM-1, COM-2, COM-3) จะมีปริมาณการคูดซับ 3.91, 6.08, 11.33 กรัมซัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ ตามลำดับ

นำตัวคูดซับคอมเปอร์ออกไซด์ที่เติมด้วยชิลิกาปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ชนิดผง ไปทดสอบกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซธรรมชาติ จะได้ประสิทธิภาพการคูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ดีกว่าตัวคูดซับทางการค้าประมาณ 2.4 เท่า และนำตัวคูดซับคอมเปอร์ออกไซด์ที่เติมด้วยชิลิกาปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ไปปั้นรูป (ชนิดเม็ด) พบว่าให้ค่าการคูดซับดีกว่าตัวคูดซับทางการค้าประมาณ 1.22 เท่า

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

49404210 : MAJOR : CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORDS : H₂S REMOVAL/ NATURAL GAS/ ADSORBENT/ SiO₂-MODIFIED CuO/
FLAME SPRAY PYROLYSIS

WORRAWIT SEEANUKUL : ADSORBENT'S DEVELOPMENT FOR HYDROGEN
SULFIDE REMOVAL FORE NATURAL GAS PROCESSING. THESIS ADVISOR :
ASST.PROF. WEERAWAT PATTTHAVEEKONGKA. 85 pp.

In this study, removal of H₂S from gas steam and natural gas using the CuO, ZnO and Cu-ZnO mixed oxide adsorbent has been successfully prepared by Flame Spray Pyrolysis (FSP) and Sol-gel method. The best adsorbent and high efficiently develop by supported SiO₂ 5-25% by mol. The obtained powder was characterized by using N₂ desorption, XRD and TEM. Removal of H₂S from gas steam and natural gas was used as the probe reaction for testing the adsorbent ability at ambient temperatures and pressure. All adsorbent will be compare efficiently remove H₂S with commercial adsorbent.

The result for removal of H₂S from gas steam reveal to the adsorbent, prepared by Flame Spray Pyrolysis (FSP) of CuO is excellent, the capacity is 10.56 g S / 100 g adsorbent and observed for CuO with 10 mol% SiO₂ loading given the best adsorbent and the highest sulfur capacity about 33.18 g S/ 100 g adsorbent and capacity of commercial adsorbent (COM-1, COM-2, COM-3) with 3.91, 6.08, 11.33 g S/ 100 g adsorbent, respectively.

Using Flame Spray Pyrolysis (FSP) of CuO with 10 mol% SiO₂ loading prepared powders to test with H₂S from natural gas, experimental result showed about 2.4 order of commercial adsorbent (COM-3). And prepared sphere form, the result of performance tested with 1.22 order of commercial adsorbent to sphere form (COM-3).

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี โดยรับความรู้และแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งความคุ้มแลเอ่า ใจใส่ในการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรวัฒน์ ปัตทวิคคค ผู้วิจัยของศูนย์คุณบุคลากรและองค์กรต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนทางด้านวิชาการ วัสดุอุปกรณ์ และการวิเคราะห์ผลจาก

1. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สนับสนุนด้านอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการ
2. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกอ. สาขาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกอ.-สสว.) ประจำปี 2550
3. สถาบันวิจัย และเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ท่อน้ำกระแส เครื่องมือ และเครื่องก๊าซโคมไฟโถก
4. คุณภาวิณี สินทรโภ ที่เคยช่วยเหลือ และติดต่อประสานงานกับทางสถาบันวิจัย และเทคโนโลยี ปตท.
5. คุณอัจจนา แพรรุ่งเรือง ที่ช่วยให้กำปรึกษาในการใช้เครื่องก๊าซโคมไฟโถก
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไอกอร์ เมฆาสุวรรณ์รองค์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูวงศ์ ชัยสุข ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์

ผู้จัดทำ

นายวริทธิ์ สีหอนุกูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๑
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๒
กิตติกรรมประกาศ	๓
สารบัญตาราง	๔
สารบัญภาพประกอบ	๕
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
งานวิจัยที่ผ่านมา	3
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
ขอบเขตของงานวิจัย	7
2 ทฤษฎี	8
การคุณชั้บ	8
ลักษณะของการคุณชั้บ	8
การคุณชั้บทางกายภาพ	8
การคุณชั้บทางเคมี	9
ข้อแตกต่างระหว่างการคุณชั้บทางกายภาพและการคุณชั้บทางเคมี	9
การคุณชั้บทางกายภาพมักจะเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	9
การคุณชั้บทางกายภาพสามารถเกิดแบบ Multilayer	9
แรงที่เกี่ยวกับการคุณชั้บทางกายภาพ	9
แรงที่เกี่ยวข้องกับการคุณชั้บ	10
แรงแปรรูป	10
แรงผลักดัน	10
แรงไฟฟ้าสถิต	10
ปัจจัยที่มีผลต่อการคุณชั้บ	11
คุณสมบัติของตัวคุณชั้บ	11

บทที่	หน้า
คุณสมบัติของตัวกรุดูดซับ	12
สภาพะในการดูดซับ	12
กลไกการดูดซับ H_2S	13
กลไกการดูดซับ	13
กลไกการดูดซับ H_2S	14
ออกซิเดชัน	15
การดูดซับในเบดนิ่ง	15
Breakthrough curves	17
ปัจจัยที่มีผลต่อค่า LUB	17
ไอโซเทอมการดูดซับ	18
สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ	20
สมการ Langmuir	20
สมการ BET	20
สมการ Freundlich	21
การเตรียมตัวกรุดูดซับด้วยวิธีโซล-เจล	22
การเตรียมตัวกรุดูดซับด้วยวิธีเฟรมสเปรย์	22
3 การดำเนินการวิจัย	25
การเตรียมตัวกรุดูดซับ และศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวกรุดูดซับ	25
การเตรียมตัวกรุดูดซับ	25
การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวกรุดูดซับ	29
การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์	32
การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สั่งเคราะห์	
ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม	32
การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ความ	
เข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ	34
4 ผลการทดลองและวิจารณ์	37
การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวกรุดูดซับ	37
การวัดค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับของก๊าซในโตรเคน	37
ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	47

บทที่	หน้า
ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	50
การทดสอบประสิทธิภาพการคุณชับก้าวไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์	52
การทดสอบประสิทธิภาพการคุณชับก้าวไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์สังเคราะห์	
ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม	53
การทดสอบประสิทธิภาพการคุณชับก้าวไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์	
ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าวธรรมชาติ	58
5 สรุปผลการทดลอง	62
 บรรณานุกรม	64
 ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของก้าวไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์	69
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของตัวคุณชับ	72
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ	77
ภาคผนวก ง ลักษณะที่ใช้ในการคำนวณ	83
 ประวัติผู้วิจัย	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สรุปลักษณะของการคุณชั้บทางเคมีและการคุณชั้บทางกายภาพ	10
2 ผลที่ได้จากการวัดค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการคุณชั้บทองก้าช์ในโตรเจน	38
3 แสดงขนาดผลลัพธ์จากการประมาณค่าขนาดอนุภาคจากผลการเลี้ยง eben ของรังสีอีกซ์ โดยใช้สมการของเซอร์เรอร์	50
4 แสดงขนาดอนุภาค จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	52
5 แสดงผลของปริมาณการคุณชั้บก้าช์ไอกโตรเจนชัลไฟฟ์สั่งเคราะห์ ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็มของตัวคุณชับคوبเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์ และคอบเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ และวิธีโซลเจล เปรียบเทียบกับตัวคุณชับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)	55
6 แสดงผลของปริมาณการคุณชั้บก้าช์ไอกโตรเจนชัลไฟฟ์สั่งเคราะห์ ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็มของตัวคุณชับคوبเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกอน ที่ซิลิกอนบริษัทต่างๆที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์เปรียบเทียบกับตัวคุณชับ ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)	57
7 แสดงผลของปริมาณการคุณชั้บก้าช์ไอกโตรเจนชัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็ม ในก้าชธรรมชาติของตัวคุณชับคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกอน 10 เปอร์เซ็นต์ กับตัวคุณชับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)	59
8 แสดงผลของปริมาณการคุณชั้บก้าช์ไอกโตรเจนชัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็ม ในก้าชธรรมชาติของตัวคุณชับคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกอน 10 เปอร์เซ็นต์ กับตัวคุณชับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่นำไปปั้นรูป	61

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการผลิตก้าชธรรมชาติ	3
2 การคุณภาพของสารคุณภาพด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต	11
3 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกคุณภาพในกระบวนการคุณภาพ	14
4 แสดงการคุณภาพในเบคนิ่ง	16
5 ไอโซเทอมการคุณภาพ	18
6 การเปรียบเทียบการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กัน กับวิธีเฟรมสเปรย์	23
7 ขั้นตอนการก่อเกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเฟรมสเปรย์	24
8 แผนผังขั้นตอนการเตรียมตัวคุณภาพด้วยวิธีโซลเจล	27
9 แผนผังขั้นตอนการเตรียมตัวคุณภาพด้วยวิธีเฟรมสเปรย์	29
10 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว	30
11 เครื่องเลี้ยงแบบรังสีเอกซ์	31
12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	32
13 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการคุณภาพก้าชไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์สังเคราะห์ ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม	33
14 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการคุณภาพก้าชไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์สังเคราะห์ ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม	33
15 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการคุณภาพก้าชไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์ ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติ	35
16 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการคุณภาพก้าชไฮโดรเจนเซลล์ไฟฟ์ ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติ	35
17 การกระจายตัวของขนาดรูปrun (Pore size distribution) และไอโซเทอมการ คุณภาพของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคوبเปอร์ ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP CuO)	40
18 การกระจายตัวของขนาดรูปrun (Pore size distribution) และไอโซเทอมการ คุณภาพของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 20 เปอร์เซ็นต์ คوبเปอร์ออกไซด์กับ 80 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี เฟรมสเปรย์ (FSP 20%Cu:80%Zn)	40

หน้า	ภาคที่
41	19 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 50 เปอร์เซ็นต์ คopolyperoxyออกไซด์กับ 50 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP 50%Cu:50%Zn)
41	20 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 80 เปอร์เซ็นต์ คopolyperoxyออกไซด์กับ 20 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP 80%Cu:20%Zn)
42	21 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP ZnO)
42	22 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคopolyperoxyออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล (SG CuO)
43	23 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 20 เปอร์เซ็นต์ คopolyperoxyออกไซด์กับ 80 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล (SG 20%Cu:80%Zn)
43	24 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 50 เปอร์เซ็นต์ คopolyperoxyออกไซด์กับ 50 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล (SG 50%Cu: 50%Zn)
44	25 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 80 เปอร์เซ็นต์ คopolyperoxyออกไซด์กับ 20 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล (SG 80%Cu: 20%Zn)
44	26 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล (SG ZnO)

หน้า	
ภาคที่	
27 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 5 เปอร์เซ็นต์ (FSP 5% SiO ₂ -modified CuO)	45
28 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ (FSP 10% SiO ₂ -modified CuO)	45
29 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 15 เปอร์เซ็นต์ (FSP 15% SiO ₂ -modified CuO)	46
30 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 20 เปอร์เซ็นต์ (FSP 20% SiO ₂ -modified CuO)	46
31 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 25 เปอร์เซ็นต์ (FSP 25% SiO ₂ -modified CuO)	47
32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณและส่องเท่าของมุมตកกระทบของคوبเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์และคوبเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล	48
33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณและส่องเท่าของมุมตกกระทบของคوبเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์และคوبเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีด้วยวิธีเฟรมสเปรย์	48
34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณและส่องเท่าของมุมตกกระทบของคوبเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกาที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์	49
35 รูปที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบล่องผ่านของตัวคุณภาพคوبเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์และคوبเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์	51
36 รูปที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบล่องผ่านของตัวคุณภาพคوبเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกาที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์	52

ภาคที่	หน้า
37 ผลการคุณชั้บก้าวไฮโตรเจนเซลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ของตัวคุณชั้บคงอปเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์และคงอปเปอร์ออกไซด์ ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์และวิธีโซลเจล ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ.....	53
38 ผลการคุณชั้บก้าวไฮโตรเจนเซลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ของตัวคุณชั้บคงอปเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์และคงอปเปอร์ออกไซด์ ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP) กับตัวคุณชั้บ ของบริษัทปตท. จำกัด (มหาชน) (COM1, COM2, COM3) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ.....	54
39 ผลการคุณชั้บก้าวไฮโตรเจนเซลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ของตัวคุณชั้บคงอปเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกาที่ปริมาณ ซิลิกาต่าง ๆ กับตัวคุณชั้บ ของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ.....	56
40 ผลการคุณชั้บก้าวไฮโตรเจนเซลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติ ของตัวคุณชั้บคงอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์กับตัวคุณชั้บ ของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ.....	58
41 ตัวคุณชั้บคงอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ กับตัวคุณชั้บ ของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) ที่นำไปปั๊มน้ำ.....	59
42 ผลการคุณชั้บก้าวไฮโตรเจนเซลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็ม ในก้าชธรรมชาติของตัวคุณชั้บคงอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ กับตัวคุณชั้บ ของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) ที่นำไปปั๊มน้ำ.....	60

บทที่ 1

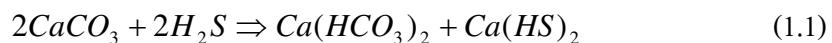
บทนำ

1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในโลกปัจจุบันก้าชธรรมชาติเป็นพลังงานที่สำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ภายใต้สถานการณ์เศรษฐกิจและสภาพการแปร่เปลี่ยน ดังนั้นการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตก้าชธรรมชาติให้มีคุณภาพที่สามารถตอบสนองทันต่อการบริโภคและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งที่ควรตระหนักรถึงเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากกระบวนการผลิตก้าชธรรมชาตินี้มีก้าชมีเทน (Methane) เป็นส่วนประกอบสำคัญกว่า 90% รองลงมาได้แก่ อีเทน (Ethane) โปรเพน (Propane) บิวเทน (Butane) และจะมีก้าชที่ไม่ใช่ก้าชเชือเพลิงประจำนาอีกด้วย ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่มีหลายชนิด โดยจากการศึกษาพบว่าประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกซิเจน (O_2) ในไตรเจน (N_2) ไฮโดรเจนแซลไฟฟ์ (H_2S) าร์กอน (Ar) ไฮเดรียม (He) นีโอน (Ne) และเซนตอน (Xe) ฯลฯ (ปริมาณ ก้าชมีเทนและกันละ 2541 : 34) ซึ่งมีความเป็นพิษจึงต้องกำจัดออก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การปนเปื้อนของก้าชไฮโดรเจนแซลไฟฟ์ จึงมีความจำเป็นต้องผ่านกระบวนการกำจัดก้าชไฮโดรเจนแซลไฟฟ์ เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

ปริมาณความเข้มข้นของก้าชไฮโดรเจนแซลไฟฟ์ที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ (Maximum allowable concentration: MAC) ที่มนุษย์ได้รับเป็นเวลา 8 ชั่วโมงคือ 20 พีพีเอ็ม (ในสหรัฐอเมริกา) และ 6.6 พีพีเอ็ม (ในสหพันธรัฐรัสเซีย) ส่วนมาตรฐานอากาศเสียที่ระบายนอกจากโรงงานอุตสาหกรรม จะต้องไม่เกิน 100 พีพีเอ็ม ซึ่งปริมาณขนาดนี้ ก่อให้เกิดอาการปวดศีรษะและความผิดปกติของระบบประสาทได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะได้กลิ่นของแก๊สไฮโดรเจนแซลไฟฟ์ เมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 0.025-0.1 พีพีเอ็ม

นอกจากก้าชไฮโดรเจนแซลไฟฟ์จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แล้วยังส่งผลกระทบต่อวัสดุต่างๆ คือ การกัดกร่อนวัสดุ เช่น วัสดุประเภทโลหะ พลาสติก และคอนกรีต ซึ่งโลหะจะถูกกัดกร่อนเมื่อทำปฏิกิริยากับก้าชไฮโดรเจนแซลไฟฟ์แล้วเกิดเป็น Metal sulfide ส่วนการกัดกร่อนวัสดุประเภทพลาสติก เนื่องจากมีส่วนผสมของ Heavy metal soap ซึ่งใช้เป็น Internal stabilizer หรือ Lubricant ส่วนวัสดุประเภทคอนกรีต มักถูกกัดกร่อนตามท่อระบายน้ำ โดยก้าชไฮโดรเจนแซลไฟฟ์ จะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมคาร์บอนเนต (Ozdemir S. et al. 1999 : 225-234) ดังปฏิกิริยา



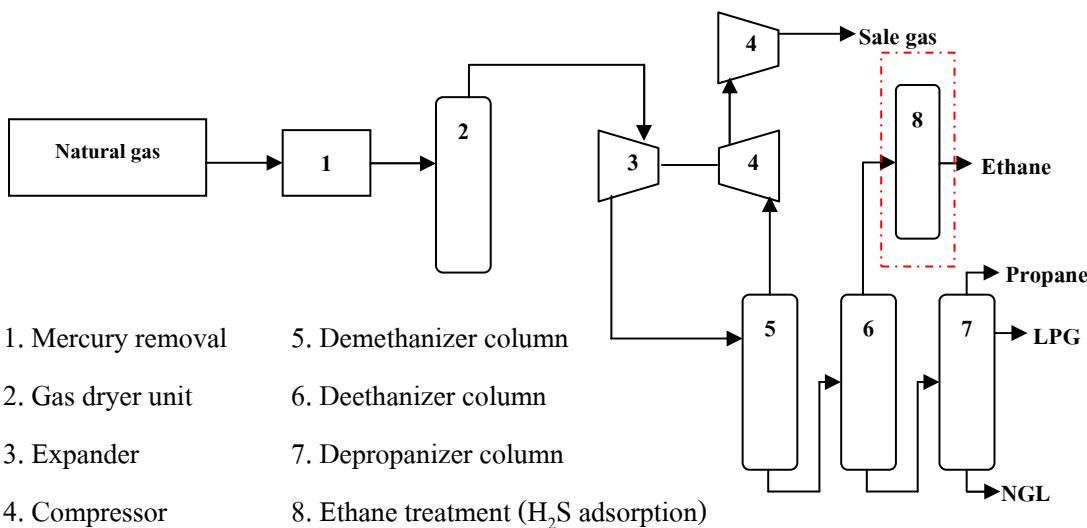
จะเห็นว่ากําชไโอลเรนซัลไฟด์มีอันตรายต่อทั้งชีวิตและวัสดุต่างๆ จึงมีความจำเป็นที่จะกำจัดกําชไโอลเรนซัลไฟด์ โดยวิธีกำจัดกําชจัดไโอลเรนซัลไฟด์มีหลายวิธี เช่น การใช้ด่างเป็นตัวคุตซึม, การใช้ปูนขาวในการคุตซับไโอลเรนซัลไฟด์ (Ozdemir S. et al. 1999 : 225-234), การออกซิไดซ์ไโอลเรนซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟอร์บอยๆ (Element of S) โดยใช้เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Sanuel et al. 1987 : 14-20) การใช้แบคทีเรีย (Thiobacillus thiooxidants) (McMurdie 1986 : 76) และการกำจัดกําชไโอลเรนซัลไฟด์ด้วยการคุตซับ

ในกระบวนการผลิตกําชธรรมชาตินั้น กําชธรรมชาติที่บุคคลได้จะถูกส่งเข้าสู่โรงแยกกําช (Gas separation plant) เพื่อทำการแยกสารประกอบจำพวกไโอลาร์บอนที่มีอยู่ในกําชธรรมชาติ ออกเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น มีเทน (Methane) อีเทน (Ethane) โพรพেน (Propane) บิวเทน (Butane) และพีจี (Liquefied petroleum gas) และกําชโซลีนธรรมชาติ (Natural gasoline, NGL)

กระบวนการแยกกําชธรรมชาติ ภาพที่ 1 เริ่มต้นด้วยการกำจัดprotoที่เจือปน อยู่ในกําชธรรมชาติหลังจากนั้นกําชธรรมชาติจะถูกทำให้แห้งด้วยกระบวนการกำจัดกําช คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ ที่เจือปนอยู่ออก โดยกระบวนการเบนฟิลด์ (Ben field) ซึ่งใช้ไปตั้งเซียมคาร์บอนเนต (K_2CO_3) เป็นตัวจับกําชคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการคุตซับ (Absorption process) โดยใช้สารจำพวกโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน ทำหน้าที่คุตซับน้ำ กําชธรรมชาติที่แห้งจากหน่วยนี้จะผ่านเข้าไปในยนิดลดความดัน (turbo-expander) เพื่อลดอุณหภูมิจาก 250 เคลวิน เป็น 170 เคลวิน และลดความดันลงจาก 43 บาร์ เป็น 16 บาร์ ก่อนแล้วจึงเข้าสู่ห้อแยกมีเทน (De-methanizer) มีเทนจะถูกกลั่นแยกออกไป และส่วนที่เหลือคือส่วนผสมของ กําชไโอลาร์บอนที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป (Ethane plus stream) ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวและจะออกทางส่วนล่างของห้อ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวห้อดังกล่าว จะถูกนำเข้าสู่ห้อแยกอีเทน (De-ethanizer) และห้อแยกโพรพেน (de-propanizer) เพื่อแยกอีเทนและโพรพेनออกตามลำดับ จากกระบวนการแยกอีเทน อีเทนที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องมาจากมีกําชไโอลเรนซัลไฟด์เจือปนอยู่จึงต้องมีกระบวนการกำจัดกําชไโอลเรนซัลไฟด์ออกจากอีเทน

ซึ่งปัจจุบันการกำจัดกําชไโอลเรนซัลไฟด์ออกจากกระบวนการผลิตกําชธรรมชาตินั้นจะใช้กระบวนการคุตซับ โดยกระบวนการนี้มีต้นทุนสูง เนื่องจากตัวคุตซับที่ใช้เป็นชนิดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูงและอาจจะได้รับผลกระทบจากการผันผวนของอัตราการแลกเปลี่ยนเงินตรา นอกจากนี้ตัวคุตซับที่ใช้ในกระบวนการยังมีอายุการใช้งานต่ำอีกด้วย ขณะผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดในการพัฒนาตัวคุตซับเพื่อใช้ทดแทนตัวคุตซับเดิมที่ใช้ในกระบวนการ

กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกจากการกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติซึ่งยังคงประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่าตัวคูดซับเดิมที่ใช้ และสามารถผลิตตัวคูดซับได้เองภายในประเทศ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าราคาของตัวคูดซับเดิมที่ใช้ ซึ่งผลการศึกษาวิจัยนี้จะนำมาซึ่งการผลิตตัวคูดซับ เพื่อไปใช้ทดแทนตัวคูดซับเดิมที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และยังเป็นการลดการขาดดุลทางการค้าให้กับประเทศไทยอีกด้วย



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติ

ที่มา : ภาวิชี สินทรัพ, ผู้บรรยาย H₂S Removal by using Copper containing Zeolite, นครปฐม : คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร, (2551).

