



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของสารคอมโพสิต
ซิลิกา-ซีโอไลต์

Study of Volatile Organic Compounds Adsorption Capacity of Silica-Zeolite Composite

นามผู้วิจัย นางสาวอุษณีย์ ถินถาวร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รongศาสตราจารย์ไพศาล คงบุญฉาย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รongศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มทววิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย
ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์

Study of Volatile Organic Compounds Adsorption Capacity
of Silica-Zeolite Composite

โดย

นางสาวอุษณี ถินถาวร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2554

อุษณี ถิ่นถาวร 2554: การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ ปรินญาวิศวรรศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช, D.Eng. 96 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถของการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของตัวดูดซับสารประกอบซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเดียว โดยมีขนาดของรูพรุน 0.50 และ 2.74 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนตัวดูดซับ MSZ-1 มีขนาดรูพรุนสองขนาดคือ 2.42 และ 3.81 นาโนเมตร พื้นที่ผิว BET ของสารประกอบซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีค่าเท่ากับ 1610, 1400 และ 179 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ และปริมาตรรูพรุนรวมของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับ 2.05 3.16 และ 0.13 มิลลิตรต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ เมื่อนำตัวดูดซับทั้งสามชนิดไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ เมทานอล เอทานอล เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับที่ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ผลการวิจัยถูกนำมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบ โดยใช้ Breakthrough curve พบว่า ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำที่สุด เนื่องจาก มีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมที่น้อยที่สุด สารประกอบซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีความสามารถในการดูดซับเมทานอลและเอทานอลดีที่สุด โดยสามารถดูดซับได้ปริมาณ 0.223 และ 0.246 $\text{g}_{\text{VOC}}/\text{g}_{\text{adsorbent}}$ ตามลำดับ ส่วนซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีความสามารถในการดูดซับเบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซนดีที่สุด โดยสามารถดูดซับได้ปริมาณ 0.158, 0.207, 0.156 และ 0.098 $\text{g}_{\text{VOC}}/\text{g}_{\text{adsorbent}}$ ต่อมาศึกษาผลของความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีต่อการดูดซับบน สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 เกิดมากขึ้นดังไอโซเทอมการดูดซับ ของเมทานอล เอทานอล เบนซีน และเฮกเซนซึ่งเป็นการดูดซับแบบ Favorable ส่วนโทลูอิน และไซลีน เป็นแบบ Strongly favorable และพบว่า มีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ความมีขั้ว/ไม่มีขั้ว และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ

Ausanee Thinthaworn 2011: Study of Volatile Organic Compounds Adsorption Capacity of Silica-Zeolite Composite. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Metta Chareonpanich, D.Eng. 96 pages.

This work studied the adsorption abilities of volatile organic compounds (VOCs) on MSZ-1 silica-zeolite composites, MCM-41 mesoporous silica and ZSM-5 zeolite which have different physical characteristics. ZSM-5 and MCM-41 have a single pore size of 0.50 and 2.74 nm, respectively, whereas MSZ-1 has two pore sizes of 2.42 and 3.81 nm. The BET surface areas and pore volumes of MSZ-1, MCM-41 and ZSM-5 were 1610, 1400 and 179 m²/g, and 2.05, 3.16 and 0.13 ml/g, respectively. These adsorbents were applied for the adsorption of hexane, methanol, ethanol, benzene, toluene, and xylene. The adsorption conditions were as follows: temperature, 40°C; carrier gas, N₂; pressure, 1 atmosphere; and gas flow rate, 30 ml/min. The adsorption capacities of each VOC on the synthesized adsorbents were compared by means of breakthrough curves and equilibrium adsorption isotherms. It was found that among these adsorbents, MSZ-1 showed the highest capacity for oxygenate hydrocarbons (methanol and ethanol) adsorption at the capacity of 0.223 and 0.246 g_{VOC}/g_{adsorbent}, respectively. Moreover, MCM-41 showed the highest capacity for hydrocarbons (benzene, toluene, xylene and hexane) adsorption at the capacity of 0.158, 0.207, 0.156 and 0.098 g_{VOC}/g_{adsorbent}, respectively. Then the effect of VOCs concentration on MSZ-1 adsorption was studied. The adsorption isotherms of methanol, ethanol, benzene, and hexane on MSZ-1 were the favorable isotherm, whereas those of toluene and xylene were the strongly favorable isotherm. It can be concluded that factors affecting the VOCs adsorption ability were specific surface area and pore size of adsorbents, and polar/non-polar characteristics and concentration of adsorbates.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความสนับสนุนในทุกๆด้าน ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เมตตา เจริญพานิช ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาชี้แนะ และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์.ดร.ไพศาล คงคาอุยชัย ดร.ธงไทย วิฑูรย์ และรองศาสตราจารย์ .ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ที่กรุณาสละเวลา ตรวจแก้ไขและให้คำชี้แนะเพิ่มเติมในการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณนางสาวอรอนงค์ จุลพันธ์ นางสาวบุษยา ชำนาญคิด รวมทั้งเพื่อนๆ และน้องๆทุกคนที่ให้ความรู้เพิ่มเติมทางทฤษฎี ให้ความช่วยเหลือ แนะนำการปฏิบัติงานวิจัย และการใช้เครื่องมือในการวิจัย

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอขอบพระคุณทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการดำเนินงานวิจัยนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้วิชาความรู้ และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

อุษณีย์ ถินถาวร

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย	34
สารเคมีและอุปกรณ์	34
วิธีดำเนินการวิจัย	37
ผลและวิจารณ์	44
สรุปผลการทดลอง	72
ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	75
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์เชิงปริมาณและชนิดของสารประกอบอินทรีย์ ระเหยง่ายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ	84
ภาคผนวก ข การคำนวณปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย บนตัวดูดซับ	88
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	94

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าเฉลี่ยรายปีของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศเทียบกับ ค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปี 2552 (หน่วย: g/m^3)	2
2	ค่ามาตรฐานสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ	9
3	ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) บางชนิด ผลกระทบต่อระบบ เนื้อเยื่อ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพ	11
4	ลักษณะของการควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเทคนิคต่างๆ	13
5	คุณสมบัติทางกายภาพของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	49
6	แสดงปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา- ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	61
7	แสดงอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่ประกอบอยู่ในตัวดูดซับชนิดต่างๆ	69
8	แสดงสูตร โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ เป็นตัวถูกดูดซับ	70
ตารางผนวกที่		
ก1	สมการของ Calibration curves ของสารแต่ละชนิดที่ใช้ในการดูดซับ	87
ข1	ปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อุณหภูมิต่างๆ บน MSZ-1	92
ข2	ค่าความเข้มข้นตั้งต้นของไอระเหยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้อุณหภูมิ การระเหยต่างๆ	93

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กลไกของการดูดซับ	18
2 ชนิดของไอเทอร์มการดูดซับ ตามการจำแนกของ IUPAC	19
3 โครงสร้างซีโอไลต์	25
4 โครงสร้างซิลิกาเจล	26
5 แบบจำลองโครงสร้างภายในถ่านกัมมันต์	27
6 โครงสร้างของซิลิกาเมโซพอร์-ซีโอไลต์	28
7 แสดงการเกิดโครงสร้างของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41	30
8 แสดงการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	32
9 แผนภาพการบรรจุตัวดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์	41
10 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล	41
11 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC) และโครมาโตแพค คัดน้ำ โปรเซสเซอร์	42
12 XRD pattern ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ที่สังเคราะห์ได้	45
13 XRD pattern ของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ที่สังเคราะห์ได้	46
14 XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้	47
15 การกระจายขนาดของรูพรุนและไอโซเทอมการดูดซับในโครเจนของ ซีโอไลต์ ชนิด ZSM-5, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1	48
16 FT-IR spectra ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ที่สังเคราะห์ได้	50
17 FT-IR spectra ของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ที่สังเคราะห์ได้	51
18 FT-IR spectra ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้	52
19 ภาพ TEM แสดงโครงสร้างของตัวดูดซับ (a) สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 (b) ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และ (c) ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	53
20 Breakthrough curve ของการดูดซับเมทานอลบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	Breakthrough curve ของการดูดซับเอทานอลบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	56
22	Breakthrough curve ของการดูดซับเบนซีนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	57
23	Breakthrough curve ของการดูดซับโทลูอินบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	58
24	Breakthrough curve ของการดูดซับไซลีนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	59
25	Breakthrough curve ของการดูดซับเฮกเซนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	60
26	ไอโซเทอร์มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทานอล และเอทานอล กับปริมาณการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1	62
27	ไอโซเทอร์มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ เบนซีน โทลูอิน และไซลีนกับปริมาณการดูดซับบน สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1	64
28	ไอโซเทอร์มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีน และเฮกเซน กับปริมาณการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1	66
ภาพผนวกที่		
ก1	แก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC)	85
ก2	โครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน 1- 3 อะตอม	86
ก3	โครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน 6-8 อะตอม	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข1 กราฟ Breakthrough curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา	89
ข2 กราฟไอโซเทอรั่มการดูดซับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ	90



การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์

Study of Volatile Organic Compounds Adsorption Capacity of Silica-Zeolite Composite

คำนำ

ปัจจุบันหน่วยงานต่างๆทั้งภาครัฐและเอกชนให้ความสนใจปัญหามลพิษทางอากาศมากขึ้น เนื่องจากเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพของมนุษย์และการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ สาเหตุหลักเกิดจากการขยายตัวทางอุตสาหกรรม การใช้เชื้อเพลิงในภาคคมนาคมขนส่ง และจากแหล่งที่ปกออาศัย โดยขาดการควบคุมหรือกำจัดก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ ทำให้ปริมาณสารพิษกระจายอยู่ในบรรยากาศเกินมาตรฐาน จึงส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศตามมา (Parmar *et al.*, 2009) ในบรรดามลพิษต่างๆที่ปนเปื้อนในอากาศ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound, VOCs) เป็นสารพิษอีกชนิดหนึ่งที่พบอยู่ในปริมาณมาก เนื่องจากสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ จึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายและรั่วซึมออกสู่บรรยากาศได้ง่าย สารประเภทนี้เป็นกลุ่มของสารพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม VOCs เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาหมอกควันแบบโฟโตเคมีคัล (Photochemical smog) และสามารถทำปฏิกิริยากับ NO_x ทำให้เกิดการทำลายชั้นบรรยากาศ ทั้งยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ โดยมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันทำให้ภูมิคุ้มกันมีประสิทธิภาพลดลง และมีผลกระทบต่อระบบประสาท โดยมีฤทธิ์กดประสาท และทำลายระบบประสาทส่วนกลาง VOCs ถูกตรวจพบได้ทั้งในพื้นที่ชุมชนเมือง และพื้นที่อุตสาหกรรม เช่น กรุงเทพมหานคร และมาบตาพุด จากตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยรายปีของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศเทียบกับค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปี

2552

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยรายปีของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศเทียบกับค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปี 2552 (หน่วย: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

VOCs	ค่ามาตรฐาน	มาบตาพุด	กรุงเทพมหานครและปริมณฑล		
		พื้นที่	พื้นที่ใกล้	พื้นที่	พื้นที่พัก
		อุตสาหกรรม	แหล่งกำเนิด	ริมถนน	อาศัย
Benzene	1.7	1.6-4.3	1.8-5.7	3.9-11	3.4-5.1
1,3 butadiene	0.33	0.17-0.65	0.18-0.78	0.24-0.94	0.17-0.23
Chloroform	0.43	0.05-0.26	0.09-0.19	0.10-0.22	0.11-0.19
Dichloroethane	22	0.50-0.96	1.2-13	0.89-2.7	1.2-8.7
1,2Dichloroethane	0.40	0.19-2.7	0.07-0.09	0.03-0.10	0.04-0.17
1,2Dichloroethane	4.0	0.05-0.08	0.03-0.05	0.02-0.34	0.02-0.03
Tetrachloroethylene	200	0.04-0.07	0.07-0.42	0.20-0.36	0.16-0.29
Trichloroethylene	23	0.06-0.32	0.24-3.2	0.18-0.86	0.27-0.59
Vinyl chloride	10	0.04-2.2	0.03-1.0	0.06-0.92	0.05-0.47

ที่มา: สราวุธ (2553)

จากผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาถึงความสำคัญของการควบคุมปริมาณสารพิษที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการเกิดมลพิษทางอากาศ วิธีการลดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ Thermal oxidation, Catalytic oxidation, Biofiltration, Condensation, Adsorption และ Membrane separation เป็นต้น (Khan *et al.*, 2009) ซึ่งงานวิจัยนี้เลือก Adsorption หรือกระบวนการการดูดซับมาใช้ในการลดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับมีหลายปัจจัย เช่น พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ อุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ ความสามารถของตัวดูดซับมวลสารที่มีอยู่ในก๊าซ ชนิดของตัวดูดซับ และความมีขี้หรือไม่มีขี้ของทั้งตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากถ้าสามารถเลือกตัวดูดซับได้เหมาะสมกระบวนการดูดซับก็จะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับและศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ (MSZ-1) เป็นตัวดูดซับ เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 โดยพิจารณาจากความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ที่พบมากในอากาศ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน เพื่อนำไปพัฒนาเป็นสารดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ ประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้สามารถลดปริมาณ VOCs ที่ปนเปื้อนในอากาศ เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และเป็นปัญหาดอกลิ่งแวดล้อมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับ ได้แก่ Mesoporous Silica Zeolite-1 (MSZ-1), Zeolite Socony Mobil-5 (ZSM-5) และ Mobile Crystalline Material-41 (MCM-41)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ MSZ-1, ZSM-5 และ MCM-41 ในการดูดซับตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ได้แก่ เมทานอล เอทานอล เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน
3. เพื่อศึกษาความเข้มข้นที่มีต่อการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับ MSZ-1

ขอบเขตงานวิจัย

สังเคราะห์สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ (MSZ-1) ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 จากนั้นนำมาใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการการดูดซับ (Adsorption) เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของสารทั้งสามชนิดนี้ ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่นำมาใช้เป็นตัวถูกดูดซับ ได้แก่ เมทานอล (CH_4O), เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), เบนซีน (C_6H_6), โทลูอิน (C_7H_8), ไซลีน (C_8H_{10}) และเฮกเซน (C_6H_{14}) โดยในกระบวนการดูดซับจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกทำการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายซึ่งควบคุมความเข้มข้นโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ 40 เซลเซียส ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของสารทั้งสามชนิดเปรียบเทียบกัน ส่วนที่สองจะควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายโดยปรับอุณหภูมิในการระเหยที่ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ทำการควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยการปรับอุณหภูมิในการระเหย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์สารประกอบคอมพอลิเมอร์ซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ได้
2. ทราบลักษณะเฉพาะของการดูดซับ และปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบน MSZ-1, ZSM-5 และ MCM-41
3. ได้ฐานข้อมูลการดูดซับของสารประกอบคอมพอลิเมอร์ซิลิกา-ซีโอไลต์ เพื่อนำไปพัฒนาใช้จริงในระบบอุตสาหกรรม เพื่อลดปริมาณมลพิษในอากาศ

การตรวจเอกสาร

การดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมหรือกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งในการศึกษาการดูดซับพบว่าปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เช่น พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ และอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ เป็นต้น นอกจากนี้ตัวดูดซับที่นำมาใช้ในกระบวนการดูดซับยังเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง เนื่องจากถ้าสามารถเลือกตัวดูดซับได้เหมาะสม กระบวนการดูดซับจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบมากในอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งได้แก่ เมทานอล เอทานอล เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และ เฮกเซน บนตัวดูดซับต่างชนิดกัน โดยใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นมาเองในห้องวิจัย ได้แก่ สารคอมโพสิตซิลิกาซีโอไลต์ (Mesoporous Silica-Zeolite-1, MSZ-1) แบบเนื้อผสม (Infiltrated mixture) ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยตัวดูดซับแต่ละตัวมีองค์ประกอบ โครงสร้างและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยรายละเอียดต่างๆจะถูกกล่าวถึงดังต่อไปนี้

1. สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs)

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีไฮโดรเจน ออกซิเจน ฟลูออไรด์ คลอไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน ประกอบกันเป็นสารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) รวมถึงกลุ่มคาร์บอนิล (อัลดีไฮด์, ดีโตน) และกลุ่มอัลกอฮอล์ ที่สามารถระเหยกลายเป็นไอหรือก๊าซได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง มีความดันไอมากกว่า 0.14 มิลลิเมตรปรอทที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นตัวทำลายที่ดี โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 12 อะตอม (Derwent, 2010) ในแต่ละประเทศมีการให้ความหมายหรือคำจำกัดความของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายแตกต่างกันไป เช่น ประเทศญี่ปุ่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของก๊าซสามารถปล่อยหรือแพร่กระจายได้ในอากาศ ประเทศสหรัฐอเมริกา สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารอินทรีย์ที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแสงแดดในอากาศ ในยุโรป สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารอินทรีย์ทุกชนิดที่มีความดันไอมากกว่า 0.01 กิโลพาสคาล หรือ 0.075 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (อรอนงค์, 2554) ส่วนในประเทศไทย หมายถึง สารประกอบเคมีที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบและความดันไอมากกว่า 0.27 กิโลพาสคาลหรือ 2 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แต่ไม่รวมถึงมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

สาร VOCs สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ ๆ ตามลักษณะโมเลกุลของสาร ดังนี้

1. กลุ่ม VOCs ที่ไม่มีหมู่คลอรีน (Non-chlorinated VOCs) หรือไม่มีหมู่ฮาโลเจน (Non-halogenated hydrocarbons) ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีอะตอมของธาตุคลอรีนในโมเลกุล สารกลุ่มนี้มาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้กองขยะ พลาสติก สารตัวทำละลาย สีทาวัสดุ ซึ่งทำให้มีผลเสียต่อสุขภาพของผู้ได้รับคือ ทำให้ป่วยเป็นโรคทางเดินหายใจ ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ ได้แก่ กลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอะลิฟาติก (Aliphatic hydrocarbons) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง (fuel oils), ตัวทำละลาย (solvents), โพรเพน (propane), บิวทาไดเอน (butadiene), และเฮกเซน (hexane)

กลุ่มสารประกอบแอลกอฮอล์ (Alcohols), อัลดีไฮด์ (Aldehyde), คีโตน (Ketone) เช่น เมทานอล (methanol), เอทานอล (ethanol) และฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)

กลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติก (Aromatic hydrocarbons) เช่น แนฟทาลีน (naphthalene), โทลูอิน (toluene), ไซลีน (xylene), สไตรีน (styrene) เบนซีน (benzene) และฟีนอล (phenol)

2. กลุ่ม VOCs ที่มีหมู่คลอรีน (Chlorinated VOCs) หรือมีหมู่ฮาโลเจน (Halogenated hydrocarbons) ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีอะตอมของธาตุคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่ใช้สังเคราะห์ในอุตสาหกรรม สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษมากกว่าและเสถียรในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารในกลุ่ม Non-chlorinated VOCs เนื่องจากในโครงสร้างมีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่มีความทนทานมาก ยากต่อการสลายตัวได้เองในธรรมชาติ ทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือโดยวิธีทางเคมีทั่วไป มีความคงตัวสูงและสะสมได้นาน และสามารถรบกวนการทำงานของสารพันธุกรรม มีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้ และสามารถยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์

ตัวอย่างของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ชนิด Halogenated VOCs (ประสงค์และไมตรี, 2554)

- 1,1,1,2- Tetrachloroethane (C ₂ H ₂ Cl ₄)	- Bromoform (CHBr ₃)	- Glycerol trichlorohydrin (C ₃ H ₅ Cl ₃)
- 1,1,1-Trichloroethane (C ₂ H ₃ Cl ₃ or CH ₃ CCl ₃)	- Bromomethane (CH ₃ Br)	- Hexachlorobutadiene (C ₄ Cl ₆)
- 1,1,2,2,-Tetrachloroethane (C ₂ H ₂ Cl ₄)	- Carbon tetrachloride (CCl ₄)	- Hexachlorocyclopentadiene (C ₅ Cl ₆)
- 1,1,2-Tetrachloroethane (C ₂ H ₂ Cl ₄)	- Chlorodibromomethane (CHBr ₂ Cl)	- Hexachloroethane (C ₂ Cl ₆)
- 1,1-Dichloroethane (C ₂ H ₄ Cl ₂)	- Chloroethane (C ₂ H ₅ Cl)	- Methylene chloride (CH ₂ Cl ₂)
- 1,1-Dichloroethylene (C ₂ H ₂ Cl ₂)	- Chloroform (CHCl ₃)	- Neoprene (C ₄ H ₅ Cl)
- 1,2,2-Trifluoroethane (C ₂ Cl ₃ F ₃)	- Chloromethane (CH ₃ Cl)	- Pentachloroethane (C ₂ HCl ₅)

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศสามารถเกิดได้จากการเผาไหม้ของน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ การปล่อยออกมากับก๊าซทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมการผลิต และจากตัวทำละลายที่มีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นองค์ประกอบ รวมทั้งเกิดการรั่วไหลระหว่างการขนถ่ายและการจัดเก็บ การขับจี้ยานพาหนะ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าแหล่งกำเนิดที่สำคัญของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายคือ โรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ และแหล่งกำจัดขยะ ด้วยเหตุนี้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจึงมีมากตามเมืองใหญ่ๆ ตัวอย่างเช่น เบนซีน โทลูอิน ไซลีน ฟอรั่มลดีไฮด์ เปอร์คลอโรเอทิลีน เป็นต้น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมสี ยาง ทินเนอร์ แลคเกอร์ น้ำยาทาเนื้อไม้ และน้ำยาซักแห้ง เป็นต้น (Yonghui *et al.*, 2005) เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมีคุณสมบัติระเหยกลายเป็นก๊าซหรือไอได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง จึงนิยมนำไปใช้เป็นสารเคลือบผิว และตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่างๆ (Shim *et al.*, 2006) ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่เกิดการร้องเรียนสูงสุด นอกจากนี้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายยังพบในผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น สีทาบ้าน ควันทูบหรี่ น้ำยาฟอกสี สารตัวทำละลายในหมึกพิมพ์ น้ำยาซักแห้ง น้ำยาสำหรับข้อมผมและน้ำยาดัดผม สารฆ่าแมลง น้ำมันเชื้อเพลิง สารที่เกิดจากการเผาไหม้ เป็นต้น โดยสารดังกล่าวจะปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม และอาหาร ซึ่ง

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่สะสมในปริมาณสูงเป็นเวลานานๆ จะมีผลกระทบทางชีวภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ตารางที่ 2 แสดงค่ามาตรฐานของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ โดยหาค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในบรรยากาศเป็นเวลา 1 ปี นำผลการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างอากาศแบบต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมงของทุกๆ เดือน (อย่างน้อยเดือนละหนึ่งครั้ง) มาหาค่าเฉลี่ยเชิงคณิตศาสตร์ ในกรณีตัวอย่างอากาศที่เก็บมาตรวจวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้จะเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ใหม่ภายใน 30 วัน นับแต่วันที่เก็บตัวอย่างที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ การคำนวณค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ แต่ละชนิดนั้นคำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 760 มิลลิเมตรปรอท และที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2 ค่ามาตรฐานสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย	ค่ามาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
เบนซีน (Benzene)	≥ 1.7
ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	≥ 10
1,2 - ไดคลอโรอีเทน (1,2 - Dichloroethane)	≥ 0.4
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	≥ 23
ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	≥ 22
1,2 - ไดคลอโรโพรเพน (1,2 - Dichloropropane)	≥ 4
เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	≥ 200
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	≥ 0.43
1,3 - บิวทาไดเอน (1,3 - Butadiene)	≥ 0.33

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 30 เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ ราชกิจจานุเบกษา (2550)

