

การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวของซิลิกาเจดด้วยสารอู่ควบไซเจน  
ต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน

ต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

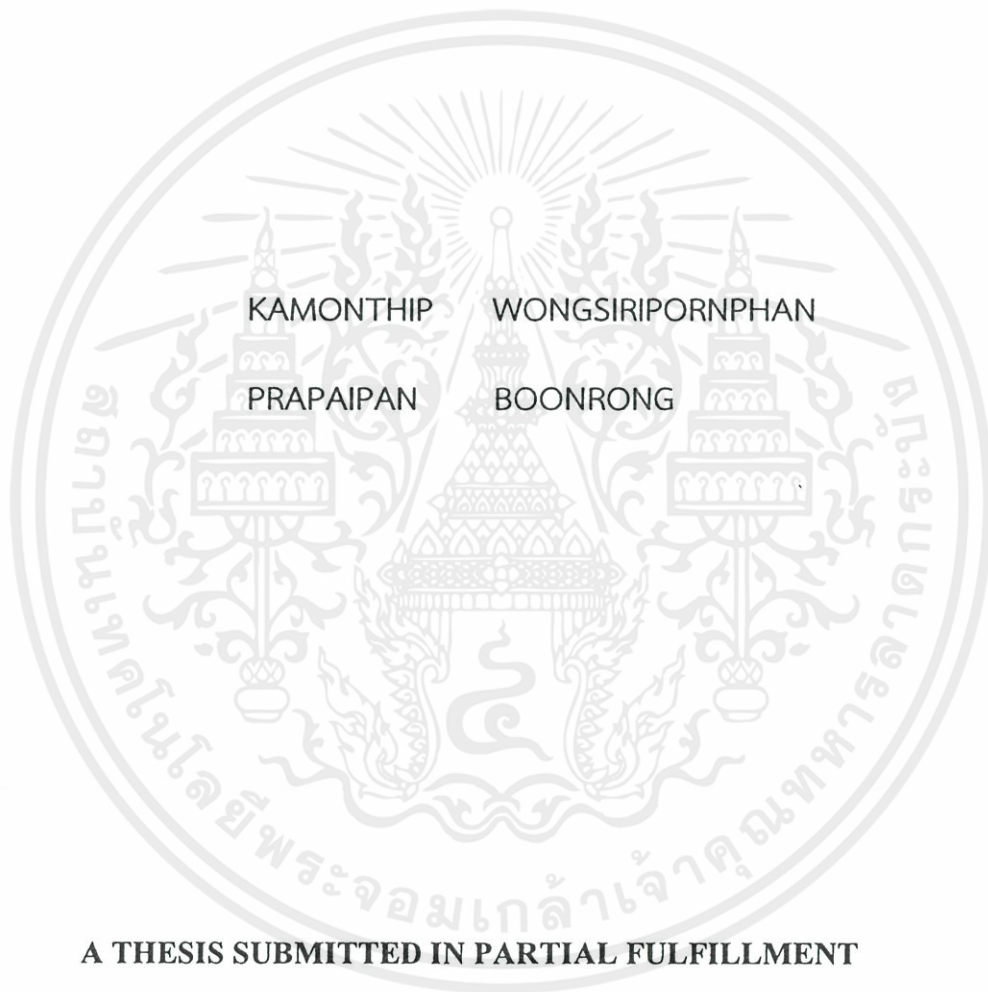
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังยังมีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

STUDY OF THE EFFECTS OF SURFACE MODIFICATION OF SILICA GEL  
USING SILANE COUPLING AGENT ON ADSORPTION OF METHYLENE  
BLUE SOLUTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEER IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณี **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** นำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2013

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน  
ต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู  
โดย กมลทิพย์ วงศ์ศิริพรพันธ์  
ประไพพรรณ บุญรงค์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ

( ผศ. ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์ )



.....กรรมการ

( รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา )



.....กรรมการ

( ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู
โดย	กมลทิพย์ วงศ์ศิริพรพันธ์ ประไพพรรณ บุญรงค์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. อภินันท์ นัมคนิสร์ณ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการเคลือบซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลนเพื่อปรับโมเลกุลของซิลิกาเจล จากนั้นทดสอบการดูดซับของซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบโดยนำไปดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ขนาดของซิลิกาเจล ชนิดของสารคู่ควบไซเลน และความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิด โดยขนาดของซิลิกาเจลที่ใช้ทดลองคือ ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ พบว่าขนาดของซิลิกาเจลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู จึงศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดยชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ประกอบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxy และสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxy และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ผลที่ได้คือซิลิกาเจลที่เคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxy สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีกว่า เนื่องจากสารละลายเมทิลีนบลูมีสภาพความเป็นขั้วบวก และสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxy ที่อยู่บนผิวของซิลิกาก็มีสภาพขั้วเป็นบวก จึงเกิดการผลักกันทำให้เป็นอุปสรรคในการดูดซับ แต่สารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxy เป็นสารที่มีสภาพไม่มีขั้วจึงดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ง่ายกว่า เมื่อศึกษาตัวแปรความเข้มข้นของสารละลายคู่ควบไซเลน โดยความเข้มข้นที่ใช้คือ 2% 4% 6% และ 8% พบว่า สำหรับสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxy ความเข้มข้นที่ดีที่สุดคือ 8% การเพิ่มความเข้มข้นทำให้การดูดซับดีขึ้นเนื่องจากการเพิ่มตัวที่ช่วยดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ส่วนสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxy ความเข้มข้นที่ดีที่สุดคือ 2% การเพิ่มความเข้มข้นทำให้การดูดซับแยลงเนื่องจากการเพิ่มประจุบวกแก่ซิลิกาเจลทำให้เกิดการผลักกันกับสารละลายเมทิลีนบลูมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูพบว่า ซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane มีค่า 4.6% สูงกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวเล็กน้อยที่ 4.3%

Report Title	Study of the effects of surface modification of silica gel using silane coupling agent on adsorption of methylene blue solution
By	Miss. Kamonthip Wongsiripornphan Miss. Prapaipan Boonrong
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2013
Advisor	Assist.Prof.Dr. Apinan Namkanisorn
Co- Advisor	Assoc. Prof. Prakob Kitchaiya, Ph.D.

### ABSTRACT

This thesis reports the study of the effects of surface modification of silica gel using silane coupling agent on the adsorption of methylene blue solution. The parameters studied consist of size of silica gel pallet, type and concentration of silane coupling agent. The experimental result shows that size of silica gel pallet has no significant effect on the adsorption of methylene blue. Two types of silane coupling agents are used to modify surface of silica gel: 3-methacryloxypropyltrimethoxy and 3-aminopropyltriethoxy. The result shows that the silica gel modified with 3-methacryloxypropyltrimethoxy silane is more effective to adsorb methylene blue solution due to non- polarity of its molecular structure, whereas 3-aminopropyltriethoxy has positive polarity resulting in the repulsive interaction with the positive polarity of silica gel surface. Varying silane concentration from 2 to 8% reveals that for 3-methacryloxypropyltrimethoxy higher concentration results in better adsorption. In contrast, for 3-aminopropyltriethoxy better adsorption occurs at lower silane concentration. Comparison of the efficiency of methylene blue adsorption shows that silica gel modified with 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane has a little higher efficiency than no treatment silica gel, 4.6% and 4.3%, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท คิสโก้ ที่ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารประกอบคู่ควบไซเลน เพื่อใช้เป็นสารเคมีในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการวิจัยและตรวจแก้ไวยากรณ์ รวมทั้งให้คำชี้แนะในทุกด้านระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา และ ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะต่างๆในงานวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ

อนึ่งขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องทุกคนที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา หากวิทยานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยมา ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กมลทิพย์

วงศ์ศิริพรพันธ์

ประไพพรรณ

บุญรงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... II

กิตติกรรมประกาศ ..... III

สารบัญ ..... IV

สารบัญตาราง ..... VII

สารบัญรูป ..... IX

บทที่ 1 บทนำ ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา ..... 1

1.3 ขอบเขตของการศึกษา ..... 1

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย ..... 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา ..... 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 3

2.1 ซิลิกาเจล ..... 3

2.1.1 คุณสมบัติและลักษณะของซิลิกาเจล ..... 3

2.1.2 ประเภทของซิลิกาเจล ..... 3

2.1.3 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวของซิลิกาเจล ..... 5

2.2 การปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลให้มีความเป็นขั้วที่ระดับต่างๆกัน ..... 5

2.2.1 สารคู่ควบไฮเลน ..... 5

2.2.2 การเคลือบผิวอนุภาคของซิลิกาเจลด้วยสารควบคู่ไฮเลน ..... 6

2.2.3 การดูดซับสารด้วยซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวแล้ว ..... 6

2.2.4 สารควบคู่ไฮเลนที่เลือกใช้ ..... 7

2.3 การวัดระดับความเป็นขั้วของสารควบคู่ไฮเลน ..... 8

2.4 การดูดซับ ..... 9

2.4.1 ความหมายและแรงในการดูดซับ ..... 9

2.4.2 กลไกของการดูดซับ ..... 11

2.4.3 ความสามารถในการดูดซับ ..... 11

2.4.4 ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ..... 14

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	14
บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน .....	15
3.1 ขั้นตอนการศึกษา .....	15
3.2 วิธีดำเนินงาน .....	15
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	15
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	15
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	16
3.3.1 การหาขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจล .....	16
3.3.2 การปรับปรุงพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลโดยการเคลือบด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน .....	16
3.3.3 การหาขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพพื้นผิวแล้ว .....	18
3.3.4 การวิเคราะห์ว่าสารคู่ควบไฮโดรเจนสามารถเคลือบพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลติดหรือไม่ .....	18
3.3.5 การหาค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ของสารคู่ควบไฮโดรเจน .....	18
3.3.6 การทำกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายเมทิลีนบลู .....	18
3.3.7 การทดลองดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจล .....	18
3.3.8 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจล ที่ปรับสภาพผิวแล้ว .....	19
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน .....	20
4.1 ผลการทดลองหาขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลจากเครื่อง BET .....	20
4.2 FTIR สเปกตรัม .....	21
4.2.1 ผลของซิลิกาเจล .....	22
4.2.2 ผลของสารคู่ควบไฮโดรเจน .....	24
4.2.3 ผลของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้ว .....	26
4.3 ผลของการหาค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) .....	30
4.4 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration Curve) ของสารละลายเมทิลีนบลู .....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

4.5 ผลการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจล.....	31
4.5.1 ผลการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ และเม็ดเล็ก.....	31
4.5.2 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจลธรรมดา และซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน.....	34
4.5.3 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วย สารละลายคู่ควบไซเลนที่มีความเข้มข้นต่างกัน.....	35
4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจล.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	39
5.1.1 ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจล.....	39
5.1.2 หมู่ฟังก์ชันที่วิเคราะห์จากเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์.....	39
5.1.3 ความมัมสัมผัสด และโครงสร้างทางเคมี.....	39
5.1.4 ผลของขนาดซิลิกาเจลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู.....	39
5.1.5 ผลของชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู.....	39
5.1.6 ผลของความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู.....	40
5.1.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิว.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	40
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก ก.....	43
ภาคผนวก ข.....	45
ภาคผนวก ค.....	53
ภาคผนวก ง.....	56
ภาคผนวก จ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ค่า Critical Surface Tension.....	9
ตารางที่ 4.1	ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลจากการวัดโดยใช้เครื่อง BET.....	20
ตารางที่ 4.2	ค่ามุมสัมผัสที่วัดได้จากการทดลอง .....	30
ตารางที่ ค.1	รวบรวมความถี่ของแถบ IR ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆในย่าน 4000-600 ซม. <sup>-1</sup> .....	54
ตารางที่ ง.1	ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายเมทิลีนบลู และค่าการดูดกลืนแสงที่จะนำไปพล็อตกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน .....	56
ตารางที่ ง.2	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ไม่ได้ถูกปรับสภาพผิวในเวลาต่างๆ.....	56
ตารางที่ ง.3	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 2% ในเวลาต่างๆ .....	57
ตารางที่ ง.4	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 2% ในเวลาต่างๆ .....	57
ตารางที่ ง.5	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ไม่ได้ถูกปรับสภาพผิวในเวลาต่างๆ.....	58
ตารางที่ ง.6	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 2% ในเวลาต่างๆ .....	58
ตารางที่ ง.7	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 4% ในเวลาต่างๆ .....	59
ตารางที่ ง.8	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 6% ในเวลาต่างๆ .....	60
ตารางที่ ง.9	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 8% ในเวลาต่างๆ .....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ฉบับด้านการค้า  
ที่สืบ.....

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ง.10	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 2% ในเวลาต่างๆ .....	61
ตารางที่ ง.11	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 4% ในเวลาต่างๆ .....	62
ตารางที่ ง.12	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 6% ในเวลาต่างๆ .....	62
ตารางที่ ง.13	ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 8% ในเวลาต่างๆ .....	63
ตารางที่ ง.14	ผลการทดลองจากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลที่ไม่ถูกปรับสภาพผิว.....	63
ตารางที่ ง.15	ผลการทดลองจากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 2% .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ลักษณะ Fine Pore ( Type A ) Silica Gel .....	3
รูปที่ 2.2	ลักษณะ Medium Pore ( Type B ) Silica Gel .....	4
รูปที่ 2.3	ลักษณะ Wide Pore ( Type C ) Silica Gel .....	4
รูปที่ 2.4	ลักษณะ Big Pore Silica Gel .....	4
รูปที่ 2.5	(ก) หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวซิลิกา (ข) รูปแบบต่างๆของหมู่ซิลานอล.....	5
รูปที่ 2.6	ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสารคู้ควบไซเลน.....	5
รูปที่ 2.7	การเกิดพันธะไซลอกเซน.....	6
รูปที่ 2.8	การเกิดพันธะระหว่างซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้วกับสารที่ถูกดูดซับ.....	6
รูปที่ 2.9	มุมสัมผัส (contact angle, $\theta$ ).....	8
รูปที่ 2.10	การดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการมีขั้วหรือไม่มีขั้ว.....	10
รูปที่ 2.11	กลไกของการดูดซับ .....	11
รูปที่ 2.12	ตัวอย่างการทดลองการดูดซับ.....	11
รูปที่ 2.13	กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) .....	12
รูปที่ 2.14	โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู.....	14
รูปที่ 3.1	การคนสารละลายคู้ควบไซเลนด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer.....	17
รูปที่ 3.2	ลักษณะการจัดอุปกรณ์ทดลอง.....	19
รูปที่ 4.1	FTIR สเปคตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดใหญ่.....	22
รูปที่ 4.2	FTIR สเปคตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดเล็ก.....	23
รูปที่ 4.3	FTIR สเปคตรัม ของสารคู้ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane .....	24
รูปที่ 4.4	FTIR สเปคตรัม ของสารคู้ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane .....	25
รูปที่ 4.5	FTIR สเปคตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู้ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane .....	26
รูปที่ 4.6	FTIR สเปคตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู้ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane .....	27
รูปที่ 4.7	FTIR สเปคตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู้ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane .....	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8	FTIR สเปกตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane .....	29
รูปที่ 4.9	กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู.....	31
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วย ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ .....	32
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วย ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก ซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane .....	33
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วย ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก ซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane .....	33
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจล เม็ดเล็ก ซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane และซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวโดย สารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane .....	34
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจล ที่ไม่ถูกปรับสภาพผิว ซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ที่มีความเข้มข้น 2% 4% 6% และ 8% .....	35
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจล ที่ไม่ถูกปรับสภาพผิว ซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ที่มีความเข้มข้น 2% 4% 6% และ 8% .....	36
รูปที่ 4.16	กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว ที่มีความสัมพันธ์ ระหว่าง $C/C_0$ กับเวลา .....	37
รูปที่ 4.17	กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง $C/C_0$ กับเวลา.....	38
รูปที่ ก.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\phi}{v(1-\phi)}$ กับ $\phi$ .....	43
รูปที่ ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง $p/V_0(p_0-p)$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจล เม็ดเล็กโดยเครื่อง BET.....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_0$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็ก โดยเครื่อง BET.....	46
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $p/V_0(p_0-p)$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดใหญ่โดยเครื่อง BET .....	47
รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_0$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ โดยเครื่อง BET.....	48
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $p/V_0(p_0-p)$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilaneโดยเครื่อง BET .....	49
รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_0$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilaneโดยเครื่อง BET.....	50
รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $p/V_0(p_0-p)$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane โดยเครื่อง BET..	51
รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_0$ กับ $p/p_0$ ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane โดยเครื่อง BET..	52
รูปที่ จ.1 กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว ที่ใช้ในการคำนวณ.	66
รูปที่ จ.1 กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ที่ใช้ในการคำนวณ.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ซิลิกาเจล (Silica Gel) เป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก คล้ายแก้ว และมีรูพรุนสูง ซิลิกาเจลเป็นสารประกอบรูปหนึ่งของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และสามารถสังเคราะห์ได้จากโซเดียมซิลิเกต โดยทั่วไป ซิลิกาเจลจะมีลักษณะเป็นโพรงมีรูพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก ประมาณ 800 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม หรือประมาณ 35-40 % ของน้ำหนักตัวเอง โดยทั่วไปนิยมใช้เป็นสารดูดความชื้น เนื่องจากมีคุณสมบัติดังนี้ สามารถดูดความชื้นได้ 30 % ของน้ำหนักตัวเอง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการอบที่อุณหภูมิสูง ไม่มีวันหมดอายุ หากเก็บในที่ไม่มีอากาศหรือความชื้น ไม่ใช่วัสดุไวไฟ และในการใช้งานสามารถบรรจุได้หลากหลายขนาด สะดวกในการเลือกใช้ นอกจากนี้ใช้ประโยชน์ในด้านการเป็นสารดูดความชื้นแล้ว ยังใช้ในอุตสาหกรรมการแยกสารได้อีกด้วย เช่น ใช้ในคอลัมน์โครมาโตกราฟี เพื่อแยกสารที่มีความเป็นขั้วสูง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับโมเลกุลของซิลิกาเจลให้มีความเป็นขั้วที่ระดับต่างๆกัน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการแยกสารที่มีความเป็นขั้วมาก ปานกลาง จนถึงสารที่ไม่มีขั้ว การปรับโมเลกุลจะใช้วิธีการทางเคมีโดยมีการเคลือบผิวอนุภาคของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agents) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการเข้าไปในโมเลกุลเดิม โดยการสร้างพันธะเคมีระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับซิลิกาเจล จะสามารถเปลี่ยนแปลงความขั้วของพื้นผิวซิลิกาเจลได้อย่างมีนัยสำคัญ ก่อให้เกิดโครงสร้างที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับโครมาโตกราฟี โดยมีคุณสมบัติเฉพาะเหมาะต่อการแยกสารที่ต้องการ การเลือกใช้หมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมของสารคู่ควบไซเลนเพื่อปรับสภาพผิวซิลิกาเจลจะก่อให้เกิดทางเลือกใหม่สำหรับการแยกสารที่แยกได้ยากโดยวิธีโครมาโตกราฟีทั่วไป อีกทั้งซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนจะมีราคาสูงกว่าซิลิกาเจลทั่วไปหลายเท่า

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อปรับระดับความขั้วของโมเลกุลซิลิกาเจลโดยการเคลือบผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

1.2.2 ศึกษาลักษณะการดูดซับของเมทิลีนบลูบนซิลิกาเจลที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้ว

#### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของซิลิกาเจลที่เลือกใช้

1.3.2 หาแนวทางเคลือบผิวซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลนที่มีความเหมาะสมกับสารที่ต้องการดูดซับ

1.3.3 เปรียบเทียบผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อระดับความขั้ว

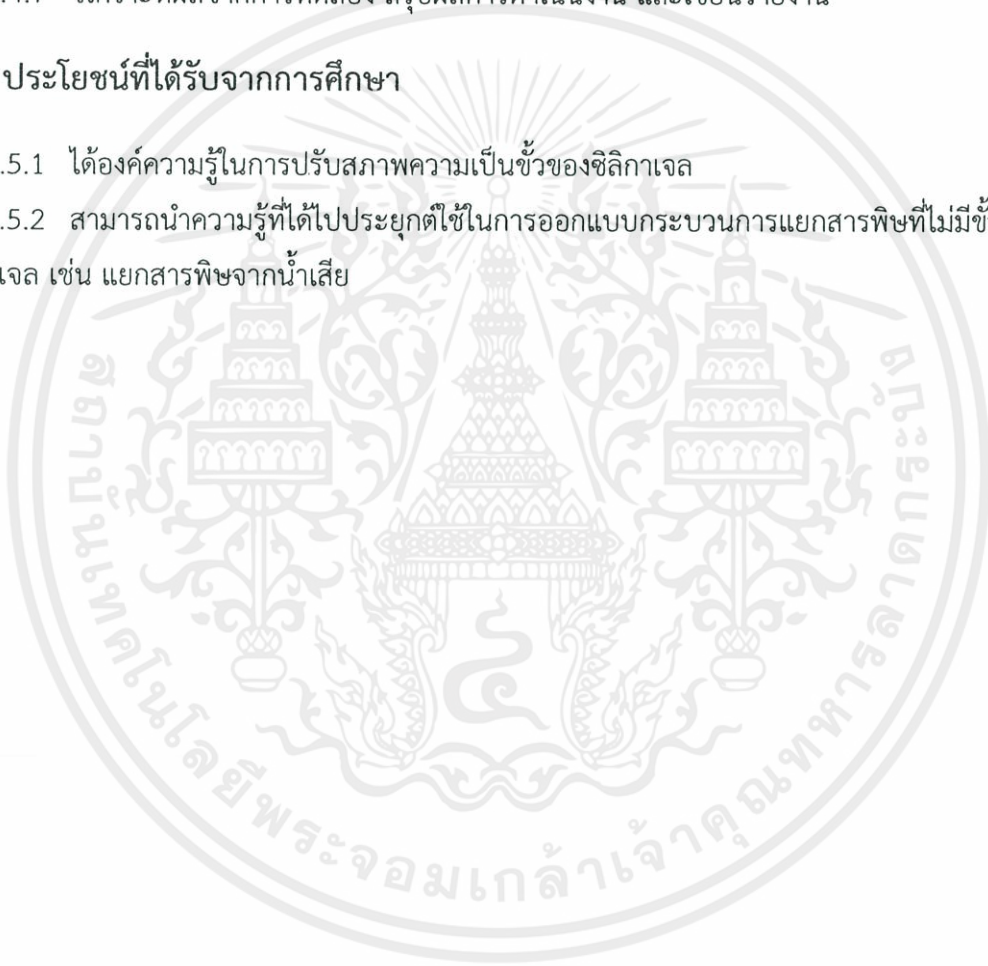
1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารไม่มีขั้วของซิลิกาเจลที่ผ่านการปรับสภาพผิวแล้ว

## 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปรับระดับความเป็นขั้วของพื้นผิวซิลิกาเจล
- 1.4.2 จัดเตรียมอุปกรณ์และออกแบบการทดลอง
- 1.4.3 วัดขนาดรูพรุนของซิลิกาเจล และวัดระดับความเป็นขั้วของสารคู่ควบไซเลน
- 1.4.4 ทำการทดลองปรับสภาพพื้นผิวซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน
- 1.4.5 ทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวแล้ว
- 1.4.6 ทำการทดลองดูดซับสารด้วยซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวแล้ว
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง สรุปผลการดำเนินงาน และเขียนรายงาน

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ในการปรับสภาพความเป็นขั้วของซิลิกาเจล
- 1.5.2 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการแยกสารพิษที่ไม่มีขั้วโดยใช้ซิลิกาเจล เช่น แยกสารพิษจากน้ำเสีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจล (Silica Gel) คือ สารสังเคราะห์จากทรายขาวผสมกรดกำมะถัน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide)

#### 2.1.1 คุณสมบัติและลักษณะของซิลิกาเจล

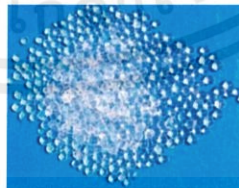
มีคุณสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้

1. เป็นโพรง มีรูพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก (ประมาณ 800 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม)
2. ใช้เป็นสารดูดความชื้น
3. ใช้ในคอลัมน์โครมาโตกราฟีแยกสารที่มีความเป็นขั้วสูง
4. ไม่มีวันหมดอายุ หากเก็บในที่ที่ไม่มีอากาศ หรือความชื้น
5. ไม่ใช่วัตถุไวไฟ
6. สามารถบรรจุได้หลากหลายขนาด สะดวกในการเลือกใช้
7. สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยวิธีการอบที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
8. การดูดความชื้นของซิลิกาเจลเป็น Physical adsorption เก็บความชื้นไว้ในโพรงโครงสร้างด้านใน และมีโอกาสคายความชื้นออกจากตัวเองได้