2 งานวิจัยที่ผ่านมา

เวสท์มอร์แลนด์ และคณะ (Westmoreland et al. 1976 : 659) ศึกษาการกำจัดซัลเฟอร์โดยการใช้ชาตุโลหะ 28 ชนิด พบร่วมกันชาตุโลหะ 10 ชนิดที่มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวคูดซับซัลเฟอร์ในช่วงอุณหภูมิ 400 – 1200 องศาเซลเซียส ชาตุเหล่านั้น คือ เหล็ก (Fe), ตังกะสี (Zn), โมลิบดีนัม (Mo), แมงกานีส (Mn), แคลเซียม (Ca), ดีบุก (Sn), แบนเรียม (Ba), โคบอลต์ (Co) และ คอปเปอร์ (Cu)

อายาลา และคณะ (Ayala et al. 1995 : 407) ศึกษาตัวคูดซับที่ถูกเลือกจากการทดลองของเวสมอร์แลนด์และคณะ ซึ่งนำชาตุทั้ง 10 ชนิดมาทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส พบร่วมกับคอปเปอร์ เป็นตัวคูดซับที่แข็งแกร่ง แต่คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) สามารถเป็นคูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ได้ดีกว่าตัวอื่น

กวัง-บกอค ลี และคณะ (Kwang – Bok Lee et al. 1998 : 17) ศึกษาการดูดซับชัลเฟอร์ใน การเผาถ่านหิน โดยเลือกใช้กوبเปอร์ออกไซด์ เป็นวัสดุหลักในการเตรียมตัวดูดซับ โดยทำการ ทดลองที่อุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส และยังศึกษาผลของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) โมลิบเดียมออกไซด์ (MoO_3) และซิลิกา (SiO_2) ที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ พบว่าซิลิกาไม่มีความสามารถ ดูดซับชัลเฟอร์ แต่เมื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่หลายครั้งพบว่าจะช่วยให้ปริมาณการดูดซับดี ขึ้น ส่วนโมลิบเดียมออกไซด์ จะไม่ค่อยมีผลต่อปริมาณการดูดซับชัลเฟอร์ เมื่อนำตัวดูดซับกลับมา ใช้ภายใน 5 ครั้งแรก แต่จะมีผลเมื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่เกิน 19 ครั้ง คือจะทำให้ปริมาณการ ดูดซับชัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีโมลิบเดียมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบ และจากการทดลองพบว่า CMS 6 เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด โดยมีองค์ประกอบ $CuO : MoO_3 : MnO_2 : SiO_2$ ตัวยั่งสัดส่วน 64 : 11 : 3 : 25 ตามลำดับ คือสามารถดูดซับชัลเฟอร์ ได้ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ฟาน อุยลิง และคณะ (Fan Huiling et al. 2001) ศึกษาผลศาสตร์และพฤติกรรมการดูด ซับไฮโอดรเจนชัลไฟฟ์โดยใช้ชิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวดูดซับที่จะศึกษา ได้ทำการศึกษาผลของ อุณหภูมิ และผลของการเติมไฮโอดรเจนและการที่ไม่เติมไฮโอดรเจนก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงหรือค่อนเวอร์ชัน ที่จะเปลี่ยนไปเป็นชิงค์ชัลไฟฟ์ (ZnS) ว่า ไฮโอดรเจน จะส่งผลกระทบต่อค่อนเวอร์ชัน หรือไม่ และจากผลการทดลองพบอุณหภูมิที่ทำให้ค่อนเวอร์ชัน มากที่สุดคือที่ 320 องศาเซลเซียส และการเติมไฮโอดรเจนจะช่วยให้ค่อนเวอร์ชันมากขึ้นเมื่อทำการ ทดลองที่อุณหภูมิ และเวลาที่เท่ากัน

ฮัน เต จาง และคณะ (Hyun Tae Jang et al. 2002) ศึกษาการดูดซับไฮโอดรเจนชัลไฟฟ์ โดยใช้แมงกานีสเป็นวัสดุหลักในการเตรียมตัวดูดซับ ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อ ปริมาณการดูดซับ คือ ผลของอุณหภูมิ ผลของขนาดอนุภาค ผลของอัตราเร็วของก๊าซที่ผ่าน孔อัลมน์ และผลของความเข้มข้นของไฮโอดรเจนชัลไฟฟ์ ผลการทดลองที่ได้ คือ อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ ที่ 700 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคที่เหมาะสม คือ 0.505 มิลลิเมตร อัตราเร็วของก๊าซที่เหมาะสม คือ 0.25 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นไฮโอดรเจนชัลไฟฟ์ที่เหมาะสม คือ 5000 พีพีเอ็ม

จินชาง ชาง และคณะ (Jinchag Zhang et al. 2002) ศึกษาการดูดซับชัลเฟอร์ในการเผา ถ่านหิน โดยเลือกใช้แมงกานีสออกไซด์ (MnO) ผสมกับเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นวัสดุหลักในการ เตรียมตัวดูดซับ และใช้ อะลูมินา (Al_2O_3) เป็นวัสดุรองรับ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 500-650 องศาเซลเซียส โดยศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง $MnO : Fe_2O_3 : Al_2O_3$ พบว่า AMF 2 เป็น ตัวดูดซับที่ดีที่สุด โดยมีองค์ประกอบ $MnO : Fe_2O_3 : Al_2O_3$ ตัวยั่งสัดส่วน 8.5 : 4.8 : 86.7 ตามลำดับ และในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของการเติมชิงค์ออกไซด์ ลงในตัวดูดซับ พบว่าการมีชิงค์ออกไซด์ เป็นองค์ประกอบแค่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะช่วยให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามี

ซิงค์ออกไซด์มากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณการดูดซับจะลดลง และซิงค์ออกไซด์ยังช่วยให้อาชญาการใช้งานตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น คือ ถ้ามีซิงค์ออกไซด์เป็นองค์ประกอบจะสามารถใช้ตัวดูดซับได้มากกว่า 15 ครั้ง แต่ถ้าไม่มีก็จะสามารถใช้ได้เพียง 6 ครั้งก็เกิดการเสื่อมสภาพ

จินชาง ชาง และคณะ (Jinchag Zhang et al. 2003) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการพื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับที่สนใจคือ Mn–Fe–Zn–O และมี γ -Al₂O₃ เป็นวัสดุรองรับ สิ่งที่ศึกษา คือ อุณหภูมิที่เหมาะสม องค์ประกอบของออกซิเจน องค์ประกอบของไอโอน์ ผลการทดลองที่ได้คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมคือที่ 700 องศาเซลเซียส มีออกซิเจน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไอโอน์ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เจี๊ยบิน ชาง และคณะ (Jae Bin Chung 2004) ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟฟ์โดยใช้โคบอลท์ออกไซด์ (Co₃O₄) เป็นวัสดุหลักในการเตรียมตัวดูดซับ โดยใช้ไทเทเนียม (TiO₂) และอัลูมินา (Al₂O₃) เป็นวัสดุรองรับ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 400 องศาเซลเซียส การใช้ไททาเนียม ได้ออกไซด์เป็นวัสดุรองรับจะดีกว่าการใช้อัลูมินาเป็นวัสดุรองรับ โดยเปรียบเทียบจากปริมาณการดูดซับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์

ซาคานิชิ และคณะ (Sakanishi et al. 2005) ได้ศึกษาการดูดซับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ ด้วยถ่านกัมมันต์จาก Brown coal โดยศึกษาผลของการเคลือบผง (Impregnate) ถ่านกัมมันต์ด้วยเหล็ก (Fe) ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผง จะสามารถดูดซับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ ได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส โดยก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งความสามารถในการดูดซับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์จะถลายตัวได้ยาก จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด เนื่องจากเหล็กทำให้การถลายน้ำของไฮโดรเจนซัลไฟฟ์เพิ่มขึ้น

เดนห์ และคณะ (Danh et al. 2005) ได้ทำการศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟฟ์โดยการนำถ่านกัมมันต์มาทำการเคลือบผงกับ 10 เปอร์เซ็นต์ของเหล็ก สังกะสี และคอปเปอร์ตัวได้ตัวหนึ่ง ซึ่งผลที่ได้ก็คือ การใช้โลหะจะมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีขนาดของรูพรุนเล็กลง และจำนวนของรูพรุนลดน้อยลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง แต่ในกรณีที่ก่อเปอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงทำให้การดูดซับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ได้ดีขึ้น

ลี และคณะ (Li et al. 2006) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับซิงค์ออกไซด์ ในการกำจัดก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ในกระบวนการผลิตเชือเพลิง Polymer electrolyte membrane (PEM) Fuel cell ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งซิงค์ออกไซด์สามารถดูดก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ลงได้ต่ำกว่า 10 พีพีเอ็ม (ppm) และศึกษาก้าชที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ในการดูดซับของซิงค์ออกไซด์ พนว่าแก๊ส COS ที่เกิดจากปฏิกิริยาของก้าชการ์บอนมอนอกไซด์ กับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ ทำให้ประสิทธิภาพความจุในการดูดซับซิงค์ออกไซด์ลดลงไปอย่างมาก โดยก้าชการ์บอนมอน-

นอกไซด์เพียง 1 เปอร์เซ็น โดยปริมาตรขึ้นไป จะมีผลกระทบต่อการดูดซับของชิงค์ออกไซด์ และยังศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของชิงค์ออกไซด์ พบว่าชิงค์ออกไซด์สามารถดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส แต่เมื่อที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียสขึ้นไปกลับพบว่าชิงค์ออกไซด์ไม่สามารถลดก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ลงได้ต่ำกว่า 10 พีพีเอ็ม

เมโล และคณะ (Melo et al. 2006) ศึกษาการใช้ชีนออกซ์ (Zinox) 380 (87% ZnO) และเซโอไลต์ (Zeolite) 13X ในการกำจัดก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ออกจากแก๊สธรรมชาติ ที่ช่วงอุณหภูมิ 25–75 องศาเซลเซียส เพราะในเชื้อเพลิงฟอสซิลมีซัลเฟอร์เป็นสิ่งเจือปนหลัก โดยถูกปล่อยสู่บรรยากาศในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และยังมีก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน โดยเซโอไลต์ 13X มีรูพรุนเมโซพอร์ (Mesoporous) โดยมีองค์ประกอบ $\text{Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 : \text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน $1 : 1 : 2.8 : X$ ตามลำดับ และชีนออกซ์ 380 มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (Microporous) มีสัดส่วนองค์ประกอบเป็น 87.1 ZnO, 0.2 Na₂O และ 22.7 CaO เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก หลังจากนำไปให้ความร้อนแล้วพบว่าชีนออกซ์ 380 สูญเสียมวลไป 1.5 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 40–230 องศาเซลเซียส ส่วนเซโอไลต์ 13X จะมีมวลคงที่เมื่อผ่านอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เพราะเกิดการกำจัดน้ำออกไป และจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับเซโอไลต์ 13X สามารถดูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ได้ดีกว่าชีนออกซ์ 380 โดยสามารถดูดซับได้นาน 36.5 ชั่วโมง (มีอัตราการไหลดของก้าชผสม 5 มิลลิลิตรต่อน้ำที่ โดยใช้สารตัวอย่าง 20 มิลลิกรัม)

ฮัลเบเดล และคณะ (Halbedel et al. 2007) ศึกษาการกำจัดไฮโครเจนชัลไฟฟ์ด้วย Ferrimagnetic ceramic adsorbents เริ่มน้ำหนัก Ferrimagnetic granules ที่เตรียมจาก Fluid bed system ซึ่งมีขนาด 15–630 ไมโครเมตร โดยเพาด์วายอากาศที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส จนน้ำกึ่งสังเคราะห์ Ceramic ferrimagnetic beads ซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล โดยนำสารละลายชิงค์อะซิเตറด (Zinc acetate) กับน้ำ 60 มิลลิลิตร และผสมกับกรดไนโตริก 5 มิลลิลิตร ที่เจือจางด้วยเอทานอล (Ethanol) 120 มิลลิลิตร ที่ 75 องศาเซลเซียส จะได้สารผสม 80 มิลลิลิตร นำเม็ดที่เตรียมได้ไปทำให้แห้งที่ 120 องศาเซลเซียสและนำไปเคลือบฝังด้วยชิงค์ออกไซด์ นำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปเผาที่ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง และรอให้เกากันเป็นก้อน (อีกประมาณ 1 ชั่วโมง) ก็จะได้ Ferrimagnetic ceramic adsorbents ที่เตรียมได้ง่าย และขนาดรูพรุน (Pore size) เล็กลง ซึ่งสามารถใช้ได้ 13 ครั้ง

รัศ ໄกวะประดิษฐ์ และคณะ (2550) งานวิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาการกำจัดก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์จากสารไฮโครคาร์บอนด้วยถ่านกัมมันต์จากกลาป้าล์มที่กระตุ้นทางเคมีด้วยไฮಡรอกไซด์โซเดียม ไฮดรอกไซด์ และศึกษาการรีเจนเนอเรทถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองดูดซับในเบด

ที่อยู่นั่ง ผลการทดลองพบว่า ถ้าความชื้นในก้าชฯ เข้าเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์จะลาป่าล้มจะมีความสามารถในการดูดซับก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ลดลง แต่ถ่านกัมมันต์ที่ชื้นมีความสามารถในการดูดซับก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์แห้ง การฟื้นฟู (Regenerate) ถ่านกัมมันต์โดยการถางด้วยน้ำที่อุณหภูมิสูงจะให้ผลดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ใช้รีเจนเนอเรทถ่านกัมมันต์มีอุณหภูมิต่ำลงถ่านกัมมันต์จะลาป่าล้มมีประสิทธิภาพในการดูดซับก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า อีกทั้งถ่านกัมมันต์จะลาป่าล้มหลังฟื้นฟูโดยการถางด้วยน้ำร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการดูดซับก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าใหม่

3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อพัฒนาตัวดูดซับสำหรับกำจัดก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ออกจากกระบวนการผลิตก้าชธรรมชาติ

4 ขอบเขตของการวิจัย

4.1 เตรียมตัวดูดซับที่สามารถกำจัดซับก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ จากกองเปอร์ออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์ และกองเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่อัตราส่วนเท่ากับ 100 : 0, 80 : 20, 50 : 50, 20 : 80 และ 0 : 100 ตามลำดับด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ และวิธีโซล-เจล และกองเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกาปริมาณ 5-25 เปอร์เซ็นต์โดยไมล ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

4.2 ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้ด้วย เทคนิค

- เทคนิคการดูดซับของก้าชฯ ในไฮโดรเจน (Brunauer Emmett Teller, BET)
- การเลือดบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

4.3 นำตัวดูดซับไปทดสอบการดูดซับกับก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ และทดสอบกับก้าชฯ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติ ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ แล้วนำตัวดูดซับไปขึ้นรูปเพื่อใช้ในระดับนำร่อง (Pilot scale)

บทที่ 2

พฤติกรรม

1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับค้นพบครั้งแรกโดย ScHeele ในปี ค.ศ.1773 เป็นการดูดซับของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ.1785 ได้ค้นพบการดูดซับของสารละลายน้ำ เป็นที่ทราบกันดีว่าการดูดซับเป็นกระบวนการที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ และเคมี การดูดซับเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารบริเวณผิว หรือผิวสัมผัสผิวน้ำ (Interface) ระหว่างของเหลว กับของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Martin K. et al. 1991 : 398)

2 ลักษณะของการดูดซับ

การดูดซับสามารถแบ่งตามความแตกต่างของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในการดูดซับได้เป็น 2 ประเภทคือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และ การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) (Guo J. et al. 2003 : 265-273)

2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ ที่เกิดขึ้นบนโมเลกุลของของแข็งนั้นปกติจะเป็นแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่เท่ากันทุกทิศทาง แต่เมื่อมีโมเลกุลอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นก๊าซหรือของเหลวมาเกาะที่ผิว จึงทำให้แรงไม่สมดุล คือ โมเลกุลของของแข็งจะต้องดึงโมเลกุลอื่นๆ ที่อาจเป็นก๊าซหรือของเหลวมาเกาะ เพื่อให้เกิดสมดุล ซึ่งหมายความว่าสภาวะอุณหภูมิตามๆ แรงดึงดูดชนิดนี้คือ แรงแวนเดอ华ร์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่ไม่แข็งแรงมากนัก เพราะมีการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ และเนื่องจากที่เป็นแรงอ่อนๆ จึงสามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ ทำให้การฟื้นสภาพ (Regenerate) ของตัวดูดซับทำได้ง่าย นอกจานี้การดูดซับทางกายภาพยังมีแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดกันทางไฟฟ้าบริเวณผิว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจาก 3 ลักษณะ ดังนี้

2.1.1 โพลาร์กับโพลาร์โมเลกุล คือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับเป็นชนิดโพลาร์ ทำให้เกิดแรงดึงดูดร่วมระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน

2.1.2 อนต์โพลาร์กับอนต์โพลาร์ คือ มีการกระจาย ซึ่งอาจมีหลักการที่ว่าอนต์โพลาร์โมเลกุลสามารถเปลี่ยนได้โดยโมเลกุลได้ ถ้าอยู่เดียวกันเคลื่อนที่มาอยู่ด้านใด

ด้านหนึ่งมาก และนอนโพลาร์โมเลกุลที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาใกล้ จะเกิดแรงดึงดูดกัน ซึ่งมัก เป็นแรงที่อ่อน ตัวอย่างเช่น สารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์ เพราะสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นอนิโโพลาร์โมเลกุล

2.1.3 โพลาร์กับอนิโโพลาร์โมเลกุล คือ เกิดจากผลของการเห็นใจว่า ซึ่งเกิดการกระทำของโพลาร์โมเลกุล เหนี่ยวแน่นให้โพลาร์โมเลกุลเกิดประจุตรงข้ามแล้วจึงดูดกัน

2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี จะเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างผิวน้ำของของแข็ง และโมเลกุลที่อยู่ในของเหลว ลักษณะสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับคือ ขนาดของอนุภาค ความเข้มข้น ของตัวถูกดูดซับ โดยที่การดูดซับทางเคมีมีลักษณะดังนี้

2.2.1 การดูดซับเนื่องจากพันธะเคมี ที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอน หรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวแน่นแรงกว่าแรงกาياฟ

2.2.2. การดูดซับที่ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ เพราะมีการยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มาก มีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

3 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

3.1 การดูดซับทางกายภาพมักจะเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล แต่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น จากคุณสมบัตินี้ จึงทำให้ตัวดูดซับหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับได้ง่าย แต่การดูดซับทางเคมี จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น จึงทำให้ตัวถูกดูดซับหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับได้ยาก (Guo J. et al. 2003 : 265-273)

3.2 การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดแบบ Multilayer ได้ภายในได้สภาวะอุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม แต่การดูดซับทางเคมี จะไม่สามารถเกิดแบบ Multilayer โดยจะเกิดแบบ Monolayer และจะเกิดได้เฉพาะจุดว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site) เท่านั้น (Martin K. et al. 1991 : 398)

3.3 แรงที่เกี่ยวกับการดูดซับทางกายภาพ ส่วนใหญ่เป็นแบบแรงวนเดียวล้าวทำให้ความร้อนที่ได้น้อยกว่า การดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากพันธะเคมี (Martin K. et al. 1991 : 398)

ตารางที่ 1 สรุปลักษณะของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
<ul style="list-style-type: none"> - มีการถ่ายความร้อนสูงถึง 10,000 แคลอรี / โมล - เกิดสารประกอบเคมี - การถ่ายการดูดซับเกิดขึ้นได้ยาก - ไม่อาจนำโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้กลับคืนมาได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีการถ่ายความร้อนต่ำเพียง 100 แคลอรี / โมล - เกิดแรงกระทำระหว่างขั้วของโมเลกุล - การถ่ายการดูดซับเกิดขึ้นได้ง่าย - สามารถนำโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้กลับคืนมาไม่ได้โดยง่าย

ที่มา : ยุวรัตน์ ประมีศนาภรณ์. การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไผ่เพื่อกำจัดแครคเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ, คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชัชนาท, (2544) : 16.

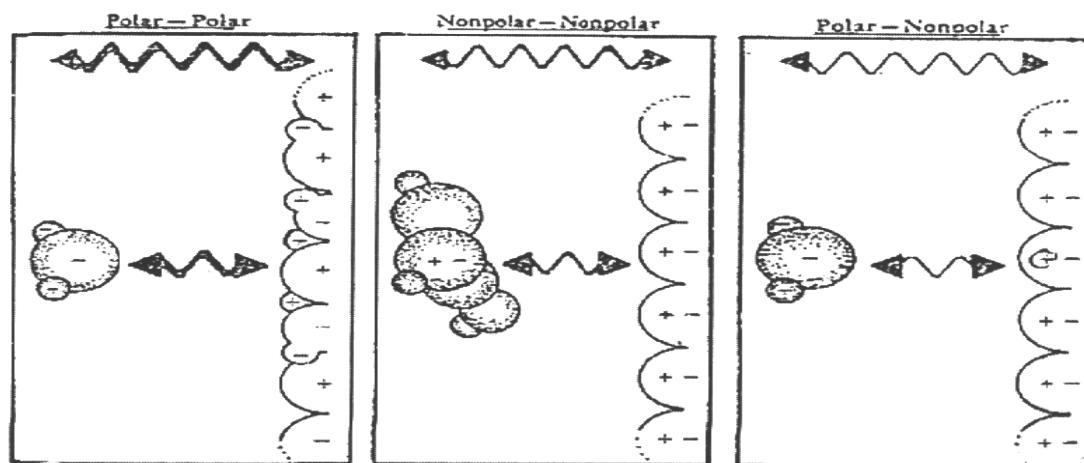
4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (บริชา โกลวิทัยญ์ และคณะ 2541 : 34)

สำหรับการดูดซับทางกายภาพแล้ว โมเลกุลสารที่ถูกดูดซับจะเกาะบนพื้นผิวของของแข็ง ได้ ก็ด้วยผลของแรงชนิดต่างๆ ซึ่งแบบออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

4.1 แรงแพร์กระจาย (Dispersion force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีข้าว เกิดจากการกระจายตัวของอิเล็กตรอนบริเวณต่างๆ ภายในอะตอมขณะใดขณะหนึ่งไม่เท่ากัน ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลมีข้าวช่วงขณะหนึ่งเกิดได้โลพขึ้น สามารถเห็นได้ในโมเลกุลข้างเคียงให้เกิดมีได้โลพตาม เป็นผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

4.2 แรงผลักระยะสั้น (Short-range repulsive) เป็นแรงที่เกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลทึ่งสองอยู่ชิดกันมาก ระยะของแรงผลักจะมีระยะหนึ่งเมื่อพื้นระยะดังกล่าวจะ ไม่ทำให้เกิดแรงผลักอะตอมหรือโมเลกุลสามารถเกิดแรงดึงดูดกันได้ แรงผลักระยะสั้นมีการทับกันของหมอกอิเล็กตรอน (Electron clouds) แรงชนิดนี้จะมีผลต่อการดูดซับเมื่อบริมาณสารดูดซับมีค่าสูง เพราะที่สภาวะเช่นนี้โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น

4.3 แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงที่มีผลจากการที่อะตอมของของแข็งมีอ่อน หรือมีข้าว ซึ่งสามารถเห็นได้ในสารถูกดูดซับเกิดได้โลพได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลจากการที่โมเลกุลสารดูดซับเองมีได้โลพตัวร แรงเหล่านี้จะทำให้การดูดซับดีขึ้น



ภาพที่ 2 การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต

ที่มา : Gonzalez R. D., Lopez T., and Gomez R, "Sol-gel preparation of supportd metal catalysts," Catal Today, 35 (1907) : 293-317.

แรงเหล่านี้ต่างก็มีผลต่อการดูดซับ แรงประเภทที่ 1 และ 2 จะเกิดขึ้นเสมอในการดูดซับ ส่วนแรงประเภทที่ 3 จะเกิดขึ้นหรือไม่ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ หรือชนิดของสารที่ถูกดูดซับและของแข็ง โดยส่วนมากมักเกิดกับโมเลกุลที่มีข้อ

5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (วิวรรณ журเกียรติกุล 2539 : 31-37)

5.1. คุณสมบัติของตัวดูดซับ

5.1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface area and pore structure)

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้นประกอบกับมีโครงสร้างรูพรุน ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะขนาดการดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่

5.1.2 ขนาดของตัวดูดซับ

ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลง พื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

5.1.3 หมุ่ฟังก์ชันทางเคมีที่ผิวน้ำ

หมุ่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากสามารถยึดเหนี่ยวตัวถูกดูดซับ แล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้

5.1.4 ชนิดการดูดซับ

การดูดซับที่ดีควรมีความสามารถในการดูดซับสารได้ดี ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะแปรผันตาม Break-point time ก cioè การดูดซับน้อย Break-point time จะมีค่าน้อย

5.2. คุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ

5.2.1 ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการดูดซับไม่เลกุลของตัวถูกคละลายมีความสัมพันธ์กับการละลาย ก cioè ถ้าตัวถูกคละลายมีความสามารถในการละลายสูง แรงดึงเหนี่ยวยระหว่างตัวถูกคละลายกับตัวทำละลาย มีค่ามาก ไม่เลกุลของตัวถูกคละลายจะถูกแยกออกจากสารละลายไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่สูง ส่วนสารที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิwtัวดูดซับได้ดีกว่า

5.2.2 น้ำหนักและขนาดของไม่เลกุล

เมื่อน้ำหนักและขนาดของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักไม่เลกุล ทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ลดลง และการดูดซับในรูปrunจะเกิดได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูปrunเล็กน้อย เพราะตัวถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูปrun เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

5.3. สภาวะในการดูดซับ

5.3.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH ของสารละลาย มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของโลหะหนัก ทำให้ผิวของวัสดุดูดซับมีประจุบวกผลักไออกอนของโลหะหนักประสิทธิภาพการดูดซับจึงน้อยแต่เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ของสารละลายสูงขึ้นหมุ่ฟังก์ชั่นเหล่านี้ จะมีประจุลบสามารถจับกับโลหะหนักได้ดี

5.3.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากเมื่อมีการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ถ้าปฏิกรรมการดูดซับเป็นชนิดเคมีความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ

5.3.3 ความดัน

การดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มความดันย่อย เพราะ โมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับไว้ ถูกอัดเข้าด้วยกันมากขึ้น จึงมีโมเลกุลจำนวนมากขึ้นที่มีโอกาสที่จะ “ชน” กับจุดว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อการดูดซับได้ ทำให้มีจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้สูงขึ้น

5.3.4 ความเร็ว

ความเร็วของกระแสก๊าซที่ผ่านหน่วยดูดซับเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่กระแสก๊าซที่มีสารมลพิษสัมผัสกับสารดูดซับ โดยระยะเวลาของการสัมผัสมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไว้ โดยที่ความเร็วของกระแสก๊าซพิษที่ผ่านหน่วยดูดซับชั้ลงนั้นหมายถึง โมเลกุลของสารมลพิษมีโอกาสชนกับตำแหน่งที่สามารถดูดซับได้มากขึ้น เมื่ออัตราการไหลเชิง (Volumetric flow rate) ปริมาตรสูงขึ้น จะทำให้เวลาที่สารอยู่ในเบดลดลง ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง มีผลให้ Length of unused bed (LUB) มีค่าเพิ่มขึ้น

5.3.5 ความเข้มข้น

ความเข้มข้นของสาร (Feed concentration) เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นขาเข้าใหม่ค่าสูงขึ้น จะทำให้เกิดการดูดซับได้มากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับมากขึ้น มีผลให้ LUB มีค่าลดลง

2.5.3.6. ความสูงของเบด

ความสูงของเบดสั้น Break-point time จะมีค่าน้อย จึงต้องการมีการเปลี่ยนเบดบ่อย ๆ ซึ่งจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และถ้าความสูงของเบด สั้นกว่า Mass-transfer zone จะทำให้สารไหลผ่านเบดออกมาน้อย คือ ไม่มีการดูดซับเกิดขึ้น

6 กลไกการดูดซับ H₂S (บริชา โกลวิศิษฐ์ และคณะ 2541 : 34)

6.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

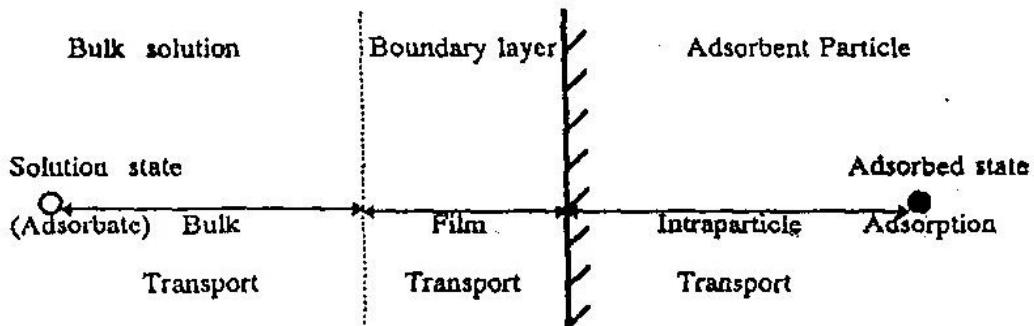
กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน ดังภาพที่ 3

ขั้นตอนที่ 1 การถ่ายเทรวม เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ จากสารละลาย (Bulk solution) ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุln้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การถ่ายเทในฟิล์ม เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ ข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 การถ่ายเทในรูพรุน เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 การดูดซับ เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับบริเวณกระตุ้นบนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

ที่มา : Jinchang Z., Yanhui W., and Diyong W., "Study on regeneration of Mn–Fe–Zn–O supported upon γ -Al₂O₃ sorbents for hot gas desulfurization," Fuel Processing Technology, 84 (2003) : 217– 227.