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถกระจายอยู่ทั่วไปในบรรยากาศ และมีผลต่อชั้นโอโซนที่อยู่ใกล้โลก โดยโอโซนในบรรยากาศชั้นใกล้โลกนี้เกิดจากผลของการทำปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ในโตรเจนออกไซด์ ฝุ่นละออง และออกซิเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่ง ทำให้เกิดปฏิกิริยา Photochemical smog ซึ่งส่งผลให้โอโซนในบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ โอโซนที่อยู่ในบรรยากาศชั้นสูงจะทำหน้าที่กรองแสงอุลตราไวโอเลตคลื่นสั้นที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตไม่ให้ตกสู่พื้นโลก แต่เมื่อโอโซนอยู่ในบรรยากาศชั้นใกล้โลกกลับเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดอาการเจ็บคอ หายใจไม่สะดวก ถ้าได้รับเป็นเวลานานเนื้อเยื่อปอดจะถูกทำลายอย่างถาวร และมีผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ (Ghoshal et al., 2002) นอกจากนี้โอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) อย่างแรง จึงทำให้สิ่งก่อสร้างชำรุด และยังส่งผลให้ผลิตผลทางการเกษตรตกต่ำลงอีกด้วย โอโซนจึงเป็นสารมลพิษในบรรยากาศใกล้โลกที่ยากต่อการควบคุมโดยตรง เนื่องจากไม่ได้เกิดจากการปล่อยสู่บรรยากาศ แต่เกิดจากกระบวนการโฟโตเคมีคัล (Photochemical process)

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายหลายตัวมีความเป็นอันตราย และจัดเป็นมลพิษทางอากาศที่อันตราย หากมนุษย์ได้รับมลพิษเหล่านี้เข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานานจะมีผลต่อสุขภาพ ตามลักษณะของสารเหล่านั้น ส่งผลให้เกิดอาการต่างๆดังตัวอย่างในตารางที่ 3 ความเป็นพิษหรือความเป็นอันตรายของสารขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละตัว โดยปริมาณและเวลาที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ (1) การหายใจ โดยจะเข้าสู่ปอดผ่านไปยังไขมันและของเหลวในร่างกายแล้วเก็บสะสมไว้ในเนื้อเยื่อส่วนที่เป็นไขมัน (2) การกินและการดื่มทางปากและ (3) การสัมผัสทางผิวหนัง หลังจากการเข้าสู่ร่างกายแล้วจะผ่านเข้าสู่ตับ ซึ่งมีความเป็นพิษต่อร่างกาย โดยอันตรายที่ได้รับจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ (ทรงวุฒิ และคณะ, 2554)

1) ช่วงครึ่งชีวิต (Half life) ของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในร่างกาย หรือในเลือด การตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในเลือดสามารถบอกประวัติการได้รับ หรือการสัมผัสสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในประชากรได้

2) สถานะความสมบูรณ์ของร่างกาย (Complete state of body) ขึ้นอยู่กับสถานะภายในร่างกาย และปฏิกิริยาชีวเคมีทางเมตาบอลิซึม (Metabolism) ในตับและเนื้อเยื่อแปรสภาพให้เป็นพิษมากขึ้นหรือน้อยลงได้ และขึ้นอยู่กับปริมาณแอลกอฮอล์หรือสารเคมีอื่นในกระแสเลือดและ

เนื้อเยื่อด้วย ตัวอย่างเช่น การดื่มเหล้า หรือเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์จะเพิ่มการดูดซึมและเพิ่มระดับของ 2-butanone และ acetone ในเลือดของผู้ดื่มเหล้า

3) ระบบการขับถ่ายของเสีย และการขับสารพิษทิ้ง (Excretory system remove waste and toxic) สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายถูกขับโดยตรงผ่านไตออกทางปัสสาวะทางลมหายใจ และโดยทางอ้อมผ่านตับ และน้ำดี ถ้าสารนั้นถูกขับออกทิ้งได้ง่าย ความเป็นพิษจะน้อยลงกว่าสารเคมีที่ถูกขับออกทิ้งได้ยาก นอกจากนั้นการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากร่างกายยังใช้กระบวนการเมตาโบลิซึม โดยการเปลี่ยนเป็นสารเคมีตัวอื่นที่ไม่มีอันตรายหรือมีอันตรายน้อยกว่า

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) บางชนิด ผลกระทบต่อระบบเนื้อเยื่อ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

สาร VOCs	เนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย	ผลต่อสุขภาพ
เบนซีน (C_6H_6)	ระบบเลือด เซลล์เม็ดเลือดแดง ประสาท	ทำลายไขกระดูก เม็ดเลือดแดงแตก โรคโลหิตจาง และอาการหรือโรคทางประสาทส่วนกลาง
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4)	ตับ ระบบประสาทส่วนกลาง	ตับเสื่อม ตับแข็ง
คลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$)	ตับ ไต กล้ามเนื้อหัวใจ ดวงตา, ผิวหนัง	ตับเสื่อม ตับแข็ง ไตเสื่อม หัวใจเต้นผิดปกติ ระคายเคืองตาและผิวหนัง
ไดคลอโรเบนซีน (DCM)	ตับ ไต เลือด ผิวหนัง ดวงตา ทางเดินหายใจ	ฤทธิ์แสบ-ระคายเคือง ปวดบวม โรคตับ กดประสาทส่วนกลาง อาจหมดสติและตายได้
เอทานอล (C_2H_5OH)	ตับ ประสาทส่วนกลาง รกในครรภ์	ตับเสื่อม ตับแข็ง เร่งการเกิดมะเร็ง ตับ มีอาการกดประสาท ทำให้การคลอดพิการ
เอทิลเบนซีน (C_8H_{10})	ดวงตา ระบบประสาทส่วนกลาง	ทำให้ระคายเคือง แสบตา แสบจมูก
เฮกเซน (C_6H_{14})	ส่วนกลาง โพรงจมูก	กดประสาทส่วนกลาง ทำให้ปวดหัว สับสนงุนงง อาจหมดสติได้

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สาร VOCs	เนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย	ผลต่อสุขภาพ
เมทานอล (CH_3OH)	ตับ ประสาทส่วนกลาง	ตับเสื่อม อาการกดประสาท ทำให้ตาบอด
โทลูอิน (C_7H_8)	ประสาทส่วนกลาง	อาการทางประสาทส่วนกลาง
ไตรคลอโรเบนซีน ($\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_3$)	ตับ ไต	ตับแข็ง ตับเสื่อม ไตเสื่อม
1,1, 1-ไตรคลอโรอีเทน (CH_3CCl_3)	ตับ ไต ประสาท	อาการทางประสาทส่วนกลาง ชัก หมดสติและอาจตายได้
ไซลีน (C_8H_{10})	ผิวหนัง ประสาท	ระคายเคือง โรคผิวหนัง และอาการ เกิดจากการกดประสาทส่วนกลาง

ที่มา: ประสงค์ และไมตรี (2544)

อันตรายและโทษต่อสุขภาพของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจะยิ่งมีผลกระทบมากขึ้นถ้าได้รับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายผสมกันหลายชนิดในระยะเดียวกัน อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ มากกว่าผลกระทบที่เกิดจากสารชนิดเดียว เพราะสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิดอาจมีฤทธิ์เสริมกัน ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสุขภาพมากขึ้น

2. การควบคุมสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

การควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีอยู่หลายวิธี ในตารางที่ 4 แสดงลักษณะการควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกัน ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ลักษณะของการควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเทคนิคต่างๆ

Techniques	Removal Efficiency (%)	Secondary waste generated	Advantages	Disadvantages
Thermal oxidation	95–99	Combustion products	Energy recovery is Possible (maximum up to 85%)	Halogenated and other oxidation compounds may require additional
Catalytic oxidation	90–98	Combustion products	Energy recovery is possible(maximum up to 70%)	Efficiency is sensitive to operating conditions. Certain compounds can poison the catalyst. May require additional control equipment downstream
Biofiltration	60–95	Biomass	Requires less initial investment, less non-harmful secondary waste, and nonhazardous	Slow, and selective microbes decomposes selective organics, thus requires a mixed culture of microbes (which is difficult). No recovery of material.
Membrane separation	90–99	Exhausted membranes	No further treatment, recovery of solvent may offset the operating cost	Membranes are costly

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Techniques	Removal efficiency (%)	Secondary waste generated	Advantages	Disadvantages
Adsorption				
i) Activated carbon	80–90	Spent carbon and collected organics	Recovery of compounds, which may offset annual operating costs	Susceptible to moisture, and some compounds (ketones, aldehydes, and esters) can clog the pores, thus decreasing the efficiency
ii) Zeolite	90–96	Collected organic, spent zeolite after several cycles	Effective in more than 90% RH; recovery of compounds offsets annual operating costs	High cost of zeolite, restricted availability
Condensation	70–85	Condensate	Product recovery can offset annual operating costs	Requires rigorous maintenance. Not recommended for the materials having boiling points above 33°C

ที่มา: Khan *et al.* (2000)

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อควบคุมปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่างก็มีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การเลือกแต่ละเทคนิคมาใช้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆ ได้แก่ ความเข้มข้นและธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ อัตราการไหลของแก๊ส และปัจจัยอื่น เช่น ความปลอดภัย และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นในการเลือกนำแต่ละเทคนิคมาใช้จึงต้องคำนึงให้เหมาะสมกับงาน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคการดูดซับ (Adsorption) เพื่อศึกษาปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับต่างชนิดกัน ทั้งนี้ เนื่องจากเทคนิคการดูดซับสามารถทำได้เร็ว ปลอดภัย ควบคุม และออกแบบได้ง่าย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดในกระบวนการนี้ คือ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม (Xiang *et al.*, 2010) ใช้ตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ซึ่งตัวดูดซับที่นำมาใช้เป็นหลักในงานวิจัยนี้ได้แก่ สารประกอบคอมโพสิตซิลิกาซีโอไลต์ (Mesoporous silica-zeolite composite: MSZ-1) ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นมาในห้องวิจัย และมีคุณสมบัติของซีโอไลต์และซิลิกาเมโซพอร์รวมกัน ทั้งนี้ เนื่องจากซีโอไลต์ และซิลิกาเมโซพอร์มีสมบัติในการดูดซับสารที่มีขนาดและชนิดแตกต่างกัน ดังนั้นหากมีคุณสมบัติทั้งสองชนิดรวมอยู่ด้วยกันจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการดูดซับกับซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 รายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

1. การดูดซับและการแยกโดยกระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ในกระบวนการดูดซับโมเลกุลของก๊าซ สารละลาย หรือสารแขวนลอยจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลไปที่ตัวดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุล และจะหยุด ณ จุดสมดุล

ปัจจัยสำคัญในการกำหนดชนิดของกระบวนการดูดซับสามารถพิจารณาได้จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำ

ให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

กลไกของกระบวนการดูดซับ แบ่งออกได้ 2 แบบ (จตุพร และคณะ, 2547)

(1) กระบวนการดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอ่อนๆ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย โดยมีค่าต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายเช่นกัน สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น โดยในแต่ละชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย การฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) เพื่อให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้ดีดังเดิมนั้น มักดำเนินการโดยใช้ความร้อนสูง ในขั้นตอนนี้สามารถทำให้เกิดการสูญเสียตัวดูดซับไปประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณตัวดูดซับ (จตุพร และคณะ, 2547) และหากแรงระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับมีค่ามากกว่าตัวทำลายกับตัวดูดซับ จะเกิดการดูดซับตัวถูกดูดซับให้เกาะที่ผิวของตัวดูดซับได้ดี (Zeinali *et al.*, 2010)

(2) กระบวนการดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล ส่งผลให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยาก และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ การดูดซับประเภทนี้จัดเป็นการดูดซับแบบขั้นเดียวเท่านั้น กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในตัวดูดซับสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

- การดูดซับระหว่างช่องว่างขนาดใหญ่ (Macro-transport adsorption)
- การดูดซับระหว่างช่องว่างขนาดเล็ก (Micro-transport adsorption)
- การดูดซับที่ผิวภายในของตัวดูดซับ (Sorption)

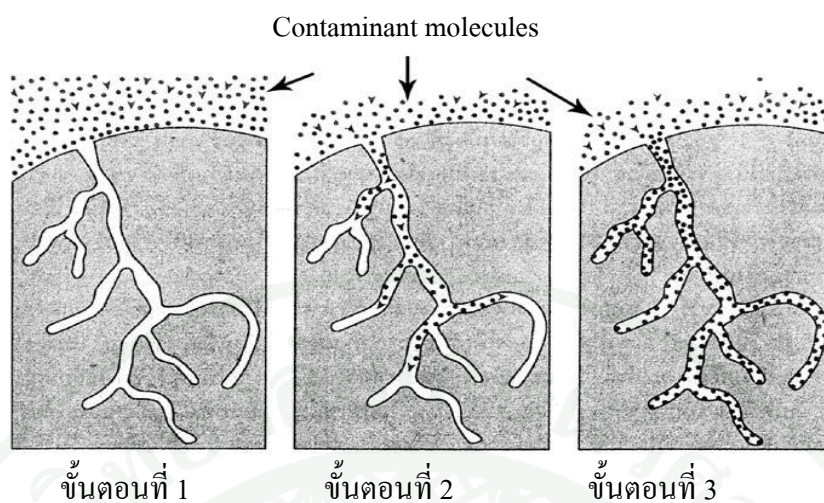
เมื่อดำเนินการดูดซับไปชั่วขณะ และพบว่าสารที่ถูกดูดซับไม่ดูดซับติดไว้ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แสดงว่าขณะนั้นกลไกของกระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล เนื่องจากตัวดูดซับมีความอิ่มตัวในการดูดซับ และการทำงานของกระบวนการดูดซับจะเข้าสู่ภาวะคงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำตัวดูดซับกลับไปฟื้นฟูสภาพอีกครั้ง เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับสารได้อีก และก่อนที่จะนำมาใช้งานอีกครั้ง โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน (จักรกฤษณ์, 2009) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการดูดซับไปยังพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุน

ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลของก๊าซที่ต้องการดูดซับจะถูกยึดติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ

การแพร่ในขั้นตอนที่ 1 เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการดูดซับในอากาศกับความเข้มข้นที่ผิวของสารที่ต้องการดูดซับ ทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ต้องการดูดซับไหลจากอากาศซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าไปยังผิวของตัวดูดซับที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อก๊าซที่ต้องการดูดซับไหลถึงผิวของตัวดูดซับแล้วก๊าซที่ต้องการดูดซับดังกล่าวก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนต่อไป การเคลื่อนที่นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนในช่วงแรก โดยถ้ารูพรุนมีขนาดใหญ่การเคลื่อนที่โดยการแพร่จะเป็นแบบกลุ่มก้อน (Bulk diffusion) และการชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซ ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กลงการเคลื่อนที่ที่จะเปลี่ยนเป็นการแพร่แบบพื้นผิว (Surface diffusion) โดยการชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนระหว่างโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการดูดซับกับพื้นผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ



ภาพที่ 1 กลไกของการดูดซับ

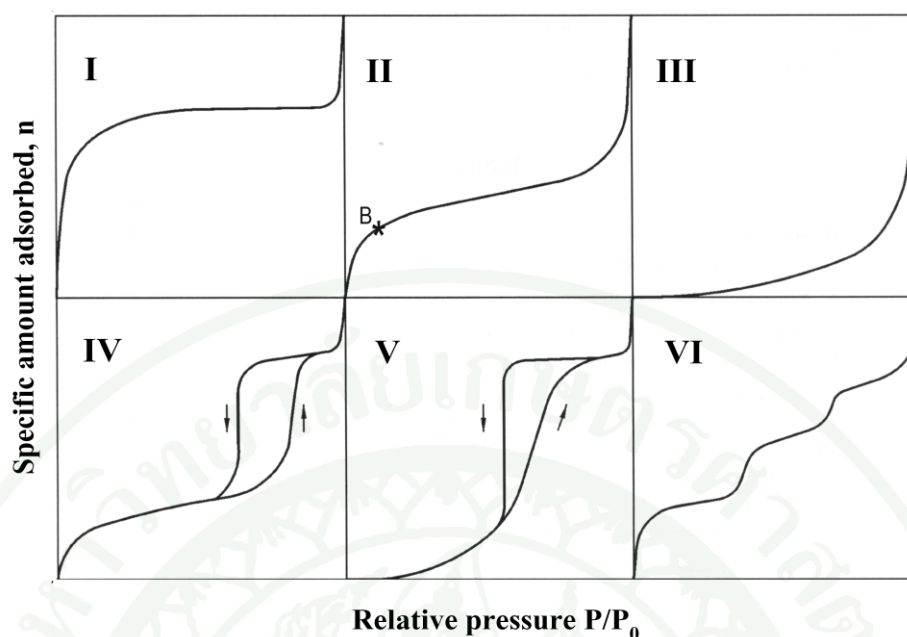
ที่มา: จักรกฤษณ์ (2009)

3. ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ แสดงความสัมพันธ์ของสมมูลระหว่างความเข้มข้นในเฟสของไหลและความเข้มข้นในอนุภาคของตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับแก๊ส ความเข้มข้นจะอยู่ในหน่วยของร้อยละโดยโมล หรือความดันย่อย ส่วนของเหลวความเข้มข้นมักจะแสดงในหน่วยมวล เช่น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับของแข็ง นิยมแสดงในหน่วยของมวลของตัวถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับเริ่มต้น (McCabe *et al.*, 2005)

ชนิดของไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Type of Adsorption isotherm type)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีอยู่หลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ในปี ค.ศ. 1945 Bruanauer ได้จำแนกชนิดของไอโซเทอร์ม ของการดูดซับออกเป็น 5 ชนิด แสดงในภาพที่ 2 ซึ่งชื่อที่เรียกเป็นไปตาม IUPAC ส่วนไอโซเทอร์มชนิดที่ 6 เป็นชนิดที่ค้นพบใหม่ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละชนิดมีดังนี้



ภาพที่ 2 ชนิดของไอโซเทอรั่มการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC

ที่มา: Iris (2010)

ชนิดที่ 1 (Type I) เรียกว่าไอโซเทอรั่มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ ไอโซเทอรั่มแบบนี้มักพบในวัสดุที่มีความพรุนสูง แต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ ตัวอย่างเช่น ซีโอไลต์ หรือถ่านกัมมันต์บางชนิด ซึ่งทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้เร็วในตอนต้น และอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่

ชนิดที่ 2 (Type II) เรียกว่า Sigmoid หรือไอโซเทอรั่มรูปตัวเอส (S-Shaped isotherm) กลไกการแพร่ทำให้ไอโซเทอรั่มแบบนี้มักเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ระดับมาโครพอร์ (Macropores) โดยการดูดซับมักเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวในช่วงแรกและต่อมาจึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

ชนิดที่ 3 (Type III) มีรูปร่างเหมือนกระจกแก้ว และไม่มีไหล่โค้ง ไอโซเทอรั่มแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย มักเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขั้วบนวัสดุที่ไม่มีขั้ว หลังจากผิวหน้าดูดซับจนหมดแล้ว การดูด

ซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกันเองมีค่าสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ เช่น การดูดซับไอน้ำบนแกรไฟต์ เป็นต้น

ชนิดที่ 4 (Type IV) มักจะพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ (Mesopores) การดูดซับในช่วงแรกจะมีค่า P/P_0 ต่ำ จะเหมือนกับไอโซเทอรั่มชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อค่า P/P_0 มาก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบ Capillary ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis ซึ่งเกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายไม่ทับกัน เนื่องจากการคายซับเกิดขึ้นได้ยากกว่าเพราะต้องเอาชนะแรง Capillary นอกจากนี้ ยังเกิดในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็ก

ชนิดที่ 5 (Type V) มีลักษณะเหมือนกับชนิดที่ 4 แต่ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุน ในกรณีที่เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ ไอโซเทอรั่มชนิดนี้พบได้ไม่บ่อยนัก เช่น ตัวอย่างงานวิจัยของ Qiao *et al.* (2004) ศึกษาการดูดซับเฮกเซนบนซิลิกานาโนพอร์ชนิด MCM-41 ที่อุณหภูมิ 30 และ 50 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบการดูดซับบนซิลิกานาโนพอร์ชนิด MCM-41 ซึ่งมีขนาดรูพรุนแตกต่างกันคือ 2.40 และ 4.24 นาโนเมตร พบว่าไอโซเทอมการดูดซับเป็นชนิดที่ 5 เนื่องจากในกระบวนการดูดซับนั้น เกิดการควบแน่นในรูพรุนขนาดเล็กแบบ Capillary ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis ในไอโซเทอม

ชนิดที่ 6 (Type VI) เรียกว่าเป็นไอโซเทอรั่มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับทีละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นกราฟจะขึ้นกับอุณหภูมิ ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Titus (2011) ศึกษาการดูดซับสารในกลุ่มอะโรมาติก และแอลเคนบนซีโอไลต์ชนิด MFI ที่อุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นไอโซเทอรั่มแบบขั้นบันได สามารถอธิบายการดูดซับโดยไอโซเทอรั่มชนิดที่ 6 โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นทำให้ ความชันของเส้นกราฟเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับสูงขึ้น ทำให้ เกิดการดูดซับบนผิวหน้าของซีโอไลต์ในปริมาณมากขึ้น

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ธรรมชาติของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ได้แก่

4.1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Kosuge *et al.* (2007) ได้ศึกษาลักษณะการดูดซับและการคายของเบนซีนและโทลูอิน บนซิลิกาเมโซพอร์ซินิก SBA-15 ซึ่งมีโครงสร้างต่างกัน 3 แบบ คือ แบบเส้นใย A แบบแท่ง B และแบบแท่ง C และชนิด MCM-41 จากผลการวิจัยพบว่าซิลิกาเมโซพอร์ซินิก SBA-15 แบบเส้นใยแสดงลักษณะ Breakthrough ที่ดี มีปริมาณการดูดซับ VOCs สูง และมีการคายการดูดซับได้ง่าย ส่วนการดูดซับบนซิลิกาเมโซพอร์ซินิก SBA-15 แบบแท่ง พบว่าในกระบวนการดูดซับนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อยเนื่องจากมีขีดความสามารถในการดูดซับ VOCs ต่ำกว่าซิลิกาเมโซพอร์ซินิก SBA-15 แบบเส้นใย และเมื่อพิจารณาเทียบกับผลการดูดซับของซิลิกาเมโซพอร์ซินิก MCM-41 พบว่าซิลิกาเมโซพอร์ซินิก MCM-41 สามารถดูดซับทั้งเบนซีน และโทลูอินได้ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงจึงทำให้สามารถดูดซับ VOCs ทั้งสองได้ปริมาณสูงตามไปด้วย นอกจากนี้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน คือ ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับก็จะลดต่ำลง

4.1.2 ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นส่วนพหุคูณกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็ว กว่าสารที่มีขนาดใหญ่ เช่น งานวิจัยของ Lee *et al.* (2004) ได้ศึกษาสมดุลและจลนศาสตร์การดูดซับของการควบแน่นแบบกะปิลารี (Capillary condensation) ของไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) บน

ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-48 พบว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-48 มีอัตราการดูดซับไตรคลอโรเอทีลีนสูงกว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ซึ่งจากคุณสมบัติทางกายภาพ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-48 มีโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบหกเหลี่ยมคดเคี้ยว มีขนาดรูพรุน 26.7 อังสตรอม ส่วนซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบหกเหลี่ยมทอตรง มีขนาดรูพรุน 27.2 อังสตรอม จะเห็นได้ว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-48 ซึ่งมีรูพรุนคดเคี้ยวและมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 แต่สามารถดูดซับไตรคลอโรเอทีลีนได้ในอัตราที่เร็วกว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41

4.1.3 เคมีที่ผิวหน้า (Surface chemistry) หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Purnomo *et al.* (2007) ซึ่งได้ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ FDU-12 ซึ่งเป็นซิลิกาเมโซพอร์ชนิด SBA-15 ซึ่งสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ และใช้สารช่วยพองตัวในการขยายรูพรุน เพื่อนำมาใช้ดูดซับ VOCs โดยเปรียบเทียบการดูดซับ VOCs บน FDU-12 บริสุทธิ์ กับ FDU-12 ที่มีหมู่ฟังก์ชันของฟีนิลไตรเมทอกซีไซเลน (Phenyltrimethoxysilane, PTMS) และไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน (Vinyltrimethoxysilane, VTES) พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันในซิลิกาเมโซพอร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ VOCs ได้ เนื่องจากเหตุผลสองประการ ประการแรก คือ กลุ่มฟังก์ชันช่วยเพิ่มการดูดติดผิวของโมเลกุลไอระเหยบนของแข็ง ประการที่สอง คือ กลุ่มฟังก์ชันทำให้รูพรุนและพื้นที่ผิวของของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นตัวดูดซับไอระเหย

4.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

4.2.1 ความสามารถในการละลายของตัวที่ถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