#### 2.1.2 ประเภทของซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของรูพรุน แบ่งเป็น 4 ประเภท ดังต่อไปนี้

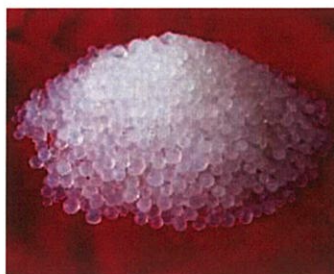
1. Fine Pore ( Type A ) Silica Gel



รูปที่ 2.1 ลักษณะ Fine Pore ( Type A ) Silica Gel [1]

โดยซิลิกาเจลประเภทนี้จะมีลักษณะทรงกลมโปร่งใส ซึ่งมีอยู่ 2 สี คือ ไม่มีสี กับสีเหลือง และมีคุณสมบัติต่างๆดังนี้ คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย 2.0-3.0 นาโนเมตร และอัตราส่วน พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เท่ากับ  $650 - 800 \text{ m}^2/\text{g}$

## 2. Medium Pore ( Type B ) Silica Gel



รูปที่ 2.2 ลักษณะ Medium Pore ( Type B ) Silica Gel [1]

โดยซิลิกาเจลประเภทนี้จะมีลักษณะทรงกลมโปร่งใสเหมือนกับประเภทแรก แต่จะมีสีเป็นสีนํ้านม และมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย 4.5-7.0 นาโนเมตร และมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เท่ากับ  $450 - 650 \text{ m}^2/\text{g}$

## 3. Wide Pore ( Type C ) Silica Gel



รูปที่ 2.3 ลักษณะ Wide Pore ( Type C ) Silica Gel [1]

โดยซิลิกาเจลประเภทนี้จะมีลักษณะรูปทรงดังในรูปที่ 2.3 แต่จะมีความโปร่งใสมีสีเป็นสีนํ้านมเหมือนกับประเภทที่ 2 และมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย 8.0 – 12.5 นาโนเมตร และมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เท่ากับ  $300 - 400 \text{ m}^2/\text{g}$

## 4. Big Pore Silica Gel



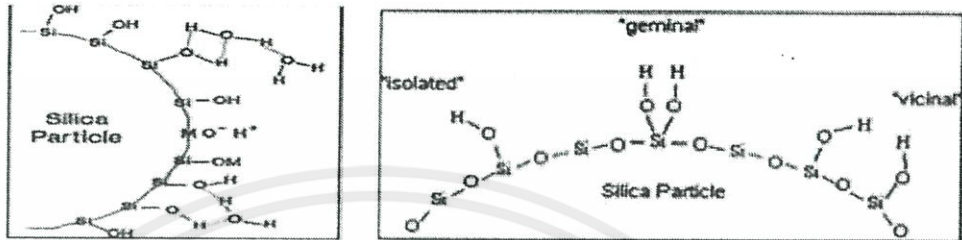
รูปที่ 2.4 ลักษณะ Big Pore Silica Gel [1]

โดยซิลิกาเจลประเภทนี้จะมีลักษณะทึบแสง และมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยมากกว่า 12.0 นาโนเมตร และอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เท่ากับ  $100 - 200 \text{ m}^2/\text{g}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวของซิลิกาเจล

ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว : โดยทั่วไปบนพื้นผิวของซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลกลุ่มอยู่อย่างหนาแน่น ( 4-5 หมู่ ต่อ  $100 \text{ \AA}^2$  ) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกานี้จะเกาะอยู่ในหลายลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 (ก) หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวซิลิกา

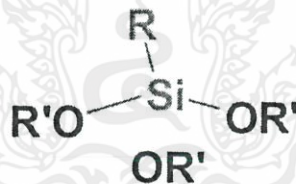
(ข) รูปแบบต่างๆของหมู่ไฮดรอกซิล [2]

## 2.2 การปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลให้มีความเป็นขั้วที่ระดับต่างๆกัน

ในการปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลให้มีความเป็นขั้วที่ระดับต่างๆกัน ซึ่งใช้วิธีทางเคมีโดยการเคลือบผิวอนุภาคของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agents)

### 2.2.1 สารคู่ควบไซเลน

ซึ่งลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสารคู่ควบไซเลน มีลักษณะดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสารคู่ควบไซเลน [3]

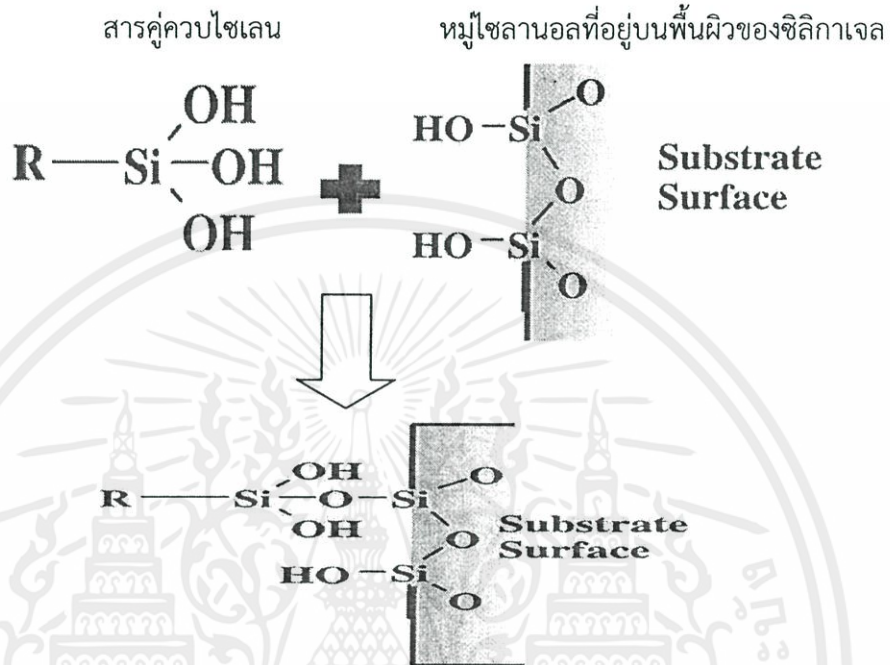
จากรูป สารคู่ควบไซเลนเป็นสารเคมีที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ ดังนี้

1.  $\text{OR}'$  คือ หมู่ฟังก์ชันแอลคอกซี (Alkoxy Group) เช่น หมู่เมทอกซี ( $-\text{OCH}_3$ ) หรือหมู่เอทอกซี ( $-\text{OC}_2\text{H}_5$ ) เป็นต้น ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (Siloxane linkage) ที่เสถียร และมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาออกมา

2.  $\text{R}$  คือ หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำพันธะกับสารที่ต้องการให้ซิลิกาเจลดูดซับ จากลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสารคู่ควบไซเลนที่สามารถเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชัน  $\text{R}$  ได้หลากหลาย ทำให้เกิดสารคู่ควบไซเลนได้หลายชนิด หมู่ฟังก์ชัน  $\text{R}$  นี้จึงเป็นตัวที่บ่งบอกระดับความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้ว

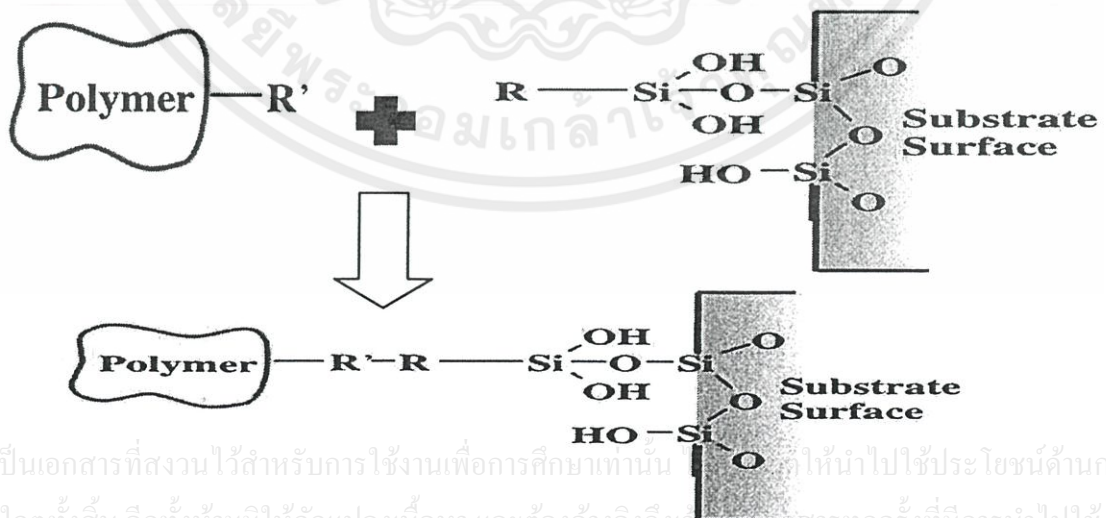
### 2.2.2 การเคลือบผิวอนุภาคของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน

เมื่อผิวของซิลิกาเจลถูกเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ไซลานอลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาเจลกับหมู่ฟังก์ชันแอลคอกซีของสารคู่ควบไซเลน เกิดเป็นพันธะซิลอกเซน ดังรูปที่ 2.7



### 2.2.3 การดูดซับสารด้วยซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวแล้ว

เมื่อมีการปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลนแล้ว ถ้านำซิลิกาเจลที่มีการปรับสภาพผิวนี้ไปดูดซับสารต่างๆ จะเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

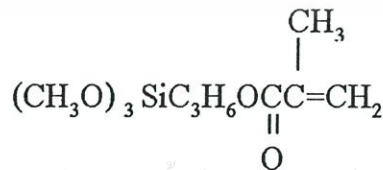
จากลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสารควบไซเลนที่สามารถเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชัน R ได้หลากหลาย ทำให้เกิดสารควบไซเลนได้หลายชนิด และจากรูปที่ 2.8 สารที่ถูกดัดซึบจะสามารถถูกดัดซึบได้ดีหรือไม่ดีจะขึ้นกับหมู่ฟังก์ชัน R ของสารควบไซเลน ดังนั้น ในการเลือกใช้สารควบไซเลนจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการดัดซึบ

ตัวอย่าง การเลือกสารควบไซเลน ให้เหมาะสมกับ สารที่ต้องการดัดซึบ

1. สารควบไซเลน :  $\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$  Vinyl  
เหมาะสมที่จะใช้กับสาร : Polyolefin , SBR (Styrene-Butadiene Rubber) , EPDM Rubber
2. สารควบไซเลน :  $\text{CH}_2\text{CH}(\text{O})\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$  Epoxy  
เหมาะสมที่จะใช้กับสาร : Epoxy , PBT (Polybutylene Terephthalate) , Urethanes , Acrylics , Polysulfides
3. สารควบไซเลน :  $\text{HSCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$  Mercapto  
เหมาะสมที่จะใช้กับสาร : Organic Rubber
4. สารควบไซเลน :  $\text{CH}_2=\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$  Methacrylate  
เหมาะสมที่จะใช้กับสาร : Unsaturated Polyesters , Acrylics , Polyolefin , EVA (Ethylene-Vinyl Acetate)

#### 2.2.4 สารควบไซเลนที่เลือกใช้

1. Product Name : KBE-903  
Chemical Name : 3-aminopropyltriethoxysilane  
Structure Formula :  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{SiC}_3\text{H}_6\text{NH}_2$
2. Product Name : KBM-503  
Chemical Name : 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane  
Structure Formula :

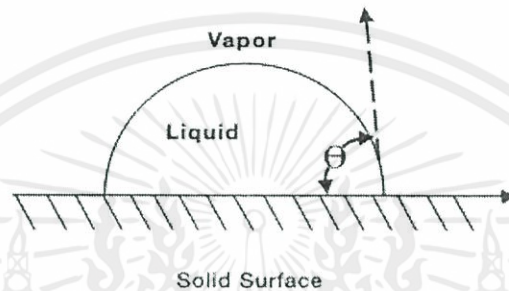


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การวัดระดับความเป็นขี้ของสารคู่ควบไซเลน

ภาวะการเปียก (wetting) คือความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจาก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล โดยระดับขั้นของภาวะการเปียกขึ้นกับความสมดุลระหว่าง แอดฮีชัน (Adhesion) และโคฮีชัน (Cohesion)

แรงแอดฮีชัน คือแรงระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งจะทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่วพื้นผิว ส่วนแรงโคฮีชัน แรงภายในระหว่างของเหลวด้วยกันเอง ซึ่งจะทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลมและไม่สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง



รูปที่ 2.9 มุมสัมผัส (contact angle,  $\theta$ ) [4]

มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง มุมสัมผัสนี้เป็นผลมาจากสมดุลระหว่างแรงแอดฮีชันกับแรงโคฮีชัน มุมสัมผัสนี้จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว

มุมสัมผัสที่น้อยกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

สำหรับกรณีถ้าของเหลวเป็นน้ำ พื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophilic (ชอบน้ำ) หรือมีความเป็นขี้สูง และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophobic (ไม่ชอบน้ำ) หรือมีความเป็นขี้ต่ำ หรือแทบไม่มีขี้เลย

ดังนั้น ถ้ามุมสัมผัสที่น้อยกว่า  $90^\circ$  แสดงว่าของแข็งนั้น หรือสารที่เคลือบอยู่บนของแข็งนั้นมีความเป็นขี้สูง ส่วนมุมสัมผัสที่มากกว่า  $90^\circ$  แสดงว่าของแข็งนั้น หรือสารที่เคลือบอยู่บนของแข็งนั้นมีความเป็นขี้ต่ำ หรือแทบไม่มีขี้เลย

นอกจากค่ามุมสัมผัสที่สามารถใช้วัดความเป็นขี้ได้แล้ว ยังมีค่า Critical Surface Tension ที่เอกส สามารถใช้วัดความเป็นขี้ของสารต่างๆได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 ค่า Critical Surface Tension

	$\gamma_c$ (dynes/cm)
3-(2-aminoethyl)-aminopropyltrimethoxysilane	33.5
aminopropyltriethoxysilane	35.0
methytrimethoxysilane	22.5
propyltrimethoxysilane	28.5
Silica, fused	78.0

โดยค่า Critical Surface Tension นี้ ถ้าเป็นพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีค่า Critical Surface Tension มากกว่า 45 แต่ถ้าเป็นพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะมีค่า Critical Surface Tension น้อยกว่า 35

## 2.4 การดูดซับ [5]

### 2.4.1 ความหมายและแรงในการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซ หรือของเหลวถูกดูดจับติดกับผิวด้านในของวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ โมเลกุลของก๊าซ หรือของเหลวที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ในขณะที่ของแข็งที่ใช้ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) สารดูดซับจะเป็นก้อนของแข็งที่มีลักษณะรูพรุน

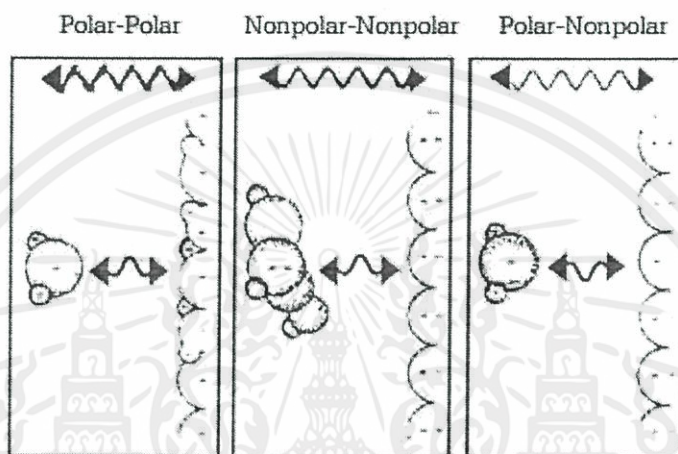
แรงที่ใช้ในกระบวนการดูดซับมี 2 ชนิด ได้แก่ แรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี ถ้าหากแรงที่ดูดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับติดกับผิวของสารดูดซับเป็นแรงทางกายภาพก็จะเป็นแรงดึงดูดที่ค่อนข้างอ่อนที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (vander waals' adsorption) และจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีเกิดขึ้น เมื่อต้องการนำเอาสารดูดซับมาใช้ใหม่ก็สามารถกำจัดสารที่ถูกดูดซับเหล่านี้ ออกได้โดยง่าย แต่ถ้าเป็นแรงทางเคมีจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากพันธะทางเคมี ซึ่งเป็นแรงที่ยึดติดกันแน่นมาก และทำให้ได้สารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับได้ยาก

การใช้แรงทางเคมี ปฏิกริยาเคมีจะหยุดลงเมื่อผิวของสารดูดซับถูกทำปฏิกิริยาโดยทั่วถึงแล้ว จึงทำให้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเรียงตัวบนสารดูดซับได้เพียงชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ขณะที่ในการใช้แรงทางกายภาพโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเรียงตัวกันได้หลายชั้น (multilayer) สำหรับแรงทางเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะสูงขึ้นด้วย ทำให้การดูดซับดีขึ้น ตรงกันข้ามกับแรงทางกายภาพ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับลดลง

แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นแรงไฟฟ้าสถิต ผลของไฟฟ้าสถิตที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดขึ้นอยู่กับความมีขั้ว (polar) หรือไม่มีขั้ว (non polar) ของทั้งโมเลกุลของสารถูกดูดซับ และโมเลกุลของสารดูดซับ สารที่มีขั้วจะมีการผลักรันของอะตอมที่มีประจุบวก และประจุลบภายในโมเลกุล

ของสารประกอบนั้น เช่น โมเลกุลของน้ำ ส่วนสารที่ไม่มีขั้วจะมีทั้งประจุบวก และประจุลบอยู่ในอะตอมเดียวกัน ตัวอย่างเช่น สารประกอบอินทรีย์ทั้งหลาย

การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้เนื่องจากผล 3 ประการ คือ ผลของการจัดเรียงตัว (orientation effect) ผลของการแพร่กระจาย (dispersion effect) และผลของการเหนี่ยวนำ (induction effect) ดังรูปที่ 2.10 สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วการดึงดูดกันและกันเกิดขึ้นได้เนื่องจากผลของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว 2 โมเลกุล โดยบริเวณที่มีประจุเป็นลบของโมเลกุลหนึ่งจะพยายามวิ่งเข้าหาบริเวณที่มีประจุเป็นบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง



ผลของการจัดเรียง ผลของการแพร่กระจาย ผลของการเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.10 การดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากการมีขั้วหรือไม่มีขั้ว [5]

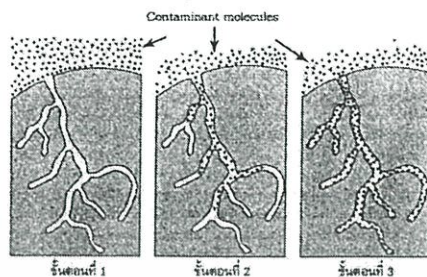
การดูดซับโมเลกุลของสารที่ไม่มีขั้วเกิดขึ้นได้โดยผลของการแพร่กระจาย เมื่อโมเลกุลของสารที่ไม่มีขั้ว 2 ชนิด เข้าใกล้กัน พลังงานที่มีในโมเลกุลของสารนั้นจะลดลง และจะยึดติดกัน

การดูดซับระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำ โมเลกุลที่มีขั้วสามารถเหนี่ยวนำ หรือทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วเกิดมีขั้วขึ้นเมื่ออยู่ใกล้กัน อย่างไรก็ตามแรงเหนี่ยวนำนี้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการจัดเรียงตัว และผลของการแพร่กระจาย ดังนั้นระบบดูดซับที่มีประสิทธิภาพจะมีลักษณะใดลักษณะหนึ่ง ดังนี้ คือ ใช้สารดูดซับที่มีขั้วเพื่อดูดซับสารที่มีขั้ว และใช้สารดูดซับที่ไม่มีขั้วเพื่อดูดซับสารที่ไม่มีขั้ว ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับจะมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับด้วยตนเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 กลไกของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.11

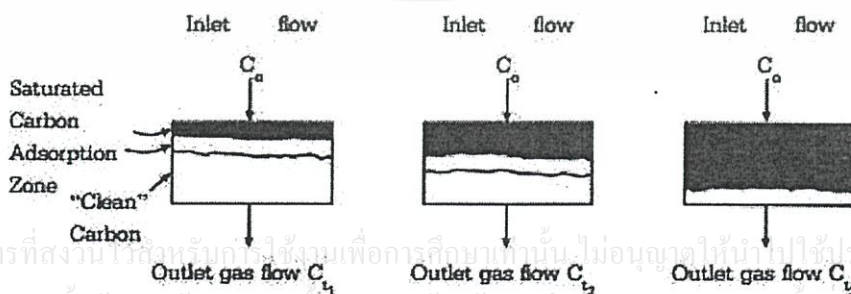


รูปที่ 2.11 กลไกของการดูดซับ [5]

1. เป็นการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไปยังผิวภายนอกของสารดูดซับ
2. เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนส่วนนี้
3. โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับโดยเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ การแพร่ในขั้นตอนที่ 1 เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในตัวทำละลายกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ ทำให้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไหลจากตัวทำละลายซึ่งเข้มข้นมากกว่าไปยังผิวของสารดูดซับซึ่งเข้มข้นน้อยกว่า เมื่อถึงผิวของสารดูดซับก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนต่อไป การเคลื่อนที่นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนในช่วงแรก ขณะที่รูพรุนมีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่โดยการแพร่แบบเป็นกลุ่มก้อน (bulk diffusion) เมื่อขนาดของรูพรุนเล็กลงการเคลื่อนที่ก็จะเปลี่ยนเป็นการแพร่แบบผิว (surface diffusion)

## 2.4.3 ความสามารถในการดูดซับ

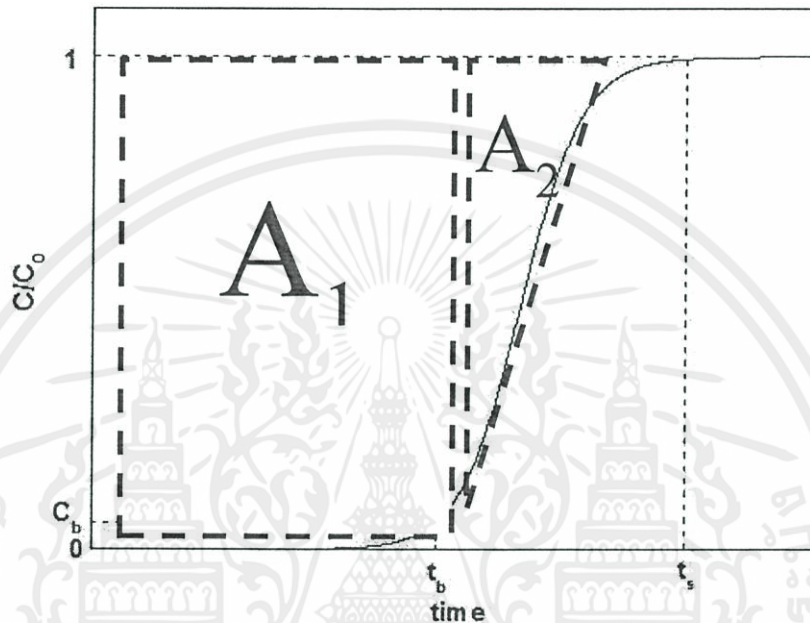
สมดุลการดูดซับเป็นสภาวะที่สารดูดซับอิ่มตัว ซึ่งเป็นสภาวะที่จำนวนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่มาถึงผิวหน้าของสารดูดซับจะเท่ากับจำนวนโมเลกุลที่หลุดออกจากผิวของสารดูดซับ และไม่สามารถดูดซับสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวทำละลายได้อีก ซึ่งสภาพสมดุลเป็นตัวกำหนดปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดที่จะถูกดูดซับไว้ได้ ณ สภาวะปฏิบัติการนั้นๆ



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการทดลองการดูดซับ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 เป็นตัวอย่างการทดลองการดูดซับ ที่ให้สารที่ถูกดูดซับไหลผ่านสารดูดซับจากบนลงล่าง โดยให้ไหลผ่านต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อตัวกลางที่เป็นสารดูดซับเกิดการอิ่มตัว การดูดซับจะเริ่มลดลงบริเวณถ่ายโอนมวลสารจะเคลื่อนไปตามทิศทางการไหลของสาร และในที่สุดสารที่ถูกดูดซับจะหลุดออกจากชั้นของสารดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออกจากตัวกลางกับ เวลา ซึ่งจะเรียกว่า กราฟเบรคทรู (breakthrough curve) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) [6]

ซึ่งกราฟนี้เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา

- เมื่อ
- $C$  คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ออกมาเวลาใดๆ
  - $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ
  - $C_b$  คือ ค่า  $C/C_0 = 0.01$  ถึง  $0.05$
  - $t_b$  คือ เวลาที่มีค่า  $C/C_0 = C_b$  หรือที่เรียกว่า Break point time
  - $t_s$  คือ เวลาที่สารดูดซับทั้งหมดเกิดการอิ่มตัว จนสารที่ถูกดูดซับออกมามีความเข้มข้นเท่ากับตอนเริ่มต้น หรือที่เรียกว่า Dead time