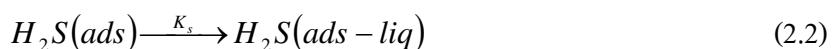
6.2 กลไกการดูดซับ H₂S (Kong X. et al. 2005 : 449–453)

6.2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพ มีดังนี้

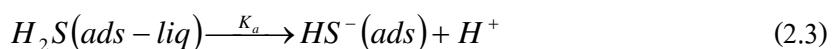
เกิดการดูดซับที่ผิว



H₂S ละลายในชั้นนำ



H₂S จะแตกตัวในชั้นนำ

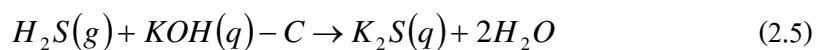
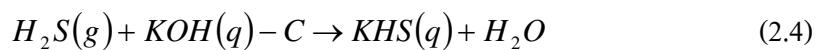


โดยที่ H₂S(g), H₂S(ads-liq), H₂S(ads) คือ ความเข้มข้นของ H₂S ในวัสดุภาคแก๊สของเหลว และสารดูดซับ ตามลำดับ

K_H, K_S, K_a คือ Equilibrium constant ซึ่งสัมพันธ์กับกระบวนการ Adsorption, gas solubility และ Dissociation ตามลำดับ

6.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับทางเคมี มีดังนี้

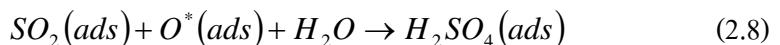
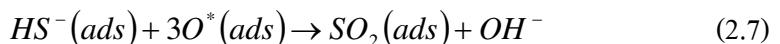
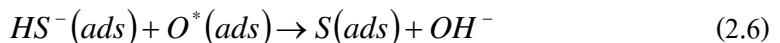
H₂S จะทำปฏิกิริยากับ KOH ที่ผิวของ Carbon



โดยที่ KOH (q) –C คือ KOH ที่เคลื่อนผ่านการอนกัมมันต์ซึ่งถูกคลุมด้วยชั้นน้ำบางๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยา 2.4 และ 2.5 หรืออาจจะมาจากความชื้นในอากาศในกรณีที่มีการนำสาร์บอนกัมมันต์ไปผ่านความชื้น

6.3 ออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาจะเกิดกับออกซิเจนที่ผิวของสาร์บอน ซึ่งจะได้ชัลเฟอร์หรือชัลเฟอร์ไดออกไซด์ และชัลเฟอร์ไดออกไซด์จะกลายเป็นกรดชัลฟูริกอยู่ในน้ำ



O* เกิดจากออกซิเจนที่ถูกดูดความชื้นมาแล้วเกิดการแตกตัว

โดยที่ S (ads) คือ ความเข้มข้นของผิวสารประกอบซึ่งเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยาออกซิเดชัน บนพิว

โดยที่ Surface reaction เป็น Rate-limiting step ของกระบวนการออกซิเดชัน H_2S

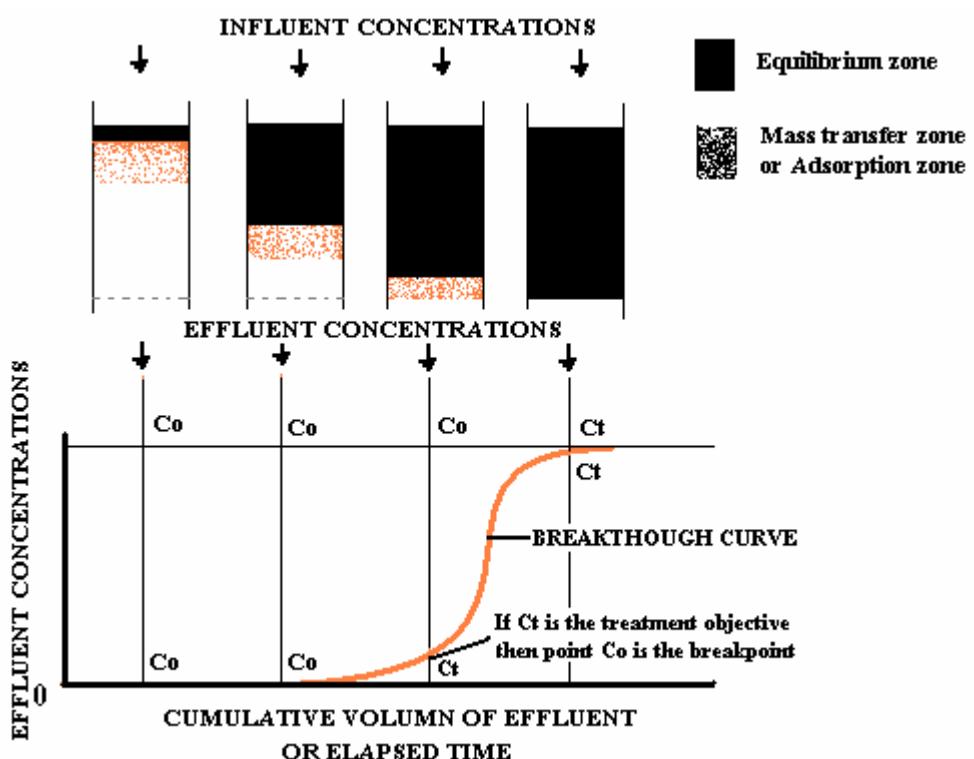
โดยที่ Degree of H_2S dissociation ควรจะสูงพอที่จะเกิดออกซิเดชันบนพิว ($HS^-(ads) \sim H_2S(g)$)

ในการดูดซับความเข้มข้นของ HS^- จะเท่ากับ H_2S ในวัฏจักรก้าช (100% Adsorption + Dissociation) จึงเพียงพอสำหรับการดูดซับ H_2S

7 การดูดซับในเบนдинง (ปิยพร สาระบูรณ์ และคณะ 2002 : 53)

สำหรับการดูดซับโดยทั่วไปจะให้สารดูดซับบรรจุอยู่ภายในคอลัมน์และอยู่ในลักษณะนิ่งๆ (Fixed bed) แล้วดูดอากาศหรือไอระเหยให้ไหลผ่านคอลัมน์ในลักษณะไอลชีน (Up-flow) หรือไอลลง (Down-flow) ผ่านตลอดความลึกของคอลัมน์ที่บรรจุด้วยสารดูดซับพิจารณาคอลัมน์ที่บรรจุด้วยสารดูดซับดังรูปที่ 3 ซึ่งให้ของไอลที่ประกอบด้วยสารถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นสูงสุดอยู่ในไอลเข้าทางด้านบน เมื่อของไอลไอลผ่านคอลัมน์สารที่สามารถถูกดูดซับได้จะถูกดูดและเกาะติดกับสารดูดซับนั้น จนถึงระยะเวลาหนึ่งตรงบริเวณทางเข้าของหอดูดซับจะอิ่มตัวจนทำให้เกิดเป็นเขตที่มีการอิ่มตัวในการดูดซับ เราเรียกว่า เขตสมดุล (Equilibrium zone) ซึ่งจะเป็นชั้นที่ไม่มีการดูดซับอีกแล้ว ในขณะที่เขตที่ต่อจากเขตที่มีการอิ่มตัวจะยังเกิดการดูดซับอยู่ได้อย่างต่อเนื่อง เขตของการดูดซับนี้เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer zone , MTZ) ทำให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่สารดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

บริเวณที่เกิดการดูดซับความเข้มข้นของสารลูกดูดซับในสารละลายนี้จะลดลงเมื่อสารละลายนี้เคลื่อนที่ผ่านเบดที่อยู่นิ่งของสารดูดซับ จะได้ไฟล์ของความเข้มข้น (Concentration profile) ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีรูปร่างคล้ายตัว “S” ซึ่งเรียกว่า Breakthrough Curve และสามารถนำ Breakthrough Curve ไปหาค่า Length of unused bed (LUB) (Nakazato T. et al. 2003 : 3413-3419) และค่า Length of mass transfer zone (LMTZ) (Jinchang Z. et al. 2003 : 217-227) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบคอลัมน์ดูดซับขนาดใหญ่ต่อไปได้



ภาพที่ 4 แสดงการดูดซับในเบดนิ่ง

ที่มา : Jinchang Z., Yanhui W., and Diyong W, “A study on regeneration of Mn–Fe–Zn–O supported upon γ -Al₂O₃ sorbents for hot gas desulfurization,” Fuel Processing Technology, 84 (2003) : 217– 227.

เมื่อ C/C_0 คือความเข้มข้นของสารต่อความเข้มข้นเริ่มต้น หลังจากนั้นตัวดูดซับที่บริเวณทางเข้าจะเริ่มอิ่มตัว จึงทำให้การถ่ายเทมวลส่วนใหญ่เกิดขึ้นห่างจากทางเข้าของ bed เป็นรูปตัว “S”

ช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น เรียกว่า “Mass-transfer zone” ซึ่งจะกำหนดค่า C/C_0 อยู่ในช่วง 0.005-0.95

8 Breakthrough curves (ปรีชา โกลวิศิษฐ์ และคณะ 2541)

เมื่อนิ่งส่วนใหญ่ไม่สามารถตรวจวัดความเข้มข้นภายในตามความยาวที่จุดต่าง ๆ เช่น ดังรูปที่ 3 ได้ แต่กราฟข้างต้นสามารถทำนายได้โดยการคำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นกับเวลาของสารที่ออกจากเบด และกราฟที่สามารถหาได้แสดงดังรูป 3 เรียกว่า Breakthrough curve ที่เวลา t_1 และ t_2 ความเข้มข้นของสารที่ต้องการจะเข้าสู่ห้องน้ำ C/C_0 เมื่อความเข้มข้นเข้าใกล้ 0.05 หรือ 0.1 และจุดสุดท้ายของกระบวนการคือความเข้มข้นประมาณ 0.95 หรือมากกว่า

ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อการดูดซับอยู่หนึ่ง Break point และช้าลงเมื่อค่า C/C_0 เข้าใกล้ 1.0 ตามรูปที่ 3 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า t^* ดังกราฟจะส่งผลถึงการการดูดซับใน Pack-bed และค่า t^* นี้สามารถหาได้จากการ โดยการลากเส้นในแนวตั้งผ่าน Breakthrough Curve โดยเส้นที่ลากผ่านนี้จะต้องให้ค่าของพื้นที่ด้านซ้ายได้เท่ากับพื้นที่ด้านขวาหนึ่งกราฟในการทดลองจำเป็นที่จะต้องหา Breakthrough curve เพื่อที่จะสามารถทราบถึงค่าประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากว่า Breakthrough curve ที่หาได้นั้น จะสามารถนำมาหาค่าของ Length of unused bed (LUB) ได้ ซึ่งค่า LUB ได้จาก

$$t_b = t^* \left(1 - \frac{LUB}{L}\right) \quad (2.10)$$

โดย t_b คือ Break point time ซึ่งเป็นเวลาที่ความเข้มข้นจะนั้น ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0.05 ($C/C_0=0.05$)

ค่า LUB ที่ได้ทำให้ทราบถึง ความยาวของ pack-bed ที่ไม่ได้เกิดการดูดซับ ซึ่งค่า LUB นี้ จะมีประโยชน์ในการทำ Scale up เนื่องจากว่าค่า LUB ไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาวทั้งหมดของเบด

จาก Breakthrough Curve สามารถหา Mass-transfer zone ได้ซึ่งจะอยู่ในช่วง C/C_0 ที่มีค่าตั้งแต่ 0.05-1.00 และที่ $C/C_0=1.00$ นี้ คือ เวลาที่สารถึงจุดอิมตัว (t_E) ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้อยลง จึงการเปลี่ยนตัวดูดซับใหม่ที่เวลานี้

9 ปัจจัยที่มีผลต่อค่า LUB (ปรีชา โกลวิศิษฐ์ และคณะ 2541)

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LUB กับความเร็วในการเคลื่อนตัวของ LUB

$$M_L = U \Delta T \quad (2.11)$$

โดย M_L คือ ความยาวของ LUB

U คือ ความเร็วในการเคลื่อนตัวของ LUB

ΔT คือ ผลต่างของเวลาที่จุดอิมตัวกับเวลาที่ Breakthrough point

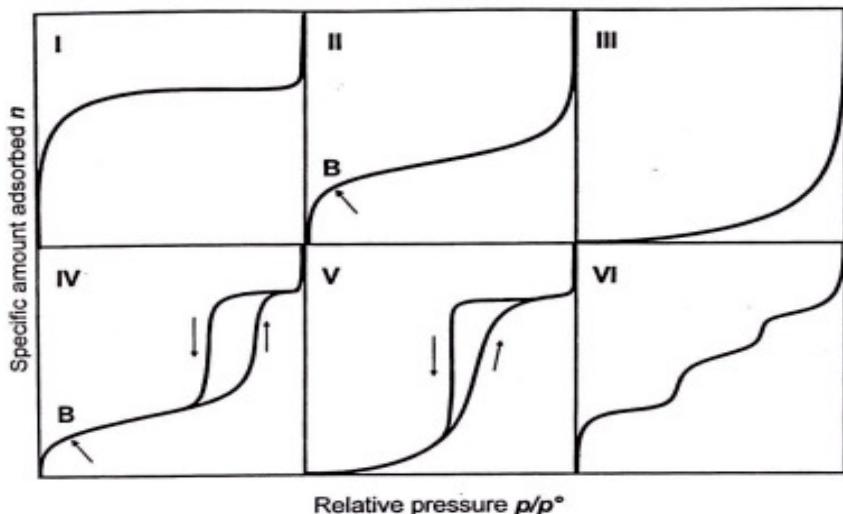
ซึ่งค่า U สามารถหาได้โดยสมการ

$$U = L/t^* \quad (2.12)$$

โดย L คือ ความยาวทั้งหมดของ Bed
 t^* คือ เวลาที่อัตราส่วนของความเข้มข้นของออกต่อความเข้มข้นของเข้มข้นที่เท่ากับ 0.5

10 ไอโซเทอมการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาความร้อน โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (Isotherm)” ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับก้าวตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดย S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT



ภาพที่ 5 ไอโซเทอมการดูดซับ

ที่มา : Anderson, J.R., and Pratt, K.C., "Introduction to Characterization and Testing of Catalysts", Academic Press, New York (1985).

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโลไลต์พบทั้งในการดูด

ชั้บทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดเมกโครพอร์ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or Knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวน้ำถูกกลุ่มแบบชั้นเดียวเก็บสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้น มากกว่าหนึ่งชั้นดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระเจ้า ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวคูดซับ และตัวถูกคูดซับที่ไม่แข็งแรงทำ ให้คูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกคูดซับด้วยกันเองทำ ให้คูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำสัน ไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำ ให้ช่วง Desorption มีปริมาณคูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เมื่อันไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ

11 สมการที่ใช้อธิบายไฮโซเทอมของการดูดซับ (Sui Y. et al. 2008 : 134)

การอธิบายไฮโซเทอมของการดูดซับ นิยมเปลี่ยนเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรง แล้วคำนวณหาค่าต่าง ๆ ด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายการดูดซับ โดยสมการที่ใช้มีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้และอธิบายในที่นี่ ได้แก่ รูปแบบของสมการ Langmuir adsorption isotherm และ Freudlich adsorption isotherm สมการที่นิยมใช้อธิบายไฮโซเทอมของการดูดซับสำหรับระบบของแข็ง-แก๊ส ได้แก่

11.1 สมการ Langmuir

สมการ Langmuir ใช้สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และไม่เกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ สมการ Langmuir แสดงดังนี้

$$\frac{p}{n} = \frac{b}{n_m} + \frac{p}{n_m} \quad (2.13)$$

โดย p = ความดันของสารถูกดูดซับ

N = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่สมดุลต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
ที่ความดัน P (mol/g)

n_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียบแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ
(mol/g)

B = ตัวประสีที่ของการดูดซับซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ และมี
ลักษณะเฉพาะสำหรับตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P/n กับ P จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งสามารถหาค่า n_m ได้จากความชันของกราฟ และคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (S) ได้จากสมการ

$$S = n_m A_m L \quad (2.14)$$

โดย S = พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)

A_m = พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารถูกดูดซับหนึ่ง โนเมตร (m^2)

L = ค่าคงที่อะโวคาโดร (6.02 × 10²³ โนเมตรต่อโมล)

11.2 สมการ BET

เป็นการนำสมการ Langmuir มาประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้นในลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น โดยที่ไม่เกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ

$$\frac{p}{n(p^0 - p)} = \frac{1}{n_m c} + \frac{c-1}{n_m c} \left(\frac{p}{p^0} \right) \quad (2.15)$$

โดย p^0 = ความดันไออกอิมตัวของสารถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิของการดูดซับ
 N = ปริมาณสารถูกดูดซับที่ความดัน P (mol/g)
 n_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวนผิวของตัวดูดซับ
 (mol/g)

C = ค่าคงที่ไร้หน่วยที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ โดยที่

$$c = \exp \left[\frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT} \right] \quad (2.16)$$

โดย ΔH_A = ความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว
 ΔH_L = ความร้อนของการควบแน่น
R = ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant)
T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

ดังนั้น $\Delta H_A - \Delta H_L$ คือ ความร้อนสุทธิของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{n(p^0 - P)}$ กับ $\frac{P}{p^0}$ จะได้กราฟเส้นตรงและสามารถคำนวณหาค่า C และ n_m ได้จากความชัน และจุดตัดกราฟ จากนั้นคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากค่า n_m ตามสมการที่ 2.14

11.3 สมการ Freundlich

ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้พลังงานของการดูดซับออกมากไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้พลังงานการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของสมการ Freundlich คือใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี รูปแบบสมการแสดงดังนี้

$$n = KP^{1/m} \quad (2.17)$$

โดย K = ค่าคงที่การดูดซับ Freundlich
m = ค่าคงที่ (Freundlich intensity parameter)

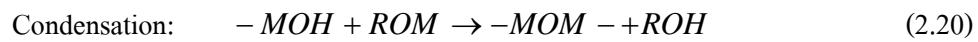
จัดรูปสมการ 2.25 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.18

$$\log n = \log K + (1/m) \log P \quad (2.18)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(n)$ กับ $\log(P)$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง สามารถคำนวณหาค่า m และ K ได้จากความชัน และจุดตัดแกนในแนวตั้งของเส้นกราฟ

12 การเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีโซลเจล (Zhang H. et al. 2002 : 184-187)

วิธีโซล-เจล เป็นวิธีเพื่อผลิตของแข็งจากเจล วิธีการเตรียมเริ่มจากโลหะอัลคาอไซด์ (Metal alkoxide) ในตัวกลางที่เป็นสารอินทรีย์ ถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) ด้วยน้ำแล้วเกิดการพอลิเมอไรซ์ โดยการควบแน่น (Condensation) ของกลุ่มไฮดรอกซิล เมื่อเกิดการพอลิเมอไรซ์และ Cross-link มากพอสารละลายจะถูกยึดเป็นเนื้อแข็งก็เดียวกับของแข็ง เจลยังอาจเกิดจากโซลที่เสถียร ส่วนมากโซลจะเกิดเสถียรภาพจากคลออลด์ที่เกิดการรวมตัวของอนุภาคออกซิไฮดรอกซี (Oxihydroxy) ของโลหะในตัวกลางที่เป็นน้ำ โซล-เจลสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี 2 ปฏิกิริยา



ในระหว่างปฏิกิริยาเริ่มต้นที่มักเรียกว่าขั้น Pregellation (Hardy B er al. 1991 : 125) ตัวทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์และควบแน่น (Condense) กลายเป็นเจล การแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) เกิดขึ้นเมื่อน้ำถูกเติมเข้าไปในอัลคาอไซด์ซึ่งจะถูกแยกออกเป็นสาร Intermediate ในที่สุดจะเกิดเป็นเจล ในปฏิกิริยาการควบแน่น และการโพลิเมอไรซ์หมู่อัลคาอไซด์ (-MOR) ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-MOH) ซึ่งเกิดขึ้นในขั้นการไฮโดรไลซ์เกิดเป็นเมราโลไซต์ (-MOM) ในปฏิกิริยาขั้นนี้จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างปฐมภูมิและสมบัติของเจล

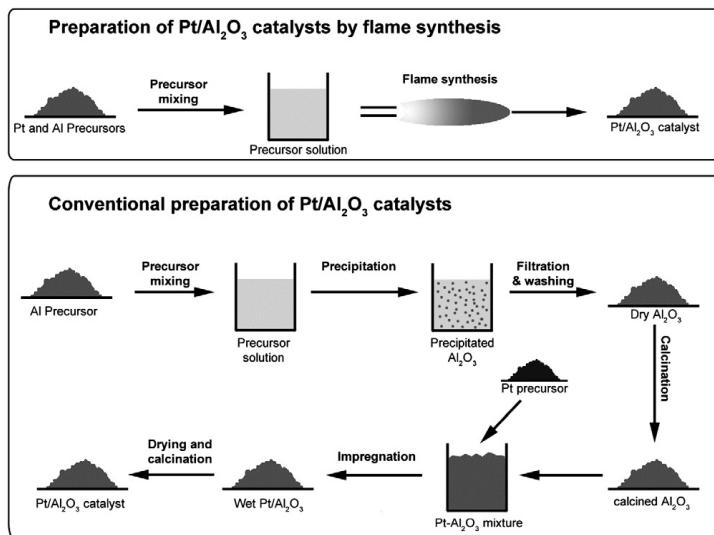
ขั้นที่ 2 ในการสังเคราะห์โซล-เจล เรียกว่าขั้น Postgelation (Hardy B er al. 1991 : 125) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะทำให้แห้งและการเผาของเจลรวมทั้งการคายซับ (Desorption) ของน้ำ การระเหยของตัวทำละลายสารอินทรีย์ตอกถัง ปฏิกิริยาขั้น Dehydroxylation และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

13 การเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (Strobel R. et al. 2006 : 457–480)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ให้มีขนาดนาโน (10^{-9}) นั้นการควบคุมและการออกแบบโครงสร้างของผลึก เป็นสิ่งสำคัญสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา จุดว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Actives site) และยังส่งผลถึงประสิทธิภาพที่ดี รวมถึงคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนด้วยวิธีเฟรมนั้นจะทำให้เราได้ข้อมูล และวัสดุที่แปลงใหม่ที่ไม่เคยมีวิธีการสังเคราะห์แบบไหนทำได้

ปัจุบันการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การเครื่องอบฟัง (Impregnation) โซล-เจล (Sol gel) และการตกตะกอน

(Precipitation) ซึ่งวิธีการเตรียมเหล่านี้ต้องมีขั้นตอนที่ยุ่งยากหลายขั้นตอน เช่น การกรอง (Filtration) การทำให้แห้ง (Drying) การเผาให้เป็นผง (Calcinations) ฯลฯ แสดงดังภาพ 6



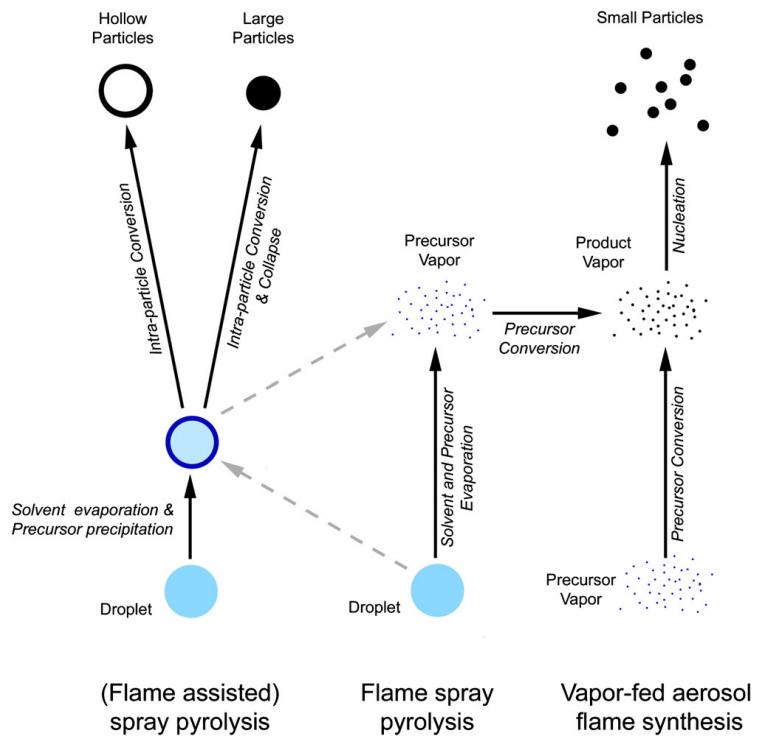
ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กัน กับวิธีเฟรมสเปรย์

ที่มา : R. Strobel., A. Baiker., and S. E. Pratsinis, "Aerosol flame synthesis of catalysts,"

Advanced Powder Technol., 17 (2006) : 457–480.