4.2.2 น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะ

เพิ่มขึ้น เช่น Radhika and Palanivelu, (2006) ศึกษาการกำจัดคลอโรฟีนอล (Chlorophenol) ด้วยวิธีการดูดซับออกจากสารละลายโดยใช้ตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ ในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับ โดยมีพาราคลอโรฟีนอล (Parachlorophenol) และไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-Trichlorophenyl) เป็นตัวถูกดูดซับซึ่งเป็นสารอินทรีย์ พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับพาราไตรคลอโรฟีนอลได้สูงกว่าพาราคลอโรฟีนอล เนื่องจากไตรคลอโรฟีนอล มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและขนาดของโมเลกุลใหญ่กว่าพาราคลอโรฟีนอล ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้น การดูดซับจะมากขึ้น เพราะโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการละลายในสารละลายน้อยกว่าโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายในสารละลายถูกดูดซับได้ในปริมาณมากกว่า

4.2.3 ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับความมีขั้วและไม่มีขั้วของทั้งตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะมีค่าสูงเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีความเป็นขั้วเหมือนกัน โดย Lee *et al.* (2004) ทำการทดลองหาค่าสมดุลการดูดซับของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (เบนซีน, โทลูอิน เฮกเซน และ ไชโคลเฮกเซน) และโมเลกุลมีขั้ว (เมทานอล และอะซีโตน) บนซิลิกาเมโซพอร์ซินิก MCM-48 ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค gravimetric พบว่า MCM-48 สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขั้วได้สูงกว่าสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ยกเว้นเบนซีน เนื่องจากพื้นผิวระหว่าง MCM-48 และตัวถูกดูดซับมีความเป็นขั้วแตกต่างกัน

4.2.4 ผลของ pH ถ้า pH ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วขึ้น และดูดซับได้ในปริมาณมากขึ้น จากงานวิจัยของ Ruiying and Jianlong (2007) ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ไอโซเทอรั่ม จากกระบวนการดูดซับคลอโรฟีนอลด้วยเม็ดตะกอนแบบไร้อากาศ (Anaerobic granular sludge) โดยทำการทดลองในช่วง pH เท่ากับ 2.15-11.18 พบว่า ความสามารถในการดูดซับสารประกอบคลอโรฟีนอลของเม็ดตะกอนแบบไร้อากาศขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยการดูดซับคลอโรฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง

4.2.5 ผลของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Chiang *et al.* (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์สามชนิด และกำหนดอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ VOCs บนถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดทำ

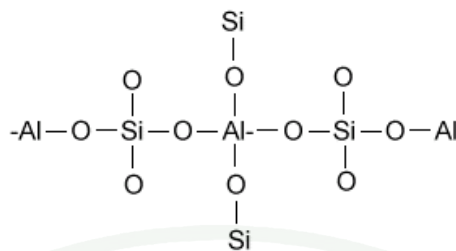
จากวัตถุดิบที่แตกต่างกันทำให้มีขนาดและโครงสร้างรูพรุนที่ต่างกัน VOCs ที่นำมาใช้เป็นถูกตัวดูดซับ ได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เบนซีน (Benzene) และเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 5 - 80 องศาเซลเซียส พบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์ม เบนซีน และเมทิลีนคลอไรด์ได้ โดยเฉพาะเบนซีนถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณรูพรุนขนาดไมโครได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการดูดซับด้วย ที่อุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับเบนซีนบนถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มศักยภาพของการทำปฏิกิริยาระหว่าง เบนซีนและถ่านกัมมันต์

5. ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ หมายถึง สารที่มีอำนาจดูดซับสารอื่นไว้บนผิวได้ ในกระบวนการดูดซับนั้นตัวดูดซับเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นควรเลือกตัวดูดซับให้มีความเหมาะสมกับตัวถูกดูดซับ ตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการดูดซับมีลักษณะและคุณสมบัติเด่นแตกต่างกันไป โดยความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นกับ ลักษณะและความมีขั้วของผิว สามารถแบ่งตัวดูดซับเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะขั้วของผิว คือ ชนิดที่มีขั้ว ได้แก่ ซีโอไลต์ อะลูมินา และซิลิกาเจล เป็นต้น และชนิดไม่มีขั้ว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และตัวดูดซับ เป็นต้น

ซีโอไลต์ (Zeolites)

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) หน่วยย่อยของ ซีโอไลต์ ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน หรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) โดยสร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) อะตอมของซิลิคอน หรืออะลูมิเนียมจะอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่ออกซิเจน เกิดโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น และเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถกำจัดด้วยการอบแห้ง หรือเผาที่ความร้อนสูง



ภาพที่ 3 โครงสร้างซีโอไลต์

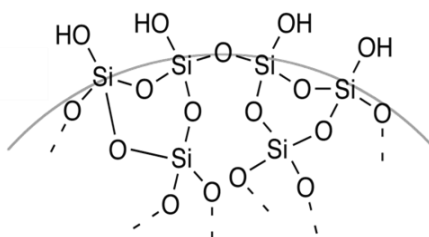
ที่มา: Green Chemistry with Zeolite Catalysts (2011)

อะลูมินา (Alumina)

อะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (Corundum) โครงสร้างของอะลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าว ต้องใช้พลังงานสูง ทำให้อะลูมินามีความแข็งแรง โดยวัสดุที่แข็งแรงมากกว่าอะลูมินา มีเพียงเพชรเท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว อะลูมินายังทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้ดียิ่ง และยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีอีกด้วย

ซิลิกาเจล (Silica gel)

ซิลิกาเจลสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยากำจัดน้ำออกจาก silicic acid หรือปฏิกิริยาระหว่าง sodium silicate กับ sulfuric acid ในทางการค้ามี 2 แบบ คือ ซิลิกาเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และซิลิกาเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซิลิกาเจลแบบที่มีรูพรุนขนาดเล็กนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนประมาณ 20 อังสตรอมและมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 650 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนซิลิกาเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนประมาณ 110 อังสตรอมและมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 450 ตารางเมตรต่อกรัม โดยส่วนใหญ่ซิลิกาเจลถูกใช้เพื่อดูดความชื้นออกจากก๊าซต่างๆ เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกาเจลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) แสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งเหมาะสำหรับการดูดซับน้ำ

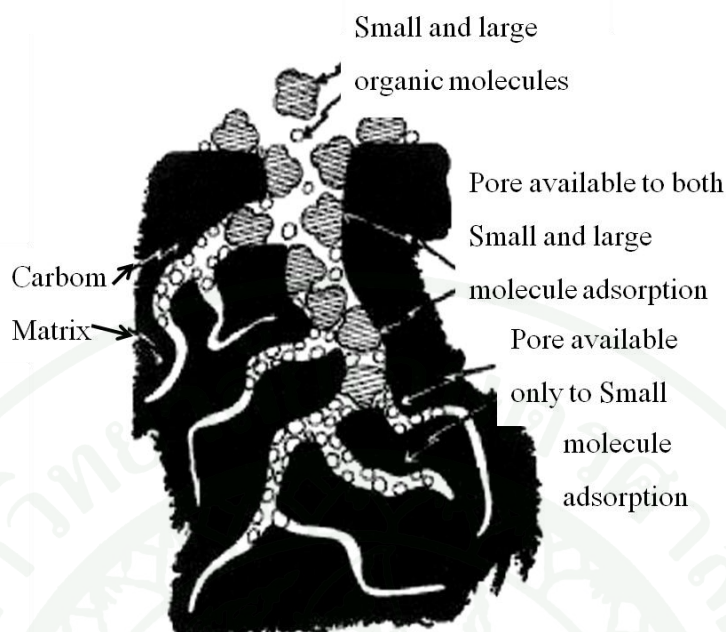


ภาพที่ 4 โครงสร้างซิลิกาเจล

ที่มา: Mons (2009)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุต่างๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่าน ถ่านหิน กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ขางรถยนต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ถูกผลิตขึ้นหลายแบบเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งานที่ต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปพบว่าถ่านกัมมันต์มีอยู่ 4 แบบคือ (1) แบบผงมีขนาดอนุภาคประมาณ 15–25 ไมครอน นิยมใช้เพื่อกำจัดสีออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การผลิตน้ำตาลทรายขาว การผลิตน้ำดื่ม (2) แบบเม็ดมีขนาดอนุภาคประมาณ 4–6 มิลลิเมตร นิยมใช้เพื่อดูดซับก๊าซหรือของเหลว เช่น ใช้ในการฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ ใช้ในการกำจัดซัลเฟอร์ออกจากก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ถ่านหินลิกไนต์ ฯลฯ (3) แบบโมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve) มีความจำเพาะในการดูดซับสูงมากเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ลักษณะทั่วไปอาจเป็นผงหรือเป็นเม็ดก็ได้มักใช้เพื่อดูดซับก๊าซในโตรเจน หรือก๊าซออกซิเจนออกจากอากาศ และ (4) แบบไฟเบอร์ สังเคราะห์ขึ้นโดยเลือกสารตั้งต้นเป็น phenolic resin, polyacrylic resin, viscous rayon ลักษณะทั่วไปคล้ายตาข่ายที่มีช่องว่างกว้างประมาณ 7–15 ไมครอน นิยมใช้ผลิตหน้ากากหรือใช้ในกระบวนการนำสารละลายที่ใช้แล้ว กลับใช้ใหม่ แบบจำลองโครงสร้างภายในถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างภายในถ่านกัมมันต์

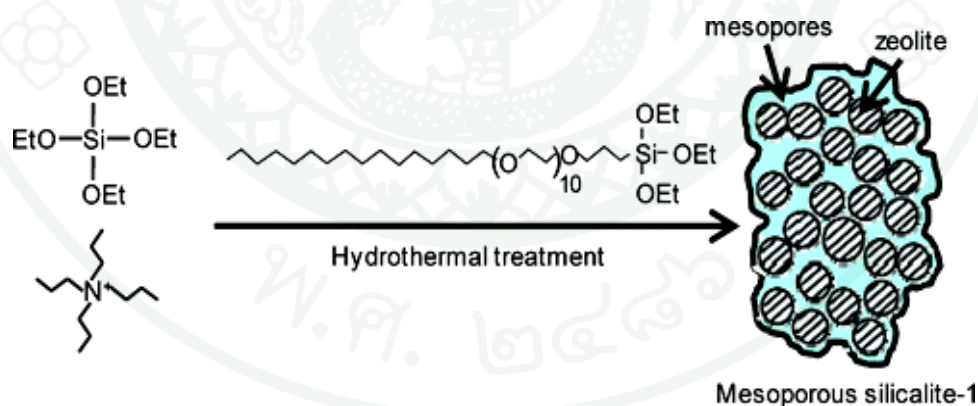
ที่มา: บุญรักษ์ (2554)

6. การดูดซับโดยใช้สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์

ในการศึกษาการดูดซับ มีปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เช่น ขนาดพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ อุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ ความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับมวลสารที่มีอยู่ในก๊าซ และชนิดของตัวดูดซับ เป็นต้น ตัวดูดซับเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งเนื่องจากถ้าสามารถเลือกตัวดูดซับได้เหมาะสมกระบวนการดูดซับก็จะมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้นำสารคอมโพสิตซิลิกาซีโอไลต์ MSZ-1, ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ MCM-41 มาใช้เป็นตัวดูดซับ โดยแต่ละตัวมีคุณสมบัติและตัวอย่างการนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับดังนี้

6.1 การดูดซับสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 (Mesoporous silica zeolite-1)

MSZ-1 เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตซีโอไลต์ ซึ่งมีลักษณะรูพรุนแบบเฮกซะโกนอลกระจายอยู่ในโครงสร้าง ในปัจจุบันมีการนำสารจำพวกซีโอไลต์มาพัฒนาทางด้านการเรียงตัวของรูพรุนที่มีระเบียบ และการทนต่อความร้อนของโครงสร้าง (Zhuo *et al.*, 2005) โดยทั่วไปซีโอไลต์จะมีคุณสมบัติทางตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี เนื่องจากมีโครงสร้างของอะลูมิเนียมซิลิเกต มีขนาดรูพรุน และการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ แต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กเช่นเดียวกับกลุ่มสารเมโซพอร์ที่จะมีผนังของรูพรุนเป็นแบบอัญรูป (Amorphous) ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดลดลง และทนต่อความร้อนลดลง นักวิจัยจึงได้ให้ความสนใจในการพัฒนาโครงสร้างของกลุ่มสารทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยการสังเคราะห์เมโซพอร์รัสอะลูมิเนียมซิลิเกตผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจากการใช้ซีโอไลต์เป็นสารตั้งต้น ซึ่งซีโอไลต์ที่ประกอบด้วยเมโซพอร์นั้นขนาดผลึกของซีโอไลต์ที่ได้จะขึ้นกับการเลือกใช้สารแม่แบบ ตัวอย่างสารแม่แบบที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ เช่น ไดอะมิโนเฮกเซน (Diaminohexane), เตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Tetrapropyl ammonium bromide) และ เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetraethylammonium hydroxide) เป็นต้น (Inaba and Hamad, 1999, Chareonpanich *et al.*, 2004; Gopal and Smirniotis, 2001) โครงสร้างของซิลิกาเมโซพอร์-ซีโอไลต์ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างของซิลิกาเมโซพอร์-ซีโอไลต์

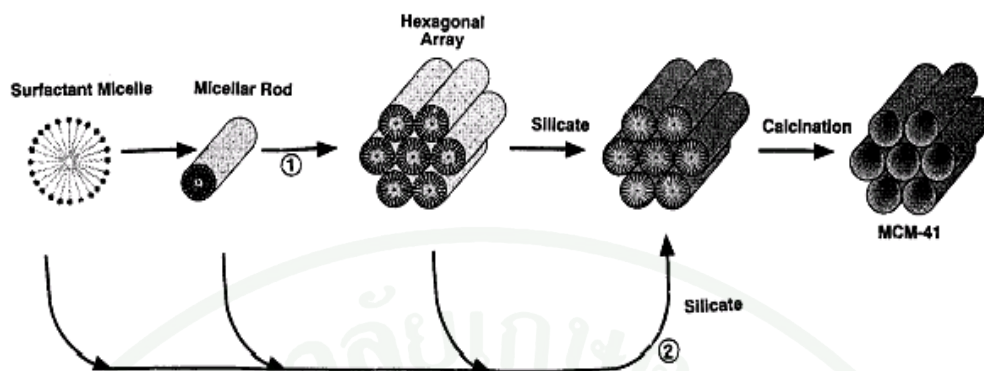
ที่มา: Rino *et al.* (2010)

เนื่องจากกลุ่มสารซิลิกาเมโซพอร์-ซีโอไลต์ได้รับการปรับปรุงในการถ่ายโอนมวลสารที่จำกัดในรูพรุนขนาดเล็กของซีโอไลต์ให้ดีขึ้น และมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่มากบนผลึกของซีโอไลต์ (Harmann, 2004, Yinyong *et al.*, 2008, Christina *et al.*, 2007) ทำให้มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ กลุ่มสารซิลิกาเมโซพอร์-ซีโอไลต์ จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัย เพื่อนำไปศึกษาและพัฒนาทั้งทางด้านการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือการใช้เป็นตัวดูดซับ

Lin *et al.* (2010) ศึกษาการดูดซับของสารไนโตรซามีน (Nitrosamines) บนตัวดูดซับ เมโซพอร์-ซีโอไลต์ (MS-y) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบผสมของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยสารที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยรูพรุน 2 ขนาด เพื่อทดสอบการดูดซับสารไนโตรซามีน โดยการใช้ Fixed-bed microreactor ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และใช้สารละลายไนโตรซามีนเริ่มต้น 2 ไมโครลิตร เปรียบเทียบกับการดูดซับโดยใช้ MCM-41 เป็นตัวดูดซับ ซึ่งพบว่าค่าการดูดซับของ MS-y มีค่าสูงกว่าการใช้ MCM-41 เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากโครงสร้างของ MS-y ที่ประกอบไปด้วยรูพรุน 2 ขนาดและโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าของรูพรุนจะช่วยเพิ่มค่าการดูดซับให้มีค่าสูงกว่าการใช้ MCM-41 ที่มีรูพรุนขนาดเดียวในโครงสร้าง

6.2 การดูดซับโดยซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 (Mobile Crystalline Material-41)

MCM-1 เป็นวัสดุรูพรุนจำพวกซิลิกาเมโซพอร์ ซึ่งเป็นกลุ่มสารที่ได้รับความสนใจจากกลุ่มนักวิจัยเนื่องจากลักษณะเด่นของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ประกอบด้วยโครงสร้างรูพรุน แบบหกเหลี่ยมที่เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ เกิดขึ้นได้เนื่องจากซิลิกเกตที่เดิมลงไปรอบๆ แท่งไมเซลล์ (Micelle) ที่จัดเรียงตัวกันเป็นแบบ Hexagonal โดยเกิดไฮโดรไลซิส-คอนเดนเซชัน (Hydrolysis condensation) และพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) รอบๆ ไมเซลล์ เมื่อกำจัดไมเซลล์ออกจึงทำให้เกิดรูพรุนดังกล่าว ซึ่งแสดงในภาพที่ 7 โดยมีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 1.5 ถึง 10 นาโนเมตร ขึ้นอยู่กับวิธีในการสังเคราะห์ (Kresge *et al.*, 1992) นอกจากนี้ยังมีการกระจายตัวของรูพรุนในช่วงที่แคบ และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูง คืออยู่ในช่วง 600 ถึง 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และมีสมบัติทนต่อความร้อนได้ดี ด้วยลักษณะเด่นดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุแลกเปลี่ยนไอออน และวัสดุดูดซับ (Parasuraman *et al.*, 2001) ซึ่งซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ถูกนำมาใช้เป็นตัวรองรับในการดูดซับอย่างแพร่หลาย เช่น นำมาใช้เป็นตัวกักเก็บสารในระบบ หรือใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสารจำพวกสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นต้น



ภาพที่ 7 แสดงการเกิดโครงสร้างของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41

ที่มา: Kresge *et al.* (1992)

สำหรับการใช้งานเป็นตัวดูดซับ พบว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีความสามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride) และเปอร์คลอโรเอทิลีน (Perchloroethylene) ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นตัวทำลายที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสี และซักแห้ง และสารไฮโดรคาร์บอนกลุ่มอะโรมาติก เช่น เบนซีน โทลูอิน ไซลีน ซึ่งใช้เป็นตัวทำลายในหมึกพิมพ์และเรซิน สารเหล่านี้สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิห้อง มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ตัวอย่างงานวิจัยที่นำซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มาใช้ในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมีดังต่อไปนี้

Tung *et al.* (2006) ศึกษาการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ โดยใช้ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 เป็นตัวดูดซับ ซึ่งทดลองใช้ดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ที่มีขนาดโมเลกุลที่หลากหลายตั้งแต่ C_2 - C_{12} พบว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับ VOCs ที่ C_3 - C_{12} ได้ โดยสามารถดูดซับโมเลกุลเล็กๆของสารประกอบ C_3 - C_7 ได้ปริมาณเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการดูดซับสารประกอบที่มีขนาดใหญ่ในช่วง C_8 - C_{12}

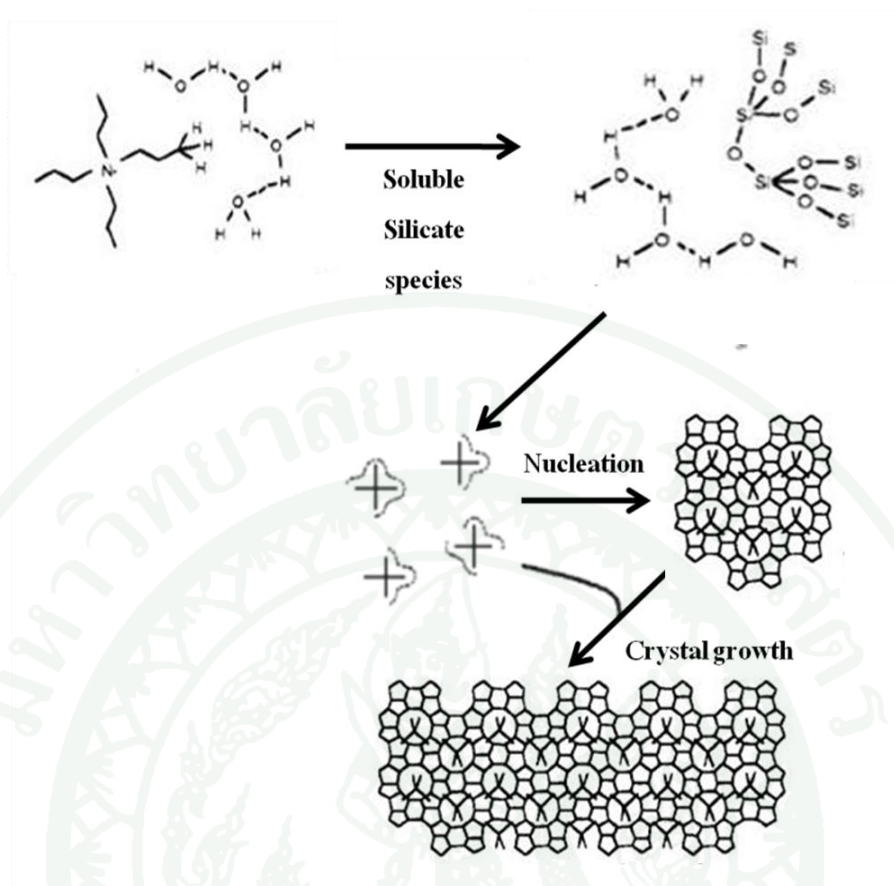
Kwong *et al.* (2008) ศึกษาการดูดซับโทลูอินบนตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ NaY, NaX และ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ซึ่งลักษณะของตัวดูดซับทั้งสามจะแตกต่างกัน คือ NaY เป็นซีโอไลต์

แบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic zeolite) ซึ่งคุณสมบัติของ NaY และ NaX จะมีลักษณะคล้ายๆกัน ส่วนซีลิคาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นกรดสูง โดยโทลูอินที่ใช้ในการดูดซับมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 1.5 ppm และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ 25 องศาเซลเซียส โดยผสมโอโซนในขั้นตอนการดูดซับ พบว่าซีลิคาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ให้ค่าการดูดซับที่ดีที่สุด รองลงมาคือ NaY และ NaX ตามลำดับ คาดว่าเนื่องมาจากค่าความแรงของกรดบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับส่งผลต่อผลการดูดซับ โดยจะเปลี่ยนโอโซนไปเป็นออกซิเจนอะตอม แล้วจึงทำปฏิกิริยาการดูดซับกับโทลูอิน

6.3 การดูดซับโดยใช้สารประกอบซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (Zeolite Socony Mobil-5)

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) คือประกอบด้วย ซิลิกอนอะลูมิเนียม และออกซิเจน 4 อะตอม โดยซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ นิยมใช้ในการดูดซับความชื้น กลิ่น เพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์รวมทั้งแยกไอออนของแอมโมเนียมหรือธาตุของโลหะหนักออกจากน้ำ และซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งมีความจำเพาะในการดูดซับสูงมาก สามารถดูดซับโมเลกุลสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นสารที่ไม่มีพิษภัยหรือสารที่มีพิษต่างๆที่อาจก่อให้เกิดภาวะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม (Gao *et al.*, 2009) ซีโอไลต์มีมากกว่า 600 ชนิด (Clean Air Technology Center, 1998) สามารถแบ่งตามกลุ่มโครงสร้างได้ 40 ชนิด โดยความแตกต่างของโครงสร้างมีผลต่อสมบัติต่างๆของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง และความแข็งแรงของพันธะ การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก โดยสามารถปรับปรุงหรือพัฒนาโครงสร้าง เช่น การผสมโลหะเข้าไปในซีโอไลต์เพื่อปรับปรุงโครงสร้าง และใช้ในกระบวนการดูดซับ VOCs (Baek *et al.*, 2004) ซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป

ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ชนิดหนึ่งที่ใช้กันแพร่หลาย ถูกพัฒนาโดยกลุ่มนักวิจัยของ Mobil Oil ZSM-5 จะเป็นซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ประกอบไปด้วยอัตราส่วนของซิลิกาสูง และอะลูมินาต่ำ (Prashant *et al.*, 1997) เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กมีความพรุนสูง และมีขนาดของรูพรุนที่สม่ำเสมอ สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและสามารถคัดแยกโมเลกุลได้ โครงสร้างซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 แสดงดังภาพที่ 8 จากการที่ซีโอไลต์มีคุณสมบัติเหมาะแก่การดูดซับ จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับขึ้นจำนวนมาก ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 8 แสดงการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