โดยที่  $t_b$  ความเข้มข้นที่ทางออกจะเริ่มเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะเท่ากับความเข้มข้นทางเข้าที่เวลา  $t_s$  โดยที่จุดนี้อาจเรียกว่า เป็นจุดที่ความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับสารเริ่มหมดไปถึงจุดอิ่มตัวทั้งหมด คือ จุดที่จะดูดซับปริมาณของสารได้สูงสุดต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเบรคทรู (breakthrough curve) นี้ สามารถคำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้  
เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการดูดซับ ( $t_t$ )

$$t_t = \int_0^\infty \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt = A_1 + A_2 \quad (1)$$

เมื่อ  $A_1$  คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.18 หรือเวลาที่ใช้ในการดูดซับของสารจนกระทั่งเริ่มมีสารที่ออกมา ( $t_u$ ; Usable capacity of bed)

ซึ่งหาได้จาก  $A_1 = t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad (2)$

$A_2$  คือ พื้นที่สามเหลี่ยมในรูปที่ 2.18

ถ้าในการดูดซับมีการแพ็คสารลงในคอลัมน์ (Pack Column) จะสามารถคำนวณหาความสูงต่างๆของคอลัมน์ และค่าอื่นๆได้จากสมการดังต่อไปนี้

สมการ Bed Length

$$\frac{H_B}{H_T} = \frac{t_u}{t_t} \quad (3)$$

และ  $H_T = H_B + H_{UNB} \quad (4)$

เมื่อ  $H_T$  คือ ความสูงทั้งหมดของคอลัมน์ (Total Bed Length)

$H_B$  คือ ความสูงของคอลัมน์ที่จุด Break point (Length of bed up to Break point)

$H_{UNB}$  คือ ความสูงของคอลัมน์หลังจากจุด Break point (Length of unused bed)

สมการ Saturation Loading capacity  $\left( \frac{\text{น้ำหนักทั้งหมดของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ}}{\text{น้ำหนักของสารดูดซับ}} \right)$

หาได้จาก  $F_g = F_v \times D \quad (5)$

เมื่อ  $F_g$  คือ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับ ที่มีหน่วยเป็น น้ำหนัก/เวลา

$F_v$  คือ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับที่มีหน่วยเป็น ปริมาตร/เวลา

$D$  คือ ความหนาแน่นของสารที่ถูกดูดซับ

จากนั้น  $T = C_0 \times F_g \times t_t \quad (6)$

เมื่อ  $T$  คือ น้ำหนักทั้งหมดของสารที่ถูกดูดซับ

จะได้ Saturation Loading capacity  $= \frac{T}{W} \quad (7)$

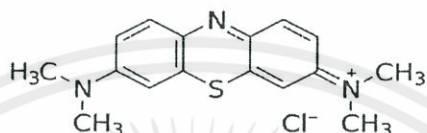
เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของสารดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีเมล: [info@ajac.ac.th](mailto:info@ajac.ac.th) หรือ โทร: 02-524-2000 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)

สารที่เลือกใช้เป็นตัวถูกดูดซับในการทดลองจะใช้สีย้อมที่มีชื่อว่า เมทิลีนบลู (Methylene Blue) มีสูตรทางเคมีคือ  $C_{16}H_{18}N_3SCl$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 319.85 g/mol จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 100-110 องศาเซลเซียส มีลักษณะโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2.14

เมทิลีนบลูที่อุณหภูมิห้องจะปรากฏเป็นของแข็งไม่มีกลิ่นผงสีเขียวเข้ม และจะกลายเป็นสีฟ้าหรือสีน้ำเงินเมื่อละลายในน้ำ (3 โมเลกุลของน้ำต่อ 1 โมเลกุลของเมทิลีน) เมทิลีนบลูถูกนำมาใช้ในงานหลายสาขา เช่น ใช้อย้อมเนื้อเยื่อพืช และเนื้อเยื่อสัตว์ ในงานทางชีววิทยา



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู [7]

ในการทดลองจะวัดค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูในช่วงความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร

#### 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Choma และคณะ [8] เปรียบเทียบลักษณะการดูดซับ (Adsorption characteristic) ของพื้นผิวซิลิกาเจลที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย n-octyl และรายงานวาลักษณะการดูดซับที่ดีเป็นผลจากความหนาแน่นพันธะ สมบัติทางโครงสร้างและพื้นผิวของซิลิกาเจลที่เปลี่ยนไป

C. H. Lee และคณะ [9] ศึกษาอนุภาคนาโนที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจนในระหว่างกระบวนการโซลเจล โดยสามารถปรับระดับความชอบน้ำ (hydrophilicity) ของสายโซ่ไฮโดรเจนบนอนุภาคซิลิกา การทดสอบนี้คือการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) และทดสอบความสามารถในการเปียกน้ำของพื้นผิว

S. Standeker และคณะ [10] ศึกษาระดับความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ของพื้นผิว Silica monolith aerogels ที่ควบคุมโดยการเติมสารคู่ควบไฮโดรเจน methyltrimethoxysilane (MTMS) หรือ trimethylethoxysilane (TMES) ในระหว่างกระบวนการโซลเจล การทดสอบความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวใช้วิธีวัดมุมสัมผัส (Contact angle) และศึกษาคุณลักษณะของ aerogel ด้วยเทคนิค FTIR, DSC และวัดความพรุนของโครงสร้าง ผลการทดสอบพบว่า Silica monolith aerogels ที่ผ่านการปรับสภาพผิวสามารถใช้เป็นตัวดูดซับที่ดีเยี่ยมสำหรับสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษจากน้ำเสีย

X. Xie และคณะ [11] ทบทวนบทความวิชาการด้านการใช้สารคู่ควบไฮโดรเจนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเส้นใยธรรมชาติ และกล่าวถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างของสารคู่ควบไฮโดรเจนที่มีผลต่อความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว กลไกการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมตริกซ์พอลิเมอร์ และรายงานการปรับปรุงประสิทธิภาพของสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจนที่มีสมรรถนะเชิงกลและการใช้งานภายนอกของวัสดุเส้นใย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1.1 รวบรวม และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

3.1.2 ออกแบบอุปกรณ์ และวิธีในการทดลอง

3.1.3 ทำการทดลอง

3.1.4 สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน

#### 3.2 วิธีดำเนินงาน

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำ
2. เอทานอล
3. สารควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane
4. สารควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane
5. เมทิลีนบลู
6. ซิลิกาเจล 2 ขนาด ได้แก่ ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET)
2. เครื่อง Magnetic Stirrer
3. กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
4. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. นาฬิกาจับเวลา
6. บีเปตแบบมีสเกลขนาด 10 มิลลิลิตร
7. เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shinko Denshi รุ่น AJ-420CE
8. กรวยกรอง
9. กระดาษกรอง
10. ตู้อบ ยี่ห้อ Carbolite
11. กระดาษฟอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ถาดสแตนเลส
13. เครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์
14. แผ่นกระจก
15. หลอดหยดสาร (Dropper)
16. กล้องถ่ายรูป
17. ไม้ครึ่งวงกลมที่ใช้วัดมุม
18. ซ้อนตักสาร
19. แท่งแก้วคนสาร
20. ขวดปรับปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
21. ขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตร
22. ขวดปรับปริมาตร 250 มิลลิลิตร
23. ขวดมีฝาปิดขนาดประมาณ 300 มิลลิลิตร
24. เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Janke&Kunkel รุ่น HS 500
25. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)
26. หลอดทดลอง
27. ขวดน้ำกลั่น
28. ปีเปตขนาด 25 ml
29. บิวเรต
30. ขายึดบิวเรต

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

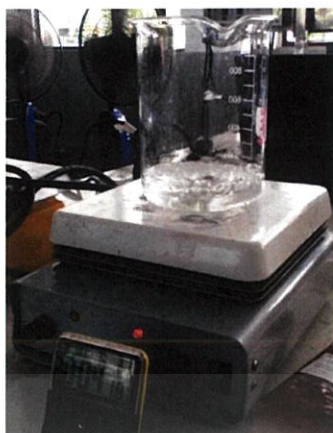
#### 3.3.1 การหาขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจล

1. วัดขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลทั้ง 2 ขนาด ด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET)

#### 3.3.2 การปรับปรุงพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลโดยการเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน

1. เตรียมสารละลายเอทานอลเข้มข้น 95% โดยปริมาตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Magnetic Stirrer ในการคนสารให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที

2. จากนั้นเตรียมสารละลายคู่ควบไซเลน โดยการปีเปตสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 2 มิลลิลิตร (เพื่อให้ได้สารละลายคู่ควบไซเลนเข้มข้น 2%) ใส่ลงในสารละลายเอทานอล 95% ที่เตรียมไว้แล้ว โดยใช้เครื่อง Magnetic Stirrer ในการคนสารให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดไฮโดรไลซิส



รูปที่ 3.1 การคนสารละลายคั่วควบไซเลนด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer

3. ชั่งซิลิกาเจล 20 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง
4. ใส่ซิลิกาเจลลงไปนสารละลายคั่วควบไซเลน เพื่อเคลือบสารคั่วควบไซเลนบนพื้นผิว โดยใช้เครื่อง Magnetic Stirrer ในการคนสารให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที
5. จากนั้นนำสารละลายคั่วควบไซเลนไปกรองเพื่อแยกซิลิกาเจลที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวแล้วออกมา
6. Rinse ซิลิกาเจลด้วยเอทานอลเล็กน้อย
7. นำซิลิกาเจลที่แยกออกมาใส่ภาตสดแตนเลสที่หุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ นำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลาประมาณ 5-10 นาที
8. นำออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็นสักครู่ แล้วเก็บซิลิกาเจลไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด

#### ตอนที่ 1 เปลี่ยนขนาดซิลิกาเจล

ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 1-5 ที่กล่าวมาข้างต้น แต่เปลี่ยนขนาดของซิลิกาเจลที่แตกต่างกัน ได้แก่ ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ แล้วจะเลือกซิลิกาเจลขนาดที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารได้ดีกว่าจากการทดลองดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่เปลี่ยนแปลงปัจจัยอื่นต่อไป

#### ตอนที่ 2 เปลี่ยนชนิดของสารคั่วควบไซเลน

จากซิลิกาเจลที่เลือกมาจากตอนที่ 1 จะทำการทดลองต่อเหมือนกับข้อ 1-5 ที่กล่าวมาข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดสารคั่วควบไซเลนที่ใช้ในการเคลือบซิลิกาเจล โดยจะใช้สารคั่วควบไซเลนทั้งหมด 2 ชนิด คือ 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane และ 3-aminopropyltriethoxysilane

#### ตอนที่ 3 เปลี่ยนความเข้มข้นของสารคั่วควบไซเลนทั้ง 2 ชนิด

ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 1-5 ที่กล่าวมาข้างต้น แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารคั่วควบไซเลน โดยจะใช้ความเข้มข้นสารคั่วควบไซเลนในสารละลายแอลกอฮอล์ 4 ความเข้มข้น คือ 2% (ใช้สารคั่วควบไซเลน 2 มิลลิลิตรต่อสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร), 4% (ใช้สารคั่วควบไซเลน 4 มิลลิลิตรต่อสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร), 6% (ใช้สารคั่วควบไซเลน 6.4 มิลลิลิตรต่อสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร) และ 8% (ใช้สารคั่วควบไซเลน 8.7 มิลลิลิตรต่อสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร)

### 3.3.3 การหาขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพพื้นผิวแล้ว

1. วัดขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวแล้วด้วยสารคู่ควบไซเลน ทั้ง 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายคู่ควบไซเลน 2% ด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET)

### 3.3.4 การวิเคราะห์ว่าสารคู่ควบไซเลนสามารถเคลือบพื้นผิวของซิลิกาเจลติดหรือไม่

1. นำซิลิกาเจล ซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้ว และสารคู่ควบไซเลน ไปเข้าเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

### 3.3.5 การหาค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ของสารคู่ควบไซเลน

1. เตรียมสารละลายเอทานอลเข้มข้น 95% โดยปริมาตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Magnetic Stirrer ในการคนสารให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที
2. จากนั้นเตรียมสารละลายคู่ควบไซเลน โดยการปิเปตสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 2 มิลลิลิตร (เพื่อให้ได้สารละลายคู่ควบไซเลนเข้มข้น 2%) ใส่ลงในสารละลายเอทานอล 95% ที่เตรียมไว้แล้ว โดยใช้เครื่อง Magnetic Stirrer ในการคนสารให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดไฮโดรไลซิส
3. นำแผ่นกระจกแช่ในสารละลายคู่ควบไซเลนในแอลกอฮอล์ ทั้งไว้ประมาณ 5 นาที
4. Rinse กระจกด้วยเอทานอลเล็กน้อย
5. นำกระจกไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
6. นำน้ำหยดบนกระจกหนึ่งหยด
7. ถ่ายรูปหยดน้ำบนแผ่นกระจก
8. วัดมุมสัมผัสของน้ำบนแผ่นกระจก

### 3.3.6 การทำกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration Curve) ของสารละลายเมทิลีนบลู

1. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 8 ppm และ 9 ppm
2. นำสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 8 ppm มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นใหม่ ที่ความเข้มข้น 4 ppm และ 1.6 ppm
3. นำสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 9 ppm มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นใหม่ ที่ความเข้มข้น 4.5 ppm , 2.25 ppm และ 1.125 ppm
4. นำสารละลายเมทิลีนบลูทุกความเข้มข้นที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสง

### 3.3.7 การทดสอบดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจล

1. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นประมาณ 8 ppm หรือความเข้มข้นใกล้เคียง ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเพื่อประโยชน์ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บรรจุสารละลายเมทิลีนบลูลงในขวดที่มีฝาปิดขนาด 300 มิลลิลิตร
3. นำซึลิกาเจลแห้งลงในสารละลายเมทิลีนบลู ปิดฝาขวดให้สนิท
4. นำขวดสารละลายเมทิลีนบลูที่แห้งซึลิกาเจลไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า
5. จับเวลา แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูมาวัดค่าการดูดกลืนแสงและบันทึกค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูจะคงที่หรือเข้าใกล้ศูนย์

### 3.3.8 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซึลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวแล้ว

1. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นประมาณ 8 ppm หรือความเข้มข้นใกล้เคียง แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสง
2. นำซึลิกาเจลประมาณ 20 g ที่ปรับสภาพผิวแล้วใส่ลงในปิเปตขนาด 25 ml
3. นำสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมไว้มาใส่ลงในบิวเรต
4. จัดอุปกรณ์ปิเปตจากข้อที่ 2 และบิวเรตจากข้อที่ 3 ให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะการจัดอุปกรณ์ทดลอง

โดยจากรูปที่ 3.2 จะต้องให้บิวเรตอยู่ด้านบนปิเปต และจัดให้สารที่ออกจากบิวเรตสามารถเข้าสู่ปลายด้านบนของปิเปตได้พอดี

5. จากนั้นเปิดวาล์วของบิวเรตให้สารละลายเมทิลีนบลูไหลลงไปยังปิเปต แล้วปรับอัตราการไหลให้ไหลอย่างพอเหมาะ

6. เก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูที่ไหลออกมาจากปลายปิเปตด้านล่างทุกๆ 1 ชั่วโมง เพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าสารละลายเมทิลีนบลูที่ไหลออกมาจะมีความเข้มข้นเท่ากับสารละลายเมทิลีนบลูที่ใส่เข้าไป

## บทที่ 4

## ผลการดำเนินงาน

## 4.1 ผลการทดลองหาขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลจากเครื่อง BET

จากการทดลองได้มีการใช้ซิลิกาเจล 2 ขนาด ซึ่งมีขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวแตกต่างกัน โดยขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวจะส่งผลต่อการทำพันธะในการเคลือบปรับพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน ทางผู้ทดลองจึงได้มีการนำซิลิกาเจลทั้ง 2 ขนาด ไปตรวจสอบขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิว โดยนำไปทดสอบเข้าเครื่อง BET ทำให้ได้ผลออกมาดังตารางที่ 4.1

นอกจากนี้ในการทดลองได้มีการเคลือบพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน แล้วจะนำไปทำการทดลองดูดซับต่อนั้น ในการเคลือบพื้นที่ผิวก็อาจส่งผลให้ทั้งพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของซิลิกาเจลเปลี่ยนไป ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซับสารด้วยเช่นกัน ผู้ทดลองจึงได้ทำการทดสอบขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วย โดยซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้วที่จะถูกนำมาตรวจสอบจะตรวจสอบแค่ซิลิกาเจลเม็ดเล็กเท่านั้น เนื่องจากเป็นซิลิกาเจลที่ใช้ในการเปรียบเทียบปัจจัยอื่นๆเป็นหลัก ในการทดสอบจึงได้ผลออกมาดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลจากการวัดโดยใช้เครื่อง BET

	ขนาดรูพรุน (nm )	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)
ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก	2.09	677.52
ซิลิกาเจลเม็ดใหญ่	2.37	782.83
ซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane	2.14	531.63
ซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane	2.07	612.41

จากผลการวัดขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลทั้ง 4 แบบ พบว่าขนาดรูพรุนที่วัดได้ของซิลิกาเจลที่ยังไม่ถูกปรับสภาพผิวทั้ง 2 แบบนั้น มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งทางผู้ทดลองคิดว่า อาจไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณของสารที่สามารถเคลือบติดผิวของซิลิกาเจลที่มีขนาดแตกต่างกัน ส่วนขนาดรูพรุนของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้วอาจมีการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนไปจากตอนที่ยังไม่ปรับสภาพผิว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารที่เคลือบผิวซิลิกาเจลมีการเคลือบจนติดซิลิกาเจลอยู่บ้าง แต่จะมากน้อยเพียงใดต้องไปดูที่การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์ ต่อไป และถ้าดูความแตกต่างเล็กน้อยเพียงใดต้องไปดูที่การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์ ต่อไป และถ้าดูความแตกต่างเล็กน้อยเพียงใดต้องไปดูที่การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์ ต่อไป

ส่วนพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลทั้ง 4 แบบ ทั้งที่ไม่ถูกปรับสภาพผิว และถูกปรับสภาพผิวแล้วทำให้พื้นที่ผิวมีน้อยลงนั้น เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วก็มีการเปลี่ยนแปลง หรือความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจส่งผลทำให้สามารถดูดซับสารแตกต่างกันไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

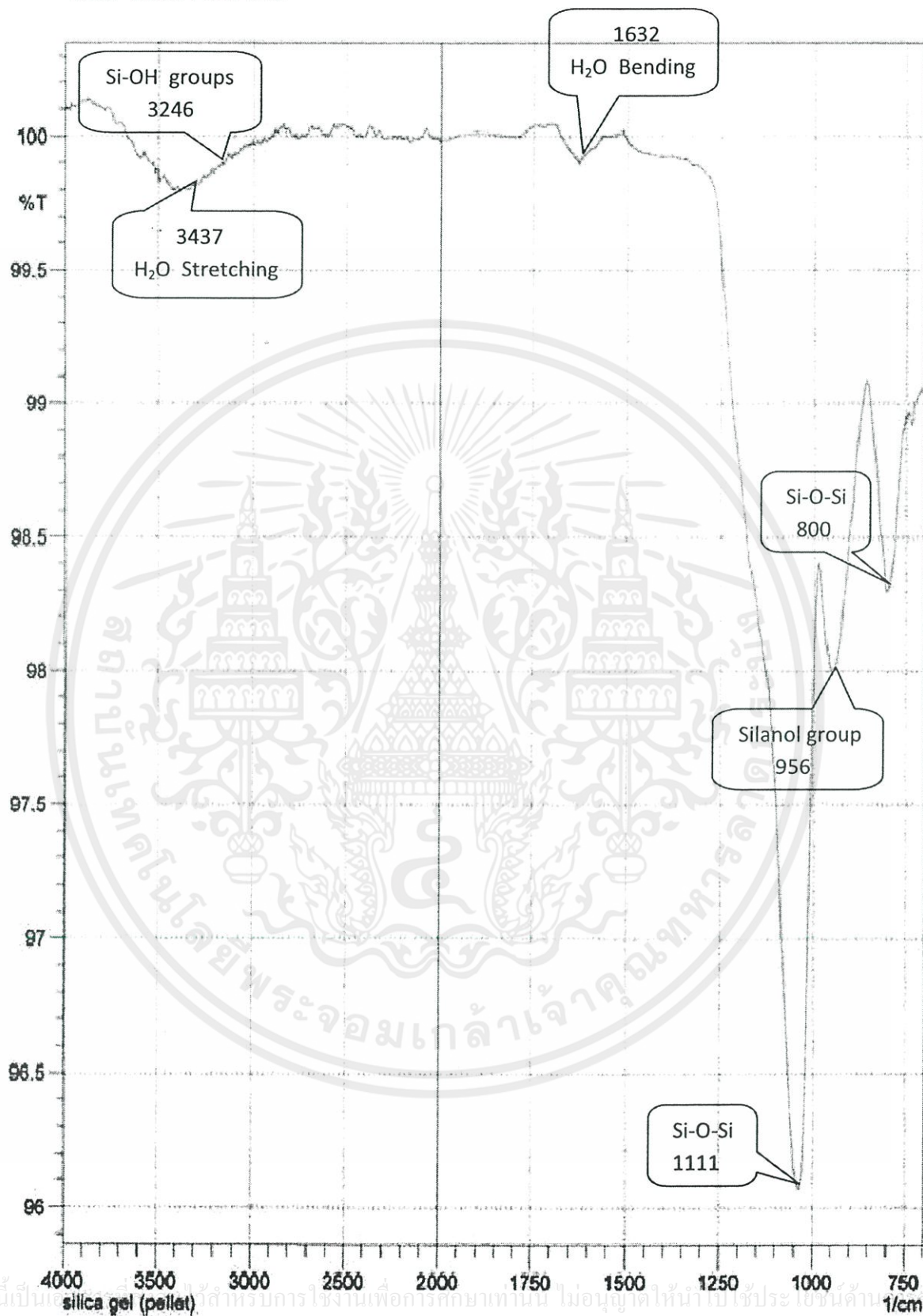
#### 4.2 FTIR สเปกตรัม

สเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบสารด้วยเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์ จะช่วยนำไปวิเคราะห์ได้ว่า สารที่นำไปทดสอบมีหมู่ฟังก์ชันใดเป็นองค์ประกอบบ้าง โดยการดูจากพีคที่เกิดขึ้นในผลที่วิเคราะห์ได้ว่า ตรงกับพีคของหมู่ฟังก์ชันใด ซึ่งถ้าเรานำสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้ว ไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของซิลิกาเจล และสเปกตรัมของสารคู่ควบไซเลน จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่าในการเคลือบสารคู่ควบไซเลนลงบนผิวของซิลิกาเจลเพื่อปรับสภาพผิว เราสามารถเคลือบสารคู่ควบไซเลนติดลงไปบนพื้นผิวของซิลิกาเจลมากขึ้นเพียงใด ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์สารต่างๆ ด้วยเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์ มีลักษณะดังต่อไปนี้