จากรูปจะเห็นได้ว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเฟรมสเปรย์เป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้ในขั้นตอนเดียว ส่วนวิธีที่ใช้กันมาจะเป็นวิธีที่มีกระบวนการหลายขั้นตอนกว่าจะได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเฟรมสเปรย์สามารถจำแนกได้โดยขั้นตอนการป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่สเปรย์ไฟ ถ้าป้อนสารตั้งที่เป็นไอจะเรียกว่า Vapor-fed Aerosol Flame Synthesis (VAFS) ถ้าป้อนสารตั้งต้นที่เป็นของเหลวที่ตัวทำละลายสามารถลดติดไฟหรือทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิง จะเรียกว่า Flame Spray Pyrolysis (FSP) และถ้าสารตั้งต้นที่เป็นของเหลวที่ตัวทำละลายไม่สามารถติดไฟได้จะเรียกว่า Flame-assisted Spray Pyrolysis (FASP) ซึ่งทั้ง 3 วิธีจะมีขั้นตอนการก่อเกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการก่อเกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

ที่มา : T. T, Kodas., and M. J. Hampden-Smith, “Aerosol Processing of Materials,” Wiley-VCH, Weinheim, 1 (1999) : 476-480.

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการคุณชั้บก้าช ไฮโครเจนชัลไฟฟ์ โดยใช้ตัวคุณชั้บที่เตรียมได้จากวิธีโซล-เจล และวิธีเฟรมสเปรย์ ซึ่งเราจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการเตรียมการตัวคุณชั้บ และศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวคุณชั้บ สำหรับคุณชั้บก้าช ไฮโครเจนชัลไฟฟ์ และส่วนที่ 2 เป็นการนำตัวคุณชั้บไปทดสอบการคุณชั้บกับก้าช ไฮโครเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ และก้าช ไฮโครเจนชัลไฟฟ์ในก้าชธรรมชาติ แล้วนำตัวคุณชั้บไปขึ้นรูปเพื่อใช้ในระดับนำร่อง (Pilot scale) โดยเราจะทำการศึกษาที่อุณหภูมิและความดันบรรยายกาศ

1 การเตรียมตัวคุณชั้บ และศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวคุณชั้บ

1.1 การเตรียมตัวคุณชั้บ

1.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวคุณชั้บ

- คอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- เตรตะเอทธิล ออโทลซิลิกาต ($\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$)
- ซิงค์แอนปทาเนต
- ซิงค์อะซิเตറต ไดไฮเดรต ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- เอ็ทเทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- แอ็ทโนเมเนียม ไฮดรอกไซด์ (NH_3OH)
- เอ็กเซน (C_6H_{14})
- น้ำกลั่น
- ก้าชมีเทน (CH_4)
- ก้าชออกซิเจน (O_2)
- ก้าชไฮโครเจน (H_2)

1.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวคุณชั้บ

- เครื่องเฟรมสเปรย์
- เครื่องก้าชโถกรามาโตกราฟี (SHIMADZU GC-14B Gas Chromatography, TCD)

- เครื่องก๊าซโถกรามาโตกราฟี (HP 6890 Series Gas Chromatography, FPD)
- เครื่องเทวี่ยงแยก
- ตู้อบ
- คอนเดนเซอร์
- เตาเผากระตุ้น (Tube Furnace)
- ตู้อบแห้ง
- โอบดอนนุภาค
- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- กระดาษกรอง
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- เครื่องปั่นกวนแบบให้ความร้อน
- บีกเกอร์
- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET)
- เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- เครื่องวัดขนาดอนุภาค (TEM)

1.1.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีโซล-เจล (Jun Bao et al. 2007 : 1)

1 การเตรียมกوبเปอร์ออกไซด์ เริ่มจากใช้กوبเปอร์ในเตรต์ไตรไอเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลละลายในเอทานอล (Dehydrated Ethanol) 100 มิลลิลิตร จนเป็นเนื้อเดียวกัน

2 นำสารละลายที่ได้นี้ทำการรีฟลักช์และกวนอยู่ตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้นำสารละลายที่ได้ดังไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้ว ลดอุณหภูมิของสารละลายโดยการแช่ในอ่างน้ำเย็นให้สารละลายมีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

3 นำลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) ความเข้มข้น 7 มิลลิโมลละลายในเอทานอล 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องและทำให้สารละลายมีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารละลายลิเทียมไฮดรอกไซด์ที่ได้เดิมลงในสารละลายกوبเปอร์ ทำการกวนอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเดิมสารละลายลิเทียมไฮดรอกไซด์จนหมด จะทำให้สารละลายกوبเปอร์-ซิงค์อะซิเตทเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีเขียวเข้ม รักษาอุณหภูมิของสารละลายที่ได้มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนเร็วเกินไป

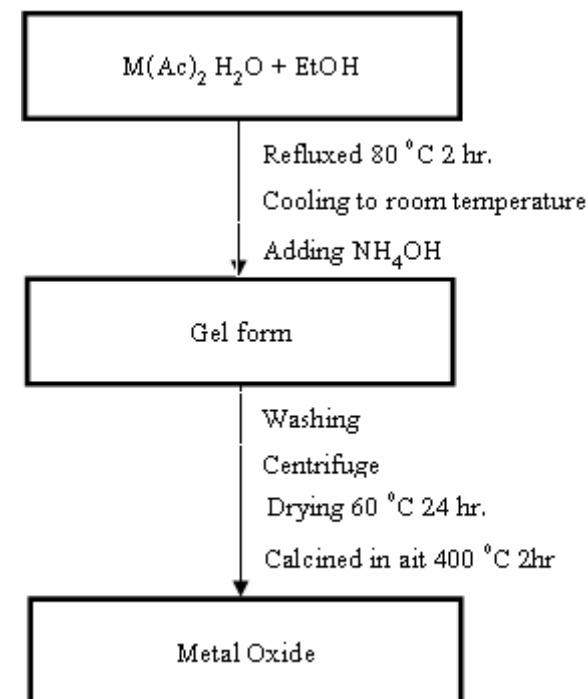
4 เติมເສກເໜີນປະມາມ 600 ມິລັລິດິຕຣ ລົງໃນສາຮລາຍຈະທໍາໄຫ້ເກີດກອກຕົວຂອງຕະກອນເປັນສີຄ່ອນຂ້າງເງິນ

5 ນຳສາຮລາຍແບວນລອຍທີ່ໄດ້ມາທໍາການແຍກຕະກອນຈາກສາຮລາຍຕົວຍ່າງເຊີງ (Centrifugation) ທໍາການດ້າງຕະກອນທີ່ໄດ້ສອງຄັ້ງດ້າຍເອຫານອດ ແລ້ວທໍາໄຫ້ຕະກອນນັ້ນແໜ່ງໂດຍການຕັ້ງທຶນກົນໄວ້ທີ່ອຸນຫຼວມ 60 ອົງສາເໜດເຊີຍສ

6 ຈາກນັ້ນນໍາໄປເພາໄຫ້ເປັນຜົງ (Calcinations) ທີ່ອຸນຫຼວມ 400 ອົງສາເໜດເຊີຍສ ເປັນເວລາ 2 ຊົ່ວໂມງ ແລ້ວເກີບຕ້ວອ່າງທີ່ໄດ້ ໃນບັດເກີບສາຮໂດຍປ່ຽນຈຳກວາມຊື່ນ

7 ການເຕີຍມືັງກອກໄຊດ໌ ເວັ້ນຈາກນຳໃຈງົດຂອະໜີເຕີກ ($Zn(Ac)_2 \cdot 2H_2O$) ຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນ 3 ມິລັລິໂມລ ຈະເປັນເນື້ອເດີວກັນ ຈາກນັ້ນທໍາຕາມບັນດອນທີ່ 1-6

8 ການເຕີຍມຄອປເປົອຮ່-ໃຈງົດຂອກໄຊດ໌ ນຳຄອປເປົອຮ່ໃນເຕຣຕໄຕຣໄອເດຣຕ ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$) ແລະ ງົງກອະໜີເຕີກ ($Zn(Ac)_2 \cdot 2H_2O$) ລະລາຍໃນເອຫານອດ 100 ມິລັລິດິຕຣ ທີ່ອັຕຣາສ່ວນຄອປເປົອຮ່ຕ່ອງໃຈງົດທ່າກັນ 100 : 0, 80 : 20, 50 : 50, 20 : 80 ແລະ 0 : 100 ເປົອຮ່ເຊັ່ນໂດຍໂມລຈາກນັ້ນຕາມບັນດອນທີ່ 1-6



ກາພທີ່ 8 ແຜນພັ້ງບັນດອນການເຕີຍມຕົວດູດຊັບດ້ວຍວິທີໂຈດ-ເຈດ

1.1.3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวคุณชับคัววิธีเฟรมสเปรย์

1 การเตรียมคอปเปอร์ออกไซด์ เริ่มจากใช้คอปเปอร์ไนเตรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมล ละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร จนเป็นเนื้อเดียวกัน

2 ใช้หลอดน้ำดယาสำหรับเครื่องเฟรมสเปรย์ขนาด 100 มิลลิลิตร ดูดสารละลายที่เตรียมไว้จากข้อที่

1.3.2.1 แล้ววางลงบนปั๊มหลอดน้ำดယา (Syringe pump)

3 ปรับกําชือกซิเจน (Oxygen/Air) และ กําช้มีเทน (Methane) ให้มีอัตราการไหลดเท่ากับ 3 และ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำที่ ตามลำดับ

4 จุดไฟที่หัวเบรินเนอร์ (Burner) แล้วปรับกําชือกซิเจน (Oxygen/Air), กําช้มีเทน (Methane) และกําชือกซิเจน (Oxygen disperse) ให้มีอัตราการไหลดเท่ากับ 3, 1.5 และ 5 มิลลิลิตรต่อน้ำที่ ตามลำดับ

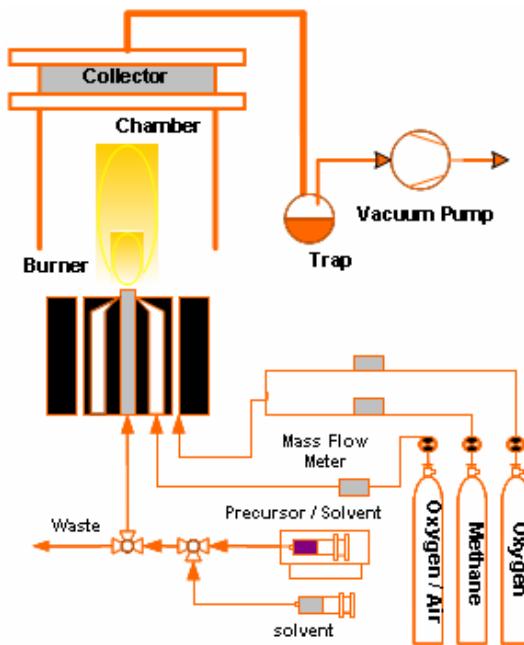
5 กดปั๊มสตาร์ทที่ปั๊มหลอดน้ำดယา (Syringe pump) และปรับให้สารละลายมีผ่านหัวหัวเบรินเนอร์ (Burner) ที่อัตราการไหลด 5 มิลลิลิตรต่อน้ำที่

6 เปิดปั๊มสูญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อคุกอนุภาคที่ได้จากการเผาสารละลายจากหัวเบรินเนอร์ (Burner) ให้ติดกระดาษกรอง

7 เมื่อเผาเสร็จคัตตี้ปั๊มหลอดน้ำดယา (Syringe pump) ทำการเก็บตัวอย่างที่ได้ ในขวดเก็บสาร โดยปราศจากความชื้น

8. การเตรียมซิงค์ออกไซด์ เริ่มจากนำซิงค์อะซิเตท ($\text{Zn}(\text{Ac})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการขึ้นตอนที่ 1-7

9 การเตรียมคอปเปอร์-ซิงค์ออกไซด์ นำคอปเปอร์ไนเตรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และซิงค์อะซิเตท ($\text{Zn}(\text{Ac})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนคอปเปอร์ต่อซิงค์เท่ากับ 100 : 0, 80 : 20, 50 : 50, 20 : 80 และ 0 : 100 เปอร์เซ็นต์โดยไมล จากนั้นทำการขึ้นตอนที่ 1-7



ภาพที่ 9 แผนผังขั้นตอนการเตรียมตัวคุณค่าด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

ที่มา : พรพจน์ บุญพิทักษ์. “คุณลักษณะและสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของโภบอลท์บนตัวรองรับเซอน์โคงเนีย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาศิวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, (2552) : 19.

1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวคุณค่า

1.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area measurement)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area measurement) ด้วยเครื่อง BELSORP  ซึ่งเป็นการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวคุณค่าที่เตรียมได้ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmer-Teller) หรือการวัดค่าพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีการคุณค่าด้วยการทดสอบแบบหลายชั้น โดยการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization) นั้นจะขึ้นอยู่กับการคุณค่าทางกายภาพของแก๊สในไตรเจนที่ผ่านระบบที่อุณหภูมิในไตรเจนเหลว (77 K) โดยวัดปริมาณแก๊สที่ถูกคุณค่าทางออกจากการผิวของสารคุณค่าที่สภาวะสมดุล

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะนี้เริ่มจากการไอล์ก้าที่อยู่ในสารคุณค่าที่ทราบนำหนัก โดยผ่านก้าชีสเลี่ยมน้ำสารคุณค่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำหนักแห้งสุญญากาศ คำนวณจากผลต่างระหว่างนำหนักตัวอย่างก่อนและหลังผ่านก้าชีสแล้ววิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) จากการคุณค่าในไตรเจนที่อุณหภูมิกองที่ 5 จุด เทียบกับนำหนักแห้งสุญญากาศ



ภาพที่ 10 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว

ที่มา : LMS Group of Companies, Laboratory Solutions for Material Science [Online], accessed 27 May 2009. Available from <http://lmsscietific.com/lmsbelminiii.html>.

1.2.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ด้วยเครื่อง SIEMENS D5000 เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายในวัสดุภาคร่วม (Bulk phase) และองค์ประกอบของผลึกของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และยังสามารถทำการวัดค่าขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิคทางกายภาพ โดยการทำงานของเครื่อง X-ray diffractometer ที่ประกอบด้วย ตัวให้แสงเพลิงงานเดี่ยว (Monochromator) ที่ทำด้วยกราไฟฟ์และหลอดทองแดง เพื่อให้กำเนิดรังสีในช่วงพลังงานวง K ของทองแดง (Cu-K radiation (1.5418 Å)) บดสารคุณภาพจนละเอียด แล้วบรรจุในภาชนะแก้วผิวบางวางในลำแสงแล้วรบกวนโครงสร้าง (Constructive interference) ด้วยรังสีเพลิงงานเดี่ยว (Monochromatographic irradiation) โดยการเปลี่ยนมุมของการตกลงบนจาก 10 องศา ถึง 80 องศา สัญญาลักษณ์แบบตัวเลข (Digital signal) ที่เป็นสัดส่วนกับรังสีเอ็กซ์จากหัววัดและการวัดมุมของ Goniometer ถูกส่งโดยตรงไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม XFIT software



ภาพที่ 11 เครื่องเดี้ยวนของรังสีอิเล็กซ์

ที่มา : The University of Queensland, Centre of microscopy and Microanalysis [Online], accessed 27 May 2009. Available from <http://uq.edu.au/nanoworld/index.html?page=43961>.

1.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนั้นจะใช้หลักการเดียวกับเครื่องฉายสีไลด์ โดยคำนึงถึงความละเอียดของภาพที่ได้มาจากการวัดและฉายเป็นภาพออกมานั้นจะสามารถรื่นเรื่องแสง (Phosphor screen) โดยทั่วไปแล้วกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่ใช้โดยทั่วไปนั้นจะทำงานที่ความต่างศักย์ประมาณ 100 ถึง 200 กิโลโวลต์ และกล้องจุลทรรศน์ขนาด 200 กิโลโวลต์ที่ถูกออกแบบอย่างดีนั้นสามารถวัดอนุภาคเล็กถึง 0.18 นาโนเมตร ยิ่งไปกว่านั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านรุ่นใหม่นั้นถูกออกแบบให้สามารถทำงานที่ความต่างศักย์สูงขึ้นไปถึง 200 ถึง 300 กิโลโวลต์ โดยใช้อุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่าปืนยิงสนามอิเล็กตรอน (Field emission Electron Guns, FEG) ซึ่งสามารถให้ความสว่างมากกว่าเดิมเกินหนึ่งพันเท่า ทำให้กำลังขยายของกล้องสูงขึ้นไปอีก นอกจากนี้ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีเกี่ยวกับการจำลองภาพในคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถติดตามกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระดับอะตอมได้อีกด้วย



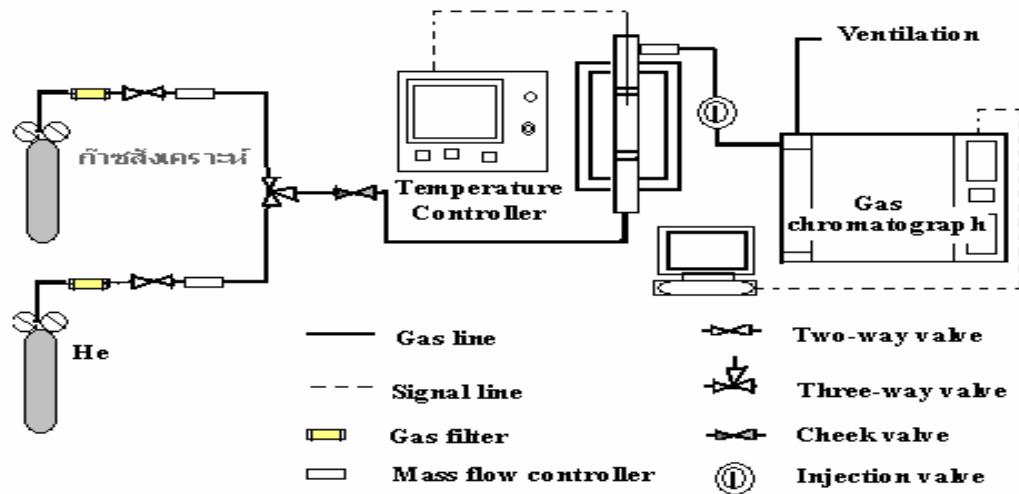
ภาพที่ 12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
ที่มา : ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง, สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[Online], accessed 27 May 2009. Available from <http://rdi.ku.ac.th/cl/unit/microscope%20.html>.

2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟด์

2.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟด์ สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม

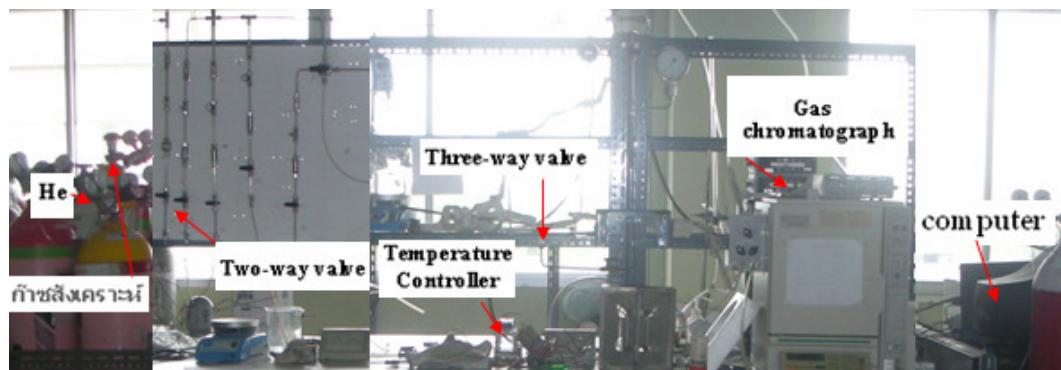
2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- ก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟด์ สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม
- เครื่องควบคุมอัตราการ ไหหลอดแบบฟองสบู่ (Bubble flow meter)
- ไยเก็ว (Quartz wool)
- ตัวดูดซับ (Adsorbent)
- หอดูดซับ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.35 เมตร, ยาว 50 เมตร)
- เครื่องก๊าซโกรามาโตกราฟี (Gas Chromatography, TCD)
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Proportional Integral and Differential, PID)
- เครื่องให้ความร้อน (Heater)



ภาพที่ 13 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความ
เข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม

ที่มา : คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัย
ศิลปากร, (2551)



ภาพที่ 14 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น
4000 พีพีเอ็ม

ที่มา : คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัย
ศิลปากร, (2551)

2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการคุณชับกําชื่อโตรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ 4000 พีพีเอ็ม

1 บรรจุตัวคุณชับชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้ในหอดคุณชับ โดยใช้ไยแก้วรองบริเวณต้านบน และด้านล่างของหอดคุณชับ ทำการไล่ความชื้นโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส และใช้กําชีวีเลิมนบริสุทธิ์ให้หล่อผ่านตัวคุณชับที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2 ทิ้งไวนิลลิงอุณหภูมิห้อง และใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ

3 ทำการทดสอบการคุณชับโดยใช้กําชื่อโตรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ให้หล่อผ่านตัวคุณชับที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที

4 กําชื่อโตรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ข้ออกจะไหลเข้าเครื่องกําชื่อโกรมาโทกราฟีชนิดที่ชัดเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของกําชื่อโตรเจนซัลไฟฟ์

5 ทำการทดสอบจนความเข้มข้นข้างออกของกําชื่อโตรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์มีความเข้มข้นเท่ากับ 4000 พีพีเอ็ม

6 ทำการทดสอบช้าตามข้อที่ 1-5 โดยเปลี่ยนชนิดตัวคุณชับ

7 เก็บรวบรวมผลการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ และสรุปการทดสอบ

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการคุณชับกําชื่อโตรเจนซัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในกําชชาร์มชาติ

2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- กําชื่อโตรเจนซัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในกําชชาร์มชาติ

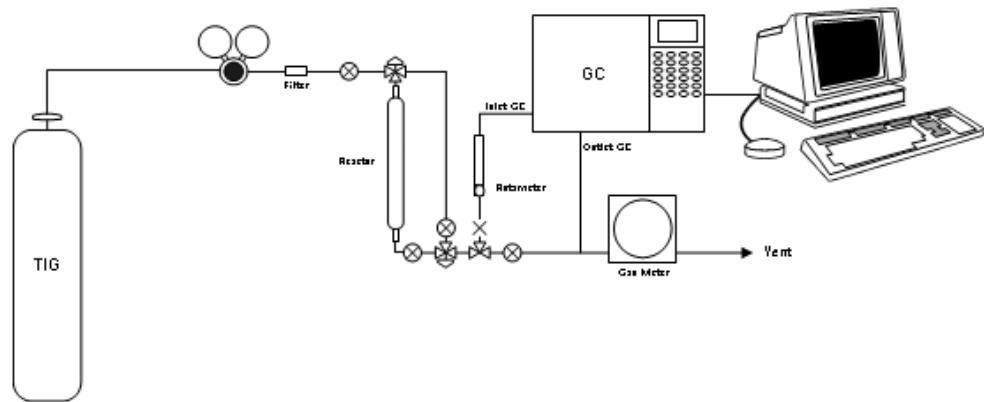
- เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Dry test gas meter)

- ไยแก้ว (Quartz wool)

- ตัวคุณชับ (Adsorbent)

- หอดคุณชับ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.35 เซนติเมตร, สูง 50 เซนติเมตร)

- เครื่องกําชื่อโกรมาโทกราฟี (Gas Chromatography FPD)



ภาพที่ 15 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการคุณภาพชับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ

ที่มา : สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), (2551).



ภาพที่ 16 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการคุณภาพชับก้าช ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มใน ก๊าซธรรมชาติ

ที่มา : สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), (2551).