ที่มา: Erica *et al.* (2006)

Aguado *et al.* (2004) ศึกษาการกำจัดมลพิษในอากาศ โดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ พบว่า ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศได้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ โดยสามารถแยกสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายซึ่งได้แก่ เฮกเซน โฟร์มาดีไฮด์ และ เบนซีน ที่ผสมอยู่ในอากาศ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในรูพรุนและการยับยั้งอากาศที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ

Khan *et al.* (2000) ศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิคการดูดซับ และการแยกสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย การดูดซับเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่มีราคาค่อนข้างถูก แต่มีข้อจำกัด เช่น อันตรายจากการติดไฟ และมี

ความสามารถในการดูดซับต่ำ เป็นต้น แม้ว่าซีโอไลต์จะราคาสูงกว่า แต่มีประโยชน์หลากหลาย เนื่องจากไม่ติดไฟ มีการกระจายของรูพรุนที่เป็นระเบียบ ผู้วิจัยรายงานว่าเทคนิคการดูดซับ เป็นเทคนิคที่ดี ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับสารละลายหลายชนิด เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

Pires *et al.* (2001) ศึกษาการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ ไตรคลอโรอีเทน (Trichloroethane) คลอโรเอทิลีน (Chloroethylene) เมทานอล (Methanol) และโพรพานอล (Propanol) บนซีโอไลต์ Y และดินเหนียว ซึ่งมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน พบว่าลักษณะกระบวนการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายแตกต่างกัน โดยไอโซเทอร์มการดูดซับถูกวิเคราะห์ด้วยสมการ Langmuir และ Dubinin-Astakhov พบว่าซีโอไลต์ซึ่งเป็นของแข็งรูพรุนขนาดไมโครพอร์ สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดี และดินเหนียวซึ่งมีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ก็มีศักยภาพที่น่าสนใจในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเช่นกัน

จากข้อมูลในขั้นตอนการทำเอกสารสำรวจ พบว่าโครงสร้างและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยแต่ละขนาดและโครงสร้างจะให้ผลการดูดซับของตัวดูดซับที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเตรียมตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ เมทานอล เอทานอล ฟีนอล เบนซีน ไซลีน โทลูอิน และเฮกเซน เปรียบเทียบกัน ในกระบวนการการดูดซับนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกทำการควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยการปรับอุณหภูมิในการระเหยที่ 40 เซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับทั้งสามชนิดดังกล่าวข้างต้น จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลการดูดซับ ส่วนที่สองทำการควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยการปรับอุณหภูมิในการระเหยที่ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 เซลเซียส โดยใช้ MSZ-1 เป็นตัวดูดซับ เพื่อศึกษาลักษณะการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบน MSZ-1 ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปใช้พัฒนาตัวดูดซับเชิงอุตสาหกรรม เพื่อลดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการทำลายสภาพแวดล้อมแล้ว ยังสามารถลดอันตรายที่จะเกิดต่อมนุษย์อีกด้วย

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาความสามารถในดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ (MSZ-1) ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีรายละเอียดของอุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการในงานวิจัยดังนี้

สารเคมีและอุปกรณ์

1. สารเคมี

1.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับ

- 1.1.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, 99% purity, MERCK)
- 1.1.2 สารละลายกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄, 95-98% purity, J.T.Baker)
- 1.1.3 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl, 36.5-38% purity, J.T.Baker)
- 1.1.4 อะลูมิเนียมไนเตรด (Al(NO₃)₃·9H₂O, 98% purity, UNILAB)
- 1.1.5 โซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃, 32% SiO₂, PQ)
- 1.1.6 ซิทิลไตรเมทิลอะลูมิเนียมโบรไมด์ (CTAB, CH₃(CH₂)₁₅N(CH₃)₃Br, 98% purity, UNILAB)
- 1.1.7 ซิทิลไตรเมทิลอะลูมิเนียมคลอไรด์ (CTAC, CH₃(CH₂)₁₅N(CH₃)₃Cl)
- 1.1.8 เตตระเอทิลอโทซิลิเกต (TEOS, Si(OC₂H₅)₄, 98% purity, ALDRICH)
- 1.1.9 เตตระโปรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (TPABr, C₁₂H₂₈BrN, 98% purity, Fluka)
- 1.1.10 น้ำกลั่น

1.2 สารเคมีดูดซับในกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

- 1.2.1 เมทานอล (CH₃OH, 100% purity, J.T.Baker)
- 1.2.2 เอทานอล (C₂H₅O, 100% purity, Merck)
- 1.2.3 เฮกเซน (C₆H₁₄, 95% purity, UNIVAR)

- 1.2.4 เบนซีน (C_6H_6 , 99.7% purity, Merck)
- 1.2.5 โทลูอิน (C_7H_8 , 99.94% purity, Fisher Scientific)
- 1.2.6 ไชลีน (C_8H_{10} , 99.5% purity, Fisher Scientific)
- 1.2.7 โพรพานอล (C_3H_8O , 100% purity, J.T.Baker)
- 1.2.8 ออกทานอล ($C_8H_{18}O$, 99.5% purity, UNILAB)
- 1.2.9 สารละลายมาตรฐาน (Standard solutions)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอน จึงใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย 2 คอลัมน์ โดยแต่ละคอลัมน์สามารถวิเคราะห์สารได้ต่างกัน (รายละเอียดของเครื่องมือจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2) สารที่ต้องการวิเคราะห์มีตั้งแต่ C_1 - C_8 จึงต้องเตรียมสารละลายมาตรฐาน 2 ชุด ชุดที่หนึ่งเตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีขนาดสารอยู่ในช่วง C_1 - C_4 ได้แก่ สารละลายเมทานอล กับสารละลายเอทานอล โดยใช้สารละลายโพรพานอลเป็นตัวปรับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ชุดที่สองเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารที่มีขนาด C_5 - C_8 ได้แก่ สารละลายเบนซีน สารละลายโทลูอิน, สารละลายไชลีน, และสารละลายเฮกเซน โดยใช้สารละลายออกทานอลเป็นตัวปรับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับและกระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีดังต่อไปนี้

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับ

- 2.1.1 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, WTB binder, E.53)
- 2.1.2 เตาเผา (Furnace ELF 10/6, Carbolite)
- 2.1.3 Autoclave
- 2.1.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Digital hot plate and stirrer, Schott, SLR)
- 2.1.5 เครื่องวัด pH (pH meter, Schott)

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ

2.2.1 Mass flow controller (8500 MC-0-1-1 Model, Kofloc)

2.2.2 Heating tape (220V 250W, Silheater)

2.2.3 Thermocouple (K type)

2.2.4 Temperature controller (120-R/E, Shinho)

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

รายละเอียดเครื่องมือวิเคราะห์ตัวดูดซับ และเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกระบวนการดูดซับ มีดังนี้

3.1 เครื่องมือวิเคราะห์ตัวดูดซับ

3.1.1 X-Ray Diffraction (XRD)

3.1.2 Nitrogen Sorption Analysis

3.1.3 Transmission electron microscopy (JEOL JEM-2010 microscope with the acceleration voltage of 200 kV)

3.1.4 Fourier-transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (Spectrum GX FT-IR System (PERKIN ELMER))

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ในกระบวนการดูดซับ

3.2.1 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph, GC) เพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกระบวนการดูดซับ โดยใช้ตัวตรวจจับชนิด Flame ionized detector (FID, รุ่น GC-8A บริษัท Shimadzu) ซึ่งประกอบด้วยคอลัมน์ชนิด Porapak-Q ซึ่งใช้วิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอน C_1 - C_4 และ OV-1 ซึ่งใช้วิเคราะห์สารประกอบไฮโดรคาร์บอน C_5 - C_{15}

3.2.2 Gas syringes (1002LTN Gastight Syringe, Hamilton and A-2 type Gastight Syringe, PS) ใช้เก็บสารตัวอย่างซึ่งมีลักษณะเป็นแก๊สที่ต้องการวิเคราะห์และนำไปฉีดที่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.2.3 Liquid syringe (80377 Microliter, Hamilton) ใช้เก็บสารตัวอย่างซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวที่ต้องการวิเคราะห์และนำไปฉีดที่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับ VOCs ของตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ เมโซพอร์ (MSZ-1) ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ซึ่งตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction และ Quantachrome Autosorb-1C โดยใช้เทคนิค Nitrogen sorption analyze หลังจากนั้นจึงนำไปใช้ในกระบวนการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1. ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวดูดซับ

1.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

1.1.1 ชั่งเตตระโพรฟิเลียมโมเนียมโบรไมด์ (TPABr) 0.74 กรัม นำมาผสมกับน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.1.2 ชั่งอลูมิเนียมไนเตรท (Aluminium nitrate) 1.69 กรัม นำมาผสมกับน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วกวนจนกระทั่งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.1.3 ชั่งโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) 16.87 กรัม นำมาผสมกับน้ำกลั่น 23 มิลลิลิตร แล้วกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.1.4 นำสารละลาย TPABr มาปรับ pH เป็น 10.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นหยดสารละลายอูมิเนียมในเตรด และโซเดียมซัลเฟต ลงในสารละลาย TPABr พร้อมทั้งควบคุม pH ให้คงที่ที่ 10.5 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที

1.1.5 จากนั้นนำสารละลายที่ได้เข้าเครื่อง autoclave โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

1.1.6 นำสารที่ได้มากรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลาง แล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำสารที่อบแห้งแล้วไปคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

1.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41

1.2.1 ชั่งซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (CTAC) 25.28 กรัม นำมาผสมกับน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วกวนจนกระทั่งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.2.2 ชั่งโซเดียมซัลเฟต 12.36 กรัม นำมาผสมกับน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร แล้วกวนจนกระทั่งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.2.3 นำสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่เตรียมได้มาหยดลงในสารละลาย CTAC พร้อมทั้งกวนและควบคุม pH ให้คงที่ที่ 10.5 จากนั้นกวนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วปรับ pH เป็น 11.25 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.2.4 จากนั้นนำสารละลายที่ได้เข้าเครื่อง autoclave โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.2.5 นำสารที่ได้มากรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลางแล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำสารที่อบแห้งแล้วไปคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

1.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1

1.3.1 ชั่งซีทีแอลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) 4.80 กรัม นำมาผสมกับน้ำ 30 มิลลิลิตร แล้วกวนจนกระทั่งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.3.2 ชั่งอลูมิเนียมไนเตรด 1.24 กรัม นำมาผสมกับน้ำ 20 มิลลิลิตร แล้วกวนจนกระทั่งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน หยดสารละลายอะลูมิเนียมไนเตรด ลงในสารละลาย CTAB ที่เตรียมไว้ พร้อมทั้งกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.3.3 ชั่งเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) มา 14 กรัม แล้วหยดลงในสารละลายที่ได้ข้างต้น แล้วกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปรับ pH เป็น 11.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วกวนเป็นเวลานาน 5 ชั่วโมง

1.3.4 ชั่งไคโตซาน 0.1 กรัม นำมาผสมกับน้ำ 30 มิลลิลิตร หยดกรดอะซิติกปริมาณ 5 มิลลิลิตร กวนจนไคโตซานละลายหมด จากนั้นนำไปหยดลงในสารที่กวนทิ้งไว้ ปรับ pH เป็น 11.5 พร้อมทั้งกวนเป็นเวลา 30 นาที

1.3.5 จากนั้นนำสารละลายที่ได้นำเข้าเครื่อง autoclave โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3.6 นำสารที่ได้มากรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสถานะเป็นกลาง แล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำสารที่อบแห้งแล้วไปคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

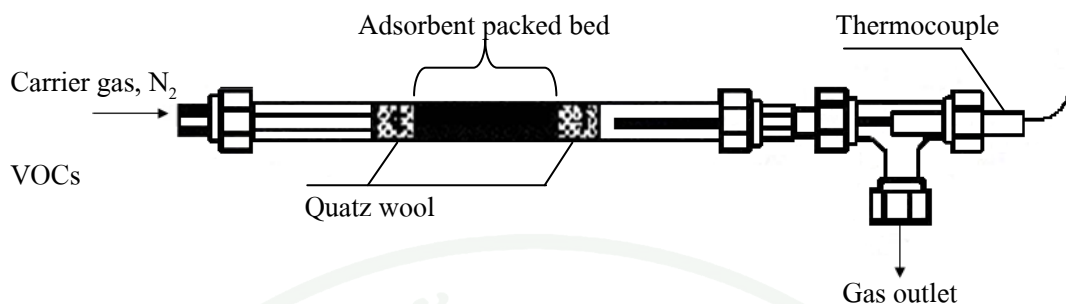
2. ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับ

2.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยการบรรจุตัวดูดซับปริมาณ 1.5 กรัมในท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{4}$ นิ้ว หนา 0.89 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ซึ่งใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ ดังภาพที่ 9 และดำเนินการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และใช้เครื่องวัดและควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลดังภาพที่ 10 เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 30 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่าย ก่อนและหลังกระบวนการดูดซับ ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph, GC) ที่ต่อกับคอลัมน์ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อทดสอบหาปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ในระหว่างการดำเนินการดูดซับ

2.2 การหาปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1

ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 โดยใช้ท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $\frac{1}{4}$ นิ้ว หนา 0.89 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ซึ่งใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ดังภาพที่ 9 และการดำเนินการดูดซับ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 40 องศาเซลเซียส และควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ และใช้เครื่องวัดและควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลดังภาพที่ 10 เพื่อกำหนดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 30 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่าย ก่อนและหลังกระบวนการดูดซับ ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph, GC) ที่ต่อกับคอลัมน์ Flame Ionization Detector (FID) เพื่อทดสอบหาปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในระหว่างการดำเนินการดูดซับ



ภาพที่ 9 แผนภาพการบรรจุตัวดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์



ภาพที่ 10 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับ รายละเอียดของการใช้เครื่องมือต่างๆในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

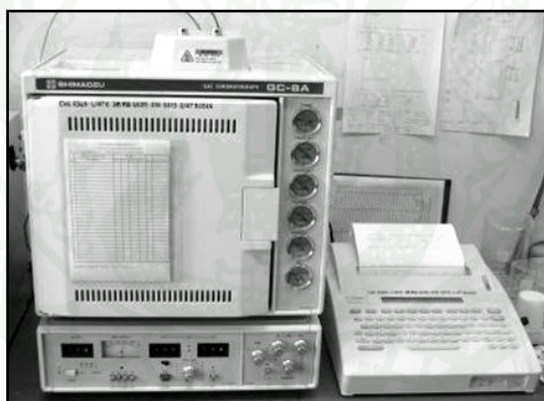
3.1 การวิเคราะห์ตัวดูดซับ

เมื่อสังเคราะห์สารทั้งสามชนิดได้แล้ว จึงนำไปวิเคราะห์เพื่อยืนยันโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อยืนยันโครงสร้างของตัวดูดซับแต่ละชนิด โดยใช้ Low-angle X-Ray Diffraction วิเคราะห์โครงสร้างของเมโซพอร์ซิลิกา-ซีโอไลต์ คอมโพสิต (MSZ-1) และซิลิ

กาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 เนื่องจากสารทั้งสองชนิดนี้เป็นสารที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน และใช้ Wide-angle X-Ray Diffraction วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เนื่องจากเป็นสารที่มีโครงสร้างแบบผลึก จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างรูพรุน พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน และปริมาณของตัวดูดซับด้วยวิธี Nitrogen sorption โดยใช้เครื่อง Quantachrome Autosorb-1C แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่สารทั้งสามชนิด ด้วยเครื่อง Fourier-transform Infrared (FTIR) Spectroscopy และวิเคราะห์ด้วย Transmission electron microscopy เพื่อศึกษารูปร่างลักษณะ และโครงสร้างรูพรุน

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกดูดซับสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC) แสดงดังภาพที่ 11 โดยใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นแก๊สตัวนำพา ใช้ไฮโดรเจนและอากาศเป็นแก๊สเชื้อเพลิงใน FID



ภาพที่ 11 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC) และ โครมาโตแพค คาด้า โปรเซสเซอร์

สภาวะที่ทำการตรวจสอบไฮโดรคาร์บอน C_1 - C_4 คือ

- | | | |
|--------------------------|-----|-------------------------------|
| - ความดันของแก๊สที่ทดสอบ | 200 | kPa (2 kg/cm^2) |
| - ความดันของแก๊สฮีเลียม | 100 | kPa (1 kg/cm^2) |
| - ความดันของแก๊สไฮโดรเจน | 60 | kPa (0.6 kg/cm^2) |
| - ความดันอากาศ | 50 | kPa (0.5 kg/cm^2) |

- อุณหภูมิภายในเครื่องตรวจสอบ	180	องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิขาเข้า	150	องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิขาออก	150	องศาเซลเซียส

สภาวะที่ทำการตรวจสอบไฮโดรคาร์บอน C_5-C_{15} คือ

- ความดันของก๊าซที่ทดสอบ	200	kPa (2 kg/cm^2)
- ความดันของก๊าซฮีเลียม	100	kPa (1 kg/cm^2)
- ความดันของก๊าซไฮโดรเจน	60	kPa (0.6 kg/cm^2)
- ความดันอากาศ	50	kPa (0.5 kg/cm^2)
- อุณหภูมิภายในเครื่องตรวจสอบ	180	องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิขาเข้า	120	องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิขาออก	120	องศาเซลเซียส

ข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำมาประมวลผลเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของตัวดูดซับแต่ละตัว และหาปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกดูดซับบนสารประกอบคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ (MSZ-1)

ผลและวิจารณ์

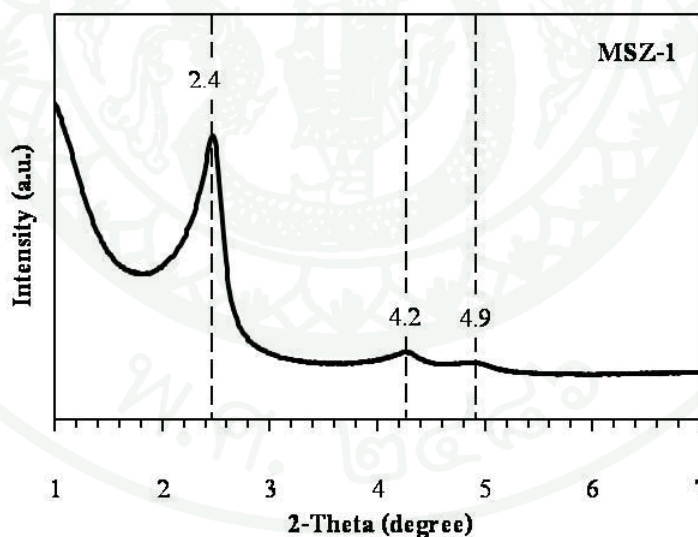
งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของตัวดูดซับที่ได้ พร้อมทั้งเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายกับตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ทั้งนี้เนื่องจาก MSZ-1 นั้นมีองค์ประกอบของอะลูมิโนซิลิเกตซีโอไลต์ และซิลิกาเมโซพอร์ ซึ่งมีลักษณะรูพรุนเป็นแบบเฮกซะโกนอล รูพรุนขนาดกลาง และมีพื้นที่ผิวสูงซึ่งคาดว่าจะมีศักยภาพในการดูดซับ VOCs ที่ทำการศึกษา และเพื่อศึกษาผลเปรียบเทียบจึงเลือกซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบที่มีขั้วได้ จากการมีอะลูมินัมในโครงสร้าง และใช้ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มาเปรียบเทียบผลการดูดซับ การทดลองเพื่อทดสอบความสามารถการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย แบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือ ส่วนแรกทำการศึกษาการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Maximum adsorption capacity) ของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ เมทานอล เอทานอล เบนซีน ไซลีน โทลูอิน และเฮกเซน บนตัวดูดซับสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และอัตราการไหลของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ 30 มิลลิลิตรต่อนาที และส่วนที่สองศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ เมทานอล เอทานอล เบนซีน ไซลีน โทลูอิน และเฮกเซน บนตัวดูดซับสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ที่ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่างกันโดยเพิ่มอัตราการระเหยจากที่ใช้ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ข้อมูลส่วนต่อไปนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของตัวดูดซับทั้งสามตามลำดับ

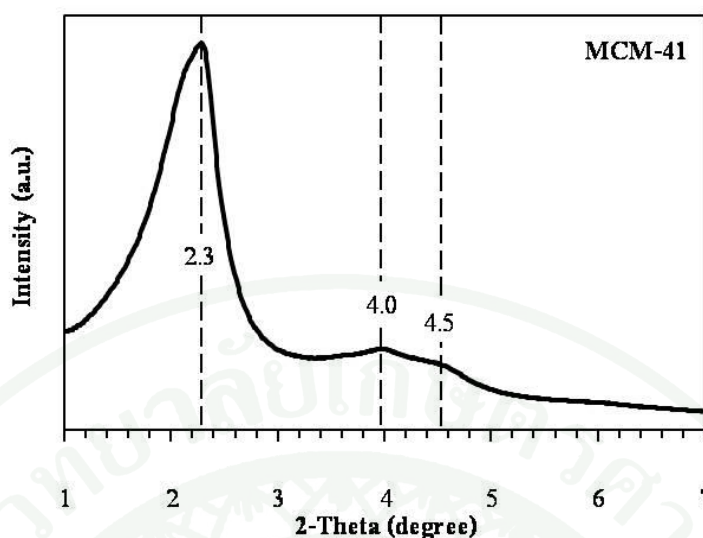
1. ข้อมูลเบื้องต้นของตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ (MSZ-1) ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction (XRD) Spectroscopy, เครื่อง Quantachrome Autosorb-1C (N_2 -sorption analysis), เครื่อง Fourier-transform Infrared (FTIR) Spectroscopy และเครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM) มีรายละเอียดดังนี้

จากการสังเคราะห์ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 แล้วนำไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray Diffraction เนื่องจากตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีโครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป โดยสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 เป็นสารที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน จึงทำการวิเคราะห์ด้วย low angle X-ray diffraction โดยตำแหน่งพิก (peak) จะอยู่ในช่วง 2θ เท่ากับ 1-7



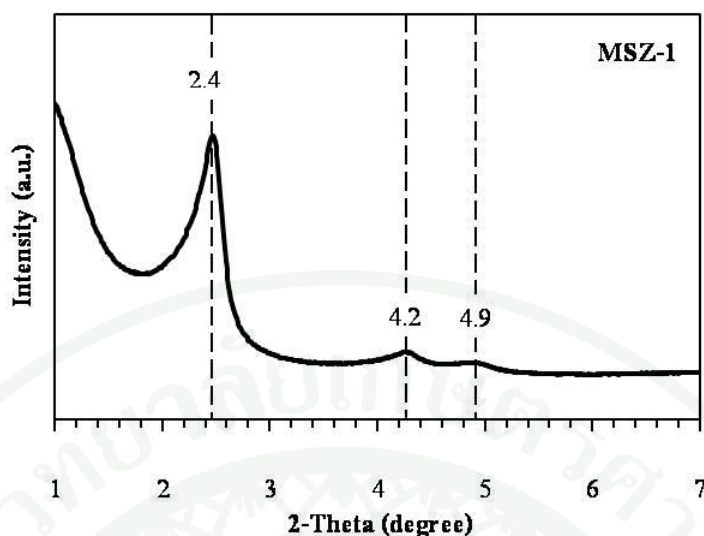
ภาพที่ 12 XRD pattern ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ที่สังเคราะห์ได้



ภาพที่ 13 XRD pattern ของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ที่สังเคราะห์ได้

ผลการวิเคราะห์สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ดังภาพที่ 12 ซึ่งพบพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2.4, 4.2 และ 4.8 ส่วนผลการวิเคราะห์ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 แสดงดังภาพที่ 13 โดยมีพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2.3, 4.0 และ 4.5 ส่วน จากการวิเคราะห์พบว่า รูปแบบกราฟที่ได้เป็นไปตาม pattern ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kruk *et al.* (1999) ซึ่งศึกษาลักษณะเฉพาะของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 โดยใช้เทคนิค XRD และ N_2 adsorption จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2.4, 3.8 และ 4.2 ซึ่งมีตำแหน่งใกล้เคียงกับซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้