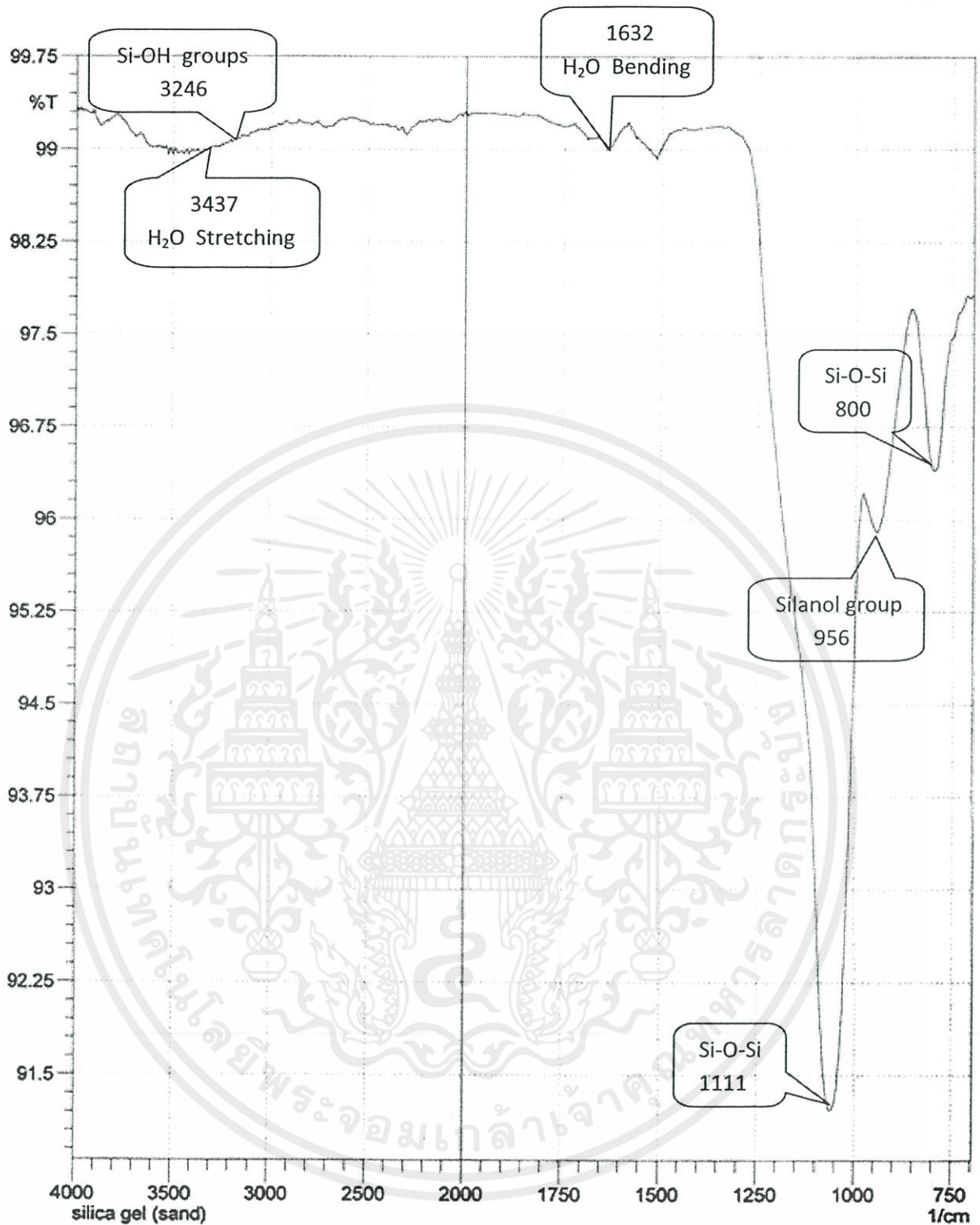


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.1 ผลของซิลิกาเจล



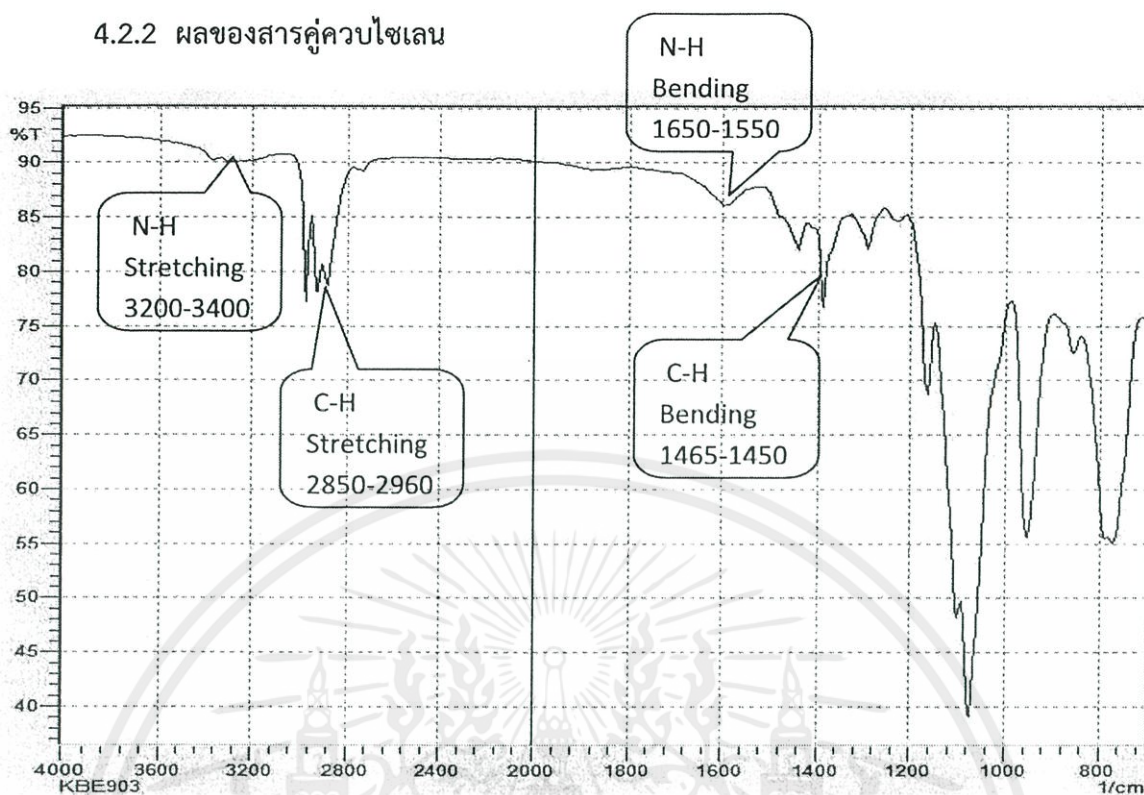
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 silca gel (pellet) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดใหญ่



รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดเล็ก

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ซิลิกาเจล 2 ขนาด ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ผลออกมามีลักษณะคล้ายกันมาก เนื่องจากทั้ง 2 ขนาด เป็นซิลิกาเจลเหมือนกัน จึงมีลักษณะหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ทำให้พีคของสเปกตรัมที่แสดงตัวเลขให้เห็นเป็นพีคของซิลิกาเจล ซึ่งจะนำไปใช้เปรียบเทียบกับซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวแล้วต่อไป

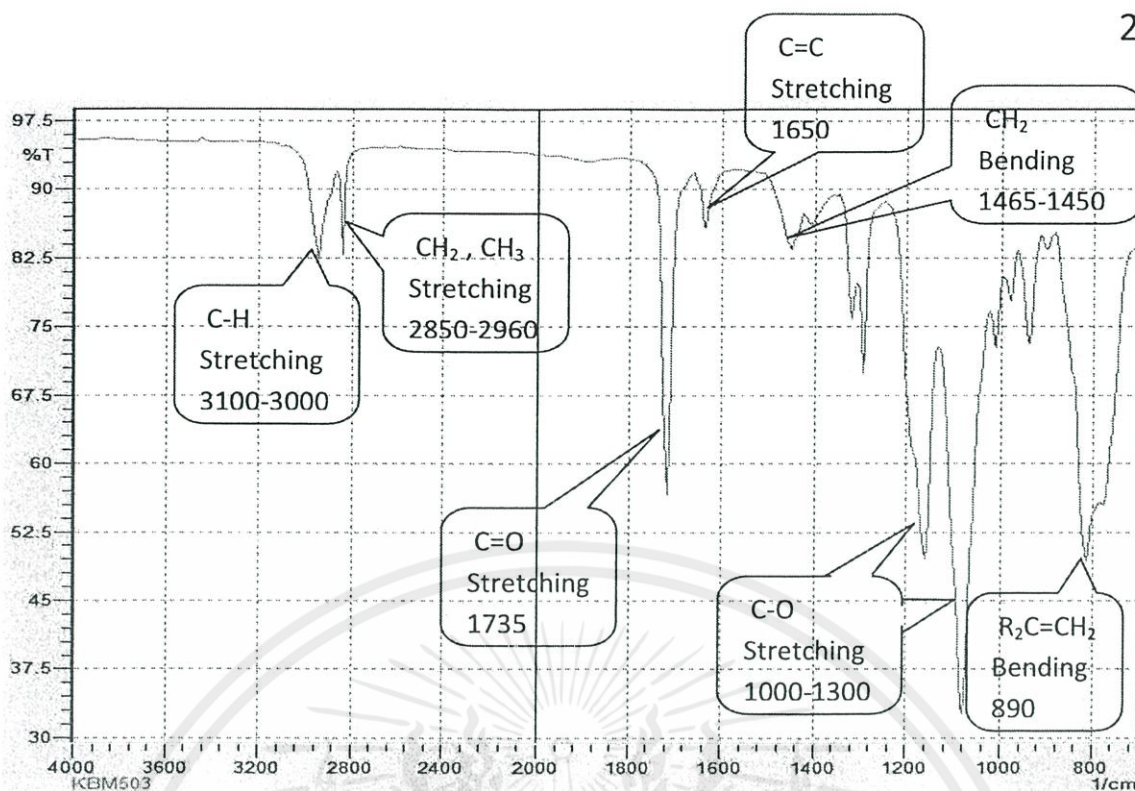
## 4.2.2 ผลของสารคู่ควบไซเลน



รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัม ของสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane

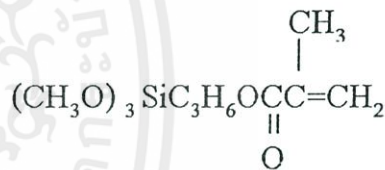
จากรูปที่ 4.3 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์สารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังต่อไปนี้  $(C_2H_5O)_3SiC_3H_6NH_2$  ซึ่งจากโครงสร้างของสารจะมีพีคของหมู่ฟังก์ชันตรงกับที่แสดงในรูปที่ 4.3 โดยจะนำไปวิเคราะห์ซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัม ของสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane

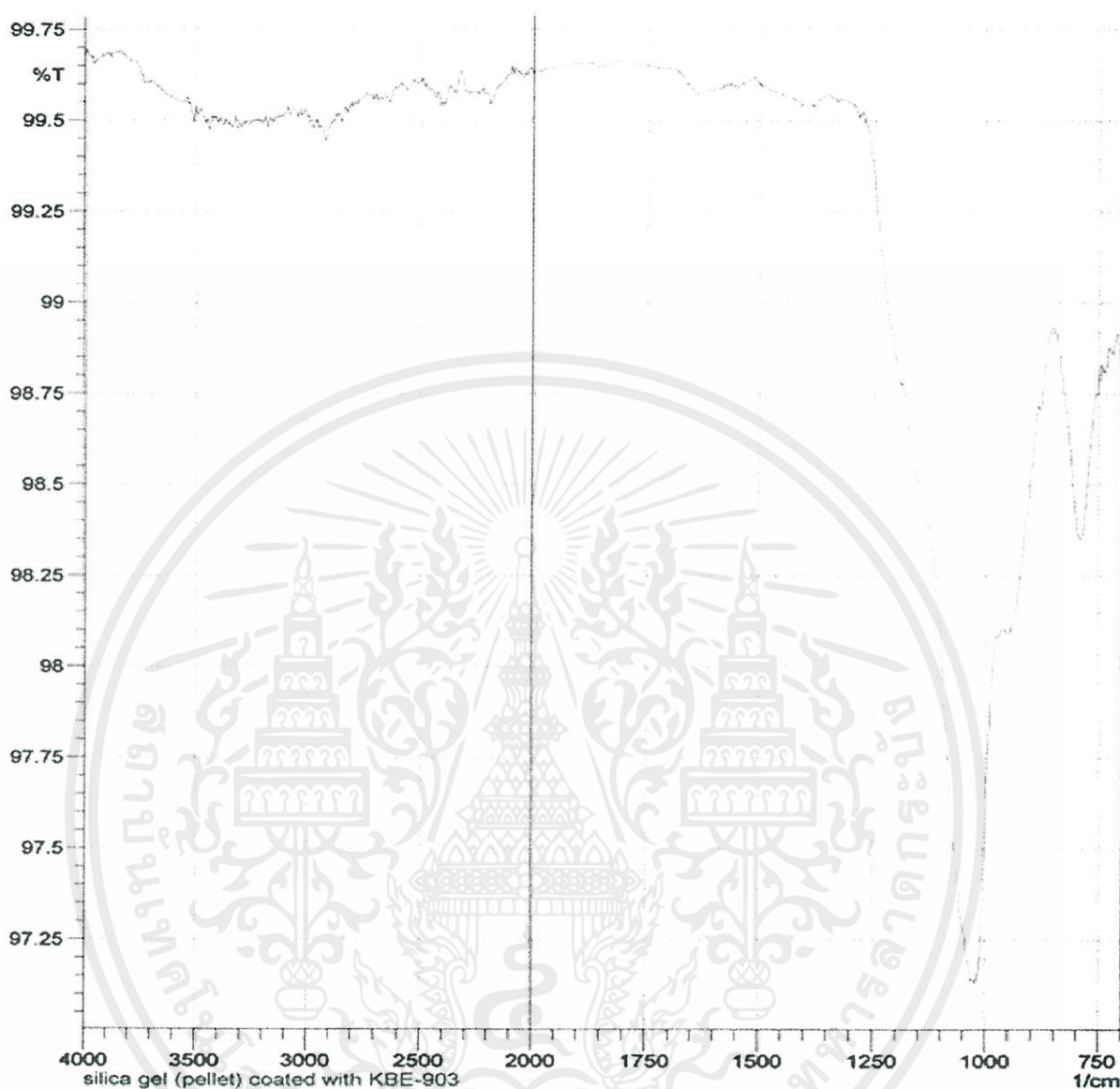
จากรูปที่ 4.4 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์สารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังต่อไปนี้



ซึ่งจากโครงสร้างของสารจะมีพีคของหมู่ฟังก์ชันตรงกับที่แสดงในรูปที่ 4.4 โดยจะนำไปวิเคราะห์ซิลิกาเจล ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ต่อไป

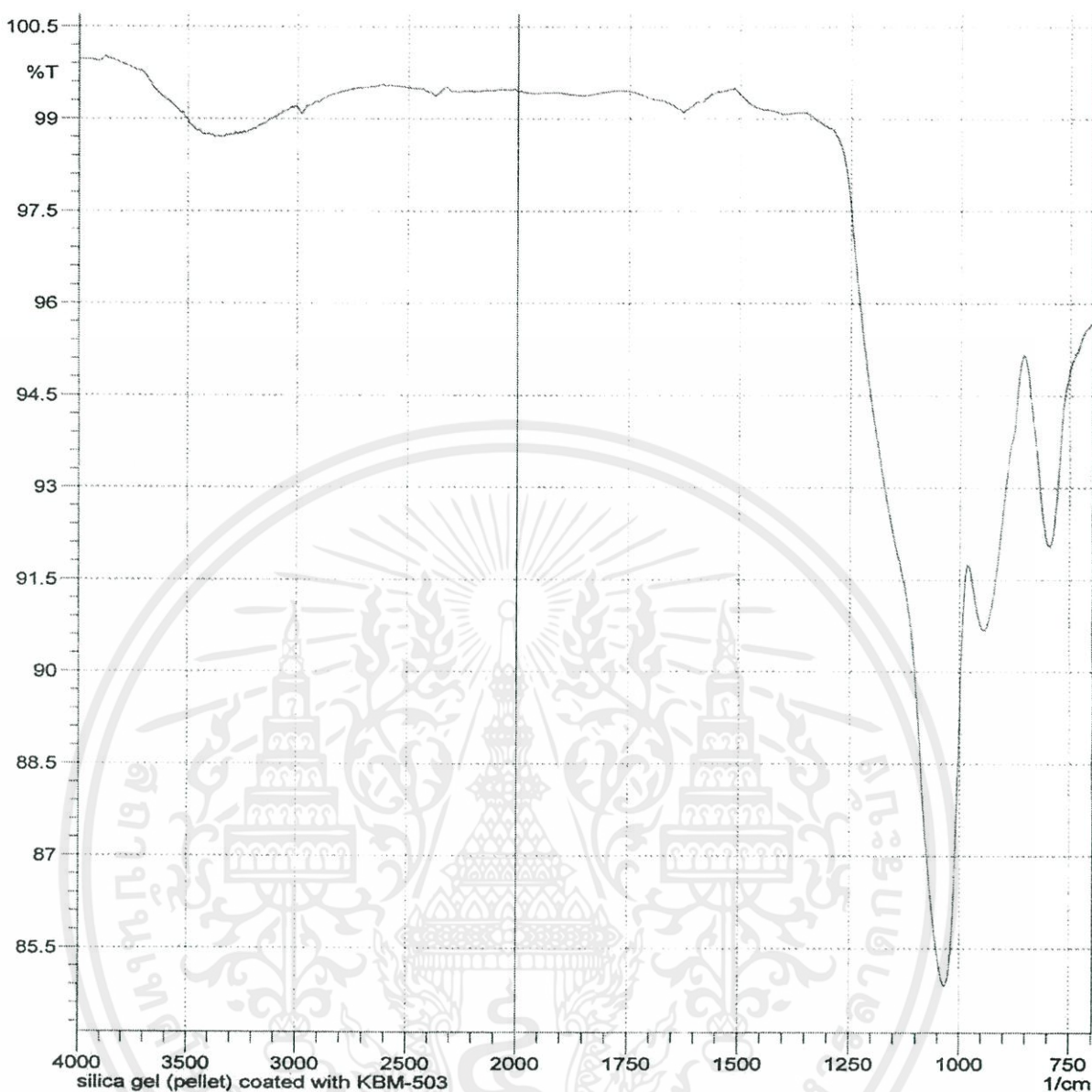
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวแล้ว



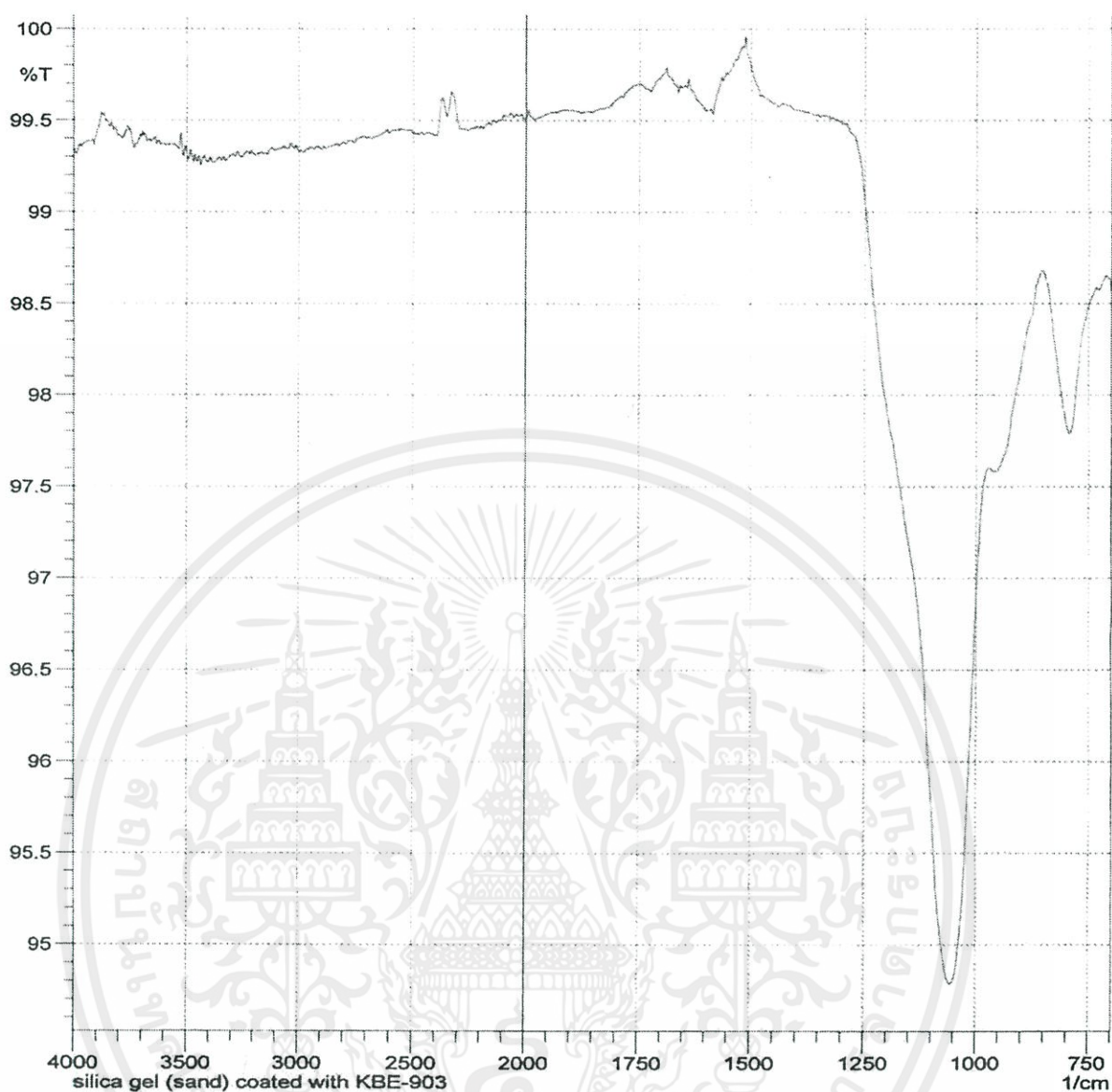
รูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane

จากรูปที่ 4.5 เป็นผลที่วิเคราะห์ซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ซึ่งสามารถนำผลจากรูปที่ 4.1 และ 4.3 มาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ว่าสารคู่ควบไซเลนสามารถเคลือบติดผิวของซิลิกาเจลหรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า สเปกตรัมในรูปที่ 4.5 มีลักษณะคล้ายคลึงกับสเปกตรัมในรูปที่ 4.1 ที่เป็นสเปกตรัมของซิลิกาเจลมาก เช่น พีค 800 และ 1111 ของ Si-O-Si , พีค 1632 ของ H<sub>2</sub>O Bending เป็นต้น แต่ก็มีพีคบางส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย และมีลักษณะคล้ายคลึงกับพีคในกราฟรูปที่ 4.3 เช่น พีค 1650-1550 ของ N-H Bending , พีค 2850-2960 ของ C-H Stretching เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการเคลือบสารคู่ควบไซเลนตัวนี้เพื่อปรับผิวซิลิกาเจลสามารถเคลือบติดผิวซิลิกาเจลได้ แต่ติดผิวซิลิกาเจลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



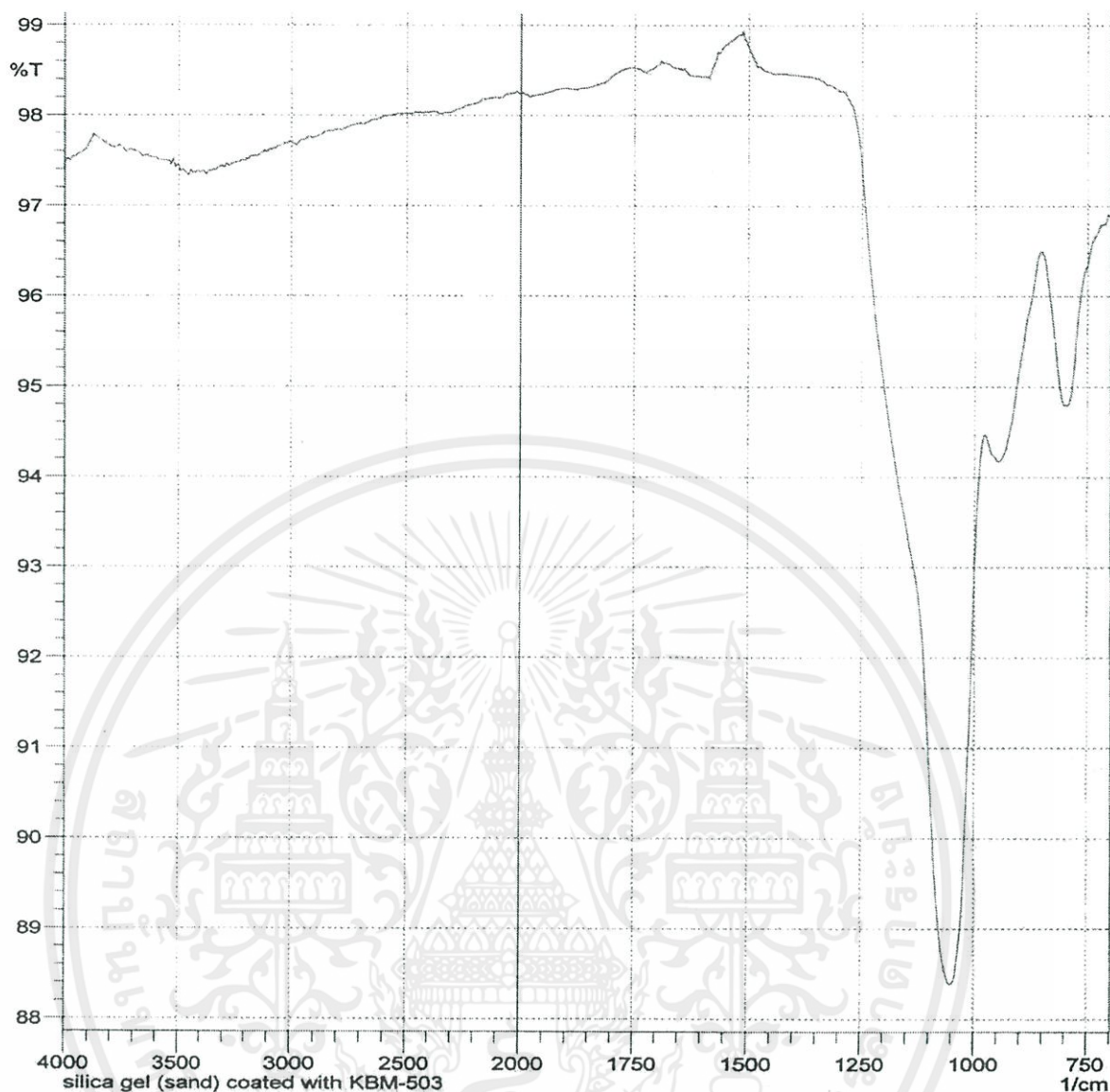
รูปที่ 4.6 FTIR สเปกตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน  
3-methacryloxypropyltrimethoxysilane