2.2.2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการคุณชับก้าวไฮโดรเจนเซลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติ

1 นำตัวคุณชับชนิดต่างๆ ที่ทำการได้ความชื้นโดยนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วบรรจุลงในหอดูดซับ โดยใช้ไข้แก้วรองบะรีเวนด้านบนและด้านล่างของหอดูดซับ

2 ทำการทดสอบการคุณชับโดยใช้ก้าวไฮโดรเจนเซลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติ ไอล่อันตัวคุณชับที่อัตราการไอล 500 มิลลิลิตรต่อนาที

3 ก้าวไฮโดรเจนเซลไฟฟ์ข้ออกจะไอลเข้าเครื่องก้าวโครมาโตกราฟิชนิคเอยดีเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของก้าวไฮโดรเจนเซลไฟฟ์

4 ทำการทดสอบจนความเข้มข้นข้าออกของก้าวไฮโดรเจนเซลไฟฟ์มีความเข้มข้นเท่ากับ 32 พีพีเอ็ม

5 ทำการทดสอบข้าตามข้อที่ 1-5 โดยเปลี่ยนชนิดตัวคุณชับ

6 เก็บรวบรวมผลการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ และสรุปการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการคุณภาพของตัวคุณภาพที่ได้จากการทดสอบโดยใช้ตัวคุณภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมีและวิเคราะห์ทางกายภาพ ซึ่งเราแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของตัวคุณภาพ โดยใช้วิธีการหาค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการคุณภาพของก๊าซในไตรเจน (Brunauer Emmett Teller, BET) การวิเคราะห์หาเฟสของตัวคุณภาพด้วยเทคนิคการเลือยabenของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) และ การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(Transmission Eletron Microscope, TEM) ส่วนที่ 2 จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการคุณภาพของก๊าซในไตรเจนชั้นไฟฟ์สั่งเกราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ของตัวคุณภาพที่ได้เตรียมขึ้นมาเพื่อนำตัวคุณภาพที่ดีที่สุดไปเบรียบเทียบกับตัวคุณภาพที่บริษัทปตท. จำกัดมาชน สำหรับมาจากต่างประเทศ ส่วนที่ 3 นำตัวคุณภาพที่ดีที่สุดที่เตรียมได้ทดสอบประสิทธิภาพการคุณภาพของก๊าซในไตรเจนชั้นไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็ม ในก๊าซธรรมชาติ และนำตัวคุณภาพที่ดีที่สุดที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเป็นทรงกลมแล้วทดสอบประสิทธิภาพการคุณภาพของก๊าซในไตรเจนชั้นไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็ม ในก๊าซธรรมชาติ

1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวคุณภาพ

1.1 การวัดค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการคุณภาพของก๊าซในไตรเจน (Brunauer Emmett Teller, BET)

ผลที่ได้จากการวัดค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการคุณภาพของก๊าซในไตรเจน ได้แก่ พื้นที่ผิจําเพาะ (Specific Surface area) เส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (Mean pore diameter) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume) และขนาดของอนุภาค (Particle size) และแสดงดังตารางที่ 2 โดยการประมาณค่าขนาดอนุภาคด้วยการวัดค่าพื้นที่ผิวจากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวและขนาดของอนุภาคนั้นทำให้สามารถประมาณค่าขนาดอนุภาคได้จากการสมการ:

$$d_{BET} = \frac{6}{S_{sp}\rho} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 2 ผลที่ได้จากการวัดค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับของก้าช ในไตรเจน

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	เส้นผ่าศูนย์กลาง รูพรุนเฉลี่ย (nm)	ปริมาตรรู พรุนรวม (cm ² /g)	ขนาดของ อนุภาค (d _{BET} (nm))
SG Zn	4.40	23.97	0.00182	22.2
SG Cu-Zn(20:80)	4.40	34.98	0.03362	22.2
SG Cu-Zn(50:50)	4.10	42.88	0.06687	23.9
SG Cu-Zn(80:20)	3.10	20.53	0.02	31.6
SG Cu	1.50	49.17	0.0263	35.2
FSP Zn	99.00	7.30	0.25	10.8
FSP Cu-Zn(20:80)	76.00	18.00	0.25	13.3
FSP Cu-Zn(50:50)	73.00	22.46	0.35	14.0
FSP Cu-Zn(80:20)	57.00	21.88	0.21	17.1
FSP Cu	52.00	5.52	0.06	19.8
FSP 5% SiO ₂ -modified CuO	51.60	5.37	0.07	18.2
FSP 10% SiO ₂ -modified CuO	67.74	5.65	0.10	13.8
FSP 15% SiO ₂ -modified CuO	72.30	7.89	0.14	14.9
FSP 20% SiO ₂ -modified CuO	74.00	7.86	0.15	14.1
FSP 25% SiO ₂ -modified CuO	67.78	7.95	0.13	16.5

*SG = ตัวดูดซับที่เตรียมได้จากวิธีโซลเจล *FSP= ตัวดูดซับที่เตรียมได้จากเฟรมสเปรย์

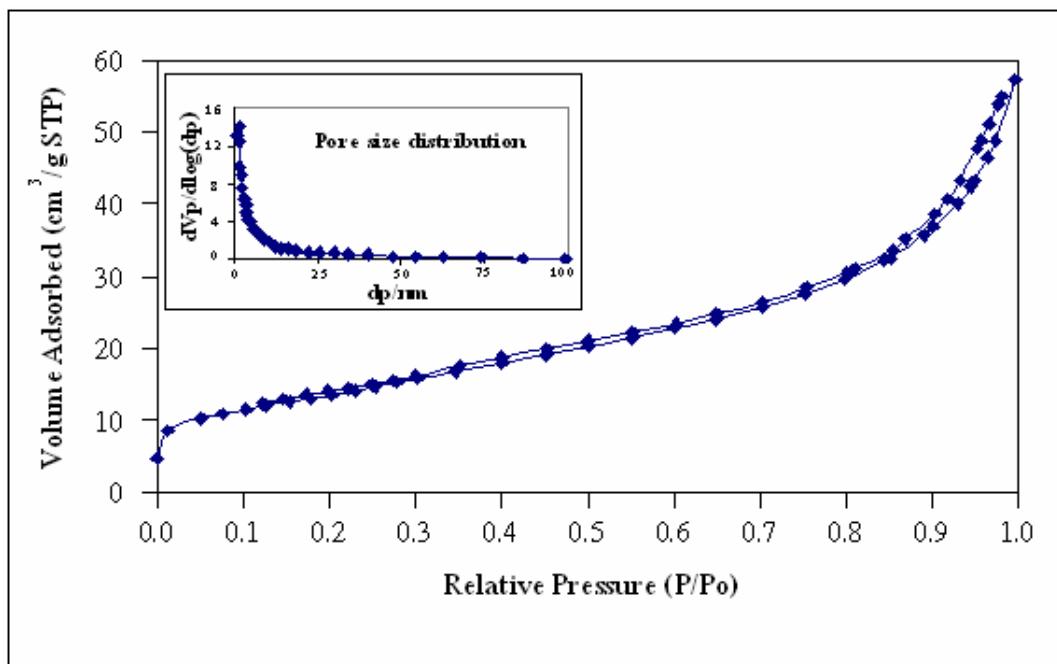
*SiO₂- modified = ตัวดูดซับที่พัฒนาด้วยซิลิกา

จากตารางที่ 2 จากผลการศึกษาที่ได้พบว่า ชิงค์ออกไซด์จะมีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากกว่า คอลป์ออร์อกไซด์ และเมื่อทำการทดสอบชิงค์ออกไซด์กับคอลป์ออร์อกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า เมื่อมีปริมาณชิงค์ออกไซด์มากขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้นด้วย และพื้นที่ผิวของคอลป์ออร์อกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกา พบว่า เมื่อมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล กับวิธีเฟรมสเปรย์ พบว่าวิธีเฟรมสเปรย์จะทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีพื้นที่ผิวมากกว่า ตัวดูดซับที่เตรียมด้วย

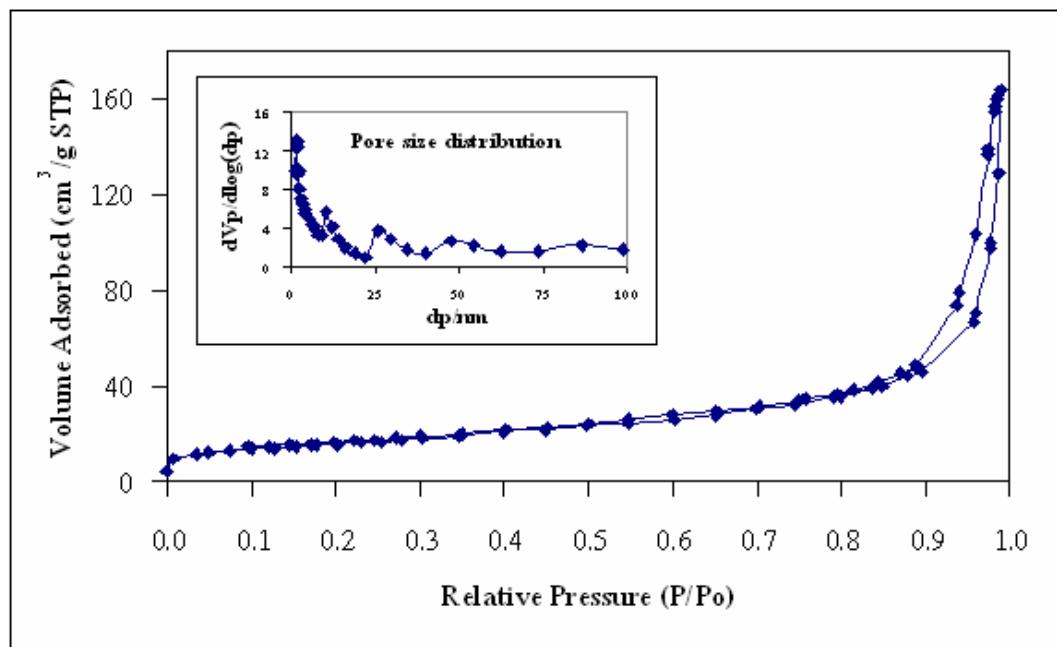
วิชีไซด์-เจด ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวคุณภาพจะมีค่าແປรัตน์ตรงกับขนาดอนุภาคของตัวคุณภาพซึ่ง คือ เมื่อขนาดอนุภาคตัวคุณภาพซึ่งมีขนาดเล็กจะทำให้พื้นที่ผิวมีค่ามากขึ้นด้วย และจากตารางที่ 2 พบว่าขนาดอนุภาค (d_{BET}) ของซิงค์ออกไซด์จะมีขนาดที่เล็กกว่าค่าcopeอร์ออกไซด์ และขนาดอนุภาคของcopeอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกา พบว่าเมื่อมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาคของตัวคุณภาพซึ่งเล็กลงด้วย

เส้นผ่านศูนย์กลางรูพ魯นเฉลี่ยที่ศึกษาได้ จากตารางที่ 2 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพ魯นเฉลี่ยของตัวคุณภาพซึ่งมีขนาดประมาณ 21 ถึง 50 ตัวคุณภาพซึ่งค่าcopeอร์-ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิชีไซด์-เจด จะมีขนาดประมาณ 21 ถึง 50 ตัวคุณภาพซึ่งค่าcopeอร์-ซิงค์ออกไซด์ และค่าcopeอร์-ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิชีวิชีเฟรมสเปรย์จะมีขนาดประมาณ 6 ถึง 23 และตัวคุณภาพซึ่งค่าcopeอร์-ซิงค์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกาที่เตรียมด้วยวิชีวิชีเฟรมสเปรย์จะมีขนาดประมาณ 6 ถึง 8 ซึ่งตัวคุณภาพซึ่งที่เตรียมได้ทั้งสิบห้าชนิดมีโครงสร้างของรูพ魯นเป็นแม่โขธอร์

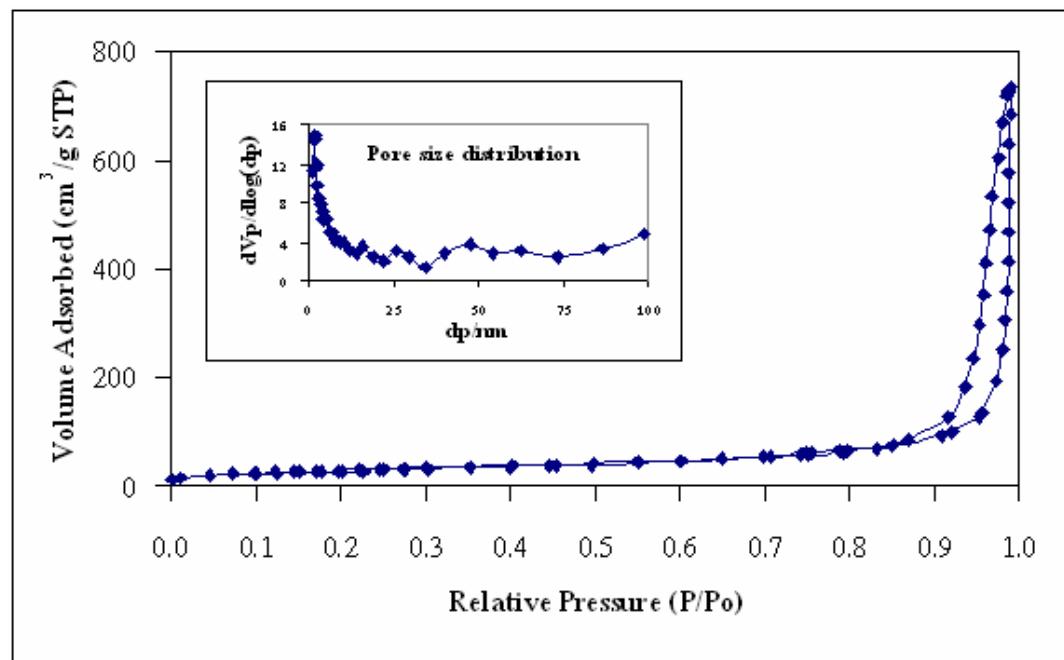
การวัดค่าพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการคุณภาพซึ่งก็จะในโครงเรนนอกจากจะบอกพื้นที่ผิวจำเพาะ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพ魯นเฉลี่ย ปริมาตรรูพ魯นรวม และขนาดของอนุภาคแล้ว ยังสามารถบอกถึงลักษณะและโครงสร้างรูพ魯น ซึ่งทำนายได้จากลักษณะรูปแบบของฮีสเตอริสคลูปส์ (Hysteresis loop) และ $P_t - t$ plot ภาพที่ 17-31 เป็นการแสดงกราฟของการคุณภาพซึ่งในโครงเรนต่อความดันรวม (P/P_0) ของตัวคุณภาพซึ่งทำการวัดลักษณะและโครงสร้างของรูพ魯น



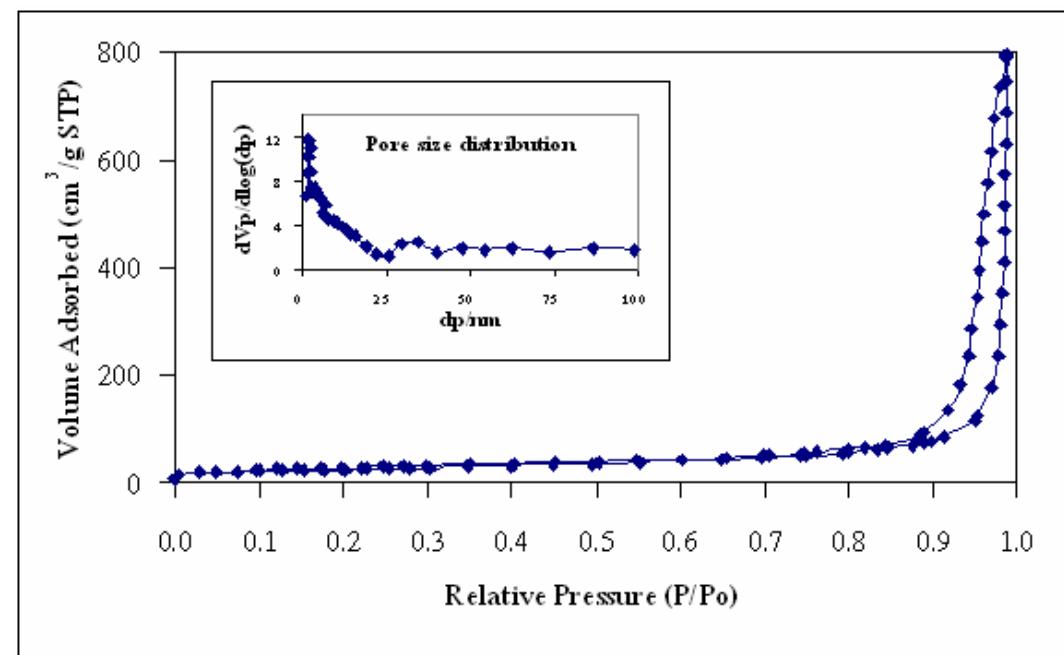
ภาพที่ 17 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไฮโซเมการดูดซึบของในไตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคือปีเปลอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP CuO)



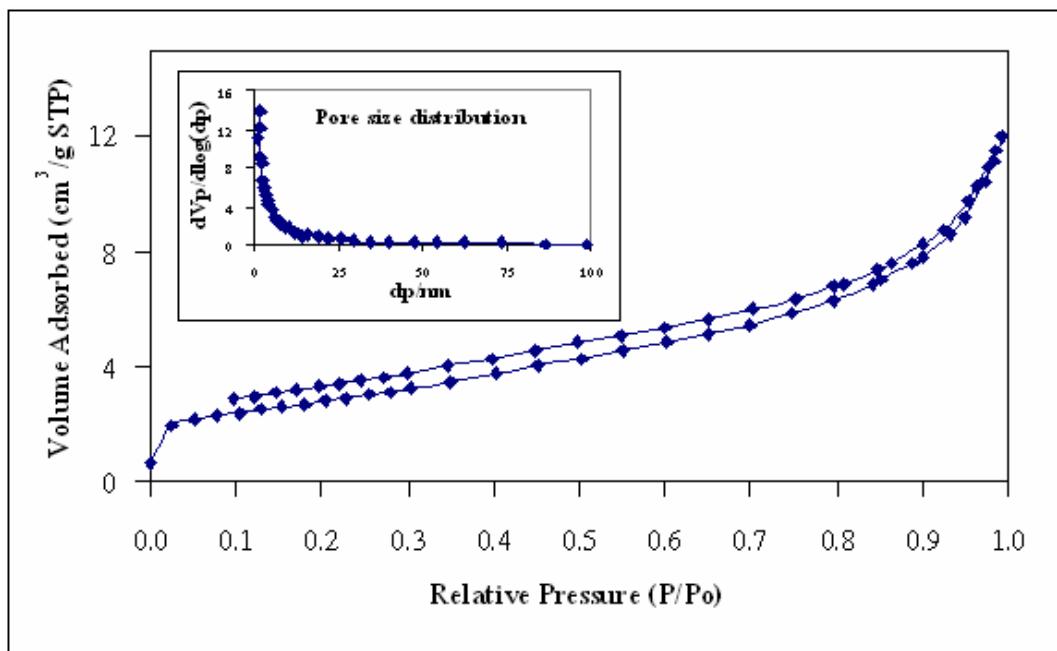
ภาพที่ 18 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไฮโซเมการดูดซึบของในไตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 20 เปอร์เซ็นต์คือปีเปลอร์ออกไซด์กับ 80 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP 20%Cu:80%Zn)



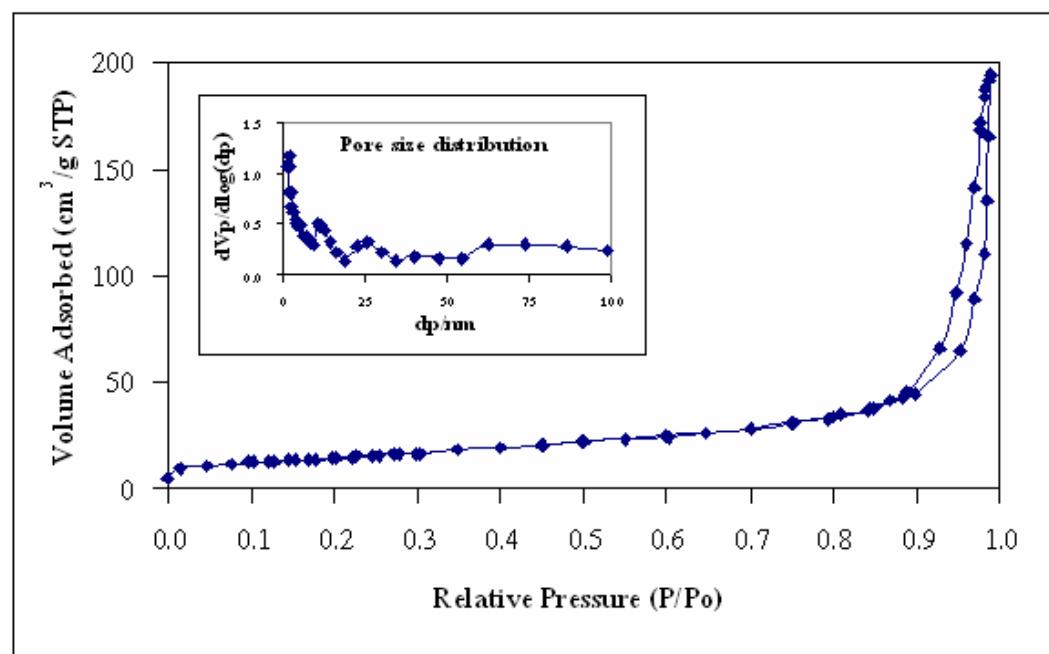
ภาพที่ 19 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 50 เปอร์เซ็นต์คือเปอร์เซนต์กับ 50 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP 50%Cu:50%Zn)



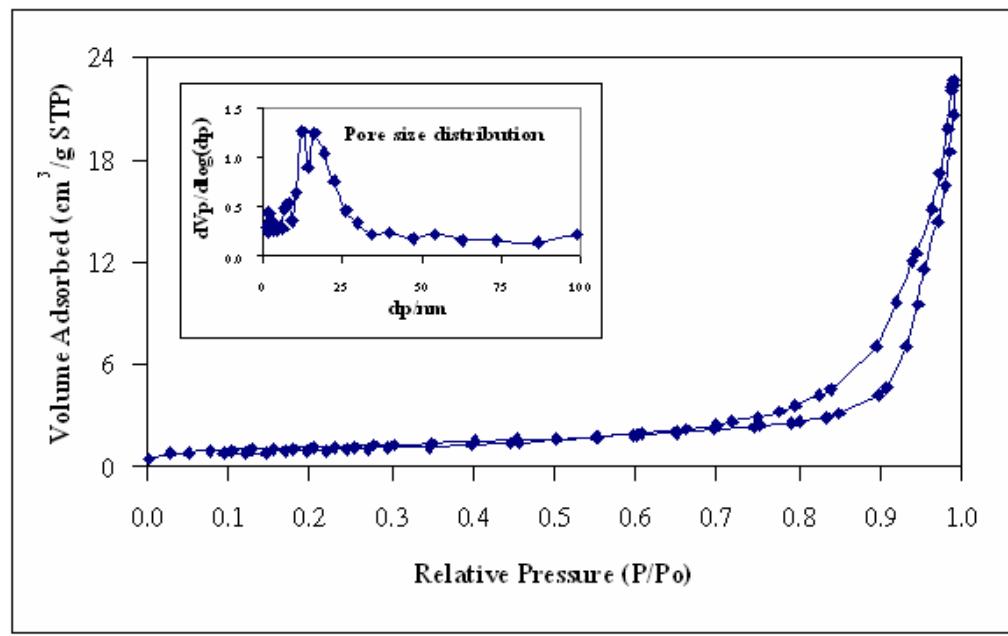
ภาพที่ 20 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 80 เปอร์เซ็นต์คือเปอร์เซนต์กับ 20 เปอร์เซ็นต์ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP 80%Cu:20%Zn)



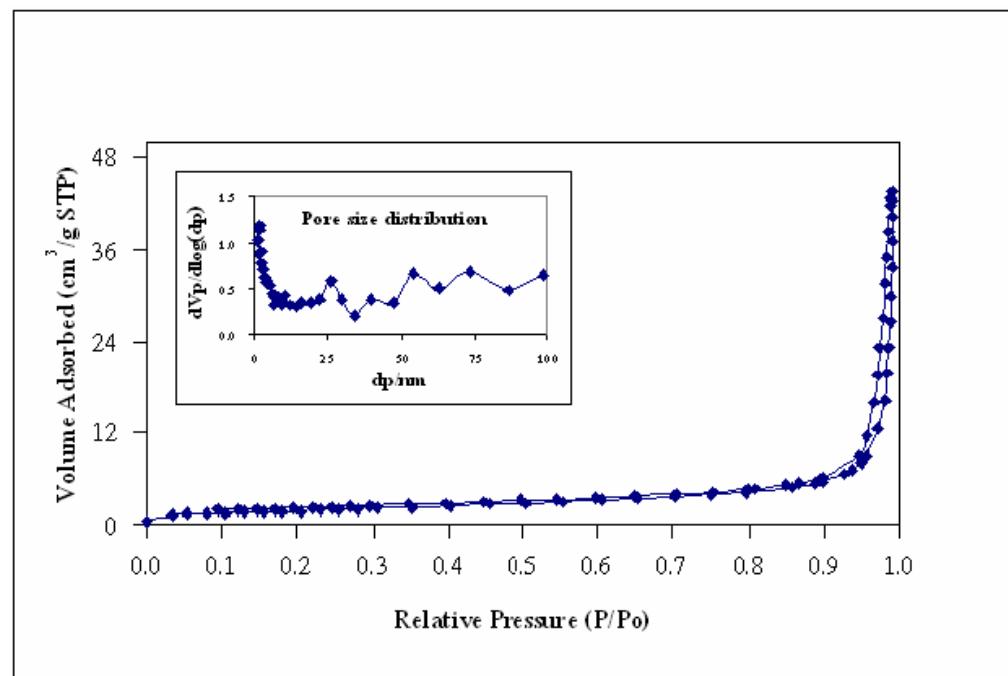
ภาพที่ 21 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ “ไอโซเทอมการดูดซึบของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP ZnO)



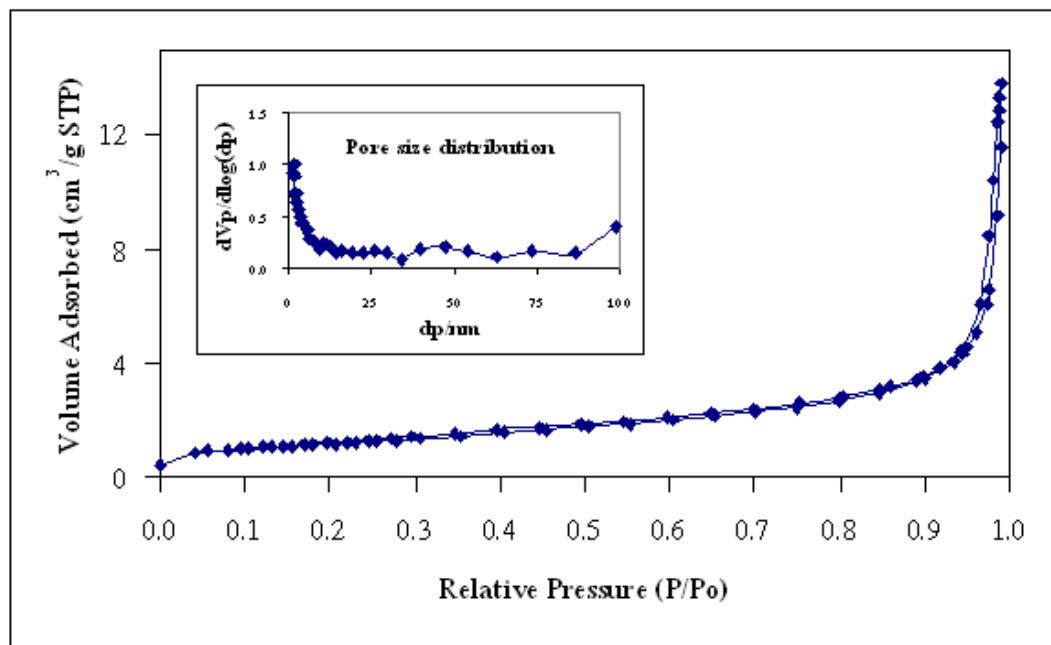
ภาพที่ 22 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ “ไอโซเทอมการดูดซึบของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของกอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซเดจ (SG CuO)