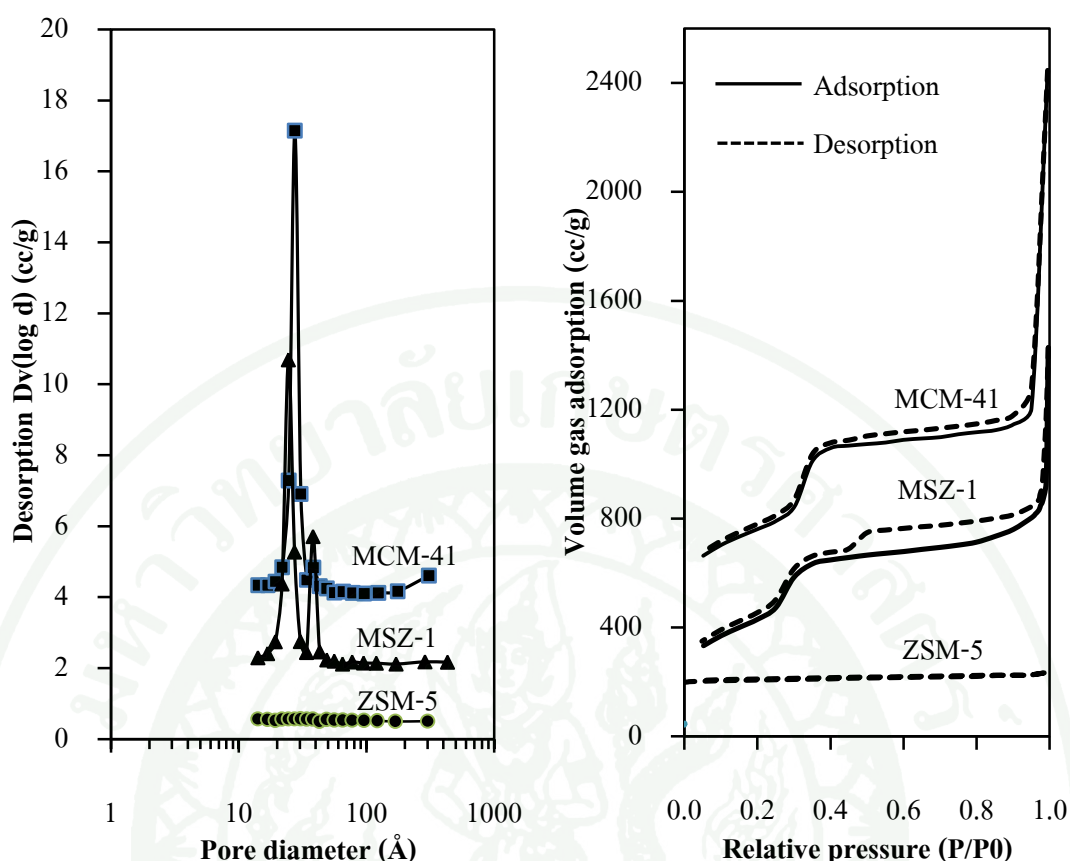
เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารที่มีโครงสร้างที่เป็นผลึก จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วย wide angle X-ray diffraction โดยวิเคราะห์ค่า 2θ ในช่วง 5-50 ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 14 โดยพบพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.9, 23.0 และ 44.8 ซึ่งรูปแบบกราฟที่ได้เป็นไปตาม pattern ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อ้างอิงตามผลงานวิจัยของ Panpa and Jinawath (2009) ซึ่งศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิเกตจากเถ้าแกลบ พบว่าการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD พบพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 8.0, 23 และ 45.1 ซึ่งมีตำแหน่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 14 XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้

จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD สามารถสรุปได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้ คือ สารคอมโพสิต ซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยลำดับ

หลังจากยืนยันโครงสร้างของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 แล้วจึงใช้เครื่อง Quantachrome Autosorb-1C ในการวิเคราะห์หาขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุน ดังแสดงผลภาพที่ 15 ซึ่งประกอบด้วยกราฟกระจายขนาดของรูพรุนและไอโซเทอมการดูดซับในโครเจนของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Zhao *et al.*, 2005 และ Du and Wu, 2007) พบว่าซีโอไลต์มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงไมโครพอร์ คือ มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร ซึ่งผลการวิเคราะห์ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาโดย ZSM-5 มีรูพรุนขนาด 0.50 นาโนเมตร ปริมาตรรูพรุนรวม 0.13 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 179 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับผลของไอโซเทอมการดูดซับในโครเจนของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ซึ่งเป็นไอโซเทอมชนิดที่ I เนื่องจากซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีความพรุนสูงแต่มีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ ส่งผลให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้นและเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลและคงที่หลังจากนั้น (จตุพร และนุรักษ์, 2547)



ภาพที่ 15 การกระจายขนาดของรูพรุนและไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนของ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1

พบว่า ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีไอโซเทอมชนิด IV แสดงให้เห็นว่ามีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์ ซึ่งมีขนาดระหว่าง 2 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของรูพรุน มาตรฐานของ MCM-41 โดยมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาด 2.74 นาโนเมตร ซึ่งรูพรุนนี้เกิดจากโครงสร้างไมเซลล์ของ ซิทิลไตรเมทิลอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Cetyltrimethylammonium chloride, CTAC) ที่ถูกกำจัดไป ระหว่างกระบวนการ Calcination ปริมาตรรูพรุนรวม 3.16 มิลลิตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 1,400 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 นั้นจะเห็นได้ว่า Hysteresis loop มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งความดันสัมพัทธ์เท่ากับ 0.44 การเปลี่ยนแปลงขนาดของ Hysteresis loop นี้แสดงให้เห็นว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีขนาดของรูพรุนสองขนาดในโครงสร้าง ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของรูพรุนที่ยืนยันขนาดของรูพรุนสองขนาด ได้แก่ 2.43 และ 3.81 นาโนเมตร โดยพบการกระจายขนาดของรูพรุนสูงสุดที่

ขนาด 2.43 นาโนเมตร รูพรุนนี้เกิดจากโครงสร้างไมเซลล์ของซีทิลไตรเมทิลอะมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB) ที่ถูกกำจัดออกไประหว่างกระบวนการ Calcination ส่วนรูพรุนขนาด 3.81 นาโนเมตร คาดว่าเป็นรูพรุนของซิลิกาที่เกิดที่ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม เกิดเป็นซีโอไลต์ และสำหรับรูพรุนในช่วงมาโครพอร์นั้นเกิดจากการกำจัดโคโคซานที่ใช้เป็นสารแม่แบบออกไปในช่วงการอบแห้งและการ Calcination ซึ่งพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

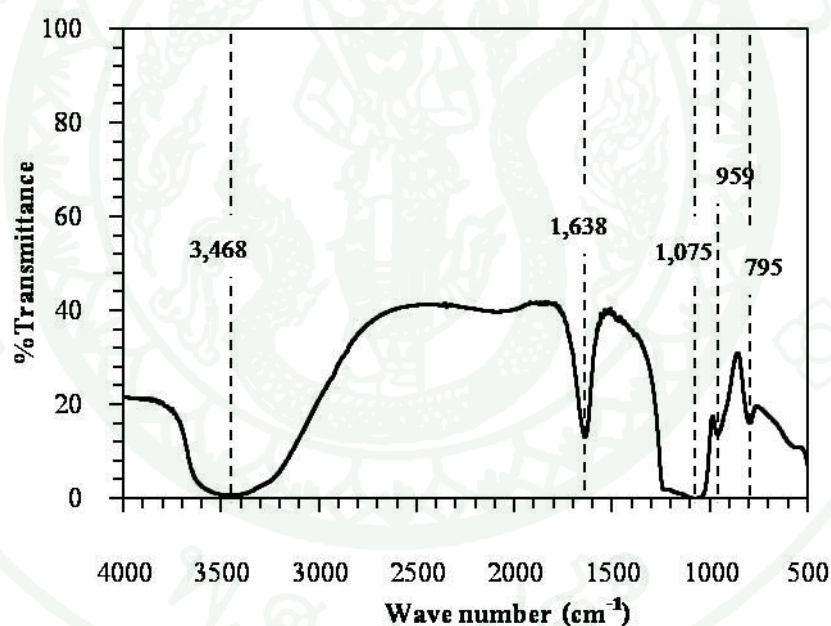
ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรรูพรุนรวม (มิลลิลิตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)
MSZ-1	1,610	2.05	2.43, 3.81
MCM-41	1,400	3.16	2.74
ZSM-5	179	0.13	0.50

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีพื้นที่ผิวมากที่สุด รองลงมาคือ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1610, 1400 และ 179 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีปริมาตรรูพรุนรวมมากที่สุด รองลงมา คือ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ซึ่งมีปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 3.16, 2.05 และ 0.13 มิลลิลิตรต่อกรัมตามลำดับ โดยสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างที่ผสมผสานระหว่างซีโอไลต์ และซิลิกาเมโซพอร์แต่มีขนาดรูพรุนของทั้งคู่อยู่ในช่วงเมโซพอร์

ต่อมาได้ทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบอยู่ในโครงสร้างของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1,ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันมีผลต่อปริมาณการดูดซับ ดำเนินการโดยใช้เครื่อง Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในการวิเคราะห์หาชนิดของหมู่ฟังก์ชัน จากผลการวิเคราะห์ดังภาพ FT-IR spectra ของตัวดูดซับทั้ง

สามชนิด แสดงดังภาพที่ 16-18 ซึ่งเห็นได้ว่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดปรากฏผลเป็นช่วงกว้างอยู่ที่ $3,200-3,600\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sepehrian *et al.* (2009) ว่าเป็นช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (hydroxyl group: -OH)

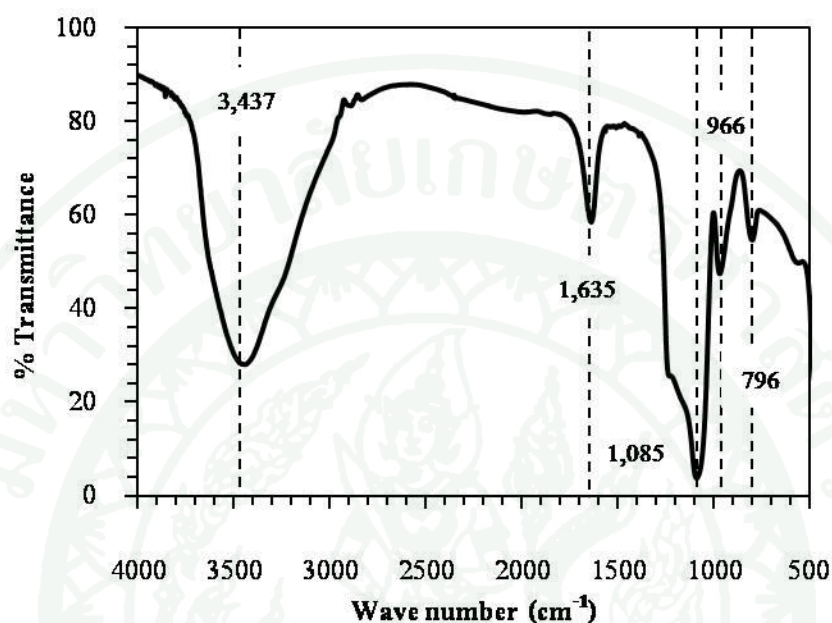
จากภาพที่ 16 พบว่าบริเวณความถี่ที่ $3,468$, $1,638$, $1,075$, 959 และ 795 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่มีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ไฮดรอกไซด์, หมู่ของน้ำ (Water: H_2O), หมู่ซิลอกเซน (Siloxane group: Si-O-Si), ซิลานอล (Silanol group: Si-OH), และหมู่ซิลิกอนออกไซด์ (Silicon oxide: Si-O) ตามลำดับ (Sepehrian *et al.*, 2009, Broyer *et.al.*, 2002 and Qi *et al.*, 2011) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ มีหมู่ซิลานอลจากโครงสร้างของซิลิกา และมีหมู่ของน้ำที่มาจากความชื้นในตัวดูดซับ อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถยืนยันพันธะของอะลูมิเนียมซิลิเกต (Si-O-Al) ได้โดยใช้เทคนิคนี้ เนื่องจากที่ตำแหน่งความถี่ $1,075\text{ cm}^{-1}$ แสดงทั้ง Si-O-Al และ Si-O-Si



ภาพที่ 16 FT-IR spectra ของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ที่สังเคราะห์ได้

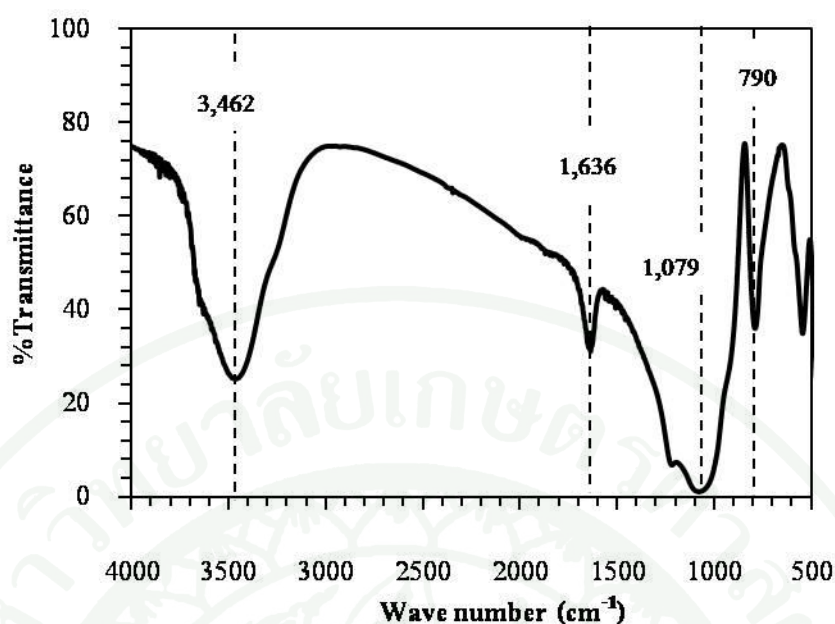
ภาพที่ 17 แสดง FT-IR spectra ของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 พบว่าความถี่ 966 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่มีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ซิลานอล ตำแหน่งความถี่นี้ใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Chiarakorn *et al.*, (2007) ซึ่งได้ศึกษากลุ่มฟังก์ชันใน MCM-41 ที่สังเคราะห์จาก

แถบ และได้รายงานการดูดกลืนแสงของหมู่ไฮดรอกซิลที่ 963 cm^{-1} ส่วนบริเวณคลื่นความถี่ที่ $3,437$, $1,635$, $1,085$ และ 796 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ของไฮดรอกไซด์ น้ำ หมู่ไฮดรอกเซน และหมู่ซิลิกอนออกไซด์ ตามลำดับ



ภาพที่ 17 FT-IR spectra ของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ที่สังเคราะห์ได้

จากภาพที่ 18 แสดง FT-IR spectra ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 พบว่าที่คลื่นความถี่ $3,462\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดซับรังสีอินฟราเรดของหมู่ไฮดรอกไซด์ ส่วนบริเวณคลื่นความถี่ที่ $1,636$, $1,079$ และ 790 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ของน้ำ, หมู่ไฮดรอกเซน และหมู่ซิลิกอนออกไซด์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าไม่ปรากฏช่วงความถี่ของไฮดรอกซิลที่ 963 cm^{-1} ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากช่วงของพีคที่ $1,079$ นั้นมีช่วงกว้างมาก อาจจะมีกลุ่มของไฮดรอกซิลปะปนอยู่



ภาพที่ 18 FT-IR spectra ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้

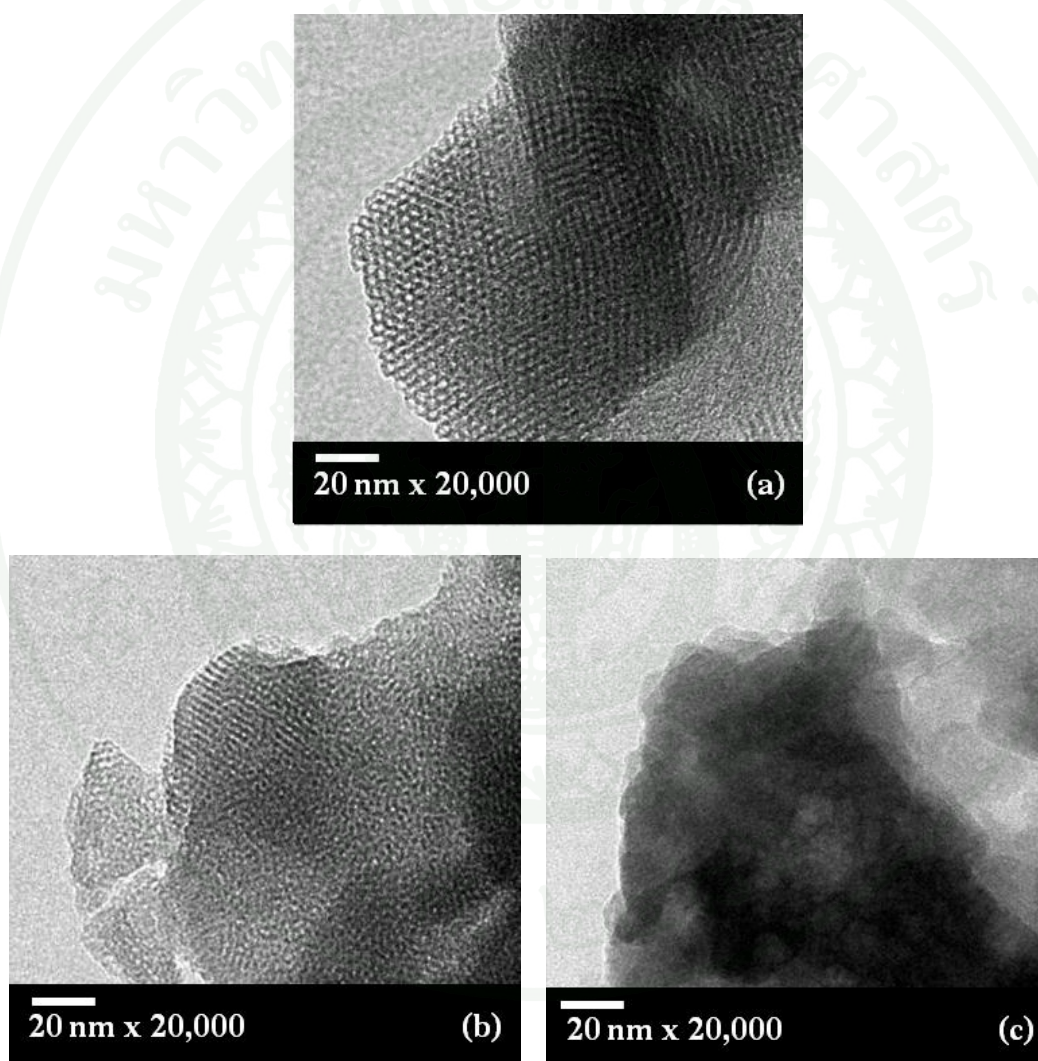
จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชันที่อยู่ในสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ด้วยเครื่อง FTIR จะเห็นได้ว่าสารทั้งสามตัวนี้ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกไซด์ ไซลันอล หมู่ของน้ำ หมู่ไฮดรอกเซน และซิลิกอนออกไซด์ เช่นเดียวกัน

ต่อมาทำการวิเคราะห์รูปร่างลักษณะโครงสร้างของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยใช้เครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM) แสดงผลดังภาพที่ 19 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ โดยภาพที่ 19 (a) แสดงลักษณะโครงสร้างของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 จะเห็นว่ามีโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบ 2D (2-Dimensional) Hexagonal โดยมีรูพรุนสองขนาด การกระจายขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ และมีความเป็นระเบียบ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งมีค่า intensity สูง แสดงถึงความมีระเบียบของผลึก

จากภาพที่ 19 (b) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 จะเห็นว่า มีโครงสร้างเป็นแบบ Hexagonal มีรูพรุนขนาดเท่าๆกัน ขนาดประมาณ 2.05 นาโนเมตร

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ และมีความเป็นระเบียบ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งมีค่า intensity สูง แสดงถึงความมีระเบียบของผลึก เช่นกัน

ส่วนภาพที่ 19 (c) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 จะเห็นได้ว่า ZSM-5 มีรูพรุนขนาดเล็กมาก คืออยู่ในระดับไมโครพอร์ จึงเห็นเป็นลักษณะเนื้อสารค่อนข้างละเอียด ไม่สามารถจำแนกส่วนที่เป็นรูพรุน และส่วนที่เป็นเนื้ออะลูมิโนซิลิเกต ได้ชัดเจน



ภาพที่ 19 ภาพ TEM แสดงโครงสร้างของตัวดูดซับ (a) สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 (b) ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และ (c) ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

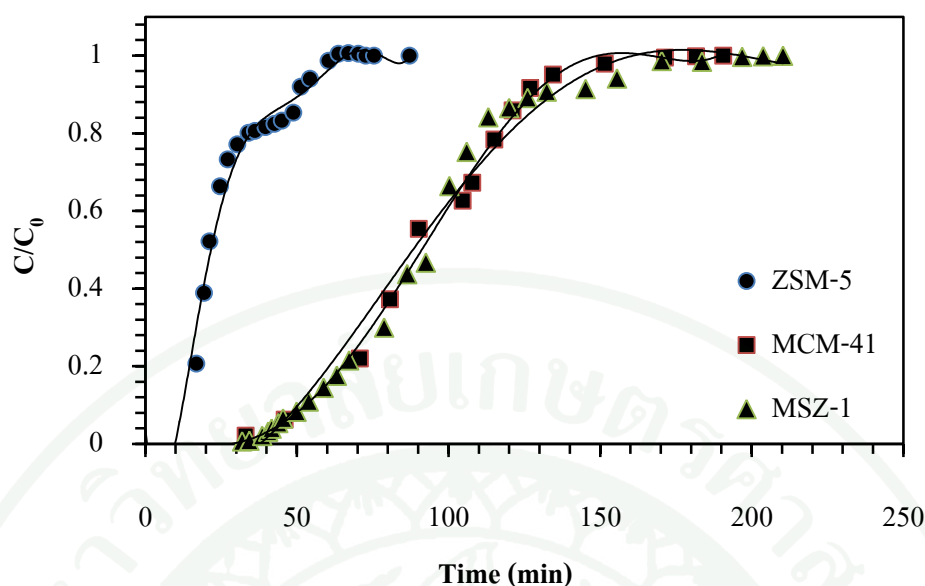
จากผลการวิเคราะห์สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 พบว่าตัวดูดซับแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ที่เหมือนกันและแตกต่างกันไปดังได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจากคุณสมบัติต่างๆ ทำให้คาดว่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพ ตัวดูดซับแต่ละชนิดโดยการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิด

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ โดยนำสารทั้งสามชนิดมาใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เมทานอล เอทานอล เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน เป็นสารตัวอย่าง การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกทำการเปรียบเทียบการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 แบบอิมตัว โดยใช้ Breakthrough curve ในการรายงานผลการวิจัย ส่วนที่สองศึกษาลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ บน MSZ-1 โดยทำการควบคุมอุณหภูมิในการระเหยที่ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส

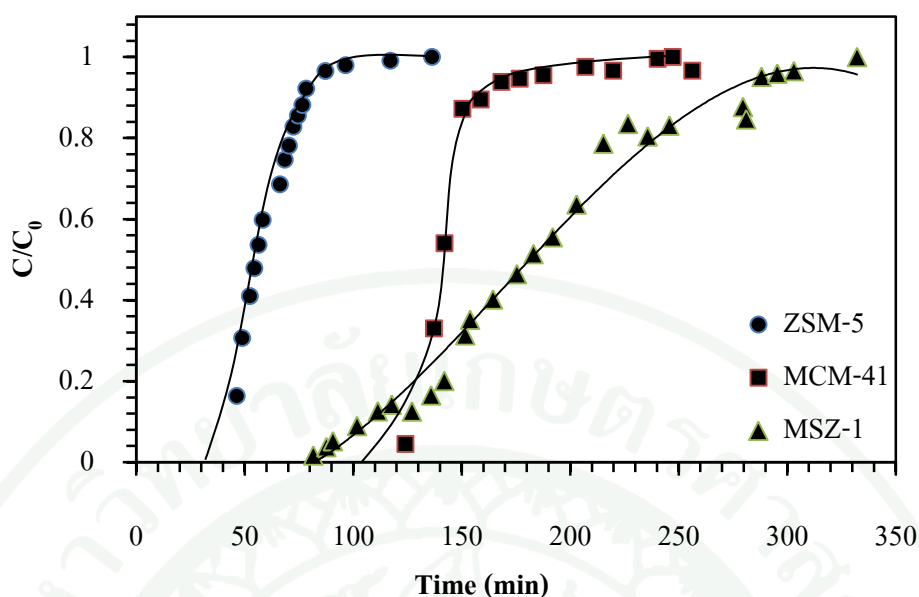
3.2.1 Breakthrough curve จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