จากรูปที่ 4.6 เป็นผลที่วิเคราะห์ซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ซึ่งสามารถนำผลจากรูปที่ 4.1 และ 4.4 มาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ว่าสารคู่ควบไซเลนสามารถเคลือบติดผิวของซิลิกาเจลหรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า สเปกตรัมในรูปที่ 4.6 มีลักษณะคล้ายคลึงกับสเปกตรัมในรูปที่ 4.1 ที่เป็นสเปกตรัมของซิลิกาเจลมาก เช่น พีค 800 และ 1111 ของ Si-O-Si , พีค 956 ของ Silanol group , พีค 1632 ของ H<sub>2</sub>O Bending , พีค 3437 ของ H<sub>2</sub>O Stretching เป็นต้น แต่ก็มีพีคบางส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยและมีลักษณะคล้ายคลึงกับพีคในสเปกตรัมรูปที่ 4.4 เช่น พีค 2850-2960 ของ CH<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub> Stretching เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการเคลือบสารคู่ควบไซเลนตัวนี้เพื่อปรับผิวซิลิกาเจลสามารถเคลือบติดผิวซิลิกาเจลได้ แต่ติดผิวซิลิกาเจลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.7 FTIR สเปกตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน  
3-aminopropyltriethoxysilane

จากรูปที่ 4.7 เป็นผลที่วิเคราะห์ซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ซึ่งสามารถนำผลจากรูปที่ 4.2 และ 4.3 มาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ว่า สารคู่ควบไซเลนสามารถเคลือบผิวของซิลิกาเจลหรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า สเปกตรัมในรูปที่ 4.7 มีลักษณะคล้ายคลึงกับสเปกตรัมในรูปที่ 4.2 ที่เป็นสเปกตรัมของซิลิกาเจลมาก เช่น พีค 800 และ 1111 ของ Si-O-Si , พีค 1632 ของ H<sub>2</sub>O Bending เป็นต้น แต่ก็มีพีคบางส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย และมีลักษณะคล้ายคลึงกับพีคในสเปกตรัมรูปที่ 4.4 เช่น พีค 1650-1550 ของ N-H Bending เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการเคลือบสารคู่ควบไซเลนตัวนี้เพื่อปรับผิวซิลิกาเจลสามารถเคลือบติดผิวซิลิกาเจลได้ แต่ติดผิวซิลิกาเจลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.8 FTIR สเปกตรัม ของซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบซิลเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane

จากรูปที่ 4.8 เป็นผลที่วิเคราะห์ซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบซิลเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ซึ่งสามารถนำผลจากรูปที่ 4.2 และ 4.4 มาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์หว่าสารคู่ควบซิลเลนสามารถเคลือบติดผิวของซิลิกาเจลหรือไม่ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่า สเปกตรัมในรูปที่ 4.8 มีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟในรูปที่ 4.2 ที่เป็นสเปกตรัมของซิลิกาเจลมาก เช่น พีค 800 และ 1111 ของ Si-O-Si , พีค 956 ของ Silanol group , พีค 1632 ของ H<sub>2</sub>O Bending เป็นต้น แต่ก็มีพีคบางส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยและมีลักษณะคล้ายคลึงกับพีคในสเปกตรัมรูปที่ 4.4 เช่น พีค 1650 ของ C=C , พีค 1735 ของ C=O Stretching เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการเคลือบะ โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะใช้สารคู่ควบซิลเลนตัวนี้เพื่อปรับผิวซิลิกาเจลสามารถเคลือบติดผิวซิลิกาเจลได้ แต่ติดผิวซิลิกาเจลเพียงไปใช้ เล็กน้อยเท่านั้น

### 4.3 ผลของการหาค่ามุมสัมผัส (Contact Angle)

จากการทดลองที่มีการปรับสภาพพื้นผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลนได้มีการใช้สารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด และจากโครงสร้างที่แตกต่างกันของสารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิด ส่งผลให้สารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิดมีระดับความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน ซึ่งในการปรับสภาพพื้นผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน ก็จะส่งผลทำให้ซิลิกาเจลเหล่านั้นมีระดับความเป็นขั้วแตกต่างกันด้วย ดังนั้นเมื่อนำซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนที่แตกต่างกันไปดูดซับสารชนิดเดียวกัน ผลการดูดซับออกมาก็จะมีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ทำการทดสอบระดับความเป็นขั้วของสารคู่ควบไซเลนทั้งสองชนิดที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยการใช้วิธีการวัดค่ามุมสัมผัส ซึ่งในการทดสอบนี้ได้นำสารคู่ควบไซเลนทั้ง 2 ชนิด เคลือบลงไปบนแผ่นกระจกอย่างละอัน แล้วหยดน้ำลงไปเพื่อวัดมุมสัมผัส และได้มีการนำแผ่นกระจกธรรมดาที่ไม่ได้เคลือบสารใดมาหยดน้ำลงไปเพื่อวัดมุมสัมผัสอีกอันด้วย เพื่อเป็นมาตรฐานในการนำมาเปรียบเทียบเพิ่มเติม ซึ่งผลที่ได้ออกมาดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ามุมสัมผัสที่วัดได้จากการทดลอง

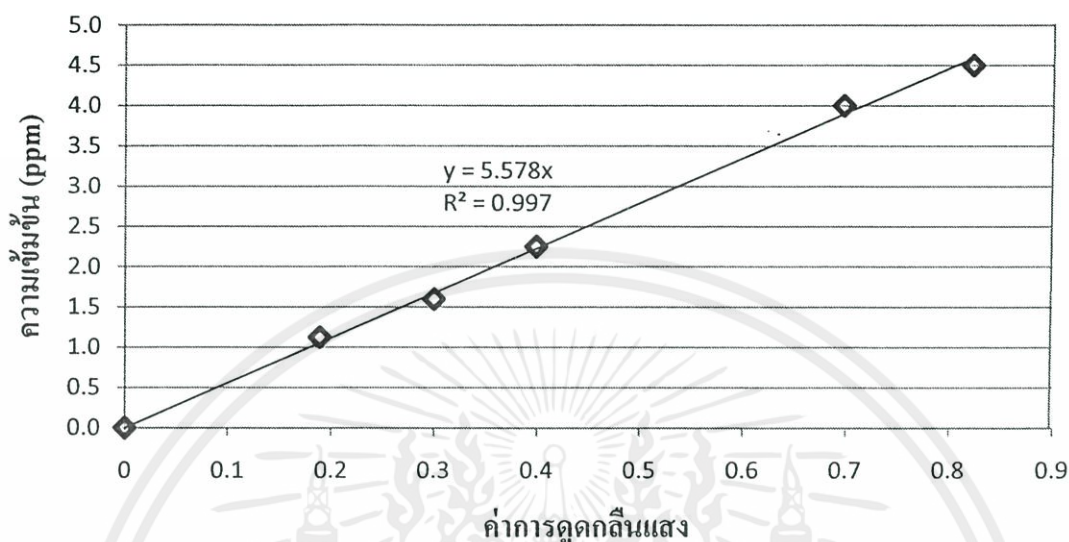
วัตถุที่ใช้ทดสอบ	ค่ามุมสัมผัส (องศา)
แผ่นกระจกที่ถูกเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane	80
แผ่นกระจกที่ถูกเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane	37
แผ่นกระจกที่ไม่ถูกเคลือบ	13

จากทฤษฎีที่บอกว่าค่ามุมสัมผัสที่มากกว่า 90 °C เป็นพวกที่มีความเป็นขั้วมาก ส่วนค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90 °C เป็นพวกที่มีความเป็นขั้วน้อย และจากผลในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane มีความเป็นขั้วน้อยกว่า สารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane และยิ่งพบว่า สารคู่ควบไซเลนทั้ง 2 จะมีความเป็นขั้วน้อยกว่าแผ่นกระจกที่ไม่ได้ถูกเคลือบผิวเลย ดังนั้น เราอาจอ้างอิงไปได้ว่า ซิลิกาเจลที่ไม่ถูกปรับสภาพผิวจะมีความเป็นขั้วสูงสุด แล้วซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane มีความเป็นขั้วสูงเป็นอันดับ 2 ส่วนซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane จะมีความเป็นขั้วน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration Curve) ของสารละลายเมทิลีนบลู

จากการผสมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง จะได้ผลออกมาดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู

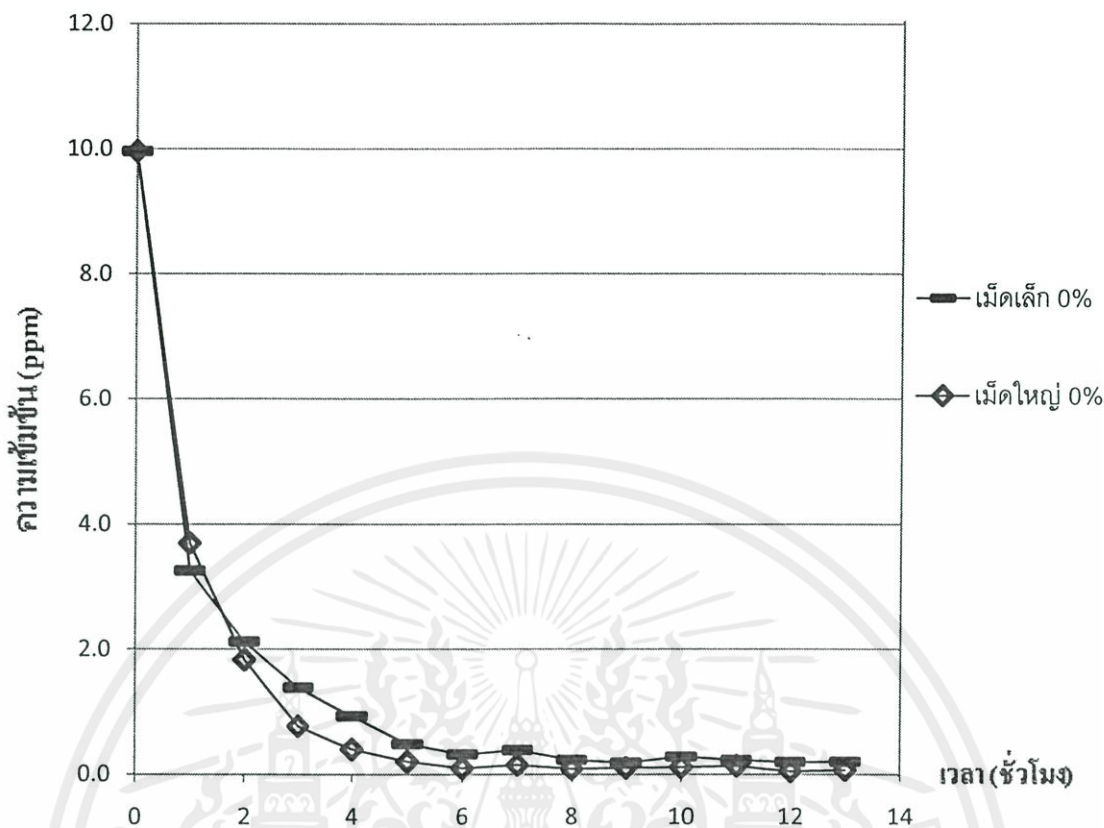
จากกราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลูที่หาสมการของกราฟออกมาได้ว่า  $y = 5.578x$  ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู กับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู ดังนั้น เราจึงสามารถเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากการทดลองให้เป็นค่าความเข้มข้นได้โดยการนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปคูณด้วย 5.578 ที่เป็นความชันของกราฟนั่นเอง

#### 4.5 ผลการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจล

##### 4.5.1 ผลการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ และเม็ดเล็ก

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของซิลิกาเจลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู การทดลองจะใช้ซิลิกาเจล 2 ขนาด คือ ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ ในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบว่าขนาดของซิลิกาเจลส่งผลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

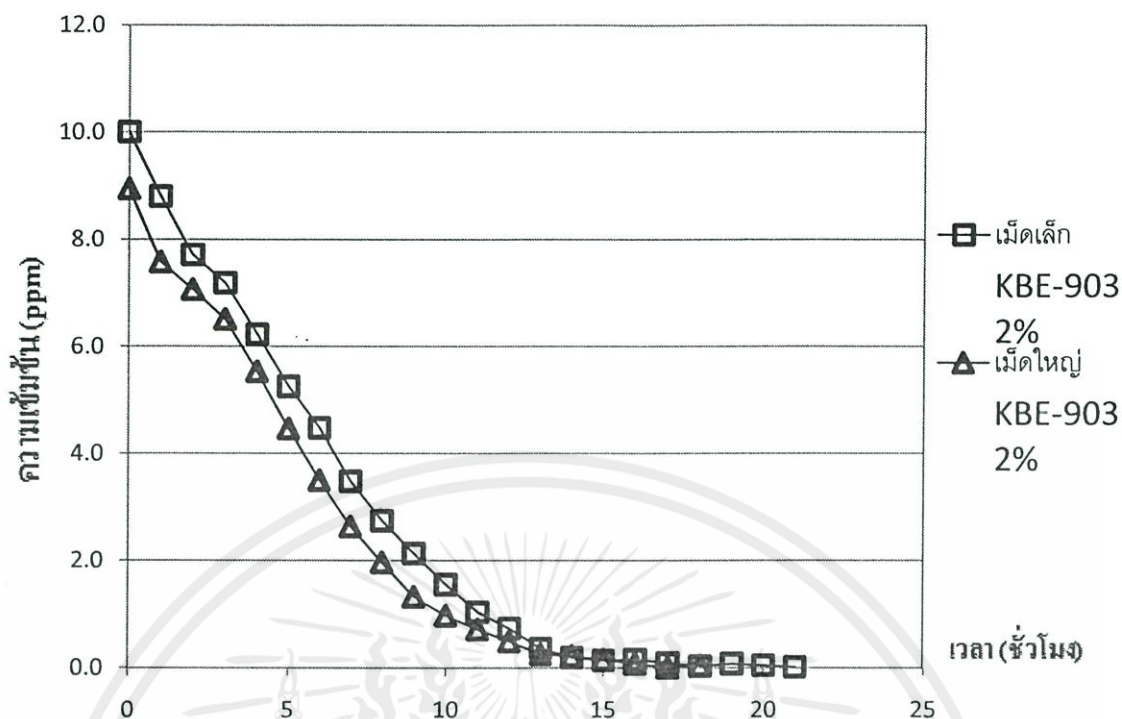


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซลิคาเจลเม็ดเล็ก และซลิคาเจลเม็ดใหญ่

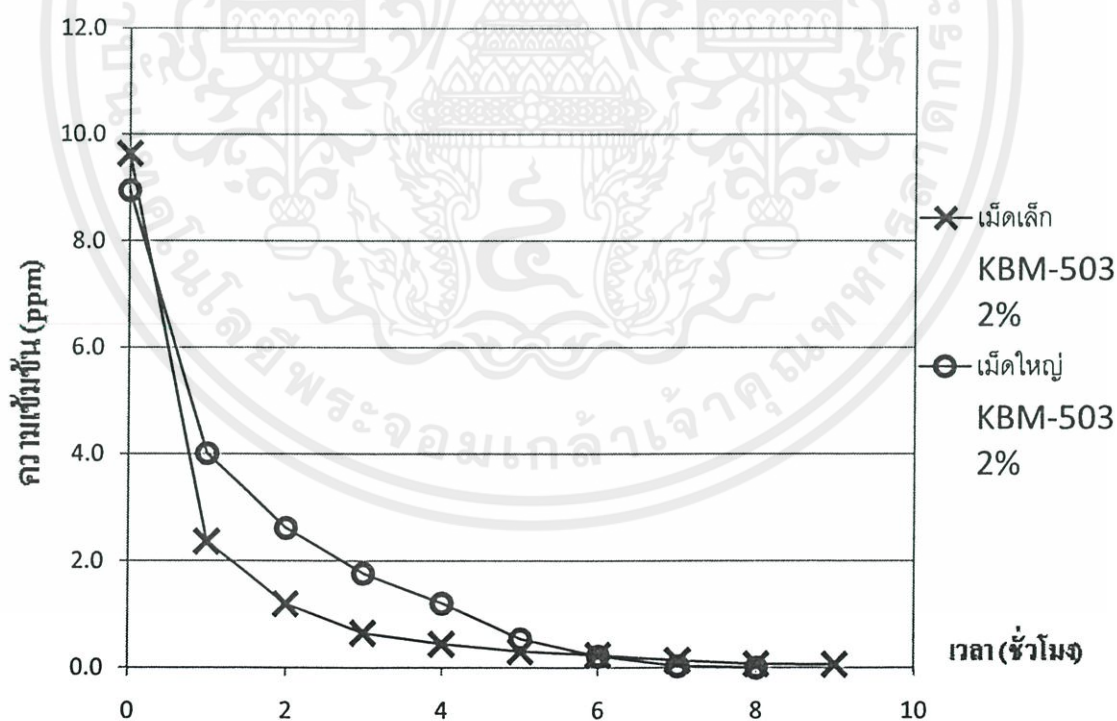
จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซลิคาเจลทั้งสองขนาด มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าขนาดของซลิคาเจลส่งผลน้อยมากหรืออาจไม่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการปรับสภาพผิวซลิคาเจลด้วยสารคู่ควบไซเลน ดังนั้นการเปรียบเทียบผลของขนาดซลิคาเจลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลของขนาดซลิคาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วย ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane



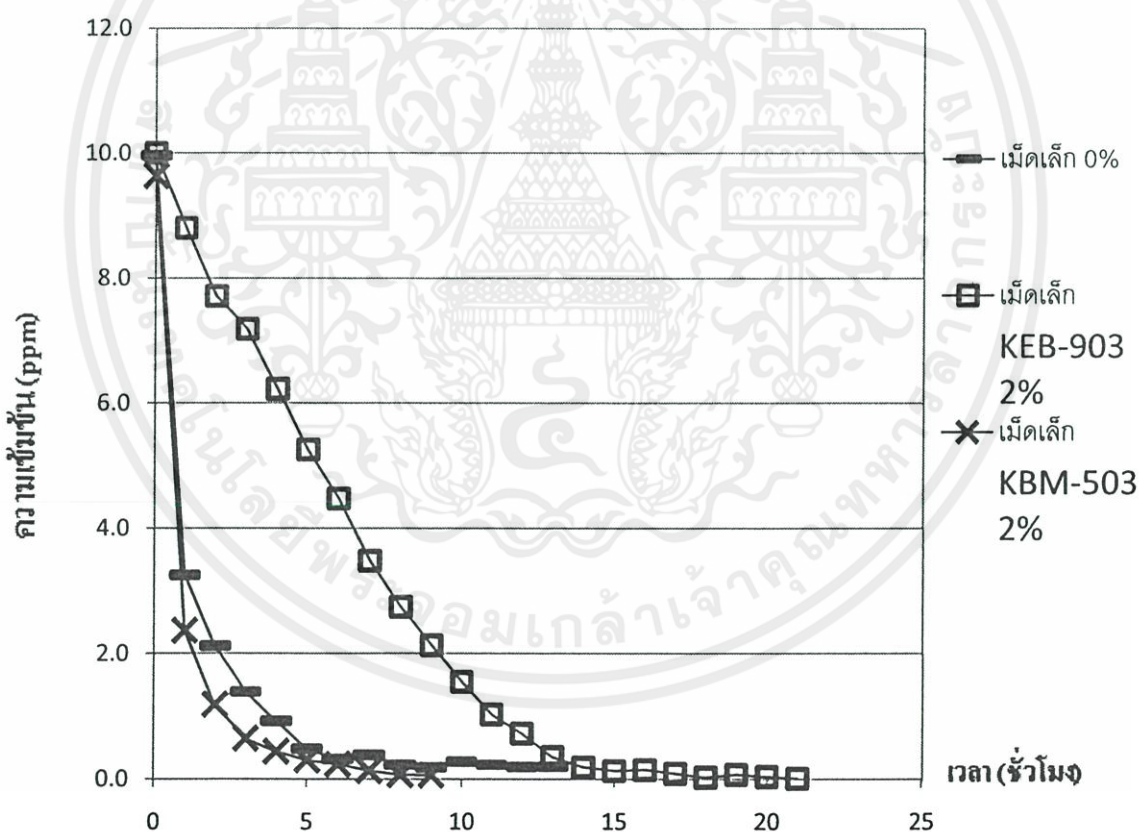
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane

3-methacryloxypropyltrimethoxysilane

จากรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วย ซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน เปรียบเทียบกับซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ปรับสภาพผิว ด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะปรับสภาพผิวด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane หรือ 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ก็ตาม

ผลการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลไม่ว่าจะเป็นซิลิกาเจลธรรมดา หรือซิลิกาเจล ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่าขนาดของซิลิกาเจลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับ สารละลายเมทิลีนบลู ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเราดูผลการตรวจวิเคราะห์ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของ ซิลิกาเจลจากตารางที่ 4.1 พบว่าแม้ซิลิกาเจลทั้ง 2 จะมีขนาดต่างกัน แต่ขนาดรูพรุน และขนาดพื้นที่ผิวของ ต่อน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลทั้ง 2 ขนาด จึงมีค่า ใกล้เคียงกัน

4.5.2 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจลธรรมดา และ ซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน

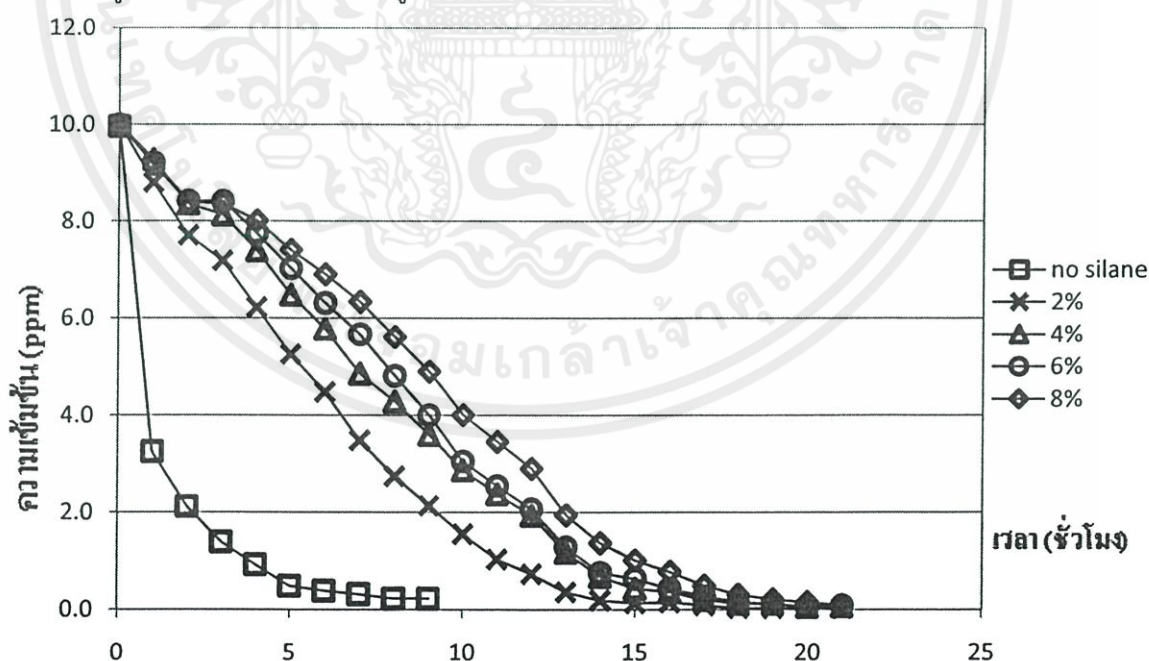


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจล เม็ดเล็ก ซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane และ ซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าชนิดของสารคู่ควบไซเลนส่งผลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดย ซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว แต่ซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิวสามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เนื่องจากหากเราดูโครงสร้างของสารละลายเมทิลีนบลู จะพบว่า สารละลายเมทิลีนบลูเป็นสารที่มีสภาพความเป็นขั้วบวก และสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ก็มีสภาพเป็นขั้วบวกเช่นกัน จึงทำให้เกิดการผลักกันของประจุที่เหมือนกัน การดูดซับของซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane จึงเกิดขึ้นยากกว่าการดูดซับของซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว ส่วนสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane นั้นหาเรดูค่ามุมสัมผัสจากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า สารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane มีค่ามุมสัมผัสน้อย แสดงว่าเป็นสารที่ ความเป็นขั้วน้อย การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูจึงเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า