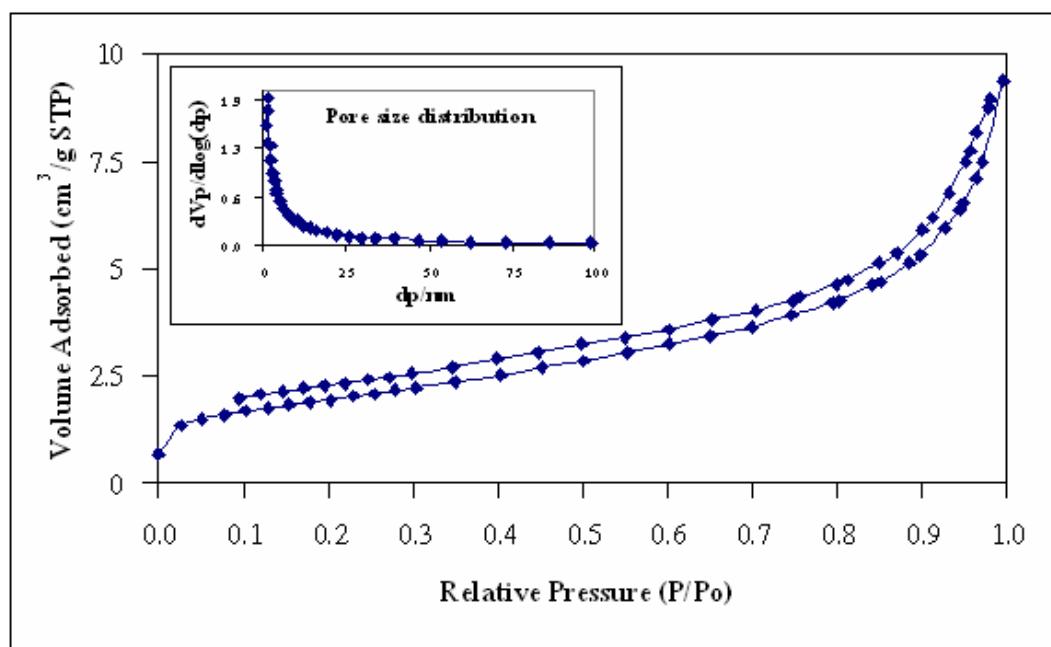
ภาพที่ 23 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไออกไซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 20 เปอร์เซ็นต์กอปเปอร์ออกไซด์กับ 80 เปอร์เซ็นต์ซิงค์กอปเปอร์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (SG 20%Cu : 80%Zn)



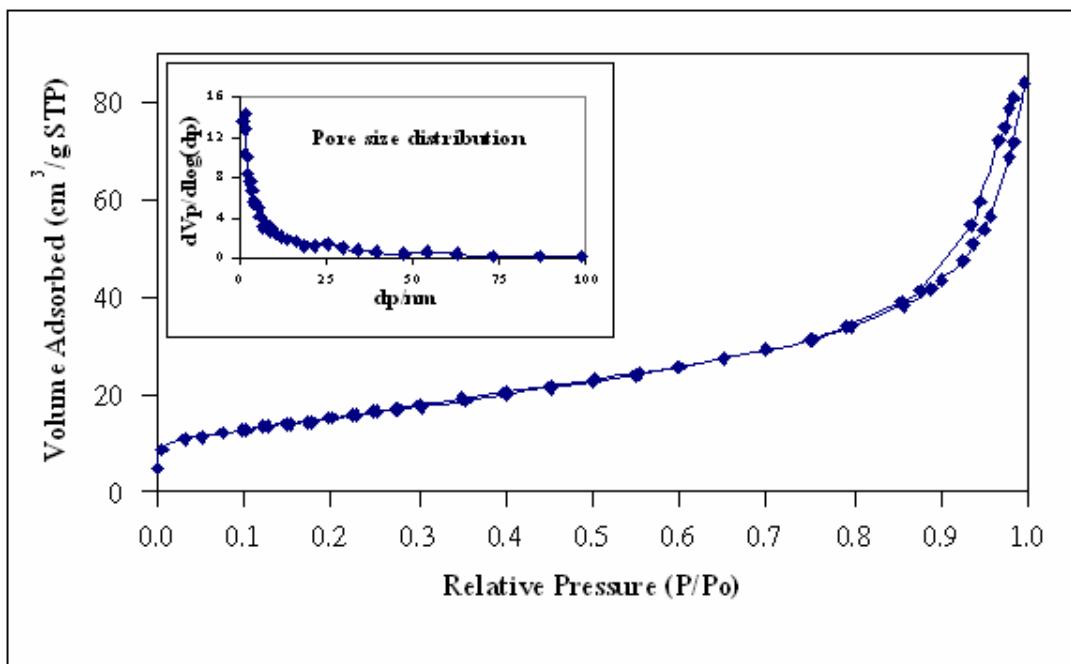
ภาพที่ 24 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไออกไซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 50 เปอร์เซ็นต์กอปเปอร์ออกไซด์กับ 50 เปอร์เซ็นต์ซิงค์กอปเปอร์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (SG 50%Cu : 50%Zn)



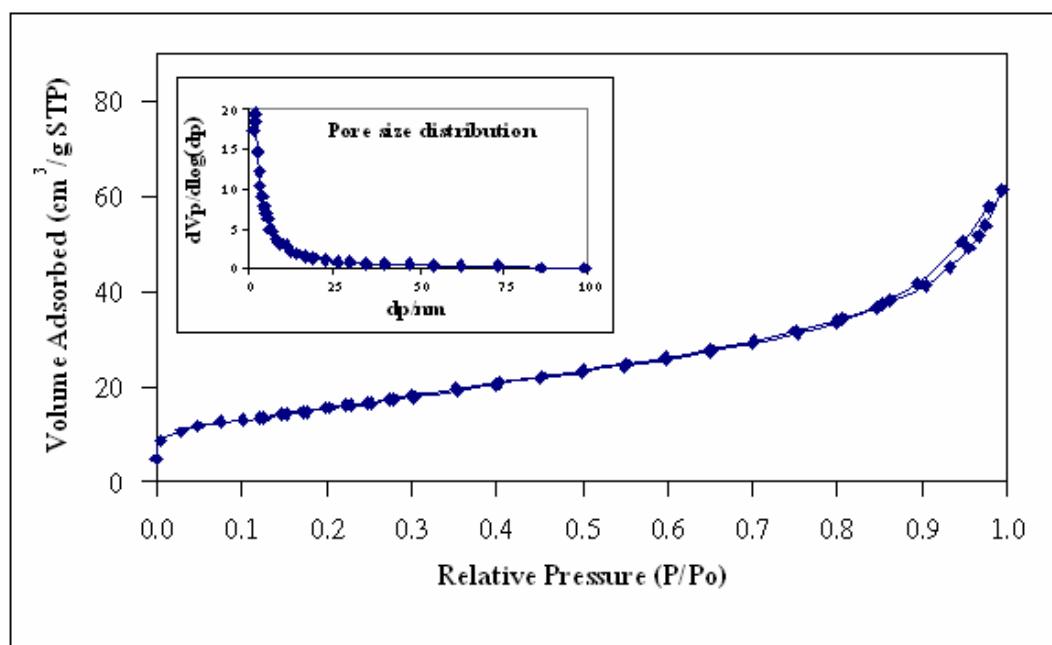
ภาพที่ 25 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของ 80 เปอร์เซ็นต์กอปเปอร์ออกไซด์กับ 20 เปอร์เซ็นต์ซิงค์กอปไชด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (SG 80%Cu : 20%Zn)



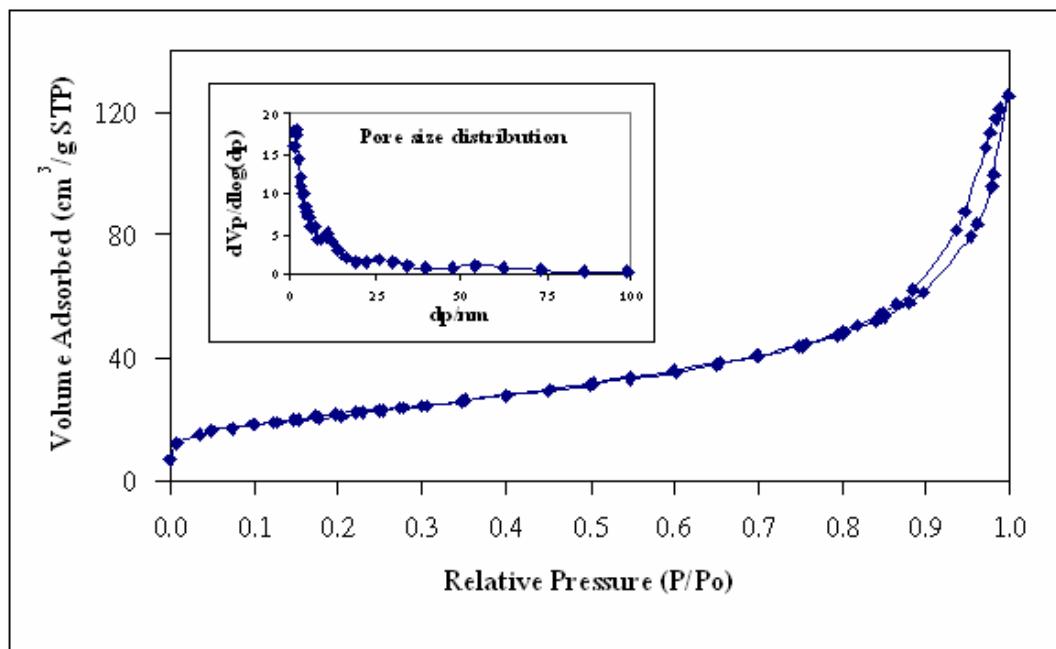
ภาพที่ 26 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของซิงค์กอปไชด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (SG ZnO)



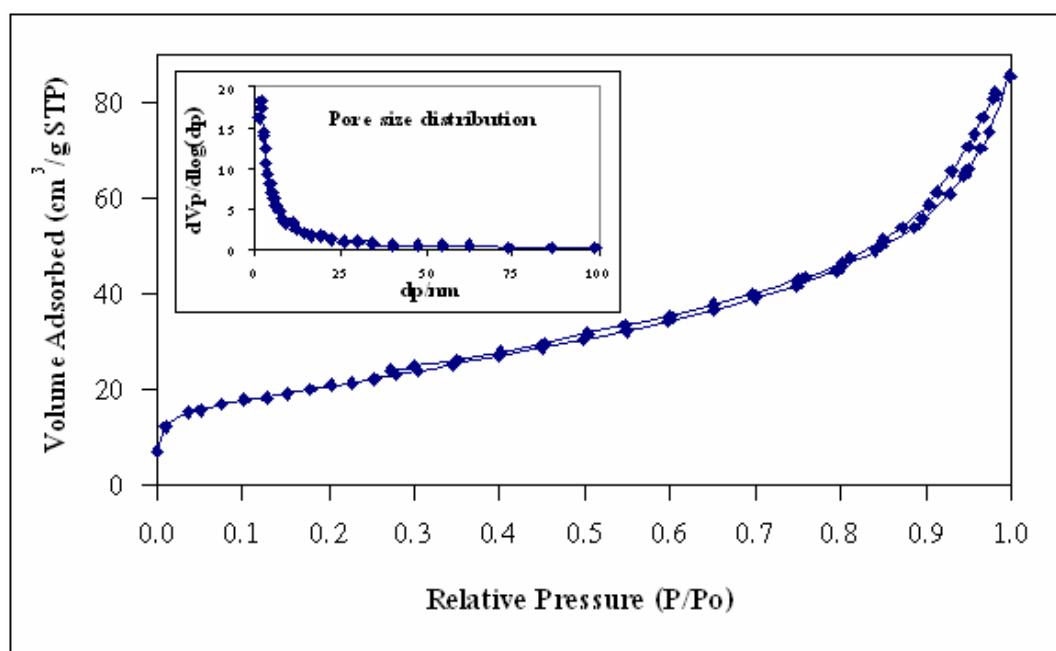
ภาพที่ 27 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ Isothermการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 5 เปอร์เซ็นต์โดยไนโตรเจน (FSP 5% SiO_2 - modified CuO)



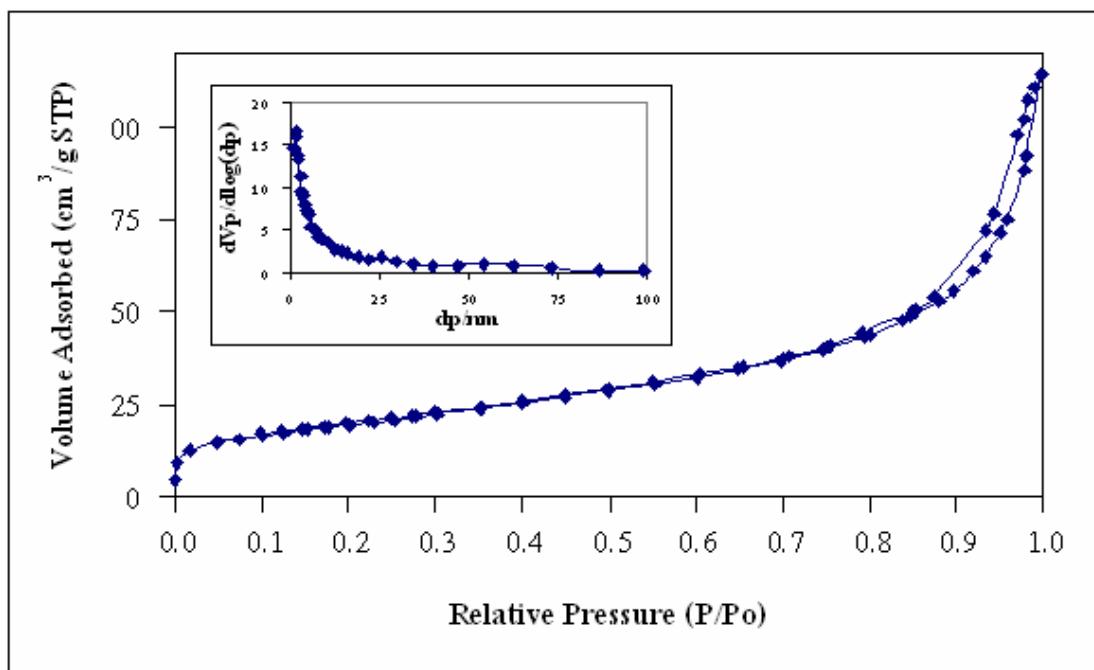
ภาพที่ 28 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ Isothermการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไนโตรเจน (FSP 10% SiO_2 - modified CuO)



ภาพที่ 29 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการคัดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 15 เปอร์เซ็นต์โดยไมล (FSP 15% SiO_2 - modified CuO)



ภาพที่ 30 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และ ไอโซเทอมการคัดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 20 เปอร์เซ็นต์โดยไมล (FSP 20% SiO_2 - modified CuO)



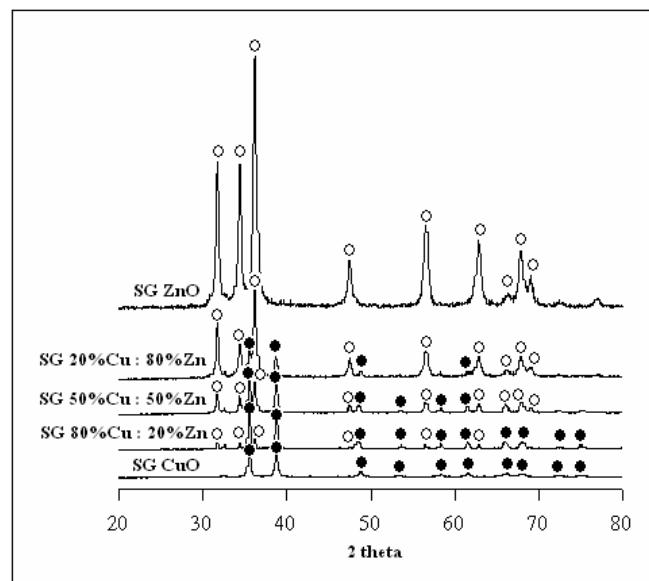
ภาพที่ 31 การกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และไอโซเทอมการดูดซับของไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherms) ของคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมชิลิกา 25 เปอร์เซ็นต์ (FSP 25% SiO₂- modified CuO)

จากรูปที่ 17-31 นั้นสามารถทำนายว่าตัวดูดซับทั้งสิบห้าชนิดเป็นไอโซเทอมแบบ A มีรูพรุนเป็นรูปทรงกระบอกที่มีปลายเปิดทั้ง 2 ข้าง

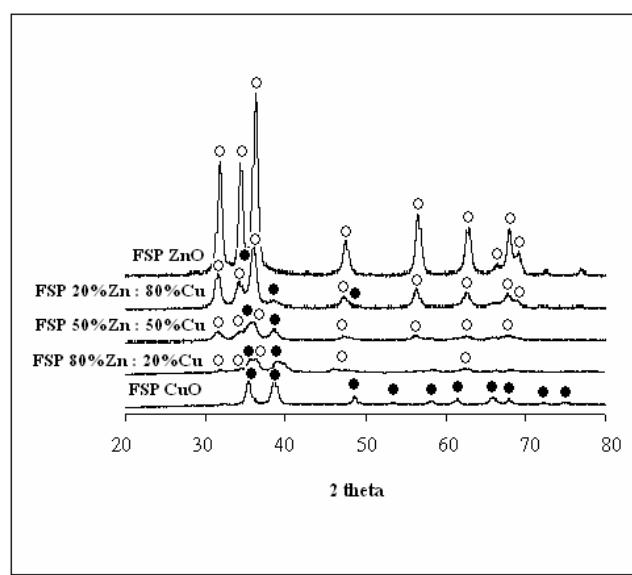
1.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ที่วัดได้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณ (intensity) และส่องเท่าของมุมต่ำกระบอก (2Theta) ทั้งสองตัวแปรนี้จะได้รับผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ โดยจำนวนของพิกซ์لن้ำหนึ่งกับลักษณะโครงสร้างและตำแหน่งของอะตอมต่างๆ ในขณะที่ตำแหน่งของพิกซ์لن้ำหนึ่งกับระบบห่างระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) โดยแสดงระนาบแลตทิซ (Lattice plane) ที่สัมพันธ์กับส่องเท่าของมุมต่ำกระบอก (2Theta)

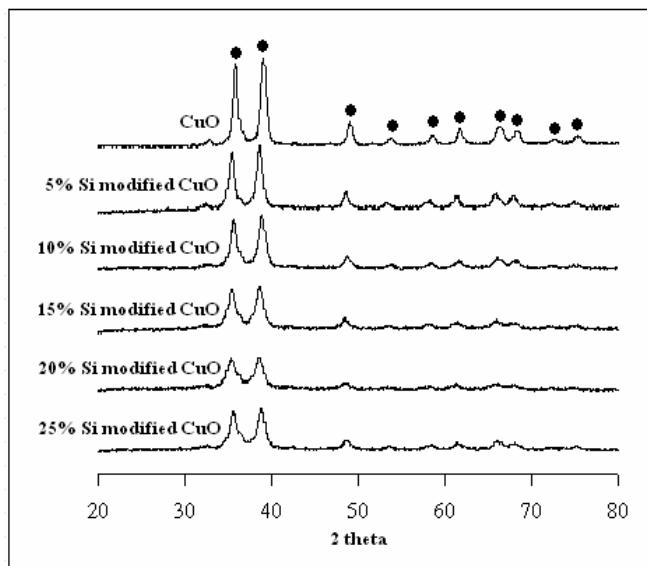
โดยพิจารณาได้จากมาตรฐานที่ตีพิมพ์โดย The Joint Committee on Powder Diffraction Standards (ASTM, JCPDS) โดยมีพิกซ์ลของการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารต่างๆ อよุ่มากกว่า 60,000 ชนิด ภาพที่ 32-34 แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของคوبเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และคوبเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ และวิธีโซล-เจล และคوبเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชิลิกาที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ตามลำดับ



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณ (Intensity) และส่องเท้าของนูนตก
กระทน (2Theta) ของคopolyเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และคopolyเปอร์ออกไซด์ที่ผสม
กับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล



ภาพที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณ (Intensity) และส่องเท้าของนูนตก
กระทน (2Theta) ของคopolyเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และคopolyเปอร์ออกไซด์ที่ผสม
กับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์



ภาพที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณ (Intensity) และสองเท่าของมุมตกกระทบ (2 Theta) ของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกาปริมาณที่ปริมาณต่าง ๆ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

จากรูปที่ 32-34 คอปเปอร์ออกไซด์จะแสดงพีกเด่นชัด ที่ค่าสองเท่าของมุมตกกระทบ 35.495, 39.133 และซิงค์ออกไซด์จะแสดงพีกเด่นชัด ที่ค่าสองเท่าของมุมตกกระทบ 31.769, 34.421, 36.252, 56.602

การวิเคราะห์การการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บังใช้ประมาณค่าขนาดอนุภาคและเป็นวิธีหนึ่งในวิธีที่นิยมกันมากในการหาขนาดของอนุภาคที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเดียว ค่าที่ได้มีความแม่นยำสูงและสามารถทำซ้ำได้ง่าย โดยทำการวัดค่าความกว้างของพีกซึ่งที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงของนั้น และนำมาแทนค่าในสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer) โดยแสดงในตารางที่ 3

$$D = \frac{K\lambda}{B \cos \theta} \quad (4.2)$$

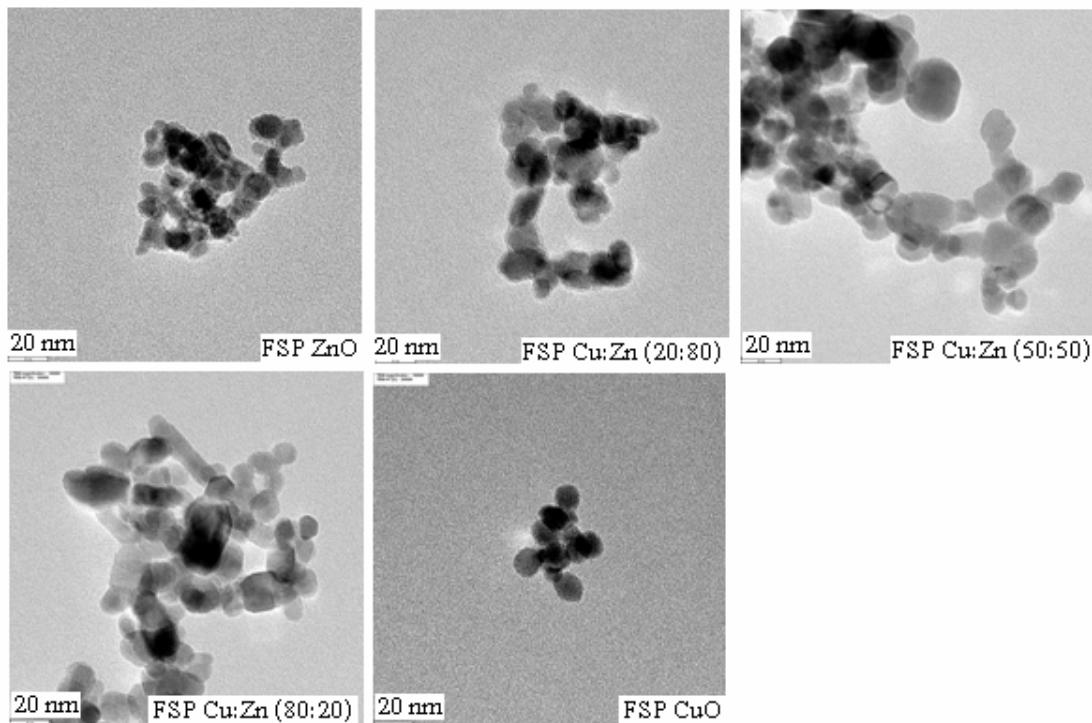
ตารางที่ 3 แสดง ขนาดผลึก (Crystallite size) จากการประมาณค่าขนาดอนุภาคจากผลการเลี้ยงบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้สมการของเซอร์เรอร์

ตัวคูดซับ (d_{XRD} (nm))	ขนาดอนุภาค (d_{XRD} (nm))	ตัวคูดซับ	ขนาด อนุภาค (d_{XRD} (nm))
SG Zn	20	FSP 80% Cu : 20% Zn	15.7
SG 20% Cu : 80% Zn	23.5	FSP Cu	18.2
SG 50% Cu : 50% Zn	27.9	FSP 5% SiO ₂ - modified CuO	16.4
SG 80% Cu : 80% Zn	30	FSP 10% SiO ₂ - modified CuO	14.3
SG CuO	32.8	FSP 15% SiO ₂ - modified CuO	13.9
FSP Zn	9.9	FSP 20% SiO ₂ - modified CuO	9.3
FSP 20% Cu : 80% Zn	11.9	FSP 25% SiO ₂ - modified CuO	10.7
FSP 50% Cu : 50% Zn	13.3		

จากตารางที่ 3 ผลขนาดผลึกจากการประมาณค่า ขนาดอนุภาคจากผลการเลี้ยงบนของรังสีเอ็กซ์โดยใช้สมการของเซอร์เรอร์ พนว่าขนาดผลึกซึ่งคือกําไรค์จะมีขนาดที่เล็กกว่าคือปไปร์ออกไชค์ เมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกของตัวคูดซับที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล กับวิธีเฟรมสเปรย์ พนว่าวิธีเฟรมสเปรย์จะทำให้ตัวคูดซับที่ได้มีขนาดผลึกที่เล็กกว่าตัวคูดซับที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล และขนาดผลึกของคือปไปร์ออกไชค์ที่พัฒนาด้วยซิลิกาพบว่าเมื่อมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาคของตัวคูดซับเล็กลงด้วย