ผลการทดลองในรูปของ Breakthrough Curve ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของตัวดูดซับ โดยสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับอิมตัวได้ ผลการดูดซับมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 20 Breakthrough curve ของการดูดซับเมทานอลบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

ภาพที่ 20 แสดง Breakthrough curve ของการดูดซับเมทานอลบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะเห็นว่าซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถดูดซับเมทานอลได้ในปริมาณต่ำ เนื่องจากปริมาณสารที่ตรวจวัดได้นั้นเข้าสู่สมดุลเร็วที่สุด ส่วนซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถดูดซับได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อทำการคำนวณผลการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับอิ่มตัว พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ ZSM-5 สามารถดูดซับเมทานอลได้ 0.223, 0.191 และ 0.006 กรัมของเมทานอลต่อกรัมของตัวดูดซับตามลำดับ (ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับจาก Breakthrough curve แสดงในภาคผนวก ข)

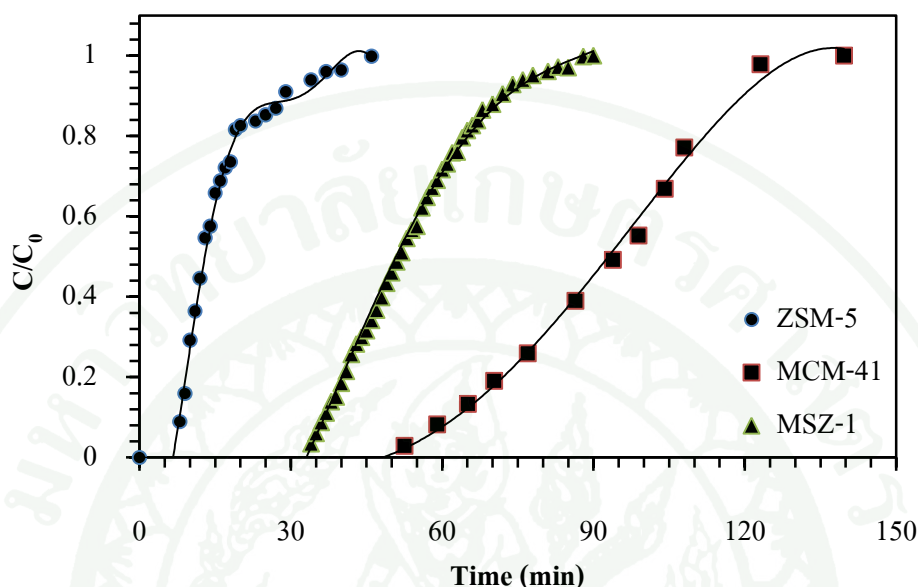


ภาพที่ 21 Breakthrough curve ของการดูดซับเอทานอลบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

ภาพที่ 21 แสดง Breakthrough curve ของการดูดซับเอทานอลบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะเห็นได้ว่า MSZ-1 สามารถดูดซับเอทานอลได้ดีที่สุด เนื่องจากปริมาณสารที่ตรวจวัดได้นั้นเข้าสู่สมดุลช้าที่สุด รองลงมา คือ MCM-41 และ ZSM-5 ตามลำดับ เมื่อทำการคำนวณผลการวิเคราะห์ปริมาณดูดซับอิ่มตัว พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมมพอร์ MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถดูดซับเอทานอลได้ 0.26, 0.189 และ 0.082 กรัมของเอทานอลต่อกรัมของตัวดูดซับตามลำดับ

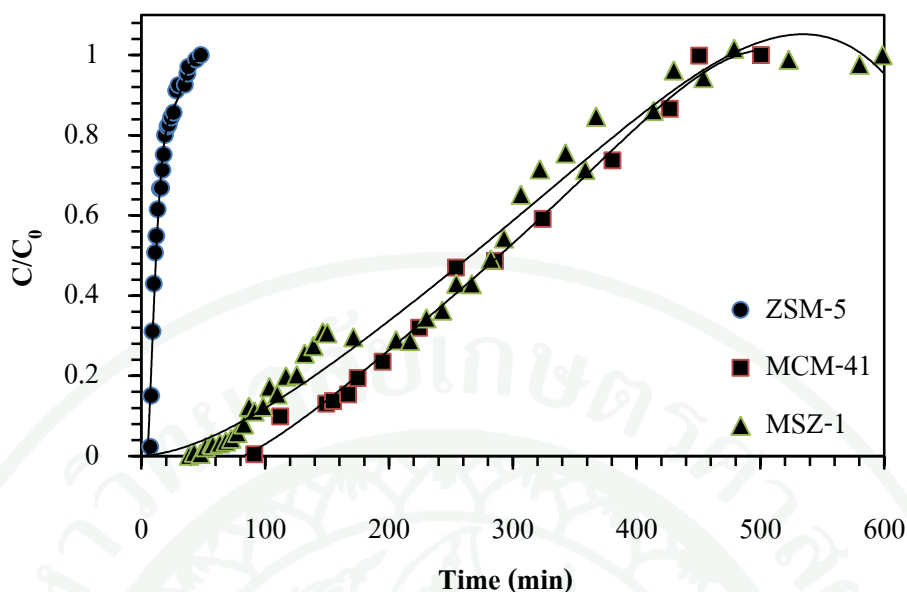
จากภาพที่ 20 และ 21 พบว่าลักษณะกราฟเบรคทูร์ที่ได้จากผลการดูดซับแตกต่างกัน โดยกราฟเบรคทูร์การดูดซับเมทานอลของ MCM-41 กับ MSZ-1 มีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน พื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน ประกอบกับความแรงของขั้วในเมทานอลมีสูง ทำให้เกิดการดูดติดของโมเลกุลระหว่างตัวดูดซับกับเมทานอลได้ดี และมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟเบรคทูร์การดูดซับเอทานอลของ MSZ-1 มีลักษณะค่อยๆ ไ้่งขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ในขณะที่ MCM-41 ลักษณะกราฟมีความชันสูง คาดว่าเนื่องมาจากเอทานอลมีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้เอทานอลหลุดออกมาได้เร็ว และอาจเนื่องมาจากการดูดซับทางกายภาพที่ค่อยๆ เกิด

การดูดซับที่ละชั้น เนื่องจากโครงสร้างของตัว MCM-41 และ MSZ-1 ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนสองขนาดแตกต่างกัน เส้นกราฟการดูดซับจึงมีลักษณะค่อยๆ ไต่ขึ้น



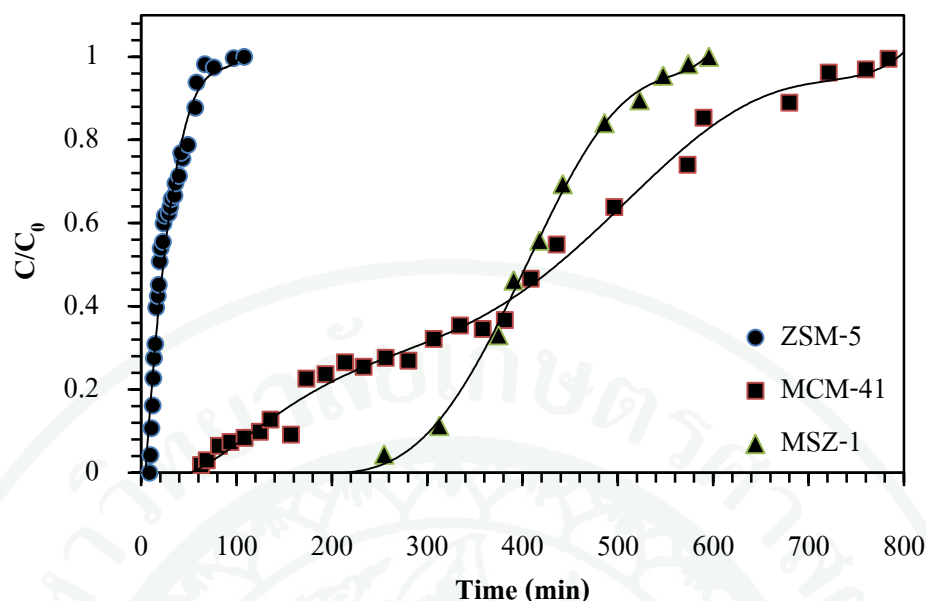
ภาพที่ 22 Breakthrough curve ของการดูดซับเบนซีนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

จากภาพที่ 22 แสดง Breakthrough curve ของการดูดซับเบนซีนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะเห็นได้ว่าซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับเบนซีนได้ดีที่สุด เนื่องจากปริมาณสารที่ตรวจวัดได้นั้นเข้าสู่สมดุลช้าที่สุด รองลงมา คือ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เมื่อทำการคำนวณผลการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับอิมตัว พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถดูดซับเบนซีนได้ 0.132, 0.158 และ 0.047 กรัมของเบนซีนต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ



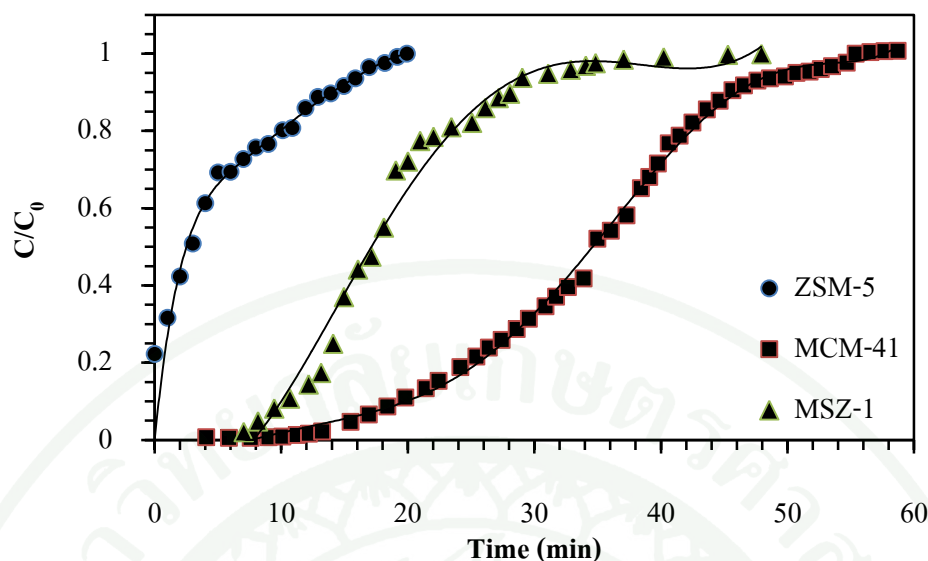
ภาพที่ 23 Breakthrough curve ของการดูดซับโทลูอินบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

จากภาพที่ 23 แสดง Breakthrough curve ของการดูดซับโทลูอินบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะเห็นได้ว่าซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับโทลูอินได้ดีที่สุด เนื่องจากปริมาณสารที่ตรวจวัดได้นั้นเข้าสู่สมดุลช้าที่สุด รองลงมา คือ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เมื่อทำการคำนวณผลการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับอิ่มตัว พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถดูดซับโทลูอินได้ 0.184, 0.207 และ 0.011 กรัมของโทลูอินต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ



ภาพที่ 24 Breakthrough curve ของการดูดซับไซลีนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

จากภาพที่ 24 แสดง Breakthrough curve ของการดูดซับไซลีนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะเห็นได้ว่าซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับไซลีนได้ดีที่สุด เนื่องจากปริมาณสารที่ตรวจวัดได้นั้นเข้าสู่สมดุลช้าที่สุด รองลงมา คือ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เมื่อทำการคำนวณผลการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับอิ่มตัว พบว่า สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถดูดซับไซลีนได้ 0.116, 0.156 และ 0.010 กรัมของไซลีนต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ



ภาพที่ 25 Breakthrough curve ของการดูดซับเฮกเซนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

จากภาพที่ 25 แสดง Breakthrough curve ของการดูดซับเฮกเซนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะเห็นได้ว่าซิลิกาเมมพอร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับเฮกเซนได้ดีที่สุด เนื่องจากปริมาณสารที่ตรวจวัดได้นั้นเข้าสู่สมดุลช้าที่สุด รองลงมา คือ MSZ-1 และ ZSM-5 เมื่อทำการคำนวณผลการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับอิ่มตัว พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 สามารถดูดซับเฮกเซนได้ 0.065, 0.098 และ 0.047 กรัมของเฮกเซนต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ

จากผลการทดลอง สรุปปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ดังตารางที่ 6 พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 จะให้ปริมาณการดูดซับเมทานอลและเอทานอลมากที่สุด ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยรูพรุนระดับเมโซพอร์ 2 ขนาด โดยขนาดเล็ก 2.42 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ 3.81 นาโนเมตร และยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุด (เท่ากับ 1,610 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ) ทำให้สามารถดูดซับเอทานอลและเมทานอล มีประสิทธิภาพดีที่สุด (Lin *et al.*, 2010) นอกจากนี้

เนื่องจากสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ยังมีคุณสมบัติพิเศษของซีโอไลต์ กล่าวคือ มีกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตเมโซพอร์ (รูพรุนขนาดใหญ่) กระจายตัวปนอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น เมทานอลและเอทานอลได้ดี เมื่อเทียบกับ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ซึ่งมีแต่ซิลิกาเป็นโครงสร้างหลัก

สำหรับซิลิกาโซพอร์ชนิด MCM-41 พบว่าให้ปริมาณการดูดซับ เบนซีน โทลูอี ไซลีน และเฮกเซน มากที่สุด เนื่องจากซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ (Tanthou *et al.*, 2004) และนอกจากนี้ ยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนรวมสูงที่สุด จากโครงสร้างของซิลิกาที่มีความเป็นขั้วน้อยกว่าอะลูมิโนซิลิเกต ทำให้ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ดูดซับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน โทลูอี ไซลีน และเฮกเซน ได้ดี

ในงานวิจัยนี้ พบว่าตัวดูดซับที่ให้ปริมาณการดูดซับต่ำที่สุด คือ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 แม้ว่าซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะมีความเป็นกรด (Acidity) สูงที่สุด (Shirazi *et al.*, 2008) ที่เป็นเช่นนี้ เพราะซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก ประมาณ 0.5 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาตรรูพรุนต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ชนิด MSZ-1 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 (มีค่า 179 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.13 มิลลิลิตรต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ) จึงทำให้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำที่สุด

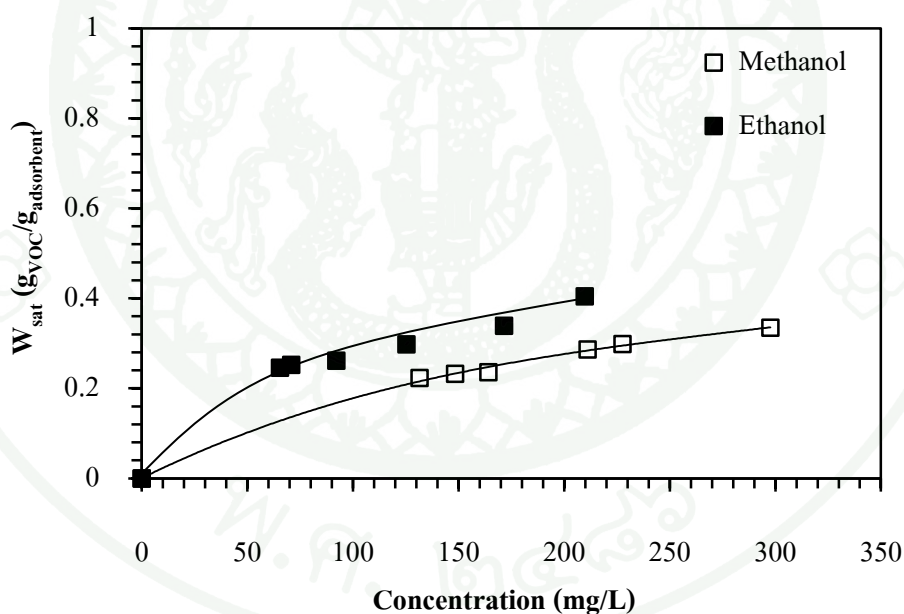
ตารางที่ 6 แสดงปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

ตัวดูดซับ	ปริมาณการดูดซับ ($g_{VOC}/g_{adsorbent}$)					
	เมทานอล	เอทานอล	เบนซีน	โทลูอี	ไซลีน	เฮกเซน
MSZ-1	0.223	0.246	0.132	0.184	0.116	0.065
MCM-41	0.192	0.189	0.158	0.207	0.156	0.098
ZSM-5	0.006	0.082	0.047	0.011	0.001	0.047

เมื่อนำตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มาทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ เมทานอล เอทานอล เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน และศึกษาผลการดูดซับในรูปของไอโซเทอร์มการดูดซับ รายละเอียดผลการวิจัย มีดังต่อไปนี้

3.2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับ

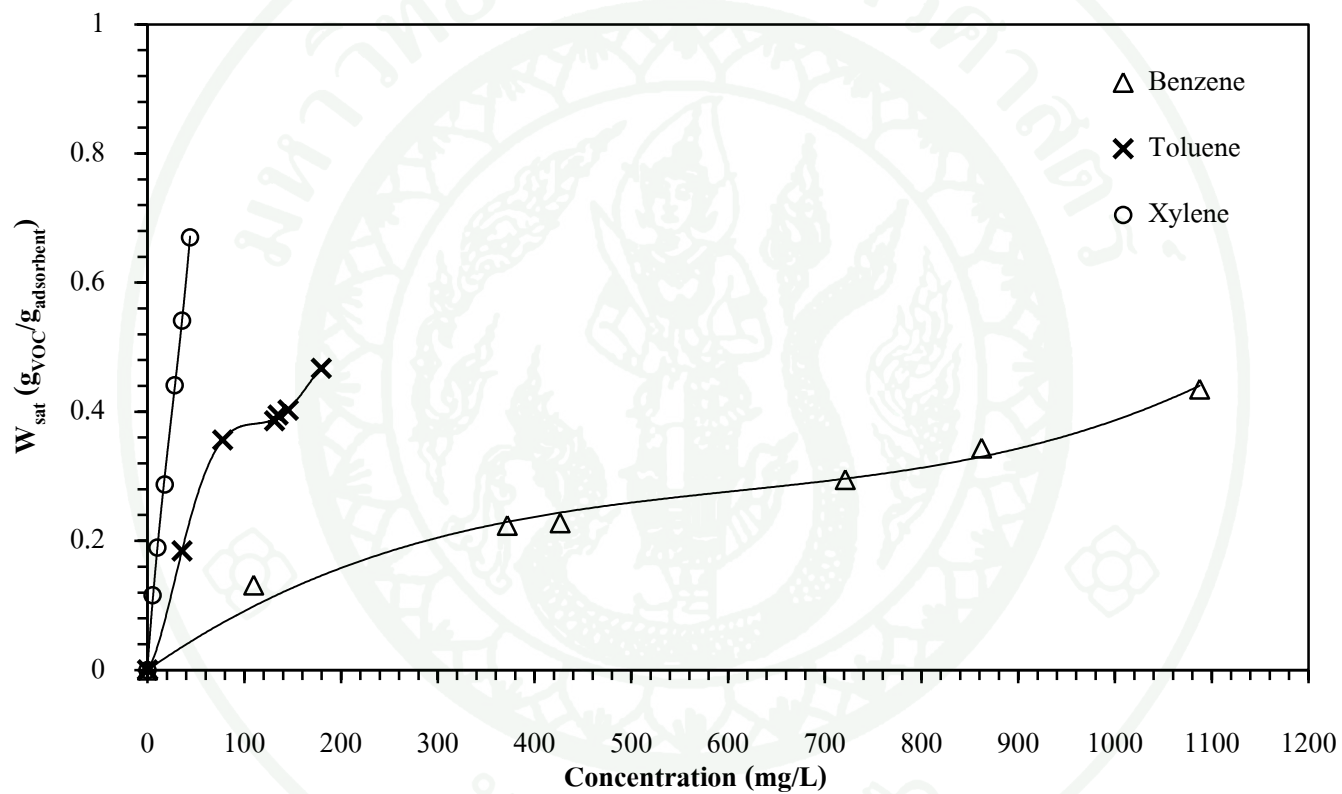
ไอโซเทอร์มการดูดซับที่แสดงดังต่อไปนี้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลการดูดซับที่สมดุลระหว่างความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (กรัมของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่อกรัมของตัวดูดซับ) โดยความเข้มข้นที่แปรค่าได้ มาจากการควบคุมอุณหภูมิการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ผสมกับก๊าซเฉื่อย เพื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นซึ่งผลการวิจัยแสดงดังกราฟต่อไปนี้



ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทานอล และเอทานอล กับปริมาณการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1

จากภาพที่ 26 ซึ่งแสดงไอโซเทอร์มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทานอลและเอทานอลกับปริมาณการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการระเหยจากอุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เมทานอลมีความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 131.568 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 148.429, 164.113, 211.182, 227.670 และ 297.709 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อผ่านเข้าสู่เบดถูกดูดซับบนเบดของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 โดยมีปริมาณการดูดซับอิ่มตัวที่แต่ละความเข้มข้นเท่ากับ 0.223, 0.232, 0.236, 0.286, 0.298 และ 0.335 กรัมของเมทานอลต่อกรัมของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 โดยลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทานอลในกระแสดอากาศ เมื่อพิจารณารูปแบบของไอโซเทอร์มที่ได้ พบว่ามีลักษณะแบบ Favorable ซึ่งสามารถทำให้สรุปได้ว่า สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับไอเมทานอลได้ในอุตสาหกรรม

เมื่อพิจารณาไอโซเทอมของเอทานอล พบว่าที่เอทานอลมีความเข้มข้นประมาณ 65.564, 70.743, 92.098, 125.392, 171.629 และ 209.729 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของไอระเหยอิ่มตัวที่ถูกดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ มีค่าเป็น 0.246, 0.252, 0.261, 0.298, 0.339 และ 0.404 กรัมของเอทานอลต่อกรัมของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในกระแสดอากาศ เมื่อพิจารณารูปแบบของไอโซเทอร์มที่ได้ พบว่ามีลักษณะแบบ Favorable ซึ่งสามารถทำให้สรุปได้ว่า สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถใช้เป็นตัวดูดซับไอเมทานอลได้ดี นอกจากนี้พบว่าเอทานอลมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าเมทานอลอยู่ 43.79 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มากกว่าเมทานอลอยู่ 45.34 เปอร์เซ็นต์



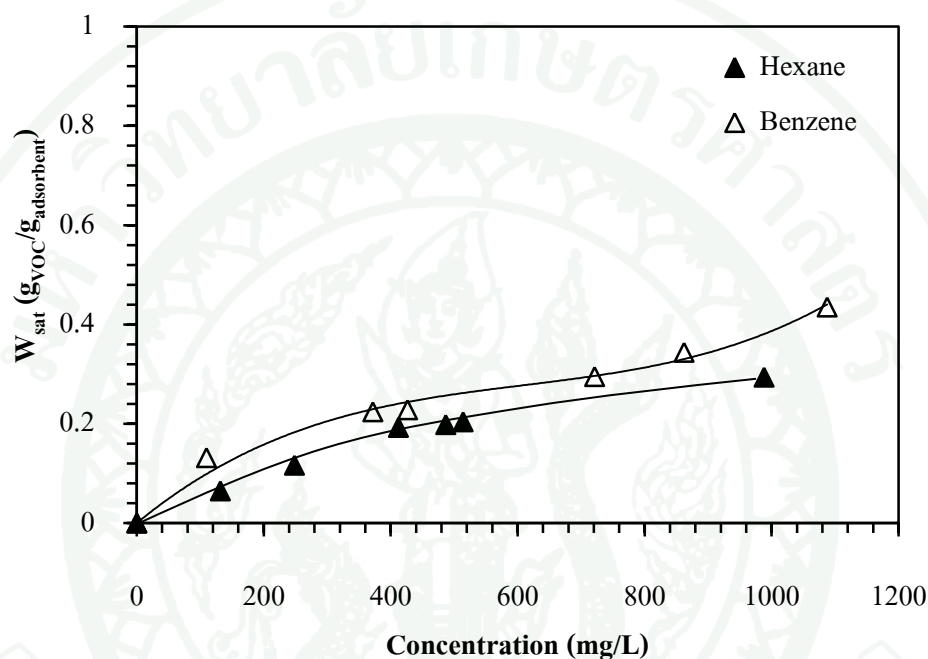
ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ เบนซีน โทลูอิน และไซลีนกับปริมาณการดูดซับบน สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1