#### 4.5.3 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารละลายคู่ควบไซเลนที่ความเข้มข้นต่างกัน

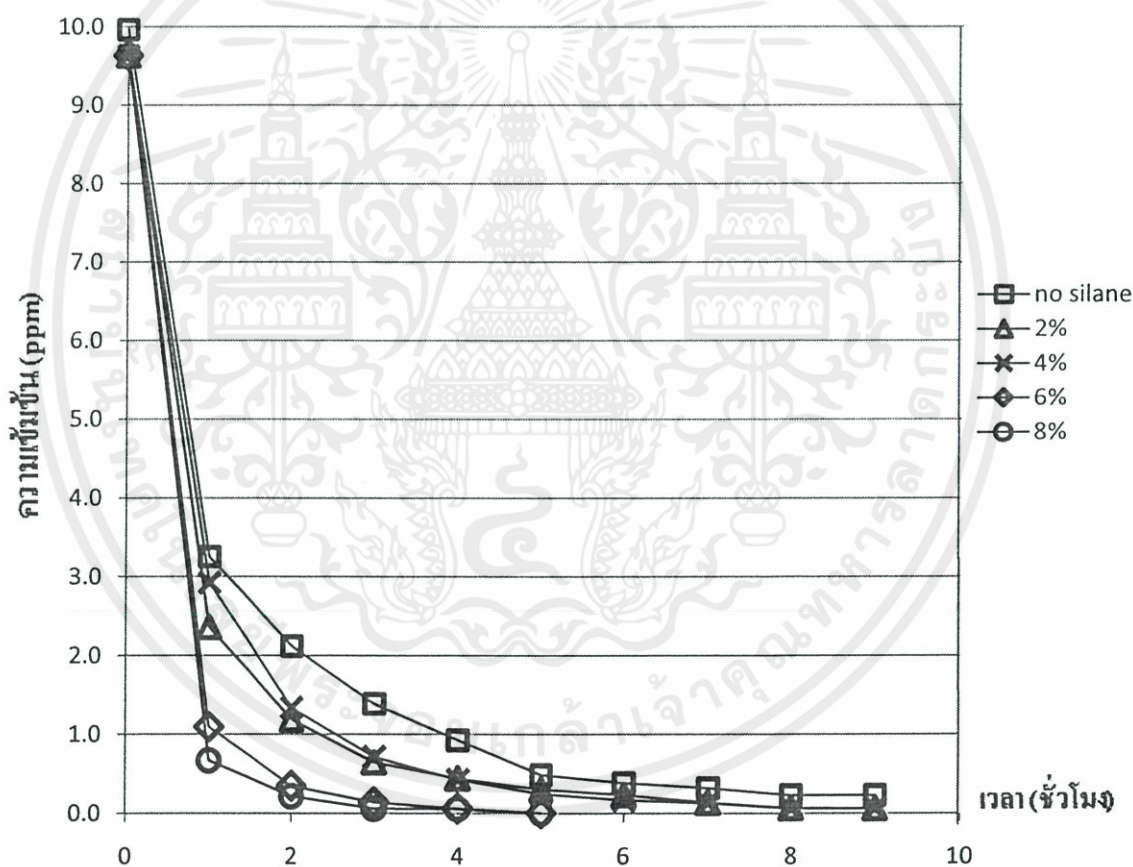
การทดลองจะศึกษาผลของความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane และสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ที่ใช้ในการปรับสภาพผิวซิลิกาเจลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งความเข้มข้นที่ศึกษาคือ 2% 4% 6% และ 8%



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจลที่ไม่ถูกปรับสภาพผิว และซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ที่มีความเข้มข้น 2% 4% 6% และ 8%

ไม่ถูกปรับสภาพผิว และซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ที่มีความเข้มข้น 2% 4% 6% และ 8%

จากรูปที่ 4.14 ผลของความแตกต่างของสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane อาจแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่แตกต่างกันเลย แต่ถ้าดูให้ละเอียดจะพบว่า ความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane ที่ดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดคือ ความเข้มข้นที่ 2% และสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ปรับสภาพผิวซิลิกาเจล จะทำให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูแย่ง ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ผลชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูที่ได้กล่าวผ่านมาแล้ว สารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ทำให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลแย่งเนื่องจากตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับมีความเป็นขั้วบวกเหมือนกัน ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ จึงเป็นการเพิ่มประจุบวกบนผิวของซิลิกาเจล ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างสารละลายเมทิลีนบลูกับซิลิกาเจลเพิ่มมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูแย่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจลที่ไม่ถูกปรับสภาพผิว ซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวโดยสารคู่ควบไซเลน

3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ที่มีความเข้มข้น 2% 4% 6% และ 8%

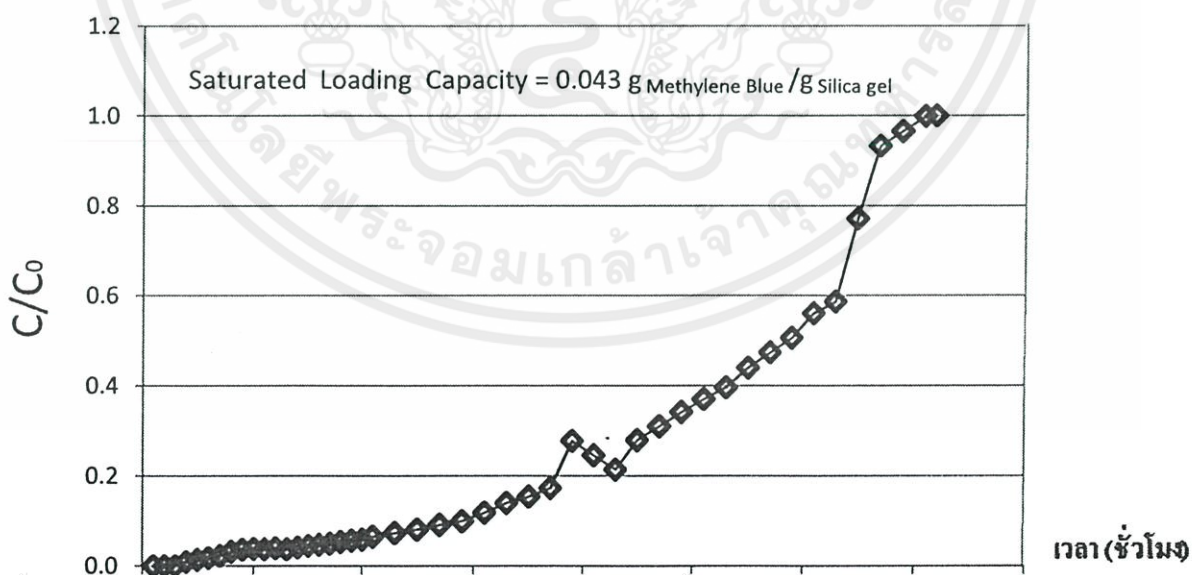
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
จากรูปที่ 4.15 14 ผลของความแตกต่างของสารคู่ควบไซเลน

3-methacryloxypropyltrimethoxysilane อาจแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่แตกต่างกันเลย แต่ถ้าดูให้ละเอียดจะพบว่า ความเข้มข้น

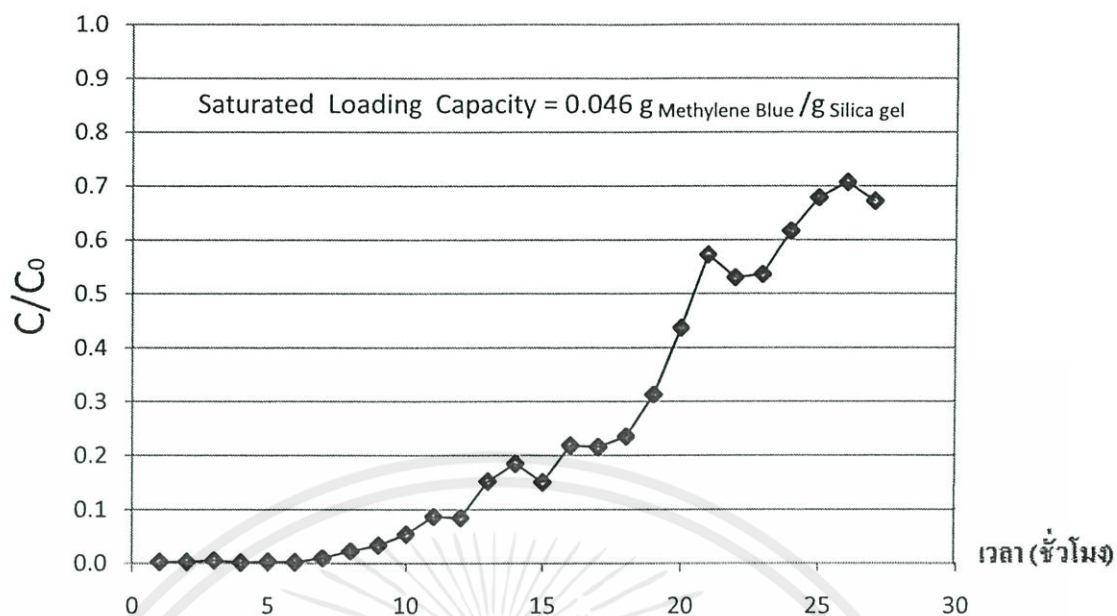
ของสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ที่ดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดคือ ความเข้มข้นที่ 8% และสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนจะทำให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูดีขึ้น ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ผลของสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูที่ได้กล่าวผ่านมาแล้ว สารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ทำให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลดีขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้ จึงเป็นการเพิ่มตัวจับสารละลายเมทิลีนบลูให้มากยิ่งขึ้น ทำให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้

#### 4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยซิลิกาเจล

จากการทดลองที่ผ่านมาเราพบว่าซิลิกาเจลชนิดที่ดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดคือซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ดังนั้นเราจึงนำซิลิกาเจลชนิดนี้มาหาประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู กับประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลที่ยังไม่ปรับสภาพผิวเพื่อเปรียบเทียบ ซึ่งค่าประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้จากกราฟเบรคทูร (Breakthrough curve) ซึ่งเป็นกราฟระหว่างเวลากับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการดูดซับโดยซิลิกาเจลซึ่งบรรจุอยู่ในคอลัมน์ โดยในการทดลองจะดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูจนกว่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูจะเข้าและขาออกจากคอลัมน์มีค่าเท่ากัน ซึ่งก็คือซิลิกาเจลเกิดการอิ่มตัว หรือหมดประสิทธิภาพไป ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้แสดงในรูป Saturated Loading capacity หน่วยคือน้ำหนักของสารละลายเมทิลีนบลูต่อน้ำหนักของซิลิกาเจล ซึ่งเป็นค่าบอกถึงประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลนั่นเอง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 กราฟเบรคทูร (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา



รูปที่ 4.17 กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับเวลา

จากรูปที่ 4.16 สำหรับซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว เมื่อนำไปคำนวณค่า Saturated Loading Capacity จะได้ค่าเท่ากับ 0.043 กรัมเมทิลีนบลูต่อกรัมซิลิกาเจล หมายความว่า 1 กรัม สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ 0.043 กรัม และจากรูปที่ 4.17 สำหรับซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ค่า Saturated Loading Capacity ที่ได้คือ 0.046 กรัมเมทิลีนบลูต่อกรัมซิลิกาเจล หมายความว่า 1 กรัม สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ 0.046 กรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูมากกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการที่สร้างขึ้นเพื่อปรับระดับความเป็นขั้วของโมเลกุลซิลิกาเจลโดยการเคลือบผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไฮเลน ซึ่งในการทดลองนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ

1. ขนาดของซิลิกาเจล จะใช้ซิลิกาเจล 2 ชนิด คือ ซิลิกาเจลเม็ดเล็ก และซิลิกาเจลเม็ดใหญ่
2. ชนิดของสารคู่ควบไฮเลน จะใช้สารคู่ควบไฮเลน 2 ชนิด คือ สารคู่ควบไฮเลน

3-aminopropyltriethoxysilane และสารคู่ควบไฮเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane

3. ความเข้มข้นของสารละลายคู่ควบไฮเลน จะใช้ความเข้มข้นที่ 2% , 4% , 6% และ 8%

โดยในการทดลองได้มีการทดสอบผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆในการปรับปรุงสภาพผิวของซิลิกาเจลโดยการนำไปดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู และได้มีการวัดค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของซิลิกาเจล

พบว่าซิลิกาเจลเม็ดเล็กและเม็ดใหญ่ที่ใช้ในการทดลองแม้จะมีขนาดต่างกัน แต่ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน และมีขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลน

##### 5.1.2 หมู่ฟังก์ชันที่วิเคราะห์จากเครื่อง FTIR สเปกโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเพื่อให้ทราบว่าในการปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลด้วยสารคู่ควบไฮเลนนั้นสามารถเคลือบสารคู่ควบไฮเลนให้ติดบนผิวของซิลิกาเจลได้หรือไม่ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเคลือบได้ติดแต่ติดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

##### 5.1.3 ค่ามุมสัมผัส และโครงสร้างทางเคมี

จากค่ามุมสัมผัสที่วัดได้ และโครงสร้างทางเคมีของสาร บ่งบอกว่าสารคู่ควบไฮเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงที่มีประจุบวก ส่วนสารคู่ควบไฮเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เป็นสารที่มีความเป็นขั้วต่ำ มีประจุเป็นกลาง

##### 5.1.4 ผลของขนาดซิลิกาเจลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

ขนาดของซิลิกาเจลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู จากซิลิกาเจลที่ใช้มีขนาดต่างกัน แต่มีขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน

##### 5.1.5 ผลของชนิดของสารคู่ควบไฮเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

ชนิดของสารคู่ควบไฮเลนที่ใช้ปรับปรุงซิลิกาเจลส่งผลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดยซิลิกาเจลปรับสภาพผิวด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane จะดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้มากกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว เนื่องจากสารคู่ควบไฮเลนชนิดนี้มีความเป็นขั้วบวกเหมือนกับสารละลาย

เมทิลีนบลู ประจักษ์ผลักกัน การดูดซับจึงเกิดขึ้นยาก ส่วนซิลิกาเจลปรับสภาพผิวด้วย 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane จะดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนชนิดนี้มีความเป็นขั้วต่ำมีประจุเป็นกลาง จึงดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว และซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนที่มีขั้วชนิดเดียวกันกับสารละลายเมทิลีนบลู

#### 5.1.6 ผลของความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

ความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนส่งผลต่อการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู หากสารคู่ควบไซเลนชนิดนั้นทำให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูแย่กว่าซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพ การเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนนี้ส่งผลให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูแย่งเช่นกัน ส่วนสารคู่ควบไซเลนที่ทำให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูดีกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพ การเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนนี้ส่งผลให้การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูดีขึ้นเช่นกัน

#### 5.1.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิว

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูพบว่า ซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane มีค่า 4.6% สูงกว่าซิลิกาเจลที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวเล็กน้อยที่ 4.3%

จากผลงานวิจัยนี้ทั้งหมด และปัจจัยต่างๆที่ได้ทดลองมา แสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดสำหรับการทดลองนี้ แต่ผู้ทดลองคิดว่ายังมีปัจจัยอื่นๆอีกมากมายที่งานวิจัยนี้ไม่ได้ระบุถึง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลที่ถูกปรับสภาพผิว ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาและศึกษางานวิจัยนี้เพิ่มเติม เพื่อที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของซิลิกาเจลในการดูดซับให้สามารถดูดซับได้ดีมากขึ้น และสามารถดูดซับสารละลายได้หลากหลายมากขึ้น (สารละลายที่นอกเหนือจากความชื้น และสารละลายเมทิลีนบลู)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. พัฒนารูปแบบการปรับสภาพผิวของซิลิกาเจลให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ซิลิกาเจลที่ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน

5.2.2. ปรับปรุงอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การออกแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] China Silica Gel CO. Silica Gel Basic. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.china-silicagel.com/knowledge.html>. (วันที่ค้นข้อมูล : 16 กันยายน 2556).
- [2] นายเชาวน์ ศรีเพชรดี. การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากแก้ว แกลบเพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติโดยกระบวนการโซลเจล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2553.
- [3] รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด. สารควบคู่ซิลิโคน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Gelest. Silane Coupling Agent. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.gelest.com/goods/pdf/couplingagents.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 16 กันยายน 2556).
- [5] รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ. หน่วยที่ 6 อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ. สุขศาสตร์อุตสาหกรรม:การควบคุม ขมรมอาชีพอนามัยและความปลอดภัย, 2552.
- [6] Robson C. Oliveira, Mauricio C. Palmieri and Oswaldo Garcia Jr. Biosorption of Metals: State of the Art, General Features, and Potential Applications for Environmental and Technological Processes. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.intechopen.com/books/progress-in-biomass-and-bioenergy-production/biosorption-of-metals-state-of-the-art-general-features-and-potential-applications-for-environmental>. (วันที่ค้นข้อมูล : 25 กุมภาพันธ์ 2557).
- [7] Wikipedia. Methylene Blue. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://en.wikipedia.org/wiki/Methylene\\_blue](http://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue). (วันที่ค้นข้อมูล : 25 กุมภาพันธ์ 2557).
- [8] J. Choma, M. Kloske and M. Jaroniec, An improved methodology for adsorption characterization of unmodified and modified silica gels, Journal of Colloid and Interface Science, 266(2003) 168-174.
- [9] C. H. Lee, S. H. Park, W. Chung, J. Y. Kim, S. H. Kim, Preparation and characterization of surface modified silica nanoparticles with organo-silane compounds, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect, 384(2011) 318-322.
- [10] S. Standeker, Z. Novak, Z. Knez, Adsorption of toxic organic compounds from water with hydrophobic silica aerogels, Journal of Colloid and Interface Science, 310 (2007) 362-368.
- [11] X. Xie, C. A. S Hill, Z. Xiao, H. Miltz, C. Mai, Silane coupling agent used for natural fiber/polymer composites: A review, Composites: Part A 41 (2010) 806-819.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ทฤษฎี Brunauer-Emmett-Teller (BET)

จากการศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก ซึ่งใช้ทฤษฎี Brunauer-Emmett-Teller (BET) ในการศึกษา โดยทฤษฎี BET เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงการดูดซับสารหลายชั้น เป็นทฤษฎีที่มีการพัฒนาสมการการคำนวณมาจากทฤษฎี Langmuir (กล่าวถึงการดูดซับสารชั้นเดียว) ซึ่งสมการการคำนวณของ BET คือ

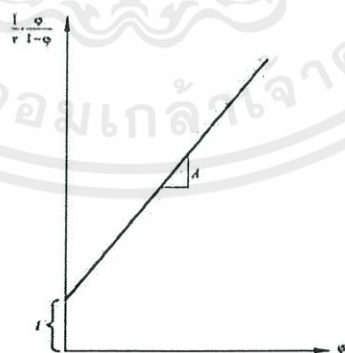
$$\frac{1}{v \left[ \left( \frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{c-1}{v_m c} \left( \frac{P}{P_0} \right) + \frac{1}{v_m c} \quad (8)$$

เมื่อ	P	คือ	ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน
	$P_0$	คือ	ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
	V	คือ	ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
	$V_m$	คือ	ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดการปกคลุมชั้นเดียว
	C	คือ	ค่าคงที่ของ BET

จากสมการจะสามารถนำมาพล็อตกราฟเป็นกราฟเส้นตรงได้ โดยให้

แกน x	คือ	$\phi = \frac{P}{P_0}$
แกน y	คือ	$\frac{1}{v \left[ \left( \frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{\phi}{v(1-\phi)}$

จะได้กราฟออกมาลักษณะดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\phi}{v(1-\phi)}$  กับ  $\phi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ซึ่งสามารถหา Slope (A) และจุดตัดแกน y (I) ได้จากกราฟ  
 จากนั้นจะสามารถนำ Slope (A) และจุดตัดแกน y (I) ไปหาค่า  $V_m$  และ  $c$  ได้ดังนี้

$$v_m = \frac{1}{A+I} \quad (9)$$

$$c = 1 + \frac{A}{I} \quad (10)$$

จากนั้นจะสามารถนำค่า  $v_m$  ไปหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร ( $S_{SP}$ )  
(หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$S_{SP} = \frac{v_m N_A S_0}{W} \quad (11)$$

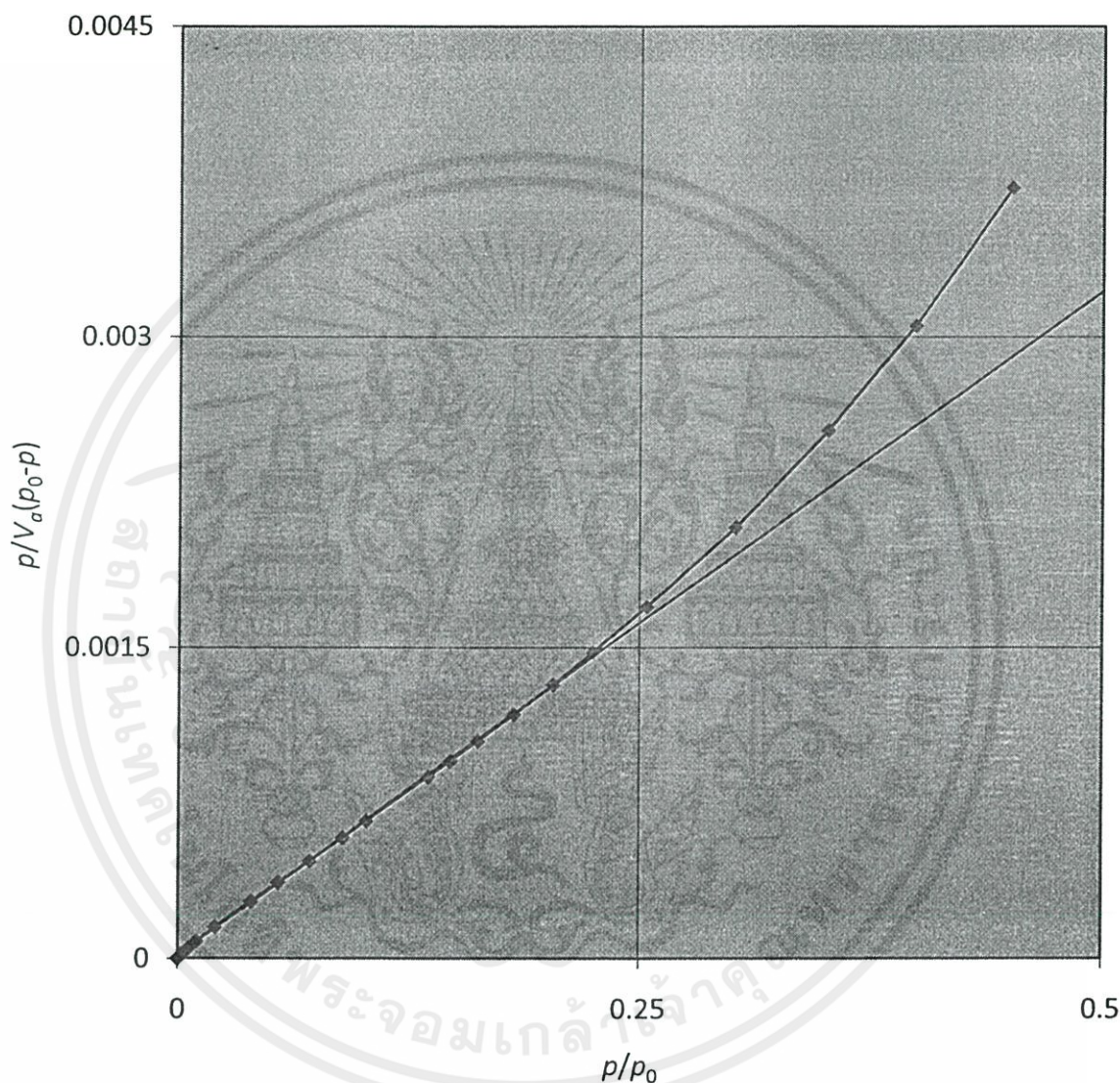
เมื่อ	$N_A$	คือ	เลขอาโวกาโดร เท่ากับ $6.02 \times 10^{23}$ (หน่วยเป็นโมเลกุลต่อกรัมโมล)
	$S_0$	คือ	พื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ เท่ากับ $1.62 \times 10^{-20}$ (หน่วยเป็นตารางเมตร)
	$W$	คือ	น้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (หน่วยเป็นกรัม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