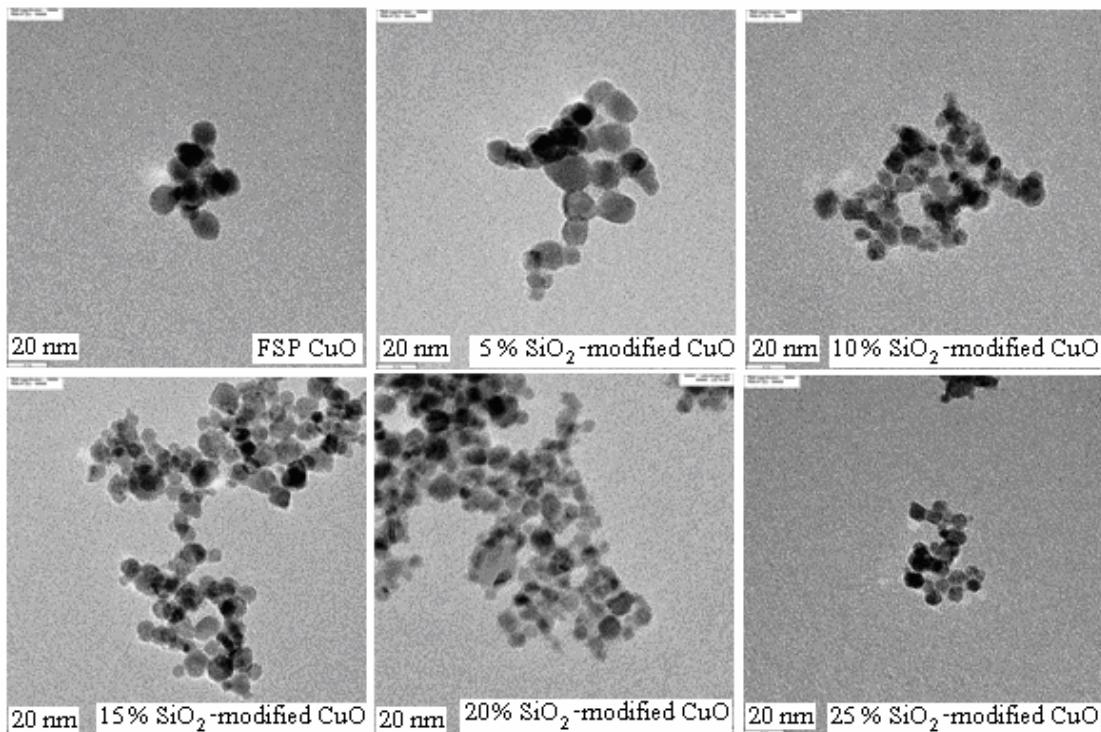
1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

รูปที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านใช้ในการหารูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงตัวของอนุภาคตัวคูดซับที่มีขนาดเล็กในระดับอะตอม โดยรูปของตัวคูดซับที่ถ่ายได้แสดงดังภาพที่ 35-36



ภาพที่ 35 รูปที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของตัวคุณซับคอปเปอร์ออกไซด์ ชิงค์ออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับชิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

จากภาพ 35 เป็นคอปเปอร์ออกไซด์ ชิงค์ออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับชิงค์ออกไซด์ เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ จะเห็นได้ว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลมและทรงรี โดยชิงค์ออกไซด์จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าคอปเปอร์ออกไซด์และหลังจากการเติมคอปเปอร์ลงในชิงค์พบว่า อนุภาคของตัวคุณซับมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 11 – 17 นาโนเมตร แสดงในตารางที่ 4



ภาพที่ 36 รูปที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของตัวคุณซับคอปเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชลิกาที่ปริมาณชลิกาต่าง ๆ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

จากรูป 36 เป็นตัวคุณซับคอปเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชลิกาที่ปริมาณชลิกาต่างๆ จะเห็นได้ว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม โดยคอปเปอร์ออกไซด์จะมีขนาดอนุภาคเล็กลงจาก 17 – 12 นาโนเมตร เมื่อทำการเติมชลิกาจาก 5 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยไมล แสดงในตารางที่ 4

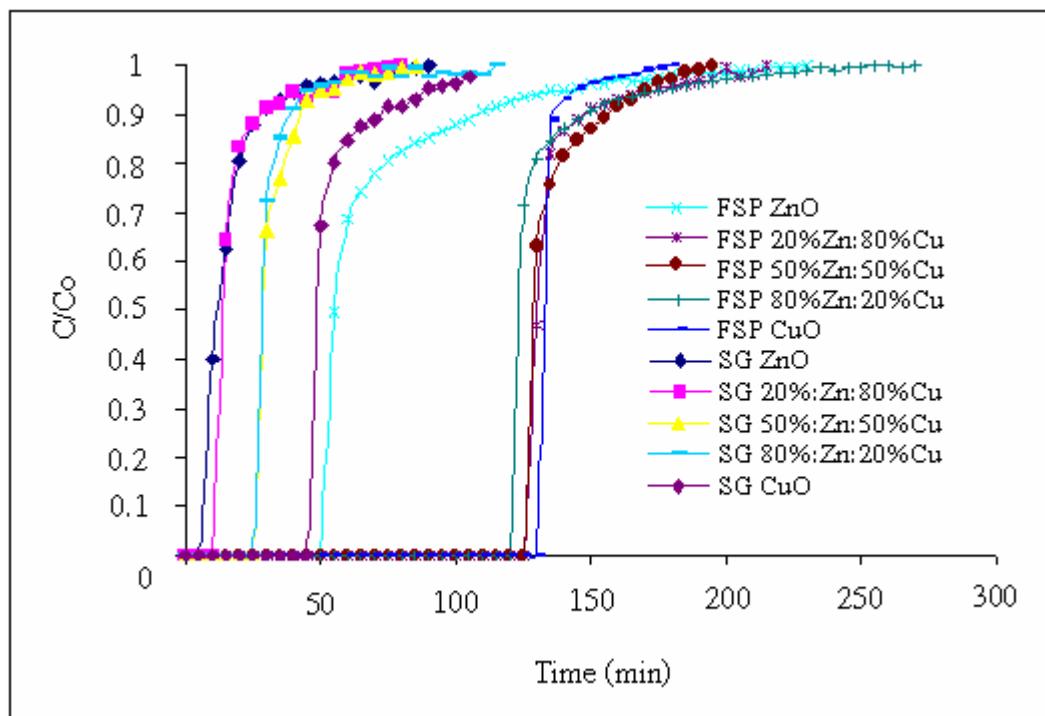
ตารางที่ 4 แสดงขนาดอนุภาค (Particle size) จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ตัวคุณซับ	ขนาดอนุภาค (d_{TEM} (nm))	ตัวคุณซับ	ขนาดอนุภาค (d_{TEM} (nm))
FSP Zn	12.6	FSP 5% SiO_2 -modified CuO	14.2
FSP Cu-Zn(20 : 80)	14.3	FSP 10% SiO_2 -modified CuO	12.1
FSP Cu-Zn(50 : 50)	14.4	FSP 15% SiO_2 -modified CuO	10.5
SG Cu-Zn(80 : 20)	16.4	FSP 20% SiO_2 -modified CuO	10.3
FSP Cu	16.7	FSP 25% SiO_2 -modified CuO	11.2

2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์

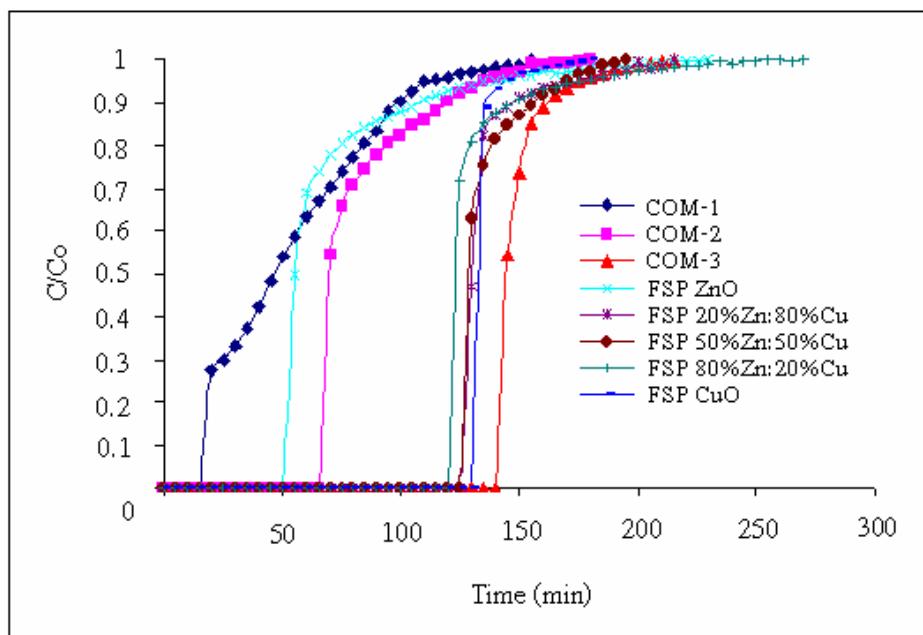
2.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็มของตัวคูดซับจะพิจารณาจากกราฟเบรคทู (Breakthrough curve) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกเวลาที่ใช้ในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ จนไม่สามารถดูดซับได้อีก จากราคาที่ 37 เป็นการแสดงประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ ของตัวคูดซับก็จะเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และก็ออกเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ และวิธีโซลเจล และราบที่ 38 เป็นการแสดงประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็มที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ ของตัวคูดซับก็จะเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกาที่ปริมาณซิลิกาต่าง ๆ กับตัวคูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) (COM-1, COM-2, COM-3) ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์



ภาพที่ 37 ผลการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ของตัวคูดซับ ก็จะเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และก็ออกเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่ เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ และวิธีโซล-เจล ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ

จากภาพที่ 37 พบว่าตัวคูดซับชนิดเดียวกันที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ จะมีปริมาณการคูดซับก้าชไฮโตรเจนซัลไฟด์สังเคราะห์ที่มากกว่าตัวคูดซับที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล เนื่องจากการเตรียมตัวคูดซับด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ จะให้ปริมาตรรูพรุนรวมมากกว่า และขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าวิธีโซล-เจล ส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวคูดซับที่เตรียมด้วยเฟรมสเปรย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้จุดว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การคูดซับก้าชไฮโตรเจนซัลไฟด์ดีกว่าวิธีโซล-เจล เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของคงอปเปอร์ออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ในตัวคูดซับ พบว่าตัวคูดซับซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติทางกายภาพดีกว่าตัวคูดซับคงอปเปอร์ออกไซด์ แต่ผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ ประสิทธิภาพคูดซับก้าชไฮโตรเจนซัลไฟด์สังเคราะห์น้อยกว่า เนื่องจากซิงค์ออกไซด์สามารถคูดซับก้าชไฮโตรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่อุณหภูมิ 500–700 องศาเซลเซียส (Flytzani et al. 1985) แต่คงอปเปอร์ออกไซด์สามารถคูดซับก้าชไฮโตรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (Laperdrix et al. 2000 : 63-69) จากนั้นนำตัวคูดซับที่มีผลการคูดซับก้าชไฮโตรเจนซัลไฟด์ที่ดีที่สุด ไปเปรียบเทียบกับตัวคูดซับจากทางบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) (COM-1, COM-2, COM-3) ได้ผลการศึกษาแสดงดัง ภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ผลการคูดซับก้าชไฮโตรเจนซัลไฟด์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็มของตัวคูดคงอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ คงอปเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ กับตัวคูดซับของบริษัทปตท. จำกัด (มหาชน) (COM-1, COM-2, COM-3)

จากภาพที่ 38 ผลการทดลองพบว่าตัวคุณภาพที่ดีที่สุดที่เตรียมได้คือ คอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP CuO) เมื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวคุณภาพของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) พบว่าตัวคุณภาพของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์สามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ได้ดีกว่าตัวคุณภาพทางการค้า COM-1, COM-2 และยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าชนิด COM-3 และเมื่อทำการคำนวณปริมาณการดูดซับจะได้ผลดังตารางที่ 5

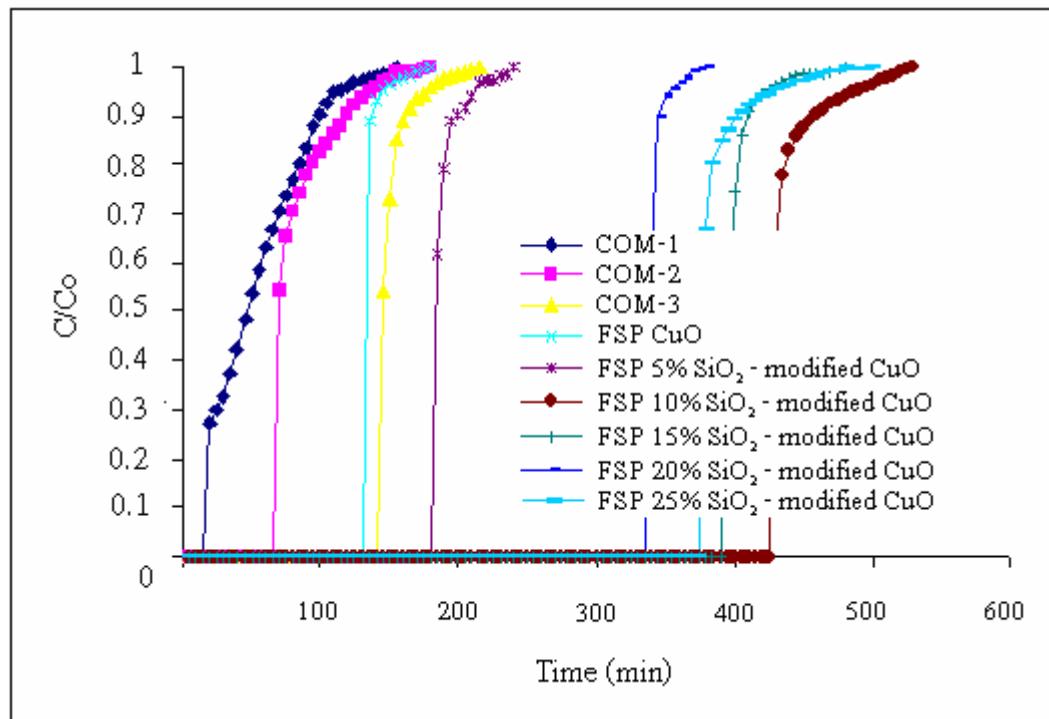
ตารางที่ 5 แสดงผลของปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พี-พีเอ็ม ของตัวคุณภาพของคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรม เปรียบเทียบกับตัวคุณภาพของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

ตัวคุณภาพ	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)	ปริมาณการดูดซับชัลไฟฟ์ (g S/100g adsorbent)
FSP CuO	135	10.56
FSP CuO-ZnO(80:20)	125	10.24
FSP CuO-ZnO(50:50)	125	10.21
FSP CuO-ZnO(20:80)	120	9.89
FSP ZnO	35	2.72
SG CuO	45	3.97
SG CuO-ZnO(80:20)	25	2.30
SG CuO-ZnO(50:50)	25	2.24
SG CuO-ZnO(20:80)	10	1.06
SG ZnO	5	1.18
Com-1	15	3.91
Com-2	65	6.08
Com-3	140	11.33

จากตารางที่ 5 ผลการศึกษาตัวคุณภาพที่ดีที่สุดที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล คือ ตัวคุณภาพของคอปเปอร์ออกไซด์ (SG CuO) มีค่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์เท่ากับ 3.97 กรัมชัลไฟฟ์ต่อ 100 กรัมตัวคุณภาพ และตัวคุณภาพที่ดีที่สุดที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ คือตัวคุณภาพของคอปเปอร์

ออกไซด์ (FSP CuO) มีค่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้นไฟฟ์สั้งเคราะห์มากถึง 10.56 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวดูดซับ

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้ค้นพบว่าการจะเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับให้ดีขึ้นวิธีที่นิยมใช้กัน คือ การทำให้ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับเล็กลง คือการเติมวัสดุรองรับเพื่อให้ตัวดูดซับกระจายตัวลง ได้ดีขึ้นทำให้ออนุภาคของตัวดูดซับเล็กลง โดยวัสดุรองรับที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ ซิลิกา จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมซิลิกาลงไปในตัวดูดซับcoppeอร์ออกไซด์ มีผลทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับดีขึ้น จากนั้นนำตัวดูดซับcoppeอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกา ที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ ไปทดสอบการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้นไฟฟ์สั้งเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม และเปรียบเทียบกับตัวดูดซับของ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) แสดงผลดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ผลการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้นไฟฟ์สั้งเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็มของตัวดูดซับ coppeอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกา ที่ปริมาณซิลิกาต่าง ๆ กับตัวดูดซับ ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

จากภาพที่ 39 แสดงผลการศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้นไฟฟ์สั้งเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็ม ของตัวดูดซับcoppeอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกา ที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ พบว่าตัวดูดซับcoppeอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยซิลิกา จะมีปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้นไฟฟ์

สังเคราะห์มากกว่าตัวคูดซับทางการค้า โดยตัวคูดซับที่ดีที่สุดคือ คopolymerออกไซด์ที่เติมชิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากชิลิกาทำให้ตัวคูดซับกระจายตัวได้ดีขึ้น ทำให้น้ำภาคของตัวคูดซับเล็กลง เมื่อทำการคุณสมบัติทางกายภาพของตัวคูดซับคopolymerออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชิลิกาที่ปริมาณชิลิกาต่างๆ พบว่าเมื่อเติมชิลิกา 15 เปอร์เซ็นต์ลงในคopolymerออกไซด์ จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของตัวคูดซับดีที่สุด แต่เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่า การเติมชิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงที่สุด เป็นผลมาจากการเติมชิลิกา ทำให้ปริมาณของคopolymerออกไซด์ลดลง ซึ่งคopolymerออกไซด์ทำหน้าที่ในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อคopolymerออกไซด์ลดลง ประสิทธิภาพในการดูดซับก็ลดลงด้วย

ตารางที่ 6 แสดงผลของการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พีพีเอ็มของตัวคูดซับคopolymerออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชิลิกาที่ปริมาณชิลิกาต่างๆ ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์เปรียบเทียบกับตัวคูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

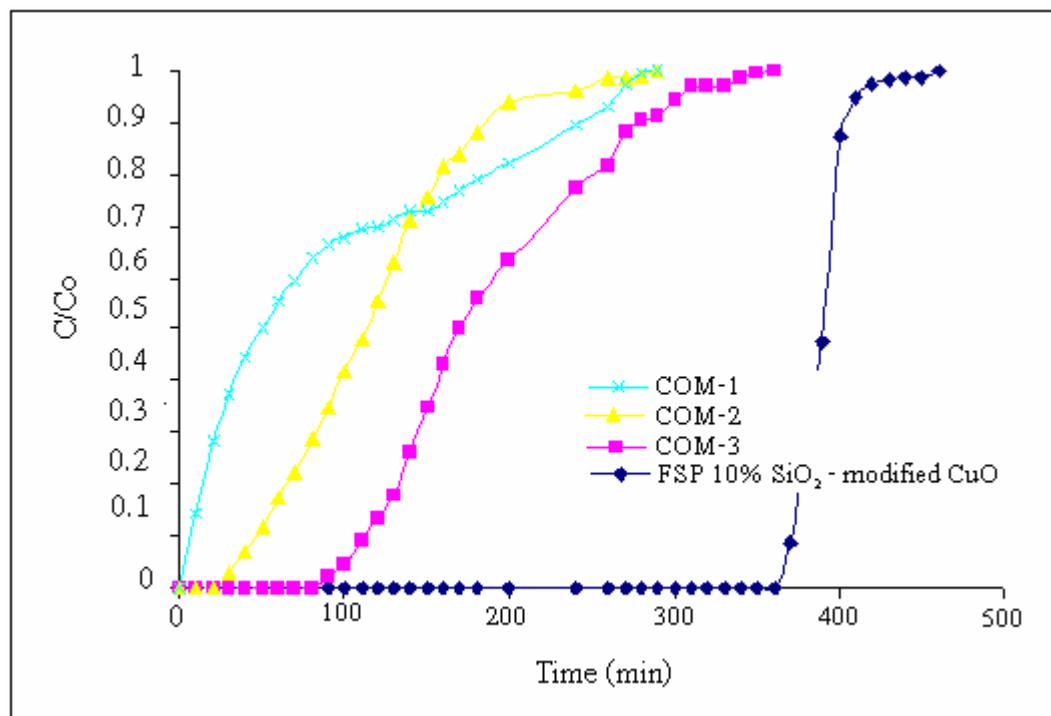
ตัวคูดซับ	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)	ปริมาณการดูดซับซัลไฟด์	
		ต่อตัวคูดซับ	ต่อคopolymer
FSP CuO	135	10.42	10.42
FSP 5%SiO ₂ -modified CuO	190	14.66	15.27
FSP 10%SiO ₂ -modified CuO	430	33.18	35.68
FSP 15%SiO ₂ -modified CuO	395	30.48	34.25
FSP 20%SiO ₂ -modified CuO	380	29.32	34.50
FSP 25%SiO ₂ -modified CuO	335	25.85	31.92
Com-1	15	3.91	-
Com-2	65	6.08	-
Com-3	140	11.33	-

จากตารางที่ 6 แสดงค่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวคูดซับคopolymerออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชิลิกา พบว่าตัวคูดซับที่ดีที่สุดคือ คopolymerออกไซด์ที่เติมชิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สังเคราะห์เท่ากับ 33.18 กรัมซัลไฟด์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ด้วยความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ

2.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ด้วยความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติดินิดอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ที่ผ่านมาเราจะพบว่า คopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกาปริมาณ 10 เบอร์เซ็นต์โดยไมอลเป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด เราจะนำตัวดูดซับชนิดนี้ไปทดสอบดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ด้วยความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ผลการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ด้วยความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติของตัวดูดซับคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เบอร์เซ็นต์โดยไมอล กับตัวดูดซับ ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ

จากภาพที่ 40 แสดงผลการศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ด้วยความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ ของตัวดูดซับคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เบอร์เซ็นต์โดยไมอล กับตัวดูดซับ ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) พบตัวดูดซับคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เบอร์เซ็นต์โดยไมอล จะมีปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ในก๊าซธรรมชาติที่มากกว่าตัวดูดซับทาง

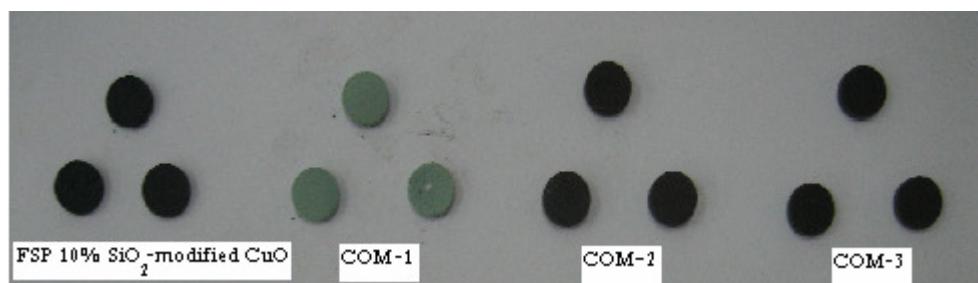
การค้าตัวดูดซับ COM-1, COM-2 และ COM-3 โดยตัวดูดซับก่อเปื้อร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไมล จะมีค่าการดูดซับก้าชไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก้าชธรรมชาติเท่ากับ 1.79 กรัมซัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวดูดซับ ส่วนตัวดูดซับทางการค้า COM-1, COM-2 และ COM-3 จะมีค่าการดูดซับก้าชไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก้าชธรรมชาติเท่ากับ 0.17, 0.45 และ 0.74 กรัมซัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวดูดซับตามลำดับแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลของปริมาณการดูดซับก้าชไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติของตัวดูดซับก่อเปื้อร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไมลกับตัวดูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

ตัวดูดซับ	ปริมาณการดูดซับซัลเฟอร์ (g S/100 g Adsorbent)
FSP 10%SiO ₂ -modified CuO	1.79
COM-1	0.17
COM-2	0.45
COM-3	0.74

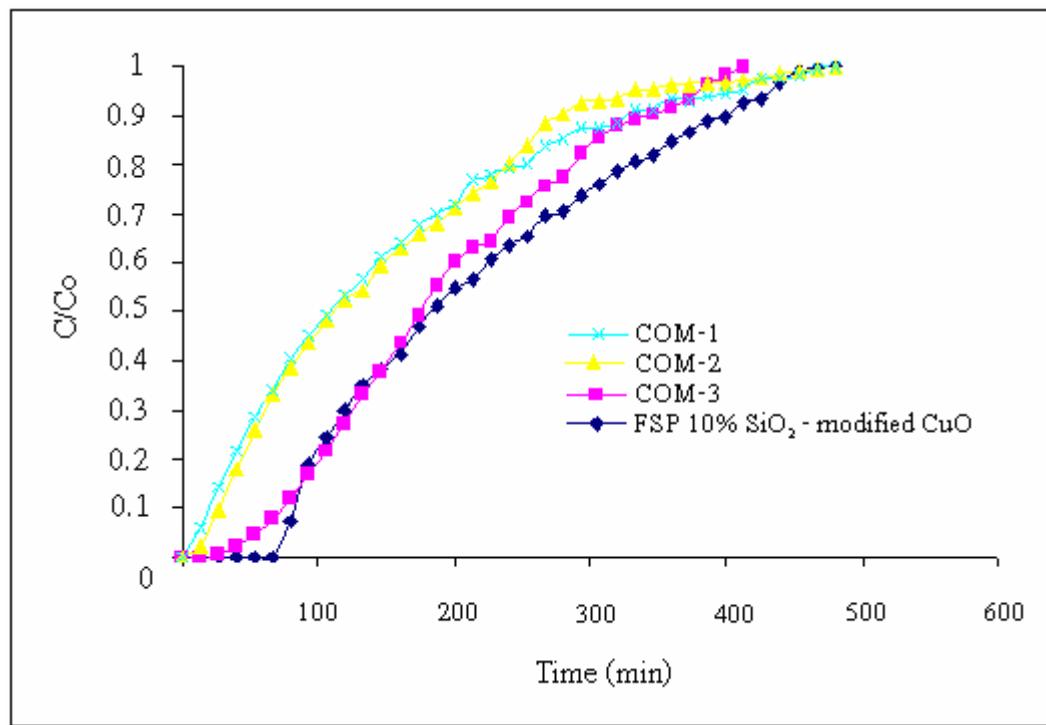
2.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับก้าชไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติชนิดเม็ด

จากนั้นนำตัวดูดซับก่อเปื้อร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไมล กับตัวดูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ขึ้นรูปเป็นทรงกลม และทดสอบการดูดซับก้าชไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก้าชธรรมชาติ โดยตัวดูดซับที่นำไปขึ้นรูปจะแสดงดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ตัวดูดซับก่อเปื้อร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไมล กับตัวดูดซับ ของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่นำไปขึ้นรูป

นำตัวคูดซับที่ขึ้นรูปได้ไปทดสอบการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้ลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติและเปรียบเทียบกับตัวคูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) แสดงผลดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ผลการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้ลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติของตัวคูดซับคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไมล กับตัวคูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่นำไปขึ้นรูป ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ

จากภาพที่ 42 แสดงผลการศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้ลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ ของตัวคูดซับคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไมล กับตัวคูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่นำไปขึ้นรูปพบว่าคopolyperoxyออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยไมล จะมีค่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้ลไฟฟ์ในก๊าซธรรมชาติเท่ากับ 0.33 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ ส่วนตัวคูดซับทางการ COM-1 COM-2 และ COM-3 จะมีค่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้ลไฟฟ์ในก๊าซธรรมชาติเท่ากับ 0.21, 0.21 และ 0.27 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงผลของปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชั้ลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็ม ในก๊าซธรรมชาติ ของตัวดูดซับคopolyperoxyde ที่เติมชิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์โดยโอม กับตัวดูดซับของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) ที่นำไปจัดรูป ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยายกาศ

ตัวดูดซับ	ปริมาณการดูดซับชัลเฟอร์ (g S/100 g Adsorbent)
FSP 10%SiO ₂ -modified CuO	0.33
COM-1	0.21
COM-2	0.21
COM-3	0.27

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและค้นคว้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาตัวคูดซับเพื่อกำจัดก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ออกจากกระบวนการผลิตก้าชธรรมชาติโดยตัวคูดซับที่ทำการศึกษานี้คือ คوبเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และ คوبเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ (FSP) และวิธีโซล-เจล (SG) และคوبเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชิลิกาที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1 ตัวคูดซับคوبเปอร์ออกไซด์จะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ สังเคราะห์มากกว่าตัวคูดซับซิงค์ออกไซด์ และคوبเปอร์ออกไซด์ที่ผสมกับซิงค์ออกไซด์

2 ตัวคูดซับที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ จะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์มากกว่าคูดซับที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล

3 ตัวคูดซับที่ดีที่สุดที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์ และวิธีโซล-เจล คือ คوبเปอร์ออกไซด์ โดยจะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ 10.56 และ 3.97 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ

4 ตัวคูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) COM-1, COM-2 และ COM-3 จะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์ คือ 3.91, 6.08 และ 11.33 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ ซึ่งคوبเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์จะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์มากกว่า COM-1 และ COM-2 แต่จะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์น้อยกว่า COM-3

5 ตัวคูดซับคوبเปอร์ออกไซด์ที่พัฒนาด้วยชิลิกาที่ปริมาณชิลิกาต่างๆ จะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ที่มากกว่าตัวคูดซับทางการค้า COM-1, COM-2 และ COM-3 โดยตัวคูดซับที่ดีที่สุดคือ คوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมชิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์สังเคราะห์เท่ากับ 33.18 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูด

6 นำตัวคูดซับคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมชิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์, COM-1, COM-2 และ COM-3 ไปทดสอบการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ในก้าชธรรมชาติ พบร่วมกับคوبเปอร์ออกไซด์ที่เติมชิลิกา 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าปริมาณการคูดซับก้าชไฮโครเจนชัลไฟฟ์ดีที่สุด คือ 1.79 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวคูดซับ และตัวคูดซับของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) จะมีค่า

ปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟค์ในก๊าซธรรมชาติ 0.17, 0.45 และ 0.74 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

7 นำตัวดูดซับคอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เบอร์เซ็นต์, COM-1, COM-2 และ COM-3 ไปขึ้นรูปเป็นทรงกลมแล้วนำไปทดสอบการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟค์ในก๊าซธรรมชาติ พนวยกอปเปอร์ออกไซด์ที่เติมซิลิกา 10 เบอร์เซ็นต์ จะมีค่าปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟค์ดีที่สุด คือ 0.33 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวดูดซับ และตัวดูดซับของบริษัทปตท. จำกัด (มหาชน) จะมีค่าปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟค์ในก๊าซธรรมชาติ 0.21, 0.21 และ 0.27 กรัมชัลเฟอร์ต่อ 100 กรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

จรัล โภภะประดิษฐ์. “การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากการไอโอดีนบนด้วยถ่านกัมมันต์จากกลาปัลเม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชานนาที,
(2548) : 31.

ปรีชา โกลวิศิษฐ์, วิวัฒน์ จันทร์แดง และ สุชิรา พาลีก. “การหาสภาวะที่เหมาะสมในการคุณภาพลีน
แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชานนาที,
(2541) : 34.

ปิยพร สาระบูรณ์, ภาณุวัฒน์ จันทร์ติบ และกิตติ ธรรมโภศล. การคุณภาพลีนทรีเยร์ระเหย่ง่ายที่
ปนเปื้อนอยู่ในน้ำโดยโพลี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชานนาที,
(2002) : 53.

ภาวิณี สินทรโภ, ผู้บรรยาย. “ H_2S Removal by using Copper containing Zeolite.” นครปฐม :
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี
มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2008.

ยุวรัตน์ ปรัมลิกานากร. “การพัฒนาวัสดุคุณภาพลีนเปลี่ยนไปเพื่อกำจัดแคนเดเมี่ยม.” วิทยานิพนธ์
ปริญญาศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ, คณะ
ทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชานนาที,
(2544) : 16.

พรพจน์ บุญพิทักษ์. “คุณลักษณะและสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของโคบอลท์บนตัวรองรับเซอน์
โโคเนีย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมี,
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, (2552) :
19.

วิวรรณ ขจรเกียรติกุล. “การใช้ถังกรองคุณภาพลีนในการบำบัดเสียงงานฟอกย้อมสีงทอง
ในการบำบัดขั้นสุดท้าย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา
เทคโนโลยีสีงทอง, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชานนาที
(2539) : 31-37.

ភាសាតាំងប្រចេក

- Anderson, J.R., and Pratt, K.C., “Introduction to Characterization and Testing of Catalysts”, Academic Press, New York (1985).
- Ayala, R. E., Venkataramani, V. S., Abbasian, J. and Hill, A. H. “Advanced Low-Temperature Sorbent.” Review Meeting, 195 (1995) : 407.
- Ertl, G., Knozinger, H., and Weitkamp, J. (Eds). “Handbook of Heterogeneous Catalysis.” Wiley-VCH, Weinheim, 1(1997) : 376-369.
- Flytzani SM, Gavalas GR, Tamhankar SS, and Sharma PK, Novel sorbents for high-temperature regenerative H₂S removal. Final Report DOE/MC/20417-1898, (1985).
- Fan H., Li Y., Li C., Guo H, and Xie K. “The apparent kinetics of H₂S removal by zinc oxide in the presence of hydrogen.” Fuel, 81 (2002) : 91 – 96.
- Gonzalez R. D., Lopez T., and Gomez R. “Sol-gel preparation of supportd metal catalysts.” Catal. Today, 35(1907) : 293-317.
- Guo J., and Lua AC. “Adsorption of sulphur dioxide onto activeted carbon prepared from oil-palm shells with and without pre-impregnation.” Sep. and Puri. Tech, 30 (2003) : 265-273.
- Halbedel, B. “Ferrimagnetic ceramic adsorbents for clean up of H₂S from exhaust gases.” China Particuology, 5 (2007) : 156–161.
- Hardy B., Walther K. L., Wokaun A., and Baiker A. “Preparation of catalysts.” Amsterdam: Elsvier Science, (1991) : 125.
- Hyun T. J., Sang B. K., and Dong S D. “The Removal of Hydrogen Sulfide with Manganic Sorbent in a High-Temperature Fluidized-Bed Reactor.” Korean J. Chem. Eng, 20 (2003) : 116-120.
- Jae B. C., and Jong, S. C. “Desulfurization of H₂S using cobalt-containing sorbents at low temperatures.” Chemical Engineering Science, 60 (2005) : 1515-1523.
- Jinchang Z., Yanhui W., and Diyong W. “A study on regeneration of Mn–Fe–Zn–O supportedupon γ -Al₂O₃ sorbents for hot gas desulfurization.” Fuel Processing Technology, 84 (2003) : 217– 227.

- Jinchang Z., Yanhui W., and Diyong W. "Effect investigation of ZnO additive on Mn-Fe/ γ -Al₂O₃ sorbents for hot gas desulfurization." Energy Conversion and Management, 44 (2003) : 357-367.
- Jun Bao, Zhenlin Liu , Yi Zhang, and Noritatsu Tsubaki. "Preparation of mesoporous Cu/ZnO catalyst and its application in low-temperature methanol synthesis." Catal. Commun., 1 (2007) : 1.
- Kodas, T. T., and Hampden-Smith, M. J.. "Aerosol Processing of Materials." Wiley-VCH, Weinheim, 1 (1999) : 476-480.
- Kong X., Li Y. "High sensitivity of CuO modified SnO₂ nanoribbons to H₂S at room temperature." Sensors and Actuators, 105 (2005) :449–453.
- Kwang B. L., Yi K S, and Young –W. R. "Reactivity of Copper-Based Sorbents in Coal Gas Desulfurization." Chemical Industry and Technology, 16 (1998) : 17
- Laperdrix, E., Costentin, G., Saur, O., Lavalle, J. C., N'edez,y, C., Savin-Poncet,z S. and Nougayr`edez J. "Selective Oxidation of H₂S over CuO/Al₂O₃; Identification and Role of the Sulfurated Species formed on the Catalyst during the Reaction." Journal of Catalysis, 189 (2000) : 63–69.
- Li L., and David L. King. "H₂S removal with ZnO during fuel processing for PEM fuel cell applications." Cat Today, 116 (2006) : 537–541.
- Madler, L. "Liquid-fed aerosol reactors for one-step synthesis of nano-structured particles." KONA , 22(2004) : 107–120.
- Martin K., McCarthy G., North Dakota State Univ., Fargo, ND, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1991) : 398.
- McMurdie H. "Power Diffraction." 1 (1986) : 76.
- Melo D.M.A., Melo M. A. F., Martinelli A. E., Cachima G. H. B., and Cunha J. D. "Evaluation of the zinox and zeolite materials as adsorbents to remove H₂S from natural gas." Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 272 (2006) : 32–36.
- Nakazato T., Kusumoto M., Nakagawa N., and Kato K. "H₂S Removal by Fine Limestone Particles in a Powder-Particle Fluidized Bed." Ind. Eng. Chem. Res, 42(2003) : 3413-3419.

- Nguyen-Thanh D., and Bandosz T.J. "Activated carbons with metal containing bentonite binders as adsorbent of hydrogen sulfide," Carbon, 43 (2005) : 359-367.
- Ozdemir, S., and Bardakci T. "Hydrogen sulfide removal from coal gas Zinc titanate sorbent." Sep.and Puri, 16 (1999) : 225-234.
- Sakanishi K., Zhiheng Wu, Akimitsu Matsumura, Ikuo Saito, Toshiaki Hanaoka, Tomoaki Minowa, Mitsuhiro Tada, and toshihiko Iwasaki. "Simultaneous removal of H₂S and COS using activated carbons and their supported catalysts." Catal. Today, 104 (2005) : 94-100.
- Samuel, D.F., and Osman M.A. "Adsorption Processes for Water Treatment." Butterworths Publishers, 1 (1987) : 14-20.
- Strobel, R., Baiker, A., and Pratsinis, S. E. "Aerosol flame synthesis of catalysts." Advanced Powder Technol, 17 (2006) : 457-480.
- Westmoreland, P. W., and Harrison DP. "Evaluation of Candidate Solid for Hight Temperature Desulfurization of Low-Btu Gases." Env. Sci. Tech, 10 (1976) : 659.
- Zhang H., Zhang M. "Synthesis of CuO nanocrystalline and their application as electrode materials for capacitors." Mat. Chem. and Phys, 108 (2002) : 184-187.

ภาคพนวก

ภาคผนวก ก

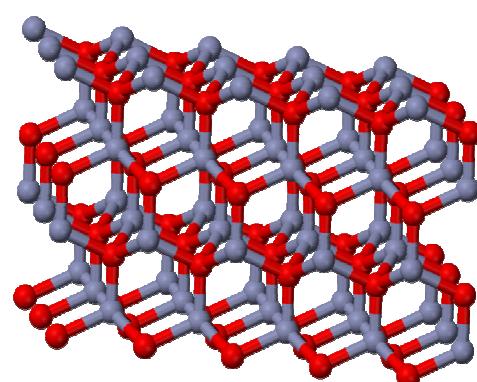
ภาคผนวก ก
คุณสมบัติของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

Hydrogen sulfide [12]	
formula	H ₂ S
IUPAC name	Hydrogen sulfide, sulfane
Other names	Sulfuretted hydrogen; sulfane; sulfur hydride; sour gas; sulfurated hydrogen; hydrosulfuric acid; sewer gas; stink damp
Identifiers	
CAS number	[7783-06-4]
RTECS number	MX1225000
Properties	
Molecular formula	H ₂ S
Molar mass	34.082 g/mol
Appearance	Colorless gas
Density	1.363 g/L, gas
Melting point	-82.30°C (190.85 K)
Boiling point	-60.28°C (212.87 K)
Solubility in water	0.25 g/100 ml (40°C)
Acidity (pK _a)	6.89 19±2 (<i>See Text</i>)

Structure	
Molecular shape	Bent
Dipole moment	0.97 D
Hazards	
EU classification	Corrosive(C) Toxic (T) Highly Flammable (F ⁺)
R-phrases	R12, R26, R50
S-phrases	(S1/2), S9, S16, S36, S38, S45, S61
Flash point	-82.4°C
Related compounds	
Related hydrogen compounds	water; hydrogen selenide; hydrogen telluride
Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25°C, 100 kPa)	
Infobox disclaimer and references	

ภาคผนวก ๘

ភាគធនវក្ខ ៦
គុណសមប័តិខំនៃគ្រឿងគ្រប់គ្រង

Zinc Oxide [13]	
	
Other names	Zinc white calamine Zincum oxydatum
Identifiers	
CAS number	[1314-13-2]
Properties	
Molecular formula	ZnO
Molar mass	81.4084 g/mol
Appearance	White solid
Density	5.606 g/cm ³ , solid
Melting point	1975°C (decomposes)
Solubility in water	Insoluble

Thermo chemistry	
Std enthalpy of formation $\Delta_f H^\circ_{298}$	-348.0 kJ/mol
Standard molar entropy S°_{298}	43.9 J.K ⁻¹ .mol ⁻¹
Hazards	
EU classification	Dangerous for the environment (N)
NFPA 704	
R-phrases	R20, R36, R37
S-phrases	S60, S61
Related compounds	
Other anions	Zinc sulfide, Zinc selenide, Zinc telluride
Other cations	Cadmium oxide, Mercury oxide
Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25°C, 100 kPa) Infobox disclaimer and refer	

Copper (II) oxide [15]	
 <p style="text-align: center;">Copper(II) oxide</p>	
IUPAC name	Copper (II) oxide
Other names	cupric oxide
Molecular formula	CuO
Identifiers	
CAS number	[1317-38-0]
Properties	
Molar mass	79.545 g/mol
Density	6.31 g/cm ³
Melting point	1201°C (1474 K)
Solubility in water	Insoluble
Band gap	1.2eV
Structure	
Crystal structure	monoclinic
Lattice constant	a = 4.6837 Å, b = 3.4226 Å, c = 5.1288 Å

Lattice constant	$\alpha = 90^\circ, \beta = 99.54^\circ, \gamma = 90^\circ$
Hazards	
MSDS	ScienceLab.com
NFPA 704	
<p>Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25°C, 100 kPa)</p> <p>Infobox disclaimer and references</p>	

ภาคผนวก ๑

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การวัดค่าขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิคทางกายภาพ

การวัดค่าขนาดอนุภาคโดยใช้วิธีทางกายภาพนั้นมีด้วยกันหลายวิธี โดยสามารถประยุกต์เครื่องมือและสมการต่างๆ มาช่วยในการคำนวณ เช่น การใช้สมการของ Scherrer ในการคำนวณขนาดจากผล X-ray diffraction การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้แสง เลเซอร์และอิเล็กตรอน หรือคำนวณกลับจากค่าพื้นที่ผิวเป็นต้น

1.1 การประมาณค่าขนาดอนุภาคจากการวัดค่าพื้นที่ผิว

จากการวัดค่าพื้นที่ผิวและขนาดของอนุภาคนั้นทำให้สามารถประมาณค่าขนาดอนุภาคได้จากการคำนวณ

$$d_{BET} = \frac{6}{S_{sp}\rho}$$

โดย S_{sp} คือ พื้นที่ผิว
 ρ คือ ความหนาแน่น

ตัวอย่างการคำนวณ ขนาดอนุภาค ของ คอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเพรมส์บาร์

$$S_{sp} = 45 \text{ m}^2/\text{g}$$

$$\rho = 6.31 \times 10^6 \text{ g/m}^3$$

$$d_{BET} = \frac{6}{(45) (6.31 \times 10^6)}$$

$$d_{BET} = 1.98 \times 10^{-8}$$

1.2 การประมาณค่าขนาดอนุภาคจากผล X-ray diffraction โดยใช้สมการของ Scherrer วิธีนี้เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมกันมากในการหาขนาดของอนุภาคที่มีโครงสร้างเป็นผลึก เดียว ค่าที่ได้มีความแม่นยำสูงและสามารถทำได้ง่าย โดยทำการวัดค่าความกว้างของพิกซ์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงของมัน และนำมาแทนค่าในสมการของ Scherrer

$$D = \frac{K\lambda}{B \cos \theta}$$

โดย	K	คือ Crystallite-shape factor มีค่าเท่ากับ 0.9
	λ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ (1.5418 \AA สำหรับ CuK_α)
	B	ความกว้างของพิกซ์ซึ่งคำนวณจากการของ Warren (X-ray diffraction broadening, radian)
	θ	มุมของพิกซ์ที่ใช้คำนวณ

โดยสมการของ Warren นั้นคือ

$$B = \sqrt{B_M^2 - B_S^2}$$

โดย B_M คือ ความกว้างของพิกซ์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง
ของตัวอย่างที่ทำการวัด

B_S คือ ความกว้างของพิกซ์ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง
ของสารที่มีผลึกขนาดใหญ่

ตัวอย่างการคำนวณ ขนาดผลึก(Crystallite size) ของ คอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

$$B_M = 0.011 \text{ radian}$$

$$B_s (\text{value at the } 2\theta \text{ of } 32.5011^\circ) = 0.0041 \text{ radian}$$

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{B_M^2 - B_S^2} \\ &= \sqrt{0.011^2 - 0.0041^2} \\ &= 0.001 \text{ radian} \end{aligned}$$

$$B = 0.01 \text{ radian}$$

$$2\theta = 35.84^\circ$$

$$\theta = 17.92^\circ$$

$$\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$$

$$\begin{aligned} \text{The crystallite size} &= \frac{1.1 \times 1.5418}{0.01 \cos 16.25} \\ &= 182 \text{ \AA} \\ &= 18.2 \text{ nm} \end{aligned}$$

2. การหาปริมาณการดูดซับ

2.1 การหาปริมาณการดูดซับก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พี-พี เอ็ม ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พี-พี-เอ็ม ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พี-พี-เอ็ม ใช้อัตราการไหลของแก๊ส 30 ลูกบาศก์เซนต์อนาที โดยใช้สมการ

ตัวอย่างการคำนวณ ปริมาณการดูดซับของ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟฟ์สังเคราะห์ความเข้มข้น 4000 พี-พี-เอ็ม ด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

แก๊สสังเคราะห์	100 cm ³ จะมี	H ₂ S = 0.4 cm ³
ถ้าแก๊สสังเคราะห์	30 cm ³ จะมี	H ₂ S = 0.4 × (30/100) = 0.12 cm ³
เพรำะจะนั่นอัตราการไหล	30 cm ³ /min จะมี	H ₂ S = 0.12 cm ³ /min
และแก๊ส	22,400 cm ³	มีจำนวน 1 mole

สมการ Ideal gas law

$$P_1 V_1 = n_1 R T_1 \quad \text{ที่สภาพ STP} \quad (1)$$

$$P_2 V_2 = n_2 R T_2 \quad \text{ที่สภาพดูดซับ} \quad (2)$$

สมการ (1) ÷ (2) ได้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1 T_1}{n_2 T_2} \quad (3)$$

แทนค่าในสมการที่ 3

$$V_2 = \frac{0.12 \times 273}{303 \times 22.4 \times 1000} = 4.823 \mu \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

นำ V₂ คูณกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จะได้

$$M_{ads} = 4.823 \times 10^{-6} \frac{mol}{min} \times 425 min$$

$$M_{ads} = 2.09 \times 10^{-3} mol$$

$$M_{ads} = 2.09 \times 10^{-3} mol \times \frac{32gS}{1molH_2S}$$

$$M_{ads} = 66.88 \times 10^{-3} gS$$

ใช้ตัวดูดซับ 0.2 g

$$M_{ads} = \frac{66.88 \times 10^{-3} gS}{0.2 gadsorbent} \times \frac{100}{100}$$

$$M_{ads} = 33.18 \frac{gS}{100gadsorbent}$$

2.2 การหาปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ ของคopolyperoxyde ไซด์ที่เติมชิลิกอน 10 เปอร์เซ็นต์

ในการทดลองใช้อัตราการไหลดของแก๊สไฮโดรเจนชัลไฟฟ์ความเข้มข้น 32 พีพีเอ็มในก๊าซธรรมชาติ ของคopolyperoxyde ไซด์ที่เติมชิลิกอน 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราการไหลดของก๊าซ 500 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ

ตัวอย่างการคำนวณ ปริมาณการดูดซับของ คopolyperoxyde ไซด์ที่เติมชิลิกอน 10 เปอร์เซ็นต์ไม่ที่

เตรียมด้วยวิธีเฟรมสเปรย์

แก๊สธรรมชาติ	100 cm ³ จะมี	H ₂ S = 0.0032 cm ³
ถ้าแก๊สธรรมชาติ	500 cm ³ จะมี	H ₂ S = 0.016 cm ³
เพราะละนันอัตราการไหลด	500 cm ³ /min จะมี	H ₂ S = 0.016 cm ³ /min
และแก๊ส	22,400 cm ³	มีจำนวน 1 mole

สมการ Ideal gas law

$$P_1V_1 = n_1RT_1 \quad \text{ที่สภาพ STP} \quad (1)$$

$$P_2V_2 = n_2RT_2 \quad \text{ที่สภาพดูดซับ} \quad (2)$$

สมการ (1) ÷ (2) ได้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1T_1}{n_2T_2} \quad (3)$$

แทนค่าในสมการที่ 3

$$V_2 = \frac{0.016 \times 273}{303 \times 22.4 \times 1000} = 6.435 \mu \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

นำ V_2 คูณกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จะได้

$$M_{ads} = 6.44 \times 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times 360 \text{ min}$$

$$M_{ads} = 0.25 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$M_{ads} = 0.25 \times 10^{-3} \text{ mol} \times \frac{32 \text{ gS}}{1 \text{ mol} H_2 S}$$

$$M_{ads} = 8 \times 10^{-3} \text{ gS}$$

ใช้ตัวดูดซับ 0.5 g

$$M_{ads} = \frac{8 \times 10^{-3} \text{ gS}}{0.5 \text{ gadsorbent}} \times \frac{100}{100}$$

$$M_{ads} = 1.79 \frac{\text{gS}}{100 \text{ gadsorbent}}$$

ภาคผนวก ๔

ภาคผนวก ๔
สัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณ

สัญลักษณ์

v	=	ปริมาณการดูดซับ
P	=	ความดันที่สภาวะสมดุล
k	=	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Hennry
t_b	=	Break point time
t_e	=	เวลาที่สารถึงจุดอิ่มตัว
S_{sp}	=	พื้นที่ผิว
ρ	=	ความหนาแน่น
K	=	Crystallite-shape factor
λ	=	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้
B	=	ความกว้างของพิกซ์ซึ่งคำนวณจากสมการของ Warren
B_M	=	ความกว้างของพิกซ์ที่ดำเนินการในครั้งหนึ่งของความสูงของตัวอย่างที่ทำการวัด
B_S	=	ความกว้างของพิกซ์ที่ดำเนินการในครั้งหนึ่งของความสูงของสารที่มีผลึกขนาดใหญ่

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายวรวิทย์ สีหอนุกุล
ที่อยู่ 130/170 หมู่ 2 แขวงกระทุมราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิชาเอกวิศวกรรมเคมี
จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2549-2550 วิศวกรควบคุมกระบวนการผลิต บริษัท อินโดโพลี ประเทศไทย จำกัด