เมื่อพิจารณาไอโซเทอร์มการดูดซับของเบนซีนบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไอเบนซีน มีความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 109.781 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 371.900, 426.571, 721.314, 862.228 และ 1087.643 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีปริมาณการดูดซับอิ่มตัวที่แต่ละความเข้มข้นเท่ากับ 0.132, 0.224, 0.228, 0.295, 0.344 และ 0.435 กรัมของเบนซีนต่อกรัมของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 โดยลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน เมื่อพิจารณารูปแบบของไอโซเทอร์มที่ได้ พบว่ามีลักษณะแบบ Favorable (Nguyen *et al.*, 1998) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวดูดซับไอเบนซีนได้ดี

ในทำนองเดียวกันกับเบนซีน เมื่อเปลี่ยนสารที่ถูกดูดซับเป็นโทลูอินและไซลีนดังรูปที่ 27 ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนชนิดอะโรมาติกที่ไม่มีขั้ว พบว่าไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโทลูอินและไซลีนกับปริมาณการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโทลูอิน และไซลีนตามลำดับ อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้น เมื่อพิจารณารูปแบบของไอโซเทอร์มที่ได้ พบว่าไอโซเทอร์มของโทลูอิน มีลักษณะไอโซเทอมเป็นแบบ Strongly favorable ส่วนไอโซเทอมของไซลีนจากเส้นไปโซเทอมมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูง คาดว่าเป็นไอโซเทอมแบบ Strongly favorable (Hernandez *et al.*, 2004) เช่นเดียวกับโทลูอินซึ่ง จากเส้นไอโซเทอมเห็นเป็นเพียงเส้นตรงเท่านั้น สาเหตุที่แสดงส่วนโค้งของเส้นไอโซเทอมเนื่องจากมีข้อจำกัดในการเพิ่มความเข้มข้นของไอโซลีนที่ป้อนเข้าสู่เบดของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 จากเส้นกราฟไอโซเทอมของโทลูอิน และไซลีน จะเห็นได้ว่าสารทั้งคู่ถูกดูดซับในปริมาณสูง ดังนั้นสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวดูดซับโทลูอินและไซลีน

เมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (เบนซีน, โทลูอิน และไซลีน) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุลของไอสารระเหยอินทรีย์ โดยพบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น 20.52 เปอร์เซ็นต์ (โทลูอิน) และ 35.96 เปอร์เซ็นต์ (ไซลีน) โดยเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของเบนซีน ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นประมาณ 83.33 และ 93.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากการดูดซับเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักโมเลกุล จะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choudhary and Mantri (2000) ศึกษาการดูดซับสารประกอบอะโรมาติก

ซึ่งได้แก่ เบนซีน (Benzene: C_6H_6), โทลูอิน (Toluene: C_7H_8) ไซลีน (p-Xylene: C_8H_{10}) และเมซีไตลีน (Mesitylene: C_9H_{12}) บนซิลิกาเมโซพอร์ซัน MCM-41 ที่อุณหภูมิ 75-225 องศาเซลเซียส พบว่า เมซีไตลีนดูดซับดีที่สุดรองลงมาคือ ไซลีน โทลูอิน และเบนซีน ตามลำดับ เนื่องจากการดูดซับเกิดแรงในการดึงดูดระหว่างหมู่ซิลินอลกับตัวถูกดูดซับ และเกิดการดูดซับหลายชั้น เมื่อความเข้มข้นหรือน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น จะทำให้สามารถดูดซับได้มากขึ้น



ภาพที่ 28 ไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีน และเฮกเซนกับ ปริมาณการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1

จากภาพที่ 28 ซึ่งแสดงกราฟไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีนกับเฮกเซนปริมาณการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 พบว่า ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เฮกเซนมีความเข้มข้นประมาณ 131.612, 248.329, 412.113, 486.745, 514.064 และ 988.209 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ปริมาณ 0.065, 0.116, 0.192, 0.198, 0.204 และ 0.294 กรัมของเฮกเซนต่อกรัมของสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 โดยลำดับ เมื่อพิจารณารูปแบบของไอโซเทอรั่มที่ได้ พบว่ามีลักษณะแบบ Favorable ซึ่งสามารถทำให้สรุปได้ว่า สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับไอระเหยของเบนซีนได้ดีกว่าไอระเหยเฮกเซน (Zhao *et al.*, 2001)

3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

จากผลการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 พบว่าตัวดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับแตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับอยู่หลายปัจจัย ดังนี้

3.3.1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

จากการวิจัย พบว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูงความสามารถในการดูดซับก็มีปริมาณมาก และถ้าพิจารณาโครงสร้างรูพรุน จะพบว่าขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนรวมก็ส่งผลต่อการดูดซับเช่นกัน โดยขนาดรูพรุนจะเป็นตัวแปรที่กำหนดขนาดสารที่จะสามารถดูดซับบนตัวดูดซับได้ ส่วนปริมาตรรูพรุนนั้นเป็นตัวแปรที่กำหนดปริมาณสารที่ดูดซับบนตัวดูดซับ ถ้าปริมาตรรูพรุนมาก ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกดูดซับก็จะมีค่ามากเช่นกัน

จากผลการวิจัย พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีพื้นที่ผิวมากที่สุด รองลงมาคือ ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 มีปริมาตรรูพรุนรวมมากที่สุด รองลงมาคือ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 จะให้ปริมาณการดูดซับเมทานอลและเอทานอลมากที่สุด ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยรูพรุนระดับเมโซพอร์ 2 ขนาด โดยขนาดเล็ก 2.42 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ 3.81 นาโนเมตร และยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุด คือเท่ากับ 1,610 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ ทำให้สามารถดูดซับเอทานอลและเมทานอล มีประสิทธิภาพดีที่สุด นอกจากนี้เนื่องจากสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ยังมีคุณสมบัติพิเศษของซีโอไลต์ กล่าวคือ มีกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกตเมโซพอร์ กระจายตัวปนอยู่ในโครงสร้าง ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น เมทานอล และเอทานอลได้ดี เมื่อเทียบกับซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 ซึ่งมีแต่ซิลิกาเป็นโครงสร้างหลัก

สำหรับซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 พบว่าให้ปริมาณการดูดซับ เบนซีน โทลูอี ไชลิน และ เฮกเซน มากที่สุด เนื่องจากซิลิกาเมพอร์ชนิด MCM-41 มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ และ

นอกจากนี้ ยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนรวมสูงที่สุด จากโครงสร้างของซิลิกาที่มีความเป็นขั้วน้อยกว่าอะลูมินาซิลิเกต ทำให้ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 ดูดซับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน โทลูอี ไซลีน และเฮกเซน ได้ดี

3.3.2 ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับขนาดรูพรุนของตัวดูดซับส่งผลต่อการดูดซับ จากผลการวิจัย พบว่า ZSM-5 สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายได้ปริมาณน้อยที่สุด เนื่องจากมีขนาดรูพรุน เล็กที่สุด กล่าวคือ มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงไมโครพอร์ขนาด 0.5 นาโนเมตร ในขณะที่ MCM-41 สามารถดูดซับ เบนซีน โทลูอี ไซลีน และเฮกเซนได้ปริมาณสูงที่สุด และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถดูดซับเมทานอล และเอทานอลได้ปริมาณสูงที่สุด ซึ่งพบว่าซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์ โดยซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีการกระจายขนาดของรูพรุนที่ขนาด 2.74 นาโนเมตร และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีรูพรุนสองขนาด คือ 2.43 และ 3.81 นาโนเมตร โดยการกระจายขนาดรูพรุนสูงที่สุดที่ขนาด 2.43 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MCM-41 และซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MSZ-1 มีขนาดรูพรุนไม่ต่างกันมากนัก (มีการกระจายขนาดรูพรุนสูงสุดที่ 2.74 และ 2.43 นาโนเมตร ตามลำดับ) แต่มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่างชนิดกัน ซึ่งในกรณีนี้ พบว่าความมีขั้ว/ไม่มีขั้วของตัวดูดซับมีผลกับการเลือกดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มต่างๆ

3.3.3 เคมีที่ผิวหน้า (Surface chemistry)

ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับแต่ละตัวนั้น มีส่วนประกอบในโครงสร้างสารที่แตกต่างกันไป สำหรับส่วนประกอบที่นับว่ามีผลต่อการดูดซับนั้น คือ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาแสดงดังตารางที่ 7 ซึ่งปริมาณซิลิกาต่ออะลูมินาได้มาจากการคำนวณปริมาณสารที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาที่ใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์ในขั้นตอนแรก

ตารางที่ 7 แสดงอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่ประกอบอยู่ในตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	Si : Al
สารประกอบคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1	1:0.03
ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41	1:0.00
ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	1:0.05

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่า แม้ว่าซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีสัดส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูงกว่า MSZ-1 แต่จากผลการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย พบว่าซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายทั้ง 6 ชนิด ต่ำกว่าสารประกอบคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ทั้งนี้คาดว่า เป็นผลมาจากความแตกต่างของพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรการดูดซับโดยรวมอยู่มาก อีกทั้งปริมาณซิลิกาต่ออะลูมินาที่ประกอบอยู่ในโครงสร้างสารแต่ละชนิดที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์อาจมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่เติมลงไป ในขั้นตอนการสังเคราะห์ ซึ่งปริมาณซิลิกาต่ออะลูมินาที่ประกอบอยู่จริงในสารแต่ละชนิด สามารถส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ

นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชันที่อยู่ในสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ด้วยเครื่อง FTIR พบว่าตัวดูดซับทั้งสามนี้ ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล ไซลันอล และไซลอกเซน ซึ่งหมู่ไซลันอลเป็นหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว โดยหมู่ไซลันอลจะทำหน้าที่เป็นส่วนที่ทำการดูดซับ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของกลุ่มไซลันอล โมเลกุลเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลันอลได้ครั้งละสองกลุ่มขึ้นไปในเวลาเดียวกัน (Hernández and J. A. Velasco)

3.3.4 ขนาดโมเลกุล และน้ำหนักของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

เนื่องจากกระบวนการดูดซับที่ศึกษาเป็นการดูดซับเชิงกายภาพ ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น โดยในแต่ละชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับ

ความเข้มข้น (หรือขนาดและน้ำหนักของโมเลกุล) ของตัวถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวดูดซับที่น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 8 ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ โดยสารที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน แต่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับได้ในปริมาณมากกว่า จะเห็นได้ว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจน (Oxygenated Hydrocarbon) ได้ดีกว่า ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยสามารถดูดซับเอทานอลได้มากกว่าเมทานอล ส่วนซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนได้ โดยสามารถดูดซับไซลีนซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุด ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ โทลูอิน และเบนซีน ตามลำดับ

ตารางที่ 8 แสดงสูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้เป็นตัวถูกดูดซับ

ชื่อสาร	สูตร โครงสร้าง	น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)
เมทานอล	CH_4O	32.04
เอทานอล	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	46.07
เบนซีน	C_6H_6	78.11
โทลูอิน	C_7H_8	94.14
ไซลีน	C_8H_{10}	106.2
เฮกเซน	C_6H_{14}	86.16

3.3.5 ความมีขั้ว/ไม่มีขั้ว ของโมเลกุลไอระเหยอินทรีย์

เนื่องจากเบนซีน โทลูอิน ไชลีน และเฮกเซน เป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ไม่มีขั้ว ส่วนเมทานอล และเอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีขั้ว จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับซิลิกาเมโซพอร์ซินิก MCM-41 สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ไม่มีขั้วได้ ในปริมาณมากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee et al. (2004) ซึ่งทำการทดลองหาค่าสมดุลการดูดซับของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (เบนซีน, โทลูอิน, เฮกเซน และไซ โคลเฮกเซน) และโมเลกุลมีขั้ว (เมทานอล และอะซีโตน) บนซิลิกาเมโซพอร์ซินิก MCM-48 ที่อุณหภูมิต่างกัน (30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส) โดยใช้เทคนิค Gravimetric พบว่าซิลิกาเมโซพอร์ซินิก MCM-48 สามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วได้สูงกว่าสารอินทรีย์ที่มีขั้ว ยกเว้นเบนซีน เนื่องจากพื้นผิวระหว่างซิลิกาเมโซพอร์ซินิก MCM-48 และตัวถูกดูดซับมีระดับความเป็นขั้วแตกต่างกัน เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ซึ่งพบว่า เมื่อทำการทดสอบการดูดซับ

3.3.6 ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ

ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้มาจากการเพิ่มอุณหภูมิในการระเหยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยที่ความเข้มข้นมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้เกิดแรงดึงดูดกันมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความสามารถในดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งได้แก่ เมทานอล เอทานอล เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน บนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 พบว่าซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำที่สุด สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถดูดซับเมทานอล และเอทานอลได้ดีที่สุด ส่วนซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับเบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน ได้ดีที่สุด

ต่อมาศึกษาผลของความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีต่อการดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 โดยอุณหภูมิในการระเหยเริ่มต้นที่ 40 องศาเซลเซียส 50, 60, 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษา พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ได้มากขึ้น ผลการทดลองอยู่ในรูปไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งการดูดซับเมทานอล เอทานอล เบนซีน แลเฮกเซน เป็นการดูดซับแบบ Favorable ส่วนการดูดซับโทลูอิน และไซลีนเป็นการดูดซับแบบ Strongly favorable การศึกษากระบวนการดูดซับ มีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ สรุปได้ดังนี้

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พบว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 มีพื้นที่ผิวมากที่สุด รองลงมาคือ ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีปริมาตรรูพรุนรวมมากที่สุด รองลงมา คือ สารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ให้ปริมาณการดูดซับเมทานอล และเอทานอลมากที่สุดที่ปริมาณ 0.223 และ 0.246 $\text{g}_{\text{VOC}} / \text{g}_{\text{adsorbent}}$ ตามลำดับ สำหรับซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 พบว่าให้ปริมาณการดูดซับ เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซนมากที่สุดที่ปริมาณ 0.158, 0.207, 0.156 และ 0.098 $\text{g}_{\text{VOC}} / \text{g}_{\text{adsorbent}}$ ตามลำดับ เนื่องจากซิลิกาเมโซพอร์ชนิด MCM-41 มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ และยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนรวมสูงที่สุด

2. ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ในกระบวนการดูดซับขนาดรูพรุนของตัวดูดซับส่งผลต่อการดูดซับ จากผลการวิจัย พบว่า ZSM-5 สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายได้ปริมาณ

น้อยที่สุด เนื่องจากมีขนาดรูพรุน เล็กที่สุด ในขณะที่ MCM-41 สามารถดูดซับ เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน ได้ปริมาณสูงที่สุด และสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถดูดซับเมทานอล และเอทานอล ได้ปริมาณสูงที่สุด

3. เคมิตที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ ฟังก์ชันที่อยู่ในสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1, ซิลิกาเมพออร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว โดยหมู่ไฮดรอกซิลจะทำหน้าที่เป็นส่วนที่ทำการดูดซับ โดยจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

4. ขนาดโมเลกุล และน้ำหนักของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ สารที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน แต่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับได้ในปริมาณมากกว่า จะเห็นได้ว่าสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจน (Oxygenated Hydrocarbon) ได้ดีกว่า ซิลิกาเมพออร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 โดยสามารถดูดซับเอทานอลได้มากกว่าเมทานอล ส่วนซิลิกาเมพออร์ชนิด MCM-41 สามารถดูดซับสารในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ โดยสามารถดูดซับไซลีนซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุด ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ โทลูอิน และเบนซีน ตามลำดับ

5. ความมีขั้ว/ไม่มีขั้วของโมเลกุลสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย แบ่งออกเป็นสามกลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็น oxygenate hydrocarbon ได้แก่ methanol และ ethanol จัดเป็นสารชนิดมีขั้ว กลุ่มที่ 2 เป็น aromatic hydrocarbon ได้แก่ benzene toluene และ xylene จัดเป็นสารประเภทที่ไม่มีขั้ว กลุ่มที่ 3 เป็น hydrocarbon ได้แก่ hexane จัดเป็นสารที่ไม่มีขั้ว เนื่องจากเบนซีน โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน เป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ไม่มีขั้ว จากผลการทดลองพบว่าถูกดูดซับบนซิลิกาเมพออร์ชนิด MCM-41 ได้ดีที่สุด ส่วนเมทานอล และเอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีขั้ว ถูกดูดซับบนซิลิกา-ซีโอไลต์ MSZ-1 ได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับซิลิกาเมพออร์ชนิด MCM-41 และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

6. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ โดยเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้เกิดแรงดึงดูดกันมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. การทำการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซตัวอย่างด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีที่ต่อออนไลน์ (On-line) กับชุดปฏิกรณ์ เนื่องจากการวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่างที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทำโดยการเก็บตัวอย่างด้วยเข็มแล้วนำไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีนั้น อาจมีการสูญหายหรือการปนเปื้อนของก๊าซอื่นๆ เนื่องจากความแตกต่างทางสภาพอุณหภูมิที่แตกต่างกันของก๊าซตัวอย่างภายใน และภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างการเคลื่อนย้ายเข็ม ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง
2. การเลือกตัวดูดซับควรเลือกให้มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกัน เพื่อสามารถเปรียบเทียบผลการดูดซับได้ เพราะถ้าตัวดูดซับมีลักษณะแตกต่างกันมาก ผลที่ออกมาจะยากที่จะเปรียบเทียบกันได้ยาก
- 3 ระบบที่ใช้ในกระบวนการเป็นระบบเปิด ใช้ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิในส่วนที่ทำการระเหย (Chamber) กับในช่วงของเบด (Adsorbent packed bed) มีความแตกต่างกันมาก จึงต้องระวังการเกิดการควบแน่น ของ VOCs ซึ่งสามารถส่งผลให้ค่าการดูดซับคลาดเคลื่อนได้
4. การทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบ และลักษณะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการอธิบายผลการทดลอง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จักรกฤษณ์ ศิวัชเชษฐาเทพ. 2009. **อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ**. ศึกษาศาสตร์อุตสาหกรรม: การควบคุม. แหล่งที่มา: www.safety-stou.com. 19 มีนาคม 2554.

จตุพร วิทยาคูณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. **การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์**: โรงพิมพ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ทรงวุฒิ ศรีสว่าง, นพพร จรุงเกียรติ และศรีนญา ภูผาจิตต์. **ภัยอันตรายจากสารอินทรีย์ไอระเหย (Volatile Organic Compounds) และการจัดการกับสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่เป็นตัวทำลาย**. แหล่งที่มา: <http://monitor.onep.go.th/document/voc.htm>. 19 มีนาคม 2554.

บุญรักษ์ กาญจนวรรณชัย. **ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**. แหล่งที่มา: http://www.electron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=1606&Itemid=9. 23 มีนาคม 2554.

ประสงค์ คุณานุวัฒน์ชัยเดช และ ไมตรี สุทธจิตต์. **สารอินทรีย์ไอระเหย และสุขภาพ (Volatile Organic Chemicals and Health)** พยวิทยาสาร ปีที่ 11 ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2544 และปีที่ 12 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2545 ภาควิชาเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. แหล่งที่มา: http://webdb.dmsh.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_2_001c.asp?info_id=120. 9 มีนาคม 2554.

ราชกิจจานุเบกษา. 2550. ฉบับราชกฤษฎีกา เล่ม 124 ตอนพิเศษ 143ง.

สรารุช เทพานนท์. 2553. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา. แหล่งที่มา: http://teenet.tei.or.th/Knowledge/Paper/VOCs_information.pdf. 20 มีนาคม 2554.

อรอนงค์ ทรงกิตติ. 2554. สารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds: VOCs).
 สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา:
<http://www.industry.go.th/ops/pio/saraburi/DocLib5/บทความน่ารู้/สารประกอบอินทรีย์ระเหย.pdf>. 19 มีนาคม 2554.

Aguado, S., A.C. Polo, M.P. Bernal, J. Coronas and J. Santamaria. 2004. Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes. **J. Membrane Sci.** 240: 159–166.

Baek, S.W., J.R. Kim and S.K. Ihm. 2004. Design of dual functional adsorbent/catalyst system for the control of VOC's by using metal-loaded hydrophobic Y-zeolites. **Catal. Today:** 575–581.

Broyer, M., S. Valange, J. P. Bellat, O. Bertrand, G. Weber and Z. Gabelica. 2002. Influence of Aging, Thermal, Hydrothermal, and Mechanical Treatments on the Porosity of MCM-41 Mesoporous Silica. **Langmuir** 18: 5083-5091.

Chareonpanich M., T. Namto, P. Kongkachuichay, J. Limtrakul. 2004. Synthesis of ZSM-5 zeolite from lignite fly ash and rice husk ash. **Fuel Process Technol.** 85: 1623– 1634.

Chiang, Y.C., P.C. Chiang and C.P. Huang. 2001. Effects of pore structure and temperature on VOC adsorption on activated carbon. **Carbon** 39: 523–534.

Chiarakorn, S., T. Areeroba and N. Grisdanurak. 2007. Influence of functional silanes on hydrophobicity of MCM-41 synthesized from rice husk. **Sci. Technol. Adv. Mat.** 8: 110–115.

Choudhary, V.R. and K. Mantri. 2000. Adsorption of Aromatic Hydrocarbons on Highly Siliceous MCM-41. **Langmuir** 16: 7031-7037.

Claus H. C., J. Kim, T. Eric, S. Iver, T. Henrik and H.C. Christina. 2007. Mesoporous zeolite single crystal catalysts: Diffusion and catalysis in hierarchical zeolites. **Catal. Today** 128: 117–122.

Clean Air Technology Center. 1998. Zeolite a versatile air pollutant adsorber. Air Quality Planning and Standards. EPA-456/F-98-004: 1-18.

Derwent, R.G. 2011. **Sources, Distributions, and Fates of VOCs in the Atmosphere**. Available source: <http://www.rsc.org/ebooks/archive/free/BK9780854042159/BK9780854042159-00001.pdf>. 19 March 2011.

Du, X. and E. Wu. 2007. Porosity of microporous zeolites A, X and ZSM-5 studied by small angle X-ray scattering and nitrogen adsorption. **J. Phys. Chem. Solids** 68: 1692–1699.

Erica, C.O., T.G. Cleo, V.M.T. Pires and H.O. Pastore. 2006. Why Are Carbon Molecular Sieves Interesting? **J. Braz. Chem. Soc** 17: 16-29.

Gao, L., Y. Cao, S.L. Zhou, T.T. Zhuang, Y. Wang and J.H. Zhu. 2009. Eliminating carcinogenic pollutants in environment: Reducing the tobacco specific nitrosamines level of smoke by zeolite-like calcosilicate. **J. Hazard. Mater.** 169: 1034–1039.

Ghoshal, A.K. and S.D. Manjare. 2002. Selection of appropriate adsorption technique for recovery of VOCs: an analysis. **J. Loss Prevent Proc.** 15: 413–421.

Gopal S., K.Y. and P.G. Smirniotis. 2001. Synthesis of Al-rich ZSM-12 using TEOH as template. **Micropor. Mesopor. Mater.** 49, Issues 1-3: 149-156.

Green Chemistry with Zeolite Catalysts. **Chemical Engineering tool and information**. Available Source: <http://www.cheresources.com/zeolitezz.shtml>. 24 March 2011.