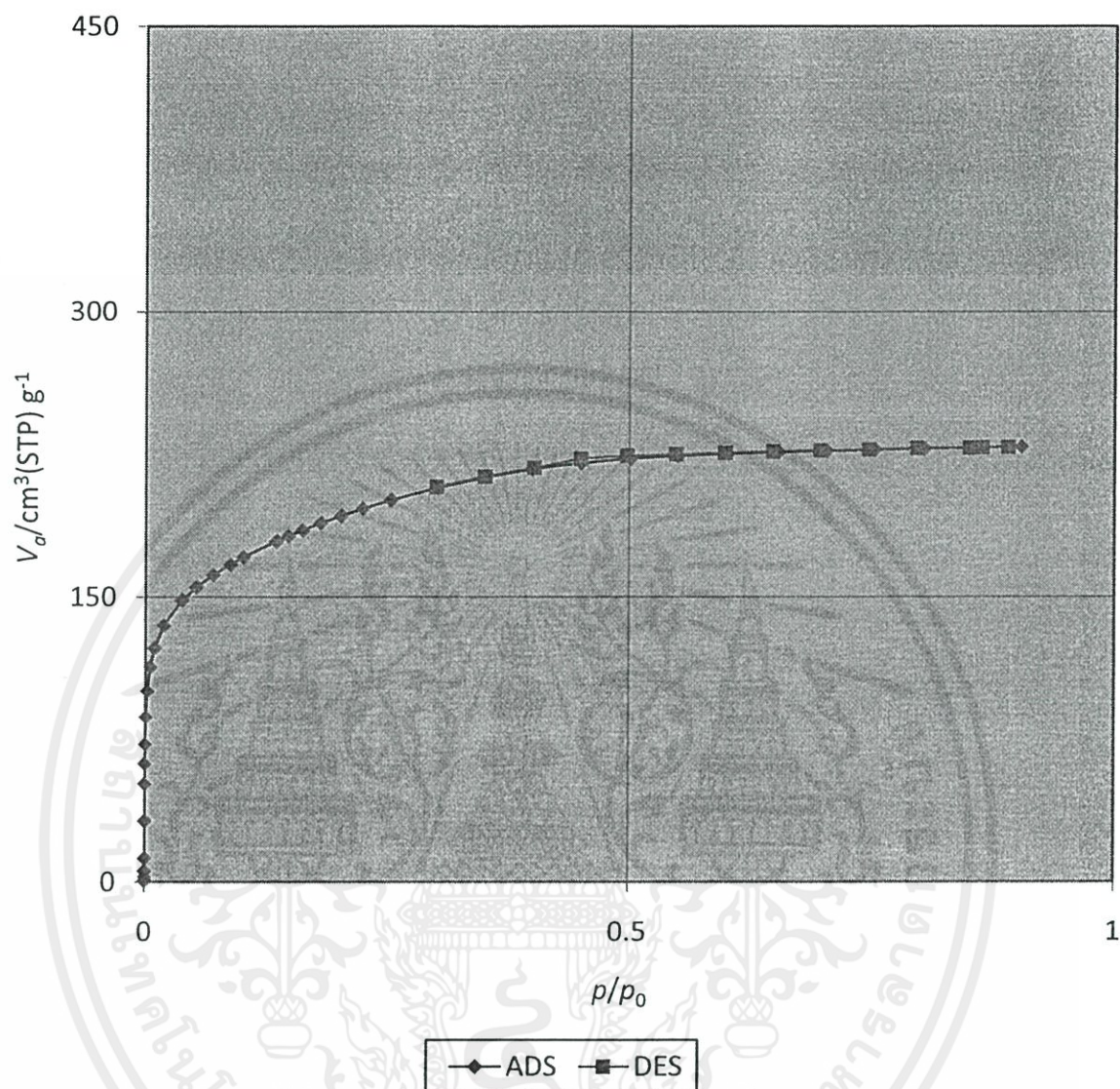
## กราฟที่เป็นผลจากการทดสอบโดยใช้เครื่อง BET



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $p/V_0(p_0-p)$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กโดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 0.007X - (4 \times 10^{-5})$

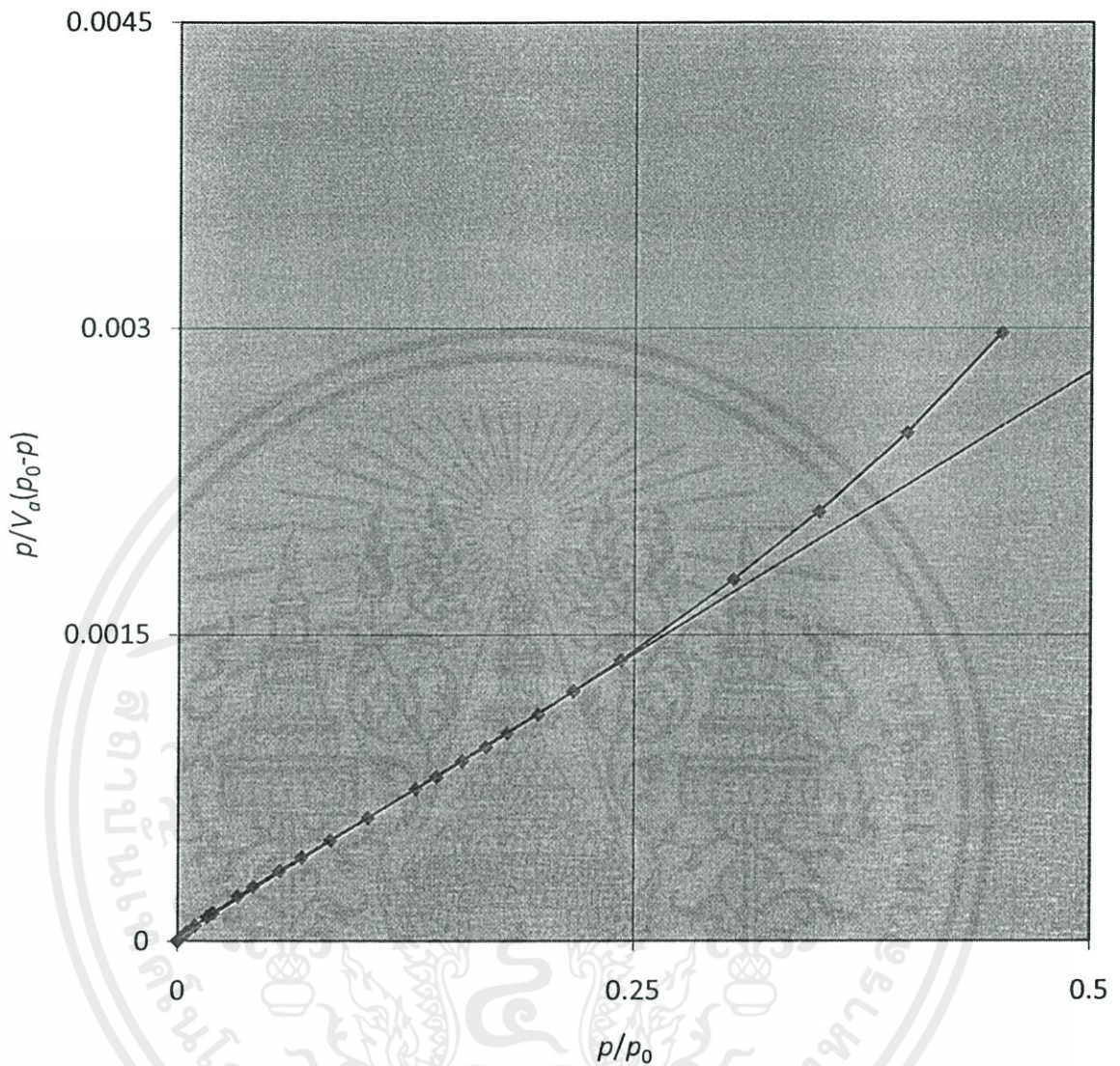
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_0$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กโดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 18.88\ln(X) - 227.8$

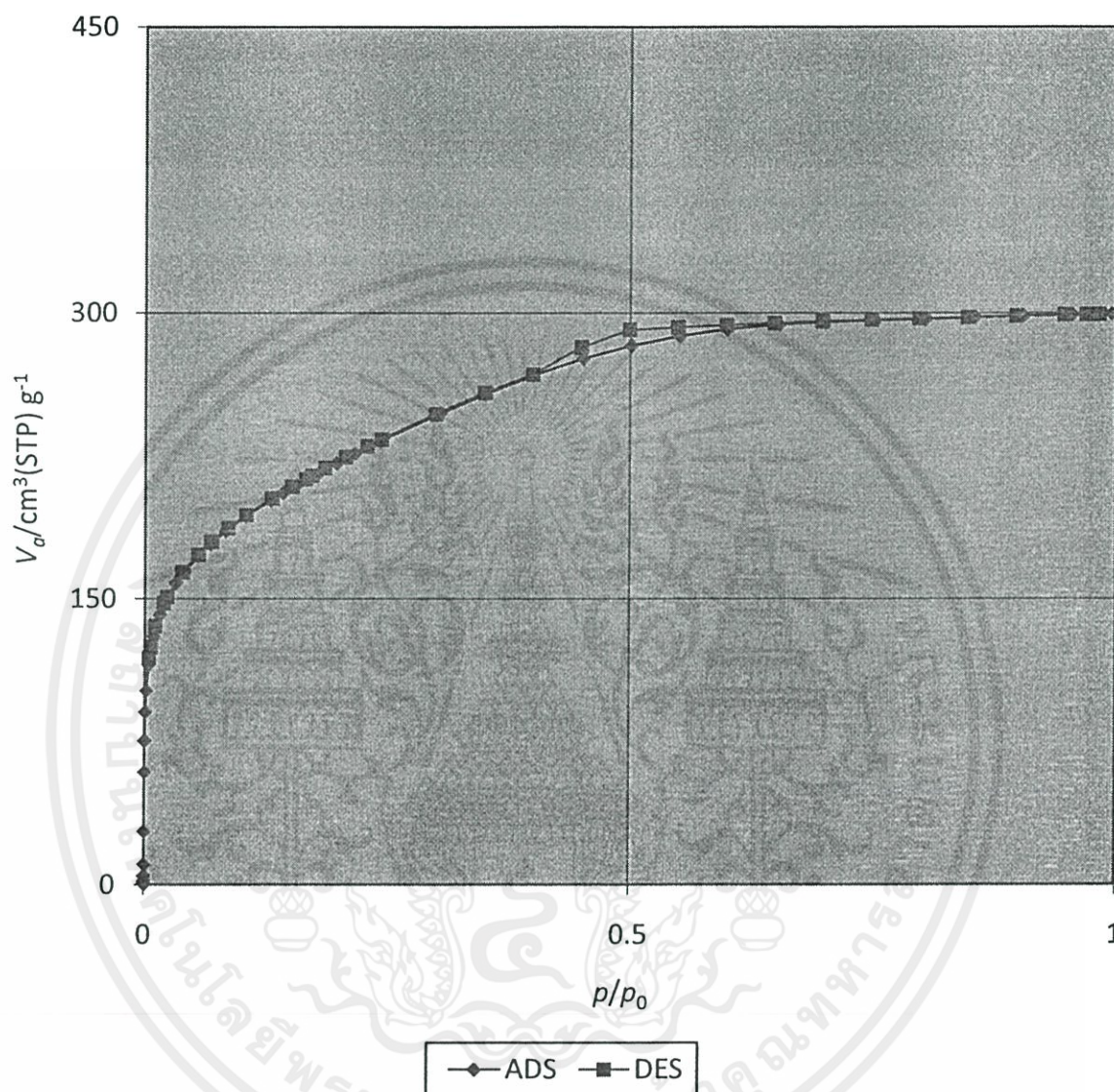
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $p/V_0(p_0-p)$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดใหญ่โดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 0.006X - (1 \times 10^{-5})$

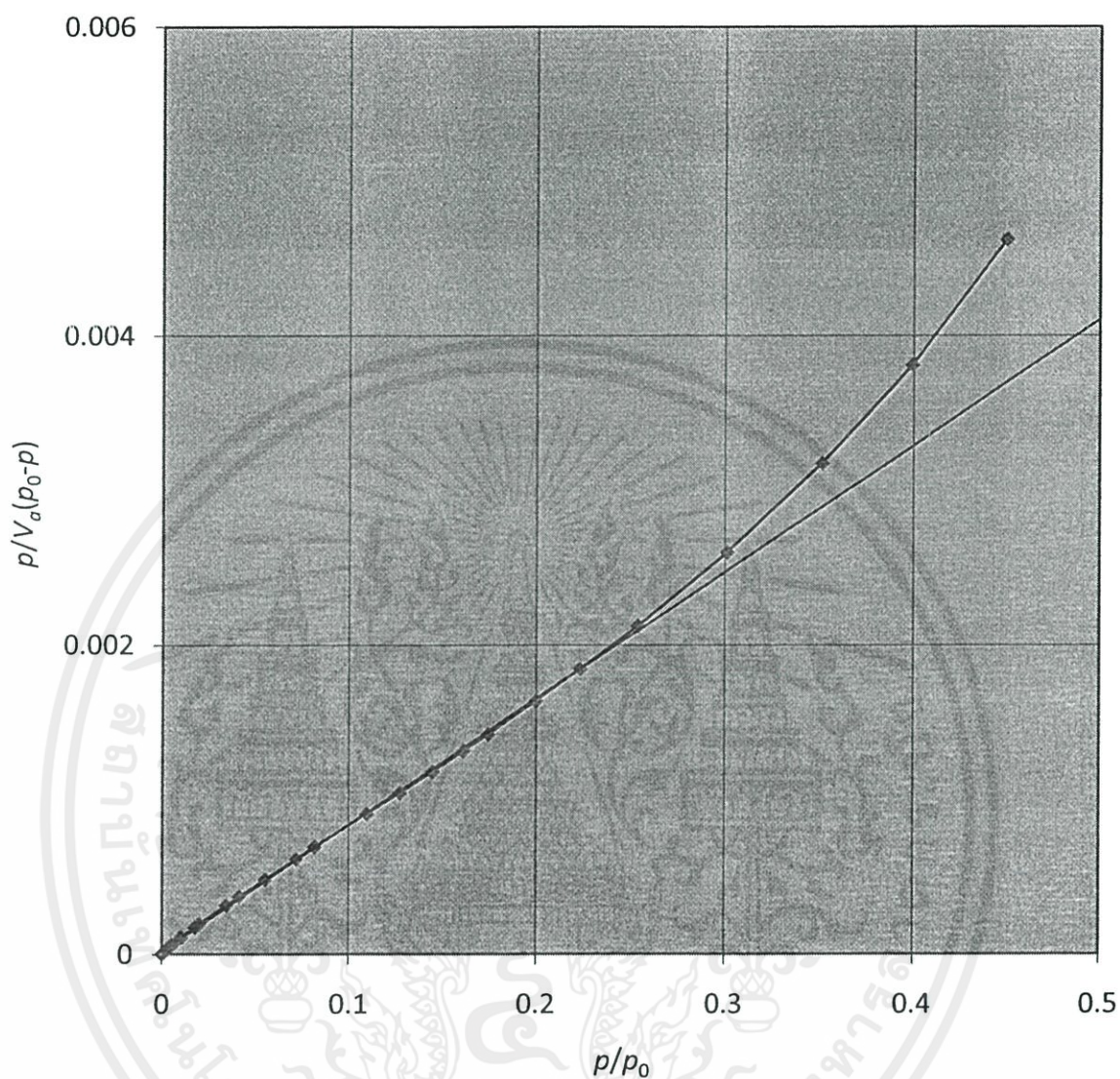
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_0$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดใหญ่โดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 25.58\ln(X) - 277.5$

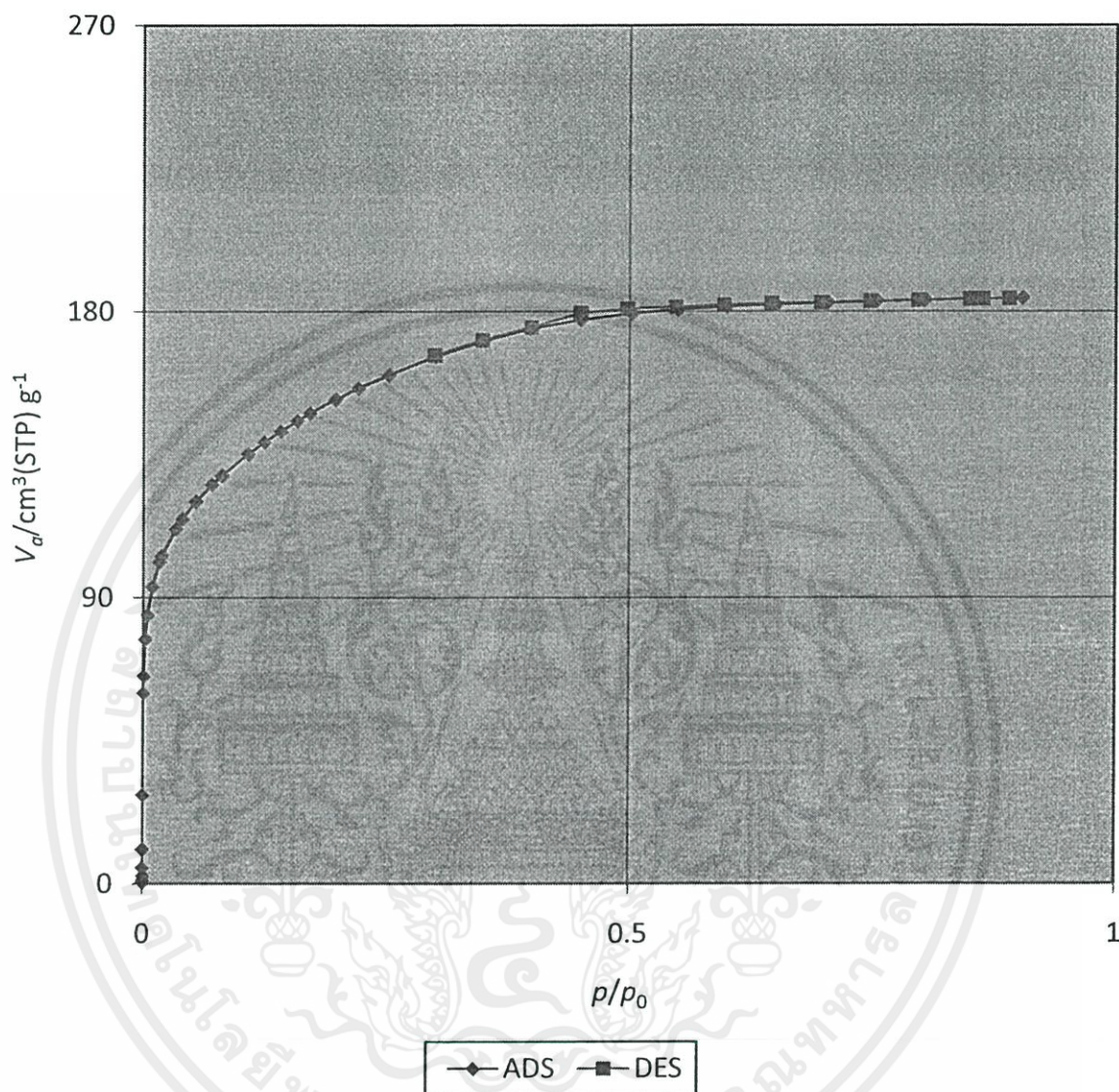
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $p/V_0(p_0-p)$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane โดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 0.009X - (4 \times 10^{-5})$

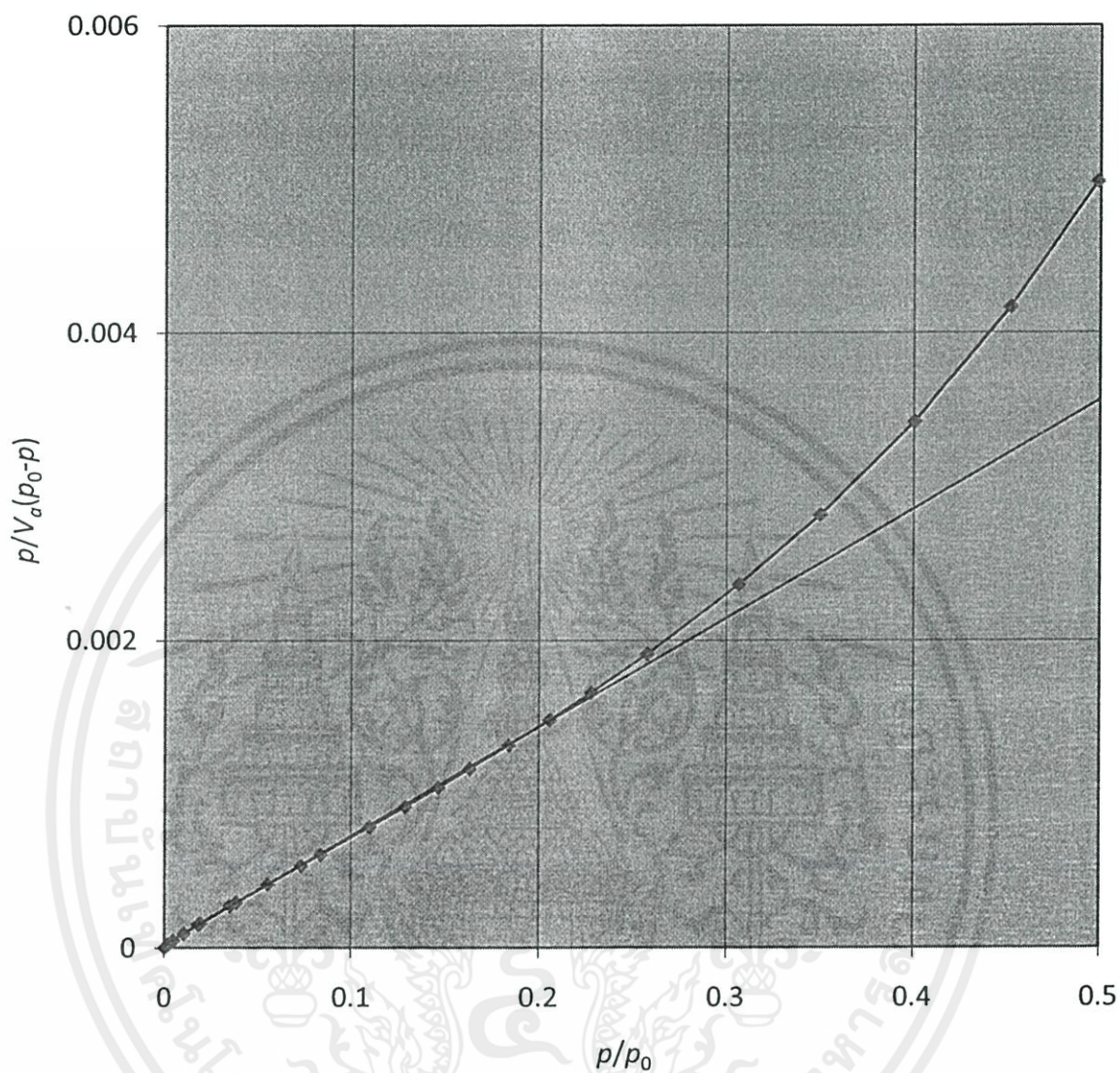
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_0$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane โดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 14.8\ln(X) - 180.6$

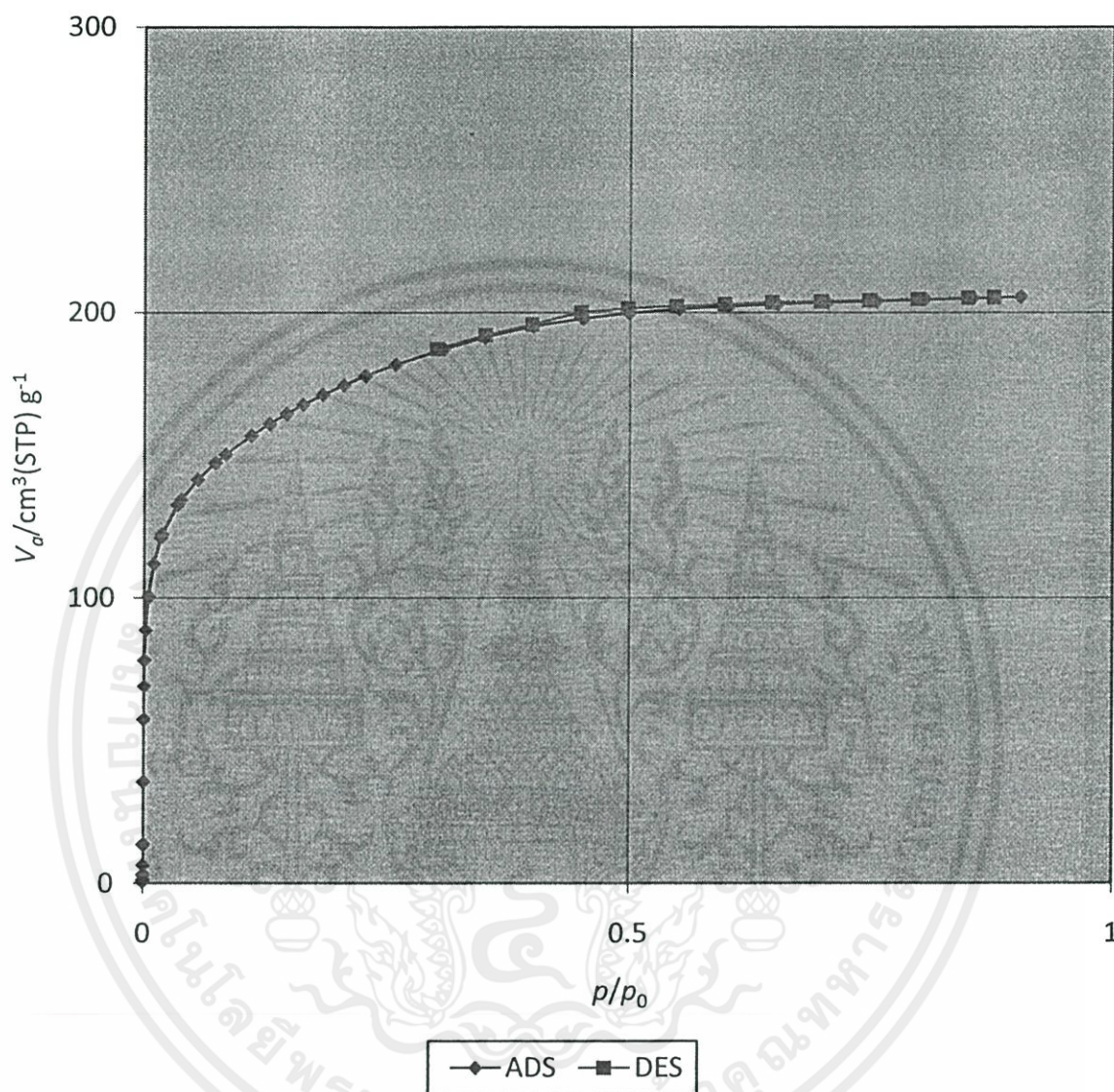
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $p/V_0(p_0-p)$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane โดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 0.008X - (7 \times 10^{-5})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_0$  กับ  $p/p_0$  ที่เป็นผลจากการทดสอบซิลิกาเจลเม็ดเล็กเคลือบด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane โดยเครื่อง BET

ซึ่งสมการของกราฟนี้คือ  $Y = 16.53\ln(X) - 203.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาเจลโดยใช้เครื่อง FTIR

ใช้วิธี Infrared Spectroscopy โดยอินฟราเรดจะให้ข้อมูลที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ ย่านอินฟราเรดในสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ประโยชน์มากที่สุดต่อนักเคมีอินทรีย์ คือ ย่านความถี่ระหว่าง  $4000-650 \text{ cm}^{-1}$  ( $\text{cm}^{-1}$  เป็นหน่วยของคลื่นต่อวินาที หรือเรียกว่าเลขคลื่น) และความยาวคลื่นระหว่าง 2.5-15 ไมโครเมตร สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น และเลขคลื่น คือ

$$\text{ความยาวคลื่น} (\mu\text{m}) = \frac{10,000}{\text{เลขคลื่น} (\text{cm}^{-1})}$$

อินฟราเรด สเปกตรัม เป็นการพล็อตระหว่างความถี่ (เลขคลื่น,  $\text{cm}^{-1}$ ) หรือความยาวคลื่น ( $\mu\text{m}$ ) และ Transmittance (T) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง (Transmitted radiation, I) และความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างและความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวอย่าง คือ

$$\text{Transmittance} = \frac{I}{I_0}$$

เมื่อ I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลาง

$I_0$  คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวกลาง

$$\% \text{ Transmittance} = 100T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 รวบรวมความถี่ของแถบ IR ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆในย่าน 4000-600 ซม.<sup>-1</sup>

cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm <sup>-1</sup> (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm <sup>-1</sup> (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm <sup>-1</sup> (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm <sup>-1</sup> (m) 1 <sup>o</sup> เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 cm <sup>-1</sup> (w) 2 <sup>o</sup> เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm <sup>-1</sup> อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C≡N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1 <sup>o</sup> เอมีน
1650-1550 (w)	N-H bending	2 <sup>o</sup> เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1 <sup>o</sup> เอมีด
1550-1510 (s)	N-H bending	2 <sup>o</sup> เอมีด
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มไม่แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s) และ 1350 (s)	NO <sub>2</sub> bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH <sub>2</sub>
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH <sub>3</sub>
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1300-1150	CH <sub>2</sub> -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเธอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH <sub>2</sub> )
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> )
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R <sub>2</sub> C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมൈด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

คำย่อ : s = ความเข้มสูง , vs = ความเข้มสูงมาก , m = ความเข้มปานกลาง , w = ความเข้มต่ำ , vw = ความเข้มต่ำมาก

sh = แหลมคม , b = กว้าง , vb = กว้างมาก , OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## ผลการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายเมทิลีนบลู และค่าการดูดกลืนแสงที่จะนำไปพล็อตกราฟ

ความเข้มข้นมาตรฐาน

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.000	0.000
1.125	0.189
1.600	0.300
2.250	0.399
4.000	0.698
4.500	0.823

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ไม่ได้ถูกปรับสภาพผิวในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.786	9.962
1	0.662	3.693
2	0.328	1.830
3	0.137	0.764
4	0.071	0.396
5	0.036	0.201
6	0.017	0.095
7	0.026	0.145
8	0.015	0.084
9	0.018	0.100
10	0.020	0.112
11	0.024	0.134
12	0.008	0.045
13	0.012	0.067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพ  
 ผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 2% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.603	8.942
1	1.358	7.575
2	1.266	7.062
3	1.167	6.510
4	0.992	5.533
5	0.800	4.462
6	0.627	3.497
7	0.473	2.638
8	0.352	1.963
9	0.237	1.322
10	0.174	0.971
11	0.128	0.714
12	0.088	0.491
13	0.045	0.251
14	0.039	0.218
15	0.027	0.151
16	0.013	0.073
17	0.000	0.000
18	0.007	0.039

ตารางที่ ง.4 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดใหญ่ที่ถูกปรับสภาพ  
 ผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 2% ในเวลา  
 ต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.603	8.942
1	0.718	4.005
2	0.468	2.611
3	0.316	1.763
4	0.215	1.199
5	0.096	0.535
6	0.039	0.218
7	0.005	0.028
8	0.000	0.000

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ไม่ได้ถูกปรับสภาพผิวในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.786	9.962
1	0.583	3.252
2	0.380	2.120
3	0.249	1.389
4	0.166	0.926
5	0.087	0.485
6	0.069	0.385
7	0.057	0.318
8	0.041	0.229
9	0.041	0.229

ตารางที่ ๓.6 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 2% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.793	10.001
1	1.578	8.802
2	1.382	7.709
3	1.288	7.184
4	1.116	6.225
5	0.942	5.254
6	0.802	4.474
7	0.624	3.481
8	0.492	2.744
9	0.382	2.131
10	0.278	1.551
11	0.185	1.032
12	0.131	0.731
13	0.064	0.357
14	0.034	0.190
15	0.024	0.134
16	0.027	0.151
17	0.016	0.089
18	0.005	0.028
19	0.005	0.028

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
20	0.005	0.028
21	0.005	0.028

ตารางที่ ง.7 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพ  
 ด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 4% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.793	10.001
1	1.664	9.282
2	1.498	8.356
3	1.458	8.133
4	1.326	7.396
5	1.162	6.482
6	1.036	5.779
7	0.870	4.853
8	0.768	4.284
9	0.645	3.598
10	0.515	2.873
11	0.426	2.376
12	0.347	1.936
13	0.211	1.177
14	0.122	0.681
15	0.078	0.435
16	0.065	0.363
17	0.036	0.201
18	0.022	0.123
19	0.022	0.123
20	0.010	0.056
21	0.012	0.067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.8 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพ  
 ด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 6% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.793	10.001
1	1.652	9.215
2	1.510	8.423
3	1.508	8.412
4	1.390	7.753
5	1.260	7.028
6	1.132	6.314
7	1.016	5.667
8	0.862	4.808
9	0.717	3.999
10	0.547	3.051
11	0.456	2.544
12	0.370	2.064
13	0.230	1.283
14	0.136	0.759
15	0.114	0.636
16	0.077	0.430
17	0.049	0.273
18	0.028	0.156
19	0.022	0.123
20	0.010	0.056
21	0.016	0.089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพ  
ผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-aminopropyltriethoxysilane เข้มข้น 8% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.793	10.001
1	1.644	9.170
2	1.504	8.389
3	1.500	8.367
4	1.436	8.010
5	1.328	7.408
6	1.238	6.906
7	1.136	6.337
8	1.006	5.611
9	0.878	4.897
10	0.718	4.005
11	0.619	3.453
12	0.520	2.901
13	0.348	1.941
14	0.245	1.367
15	0.181	1.010
16	0.139	0.775
17	0.088	0.491
18	0.055	0.307
19	0.038	0.212
20	0.027	0.151
21	0.017	0.095

ตารางที่ ง.10 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับ  
สภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 2%  
ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.727	9.633
1	0.423	2.359
2	0.213	1.188
3	0.116	0.647
4	0.079	0.441
5	0.054	0.301
6	0.042	0.234

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
7	0.024	0.134
8	0.012	0.067
9	0.011	0.061

ตารางที่ ง.11 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 4% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.727	9.633
1	0.524	2.923
2	0.240	1.339
3	0.128	0.714
4	0.076	0.424
5	0.044	0.245
6	0.030	0.167
7	0.023	0.128
8	0.011	0.061
9	0.011	0.061

ตารางที่ ง.12 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 6% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.727	9.633
1	0.196	1.093
2	0.062	0.346
3	0.025	0.139
4	0.011	0.061
5	0.001	0.006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.13 ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane เข้มข้น 8% ในเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (ppm)
0	1.727	9.633
1	0.120	0.669
2	0.039	0.218
3	0.011	0.061
4	0.010	0.056
5	0.001	0.006

ตารางที่ ง.14 ผลการทดลองจากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจลที่ไม่ถูกปรับสภาพผิว

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (C) (ppm)	C/C <sub>0</sub>
0.5	0.000	0.000	0.000
1	0.000	0.000	0.000
1.5	0.000	0.000	0.000
2	0.016	0.089	0.009
2.5	0.024	0.134	0.014
3	0.031	0.173	0.018
3.5	0.039	0.218	0.023
4	0.055	0.307	0.032
4.5	0.063	0.351	0.036
5	0.066	0.368	0.038
5.5	0.064	0.357	0.037
6	0.068	0.379	0.039
6.5	0.064	0.357	0.037
7	0.071	0.396	0.041
7.5	0.077	0.430	0.044
8	0.081	0.452	0.047
8.5	0.086	0.480	0.050
9	0.093	0.519	0.054
9.5	0.098	0.547	0.057
10	0.102	0.569	0.059
10.5	0.113	0.630	0.065
11.5	0.127	0.708	0.073

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (C) (ppm)	C/C <sub>0</sub>
12.5	0.140	0.781	0.081
13.5	0.158	0.881	0.091
14.5	0.172	0.959	0.099
15.5	0.205	1.143	0.118
16.5	0.242	1.350	0.140
17.5	0.266	1.484	0.153
18.5	0.299	1.668	0.173
19.5	0.480	2.677	0.277
20.5	0.425	2.371	0.245
21.5	0.370	2.064	0.214
22.5	0.483	2.694	0.279
23.5	0.536	2.990	0.309
24.5	0.591	3.297	0.341
25.5	0.641	3.575	0.370
26.5	0.686	3.827	0.396
27.5	0.762	4.250	0.440
28.5	0.821	4.580	0.474
29.5	0.877	4.892	0.506
30.5	0.971	5.416	0.560
31.5	1.016	5.667	0.586
32.5	1.336	7.452	0.771
33.5	1.616	9.014	0.932
34.5	1.673	9.332	0.965
35.5	1.731	9.656	0.999
36	1.733	9.667	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

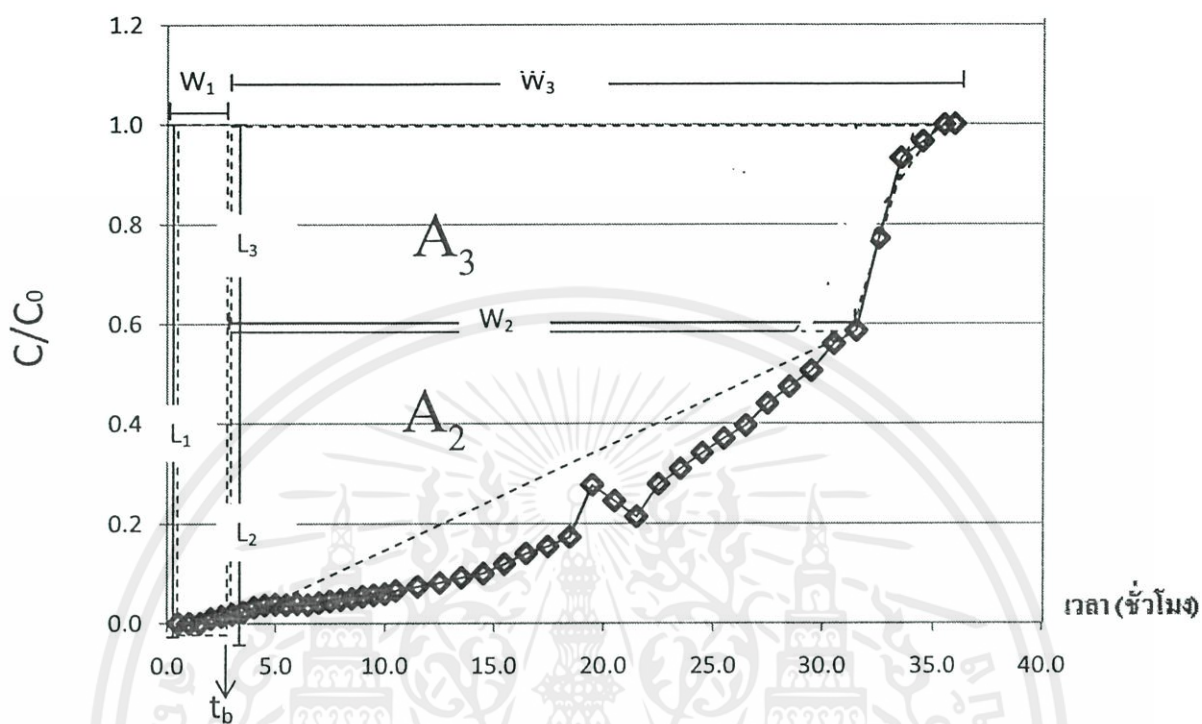
ตารางที่ ง.15 ผลการทดลองจากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยซิลิกาเจล  
เม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxy-  
silane เข้มข้น 2%

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (C) (ppm)	C/C <sub>0</sub>
1	0.004	0.022	0.002
2	0.004	0.022	0.002
3	0.009	0.050	0.005
4	0.002	0.011	0.001
5	0.005	0.028	0.003
6	0.003	0.017	0.002
7	0.017	0.095	0.010
8	0.039	0.218	0.023
9	0.057	0.318	0.034
10	0.092	0.513	0.054
11	0.148	0.826	0.087
12	0.144	0.803	0.085
13	0.258	1.439	0.152
14	0.314	1.751	0.185
15	0.255	1.422	0.150
16	0.371	2.069	0.219
17	0.366	2.042	0.216
18	0.400	2.231	0.236
19	0.532	2.967	0.313
20	0.741	4.133	0.437
21	0.971	5.416	0.572
22	0.900	5.020	0.530
23	0.910	5.076	0.536
24	1.047	5.840	0.617
25	1.152	6.426	0.679
26	1.200	6.694	0.707
27	1.140	6.359	0.672

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## การคำนวณค่า Saturated Loading Capacity



รูปที่ จ.1 กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ไม่ปรับสภาพผิว ที่ใช้ในการคำนวณ

เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการดูดซับ ( $t_t$ )

$A_1$  คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ จ.1

$$A_1 = t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) = W_1 \times L_1 = 2 \times 1 = 2 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\begin{aligned} A_2 \text{ คือ } \text{พื้นที่สามเหลี่ยมในรูปที่ จ.1} \quad A_2 &= \frac{1}{2} \times W_2 \times L_2 \\ &= \frac{1}{2} \times 29.5 \times 0.586 \\ &= 8.6435 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_3 \text{ คือ } \text{พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูในรูปที่ จ.1} \quad A_3 &= \frac{1}{2} \times (W_2 + W_3) \times L_3 \\ &= \frac{1}{2} \times (29.5 + 34) \times 0.414 \\ &= 13.1445 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_t = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt = A_1 + A_2 + A_3 = 2 + 8.6435 + 13.1445$$

$$= 23.788 \text{ ชั่วโมง}$$

ในการดูดซับมีการแพ็คสารลงในคอลัมน์ ( Pack Column ) จะสามารถคำนวณหาความสูงต่างๆของคอลัมน์ และค่าอื่นๆได้จากสมการดังต่อไปนี้

สมการ Bed Length

$$\frac{H_B}{H_T} = \frac{t_u}{t_t}$$

และ  $H_T = H_B + H_{UNB}$

เมื่อ  $H_T$  คือ ความสูงทั้งหมดของคอลัมน์ (Total Bed Length)

$H_B$  คือ ความสูงของคอลัมน์ที่จุด Break point

$H_{UNB}$  คือ ความสูงของคอลัมน์ที่เหลือหลังจากจุด Break point

ในการทดลองเราใช้  $H_T = 1.479 \text{ cm}$

จะได้ว่า 
$$\frac{H_B}{1.479} = \frac{2}{23.788}$$

$$\therefore H_B = 0.1243 \text{ cm}$$

และจะได้ว่า  $H_{UNB} = 1.479 - 0.1243 = 1.3547 \text{ cm}$

สมการ Saturation Loading capacity  $\left( \frac{\text{น้ำหนักทั้งหมดของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ}}{\text{น้ำหนักของสารดูดซับ}} \right)$

หาได้จาก  $F_g = F_v \times D$

เมื่อ  $F_g$  คือ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับ ที่มีหน่วยเป็น น้ำหนัก/เวลา

$F_v$  คือ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับที่มีหน่วยเป็น ปริมาตร/เวลา

$D$  คือ ความหนาแน่นของสารที่ถูกดูดซับ

ในการทดลองใช้ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับ ;  $F_v = 0.139 \text{ cm}^3/\text{s} = 500 \text{ cm}^3/\text{ชั่วโมง}$

ความหนาแน่นของสารละลายเมทิลีนบลู ;  $D = 0.744 \text{ g (สารละลาย)}/\text{cm}^3$

$$\therefore F_g = 500 \times 0.744 = 372 \text{ g(สารละลาย)}/\text{ชั่วโมง}$$

จากนั้น  $T = C_0 \times F_g \times t_t$

เมื่อ  $T$  คือ น้ำหนักทั้งหมดของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันที่ 15/11/2561 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้เห็นว่าไม่จริงหรือเห็นการก้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลนี้ออก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $C_0 = 9.667 \text{ ppm} = 9.667 \times 10^{-6} \text{ g (ตัวถูกดูดซับ)}/\text{g(สารละลาย)}$

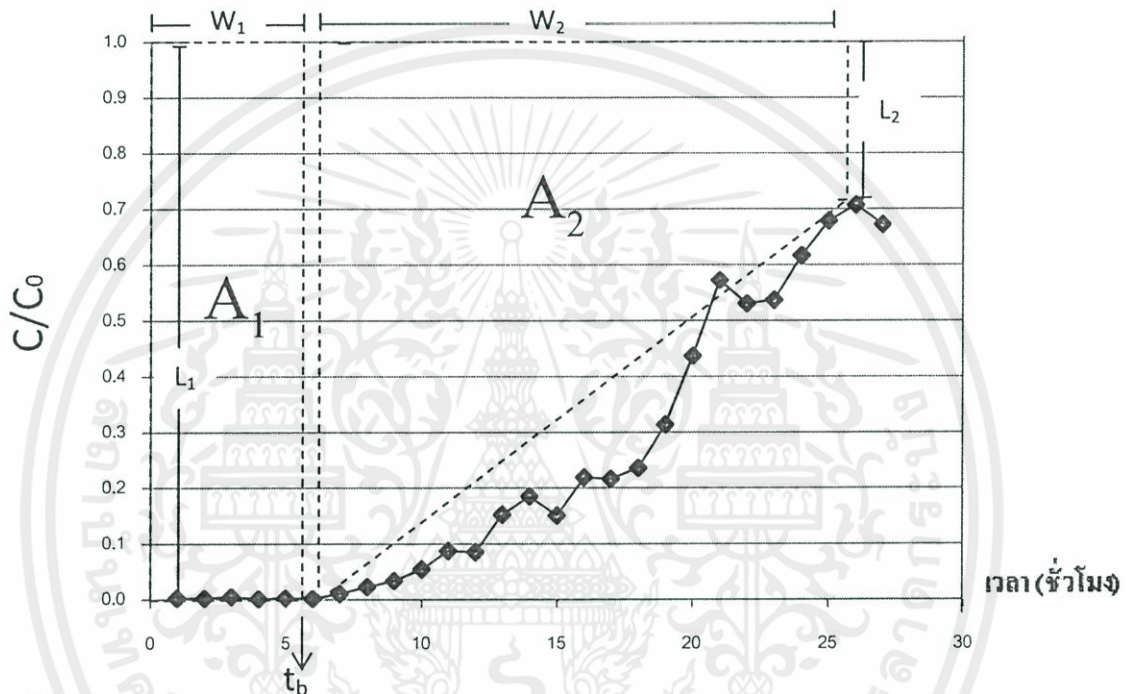
$$\therefore T = 9.667 \times 10^{-6} \times 372 \times 23.788 = 0.0855 \text{ g (ตัวถูกดูดซับ)}$$

จะได้ Saturation Loading capacity =  $\frac{T}{W}$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของสารดูดซับ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สารดูดซับน้ำหนัก  $g$

$$\therefore \text{Saturation Loading capacity} = \frac{T}{W} = \frac{0.0855}{1.981} = 0.043 = 4.3\%$$

จากค่า Saturation Loading capacity ที่คำนวณได้ประมาณ 0.043 g Methylene blue/g silica gel คือประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ไม่เคลือบผิวมีค่าเท่ากับ 4.3 %



รูปที่ จ.2 กราฟเบรคทูร (Breakthrough curve) ของซิลิกาเจลที่ปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane ที่ใช้ในการคำนวณ

เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการดูดซับ ( $t_t$ )

$A_1$  คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ จ.2

$$A_1 = t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt = W_1 \times L_1 = 6 \times 1 = 6 \text{ ชั่วโมง}$$

$A_2$  คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูในรูปที่ จ.2  $A_2 = \frac{1}{2} \times W_2 \times (L_1 + L_2)$

$$= \frac{1}{2} \times 21 \times (1 + 0.293)$$

$$= 13.576 \text{ ชั่วโมง}$$

$$t_t = \int_0^\infty \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt = A_1 + A_2 = 6 + 13.576 = 19.576 \text{ ชั่วโมง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการดูดซับมีการแพ็คสารลงในคอลัมน์ ( Pack Column ) จะสามารถคำนวณหาความสูงต่างๆของคอลัมน์ และค่าอื่นๆได้จากสมการดังต่อไปนี้

สมการ Bed Length

$$\frac{H_B}{H_T} = \frac{t_u}{t_t}$$

และ  $H_T = H_B + H_{UNB}$

เมื่อ  $H_T$  คือ ความสูงทั้งหมดของคอลัมน์ (Total Bed Length)

$H_B$  คือ ความสูงของคอลัมน์ที่จุด Break point

$H_{UNB}$  คือ ความสูงของคอลัมน์ที่เหลือหลังจากจุด Break point

ในการทดลองเราใช้  $H_T = 1.479$  cm

จะได้ว่า 
$$\frac{H_B}{1.479} = \frac{6}{19.576}$$

$$\therefore H_B = 0.4533 \text{ cm}$$

และจะได้ว่า  $H_{UNB} = 1.479 - 0.4533 = 1.0257$  cm

สมการ Saturation Loading capacity  $\left( \frac{\text{น้ำหนักทั้งหมดของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ}}{\text{น้ำหนักของสารดูดซับ}} \right)$

หาได้จาก  $F_g = F_v \times D$

เมื่อ  $F_g$  คือ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับ ที่มีหน่วยเป็น น้ำหนัก/เวลา

$F_v$  คือ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับที่มีหน่วยเป็น ปริมาตร/เวลา

$D$  คือ ความหนาแน่นของสารที่ถูกดูดซับ

ในการทดลองใช้ Flow rate ของสารที่ถูกดูดซับ ;  $F_v = 0.14 \text{ cm}^3/\text{s} = 496 \text{ cm}^3/\text{ชั่วโมง}$

ความหนาแน่นของสารละลายเมทิลีนบลู ;  $D = 0.9959 \text{ g (สารละลาย)}/\text{cm}^3$

$$\therefore F_g = 496 \times 0.9959 = 493.9664 \text{ g(สารละลาย)}/\text{ชั่วโมง}$$

จากนั้น  $T = C_0 \times F_g \times t_t$

เมื่อ  $T$  คือ น้ำหนักทั้งหมดของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 9.466 ppm

ซึ่ง  $C_0 = 9.466 \text{ ppm} = 9.466 \times 10^{-6} \text{ g (ตัวถูกดูดซับ)}/\text{g(สารละลาย)}$

$$\therefore T = 9.466 \times 10^{-6} \times 493.9664 \times 19.576 = 0.0915 \text{ g (ตัวถูกดูดซับ)}$$

จะได้ Saturation Loading capacity  $= \frac{T}{W}$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของสารดูดซับ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สารดูดซับน้ำหนัก  $g$

$$\therefore \text{Saturation Loading capacity} = \frac{T}{W} = \frac{0.0915}{1.981} = 0.046 = 4.6\%$$

จากค่า Saturation Loading capacity ที่คำนวณได้ประมาณ 0.046 g Methylene blue/g silica gel คือประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลเม็ดเล็กที่ถูกปรับสภาพผิวด้วย สารคู่ควบไซเลน 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane มีค่าเท่ากับ 4.6 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้