- Harmann, M. 2004. Hierarchical Zeolites: A Proven Strategy to Combine Shape Selectivity with Efficient Mass Transport. **Angewandte Chemie International** 43: 5880–5882.
- Hernández, M.A. and J.A. Velasco. 2003. Alkane Adsorption on Microporous SiO₂ Substrata. 1. Textural Characterization and Equilibrium. **Energy & Fuels** 17: 262-270.
- _____, _____, S. Solís, F. Rojas, and V.H. Lara. 2004. Adsorption of Benzene, Toluene, and p-Xylene on Microporous SiO₂. **Ind. Eng. Chem. Res.** 43, 1779-1787.
- Inaba M. and Hideaki Hamada. 1999. Zeolite synthesis. using 1,6-diaminohexane-based organic diammonium salts as templates. **Stud. Surf. Sci. Catal.** 125: 125-132
- Iris Herrmann-Geppert. 2010. **Gas adsorption measurements**. Helmholtz Zentrum Berlin.
Available source: http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/enma/solare_brennstoffe/analytische_methoden/gassorptionsmessungen_en.html. 20 March 2011.
- Khan, F.I., Alope, Kr. and Ghoshal. 2000. Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air. **J. LOSS PREVENT. PROC.** 13: 527–545.
- Kosuge, K., S. Kubo, N. Kikukawa and M. Takemori. 2007. Effect of Pore Structure in Mesoporous Silicas on VOC Dynamic Adsorption/Desorption Performance. **Langmuir**. 23, 3095-3102.
- Kresge, C.T., Leonowicz, M.E., Roth, W.J., Vartuli, J.C. and Beck, J.S., 1992. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. **Nature** 359, 710 – 712.
- Kruk, M., M. Jaroniec, J.M. Kim and R. Ryoo. 1999. Characterization of Highly Ordered MCM-41 Silicas Using X-ray Diffraction and Nitrogen Adsorption. **Langmuir** 15: 5279-5284.

- Kwong, C.W., C.Y.H. Christopher, K.S. Hui and M.P. Wan. 2008. Removal of VOCs from Indoor Environment by ozonation over different porous materials. **Atmos. Environ** 42: 2300-2311.
- Lee, J.W., W.G. Shimb and H. Moon. 2004. Adsorption equilibrium and kinetics for capillary condensation of trichloroethylene on MCM-41 and MCM-48. **Micropor. Mesopor. Mater.** Volume 73, Issue 3: 109-119.
- _____, _____, M.S. Yang and H. Moon. 2004. Adsorption Isotherms of Polar and Nonpolar Organic Compounds on MCM-48 at (303.15, 313.15, and 323.15) K. **J. Chem. Eng. Data** 49, 502-509.
- Lin, W.G., F. Wei, F.N. Gu, X. Dong, L. Gao, T.T. Zhuang, M.B. Yue and J.H. Zhu. 2010. Adsorption of nitrosamines by mesoporous zeolite. **J. Colloid Interface Sci.** 348(2): 621-627.
- McCabe, W.L., J.C. Smith and P. Hariott. **Unit Operation of Chemical Engineering**. Seventh edition. McGraw-Hill, New York. 2005. Noble Metals Supported on Mesoporous Zeolites. **Angew. Chem. Int. Ed.** 47: 8478-8481.
- Nguyen, C., C.G. Sonwane, S.K. Bhatia and D.D Do. 1998. Adsorption of Benzene and Ethanol on MCM-41 Material. **Langmuir** 14: 4950-4952.
- Panpa, W. and S. Jinawath. 2009. Synthesis of ZSM-5 zeolite and silicalite from rice husk ash. **Applied Catalysis B: Environmental** 90: 389-394.
- Parasuraman, S., K.B. Suresh and G.S. Chandrashekar. 2001. Recent Advances in Processing and Characterization of Periodic Mesoporous MCM-41 Silicate Molecular Sieves. **Ind. Eng. Chem. Res** 40: 3237-3261.

- Parmar, G.R. and Rao, N.N. 2009. Emerging Control Technologies for Volatile Organic Compounds. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 39: 41–78.
- Pires, J., Carvalho, A. and Carvolho, M.B.D. 2001. Adsorption of volatile organic compounds in Y zeolites and pillared clays. **Micropor. Mesopor. Mater.** 43: 277-287.
- Prashant, S.C. and H.L. Greene. 1997. Adsorption and catalytic destruction of trichloroethylene in hydrophobic zeolites. **Applied Catalysis B: Environmental** 14: 37-47.
- Purnomo, C.W. and S.Z. Qiao. 2007. Functionalized Mesoporous Silica Utilization for VOCs Adsorption. **AJChE**. Vol. 7, No. 1: 43-48.
- Qi, J., T. Zhao, X. Xu, F. Li and G. Sun. 2011. High activity in catalytic cracking of large molecule over a novel micro-micro/mesoporous silicoaluminophosphate. **J. Porous Mater** 18: 69–81.
- Qiao S. Z., S. K. Bhatia and D Nicholson. 2004. Study of Hexane Adsorption in Nanoporous MCM-41 Silica. **Langmuir**, 20: 389-395.
- Radhika, M. and K. Palanivelu. 2006. Adsorptive removal of chlorophenols from aqueous solution by low cost adsorbent-Kinetics and isotherm analysis. **J. Hazard. Mater.** B138: 116–124.
- Rino, R.M., Hirotomo, H., Ayae, S., Atsushi, S. and Tatsuya, O. 2010. Direct Hydrothermal Synthesis of Hierarchically Porous Siliceous Zeolite by Using Alkoxysilylated Nonionic Surfactant. **Langmuir** 26 (4): 2731–2735.
- Ruiying G. and W. Jianlong. 2007. Effects of pH and temperature on isotherm parameters of chlorophenols biosorption to anaerobic granular sludge. **J. Hazard. Mater.** 145: 398-403.

Sepehrian, H., S. Waqif-Husain, F. Rakhshandderu and L. KAMEL. 2009. Modified Mesoporous Silicate MCM-41 for Zinc Ion Adsorption: Synthesis, Characterization and Its Adsorption Behavior. **Chinese J. Chem.** 27: 2171-2174.

_____, M. SYED, W. Husainb, G. Maragheh. 2009. Synthesis and Characterization of Amino-functionalized Mesoporous Silicate MCM-41 for Removal of Toxic Metal Ions. **Chinese J. Chem.** 27: 915-919.

Shim W.G. , J.W. Lee and H. Moon. 2006. Adsorption equilibrium and column dynamics of VOCs on MCM-48 depending on pelletizing pressure. **Micropor. Mesopor. Mater.** 88: 112-125.

Shirazi, L., E. Jamshidil and M.R. Ghasemi. 2008. The effect of Si/Al ratio of ZSM-5 zeolite on its morphology, acidity and crystal size. **Cryst. Res. Technol.** 43: 1300 1306.

Stéphane Mons. 2009. **Schematic silica gel surface**. Available source: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_silica_gel_surface.png. 24 March 2011.

Tanchoux, N., P.Trens, D. Madonado, F.D. Renzo and F. Fajula. 2004. The adsorption of hexane over MCM-41 type materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 246: 1–8.

Titus M.P. 2011. Thermodynamic Analysis of Type VI Adsorption Isotherms in MFI Zeolites. **J. Phys. Chem. C**, 115, 3346–3357.

Tung, M.W., R.W. Gy, M.K. Hsien and L.W. Jia. 2006. Using mesoporous silica MCM-41 for in-line enrichment of atmospheric volatile organic compounds. **J. Chromatogr. A** 1105: 168–175.

- Xiang, Z., Y. Lua X. Gong and G. Luo.. Absorption and desorption of gaseous toluene by an absorbent microcapsules column. **J. Hazard. Mater.** 173: 243-248.
- Yinyong, S. and P. Roel. 2008. Hydrodesulfurization of 4, 6-Dimethyldibenzothiophene over Noble Metals Supported on Mesoporous Zeolites. **Angew. Chem. Int. Ed.** 47: 8478-8481.
- Yonghui, L., Xie, Q., Yazhi, Z., Shuo, C. and Huimin, Z. 2005. Removal of ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-based biofilter. **Biochem. Eng. J.** 23: 85–95.
- Zeinali F., A.A. Ghoreyshi and G.D. Najafpour. 2010. Adsorption of dichloromethane from aqueous phase using granular activated carbon: Isotherm and breakthrough curve measurements. **Middle-East Journal of scientific Research** 5 (4): 191-198.
- Zhao, T., H. Zhang, F. Li, C. Yang and B. Zong. 2005. Synthesis and Characterization of ZSM-5/Co-Crystalline Zeolite. **J. Nat. Gas. Chem.** 14: 95–100.
- Zhao, X.S., G.Q. Lu, X. Hu. 2001. Organophilicity of MCM-41 adsorbents studied by adsorption and temperature-programmed desorption. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 179: 261–269.



ภาคผนวก

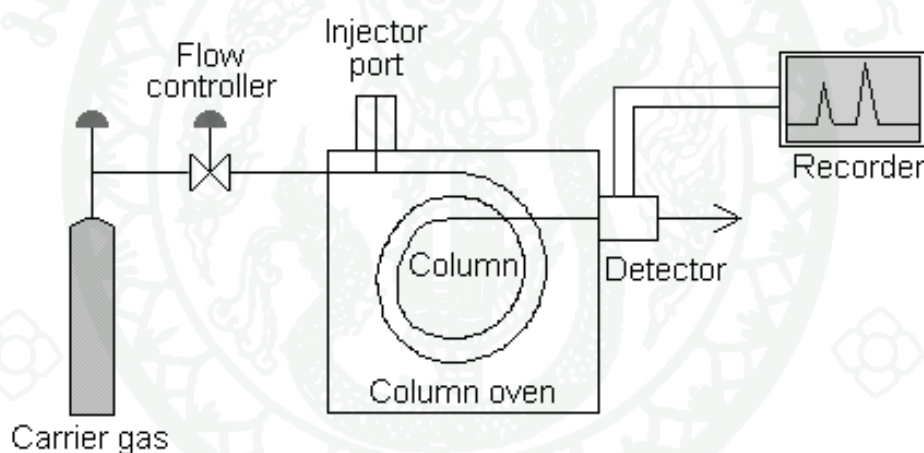


ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์เชิงปริมาณและชนิดของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย
ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณและชนิดของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

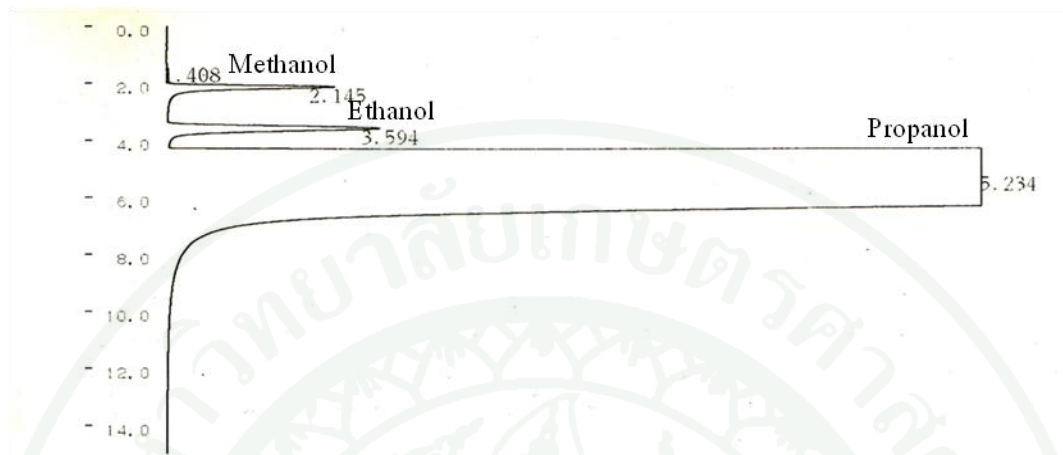
แก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC) เป็นเครื่องมือสำหรับแยกและวิเคราะห์หาปริมาณสารในสถานะแก๊ส โดยมีส่วนประกอบ คือ อินเจคเตอร์ (injector) คอลัมน์ (column) และดีเทคเตอร์ (detector) ดังภาพผนวกที่ 1 และมีหลักการทำงาน คือ เมื่อทำการฉีดสารตัวอย่างผ่านเข้าอินเจคเตอร์ สารตัวอย่างจะถูกทำให้ระเหยกลายเป็นไอ หลังจากนั้นจะถูกพาไปด้วยก๊าซเฉื่อย ผ่านคอลัมน์ที่ผ่านการให้ความร้อนแล้ว เมื่อก๊าซตัวอย่างเดินทางผ่านคอลัมน์ สารจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถแยกสารให้ออกมาเป็นสารบริสุทธิ์ ก่อนที่สารแต่ละชนิดจะออกจากอุปกรณ์จะผ่านส่วนที่เรียกว่าดีเทคเตอร์ ซึ่งดีเทคเตอร์จะทำการส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังตัวเก็บข้อมูล และแสดงผลออกเป็นกราฟเรียกว่าโครมาโตแกรม (Chromatogram)



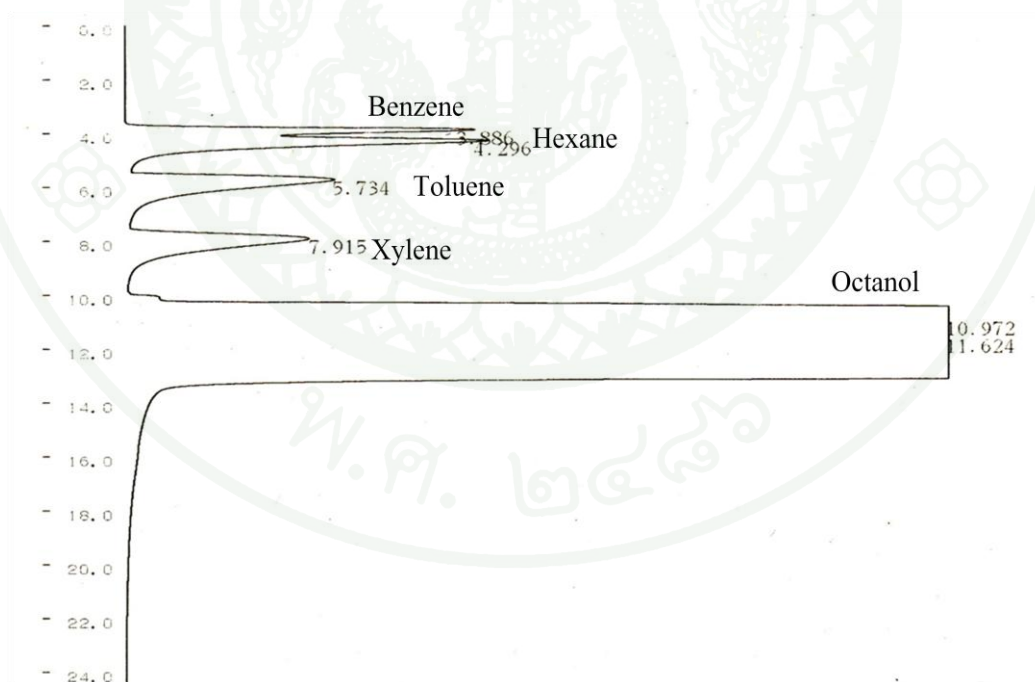
ภาพผนวกที่ ก1 แก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC)

ในการใช้แก๊สโครมาโตกราฟวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของก๊าซตัวอย่าง ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่างจะต้องทำการวิเคราะห์ก๊าซมาตรฐานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เชิงปริมาณของก๊าซ วิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซที่ถูกฉีดเข้าแก๊สโครมาโตกราฟกับพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากโครมาโตแกรม

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของก๊าซ วิเคราะห์ได้จากการเปรียบเทียบช่วงเวลาที่ก๊าซอยู่ในแก๊สโครมาโตกราฟีระหว่างก๊าซตัวอย่างกับก๊าซมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ ก2 แสดงโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน 1-3 อะตอม



ภาพผนวกที่ ก3 แสดงโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน 6-8 อะตอม

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารกับพื้นที่ใต้กราฟมีลักษณะเฉพาะตัว โดยสามารถทำเป็นสมการเส้นตรง หรือเรียกว่า Calibration curve ตามตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 สมการของ Calibration curves ของสารแต่ละชนิดที่ใช้ในการดูดซับ

Substance	Equation	R ²
CH ₄ O	mol = (1.88 x 10 ⁻¹²) x area	0.999
C ₂ H ₆ O	mol = (8.27x10 ⁻¹³) x area	0.999
C ₆ H ₆	mol = (3.13 x 10 ⁻¹³) x area	0.992
C ₇ H ₈	mol = (1.95 x 10 ⁻¹¹) x area	0.998
C ₈ H ₁₀	mol = (1.63x x 10 ⁻¹³) x area	1.000
C ₆ H ₁₄	mol = (1.00 x 10 ⁻¹³) x area	0.999

การคำนวณปริมาณสารแต่ละชนิดคำนวณได้ดังนี้

$$\text{กรณีเป็นก๊าซ ปริมาณสาร (mol)} = (V_i \times T) / (100 \times 22400)$$

เมื่อ V_i = สัดส่วนปริมาตรของสารในก๊าซตัวอย่าง (cm³/cm³)

T = ปริมาตรรวมของก๊าซตัวอย่าง (ml, cm³)

$$\text{กรณีเป็นสารละลาย ปริมาณสาร (mol)} = (V_i \times T \times D \times P \times 10^{-7}) / (MW)$$

เมื่อ V_i = สัดส่วนปริมาตรของสารในสารละลายตัวอย่าง (cm³/cm³)

T = ปริมาตรรวมของสารละลาย (μL)

D = ความหนาแน่น (g/cm³)

MW = molecular weight (g/mol)

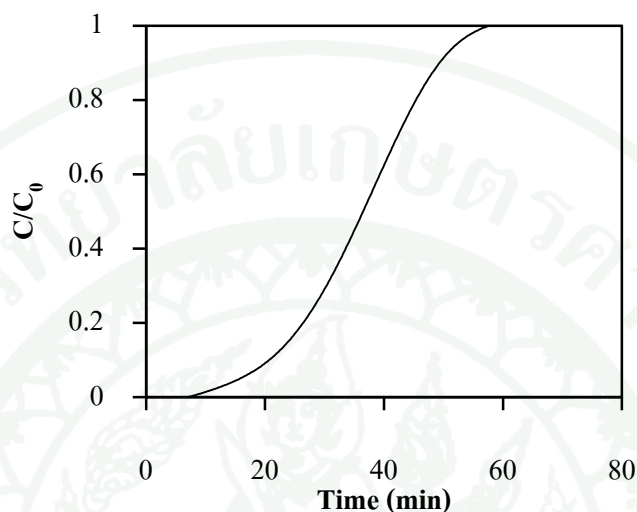
P = ความบริสุทธิ์ (%)



ภาคผนวก ข
การคำนวณปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับ

การคำนวณปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับ

1. การคำนวณปริมาณการดูดซับจากกราฟ Breakthrough curve



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟ Breakthrough curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา

จากกราฟ Breakthrough curve สามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับได้จากสมการที่ (1)

$$\text{ปริมาณการดูดซับ} = \int_{t_0}^t \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad (1)$$

โดยที่

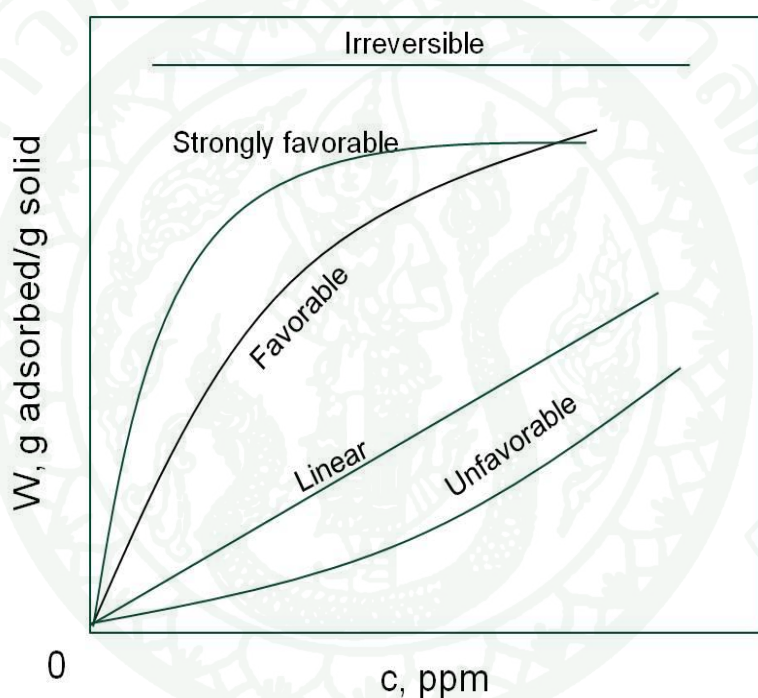
$\frac{C}{C_0}$ = ปริมาณความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ ณ เวลาหนึ่ง ต่อความเข้มข้นอิ่มตัว

t = เวลาที่การดูดซับอิ่มตัว (h)

t_0 = เวลาที่เริ่มดูดซับ (h)

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับ และการคำนวณปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ แสดงความสัมพันธ์ของสมดุลระหว่างความเข้มข้นในเฟสของไหลและความเข้มข้นในอนุภาคของตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับแก๊ส ความเข้มข้นจะอยู่ในหน่วยของร้อยละโดยโมล หรือความดันย่อย ส่วนของเหลวความเข้มข้นมักจะแสดงในหน่วยมวล เช่น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนตัวถูกดูดซับของแข็ง นิยมแสดงในหน่วยของมวลของตัวถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับเริ่มต้น



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ

สมการที่ (2) คำนวณปริมาณการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนตัวดูดซับ

$$W_{\text{sat}} = \frac{F_A [\int (1 - C/C_0) dt]}{W_{\text{adsorbent}} / \text{crosssection area}} \quad (2)$$

โดยที่

W_{sat} = ปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายต่อกรัมของตัวดูดซับ ($g_{\text{VOC}}/g_{\text{adsorbent}}$)

F_A = อัตราการไหลของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ($g/(h \cdot cm^2)$)

$\int (1 - C/C_0) dt$ = ปริมาณการดูดซับมาจากการอินทิเกรตกราฟ Breakthrough curve (g)

$W_{\text{adsorbent}}$ = ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (g)

crosssection area = พื้นที่หน้าตัดของเบดที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ (cm^2)

ส่วนความเข้มข้นตั้งต้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในหน่วย (mg/l) ที่มีค่าอยู่ในแกน Y คำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$\text{concentration} = \frac{C_0}{\text{ปริมาณที่เก็บสารตัวอย่าง}} \times MW_{\text{VOC}} \times \frac{10^3 mg}{g} \times \frac{10^3 ml}{l} \quad (3)$$

โดยที่

Concentration = ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/l)

C_0 = ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (mol)

MW_{VOC} = มวลโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (g/mol)

ปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายบนสารคอมโพสิตซิลิกา-ซีโอไลต์ ซึ่งได้จากการปรับความเข้มข้นตั้งต้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการควบคุมอุณหภูมิในการระเหยแสดงค่าดังตารางผนวกที่ ข1

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อุณหภูมิต่างๆ บน MSZ-1

อุณหภูมิที่ใช้ในการระเหย VOCs (°C)	ปริมาณการดูดซับ ($g_{VOCs}/g_{adsorbent}$)					
	เมทานอล	เอทานอล	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เฮกเซน
40	0.223	0.246	0.132	0.184	0.116	0.065
50	0.232	0.252	0.224	0.356	0.189	0.116
60	0.236	0.261	0.228	0.386	0.287	0.192
70	0.286	0.298	0.295	0.395	0.441	0.198
80	0.299	0.339	0.344	0.402	0.541	0.204
100	0.335	0.404	0.435	0.469	0.670	0.294

ซึ่งค่าความเข้มข้นตั้งต้นที่ได้จากการปรับอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งนำไปใช้ในการพล็อตกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับในแกน X แสดงดังตารางผนวกที่ ข2

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความเข้มข้นตั้งต้นของไอระเหยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้อุณหภูมิ
การระเหยต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ ในการระเหย VOCs (°C)	ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/L)					
	เมทานอล	เอทานอล	เบนซีน	โทลูอิน	ไซลีน	เฮกเซน
40	131.57	65.56	109.78	35.53	5.02	131.61
50	148.43	70.74	371.90	77.56	10.05	248.32
60	164.11	92.10	426.57	131.28	17.76	412.11
70	211.18	125.39	721.31	134.89	27.90	486.74
80	227.67	171.63	862.23	145.30	35.46	514.06
100	297.71	209.73	1087.64	179.64	43.93	988.21

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวอุษณี ถินถาวร
เกิดวันที่ 31 ตุลาคม 2528
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา
ประวัติการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยบูรพา

