

การเตรียมอะลูมิเนียมพิลลาเคลย์ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก  
และการดูดซับสีย้อมอินทรีย์

PREPARATION OF ALUMINIUM-PILLARED CLAY  
BY ULTRASONIC TECHNIQUE AND THEIR ABSORPTION  
OF ORGANIC DYES

ประภาพร ลิ้มเรืองธรรม  
PRAPAPORN LIMRAUNGHUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-SC-M-012-049

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมอะลูมิเนียมพิลลาเคลย์ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก  
และการดูดซับสีย้อมอินทรีย์

PREPARATION OF ALUMINIUM-PILLARED CLAY  
BY ULTRASONIC TECHNIQUE AND THEIR ABSORPTION  
OF ORGANIC DYES



ประภาพร ลิ้มเรืองธรรม

PRAPAPORN LIMRAUNGTHUM

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 87891  
วัน,เดือน,ปี 19 ส.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-SC-M-012-049

**PREPARATION OF ALUMINIUM-PILLARED CLAY  
BY ULTRASONIC TECHNIQUE AND THEIR ABSORPTION  
OF ORGANIC DYES**

**PRAPAPORN LIMRAUNGTUM**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2008  
KMITL-2008-SC-M-012-049**

**COPYRIGHT 2008**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมอะลูมิเนียมพิลลาเคลย์ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกและการดูดซับสีอินทรีย์  
Preparation of Aluminium-Pillared Clay by Ultrasonic Technique and Their Absorption of Organic Dyes

นักศึกษา นางสาวประภาพร ลิมเรื่องธรรม




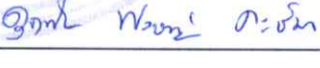
รหัสประจำตัว 46068803

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมี (เคมีอนินทรีย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.ศักดา ไตรศักดิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวรรณ	ไชยสิทธิ์	
ผศ.ดร.ปทุมมา	ศิริพันธ์โนน	
รศ.ดร.ศักดา	ไตรศักดิ์	
รศ.ดร.ตะวัน	สุขน้อย	
ดร.ดุจดัทพ์	พงษ์เก่า กระชิวา	

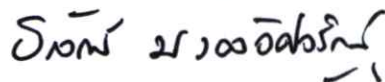
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 7 ตุลาคม 2551 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครรัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2551

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมอะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ด้วยเทคนิค อัลตราโซนิกและการดูดซับสีย้อมอินทรีย์
นักศึกษา	นางสาวประภาพร ลิ้มเรืองธรรม
รหัสประจำตัว	46068803
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี (เคมีอนินทรีย์)
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ศักดิ์ ไตรศักดิ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) ด้วยสารละลายอะลูมิเนียมไนเตรดกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเป็น 0.4 และ 0.8 โมล/ลิตร และใช้เทคนิคการดัดแปรโครงสร้าง 2 แบบคือ เทคนิคอัลตราโซนิก และเทคนิคปั่นกววน ภายหลังจากการดัดแปรโครงสร้างพบว่า มีอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน ( $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ ) แทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้าง ทำให้ระนาบ  $d_{001}$  ของ MMT มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดย MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก จะให้ค่า  $d_{001}$  สูงที่สุดคือ 16.97 Å อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นไม่แสดงผลต่อการดัดแปรโครงสร้างของ MMT อย่างชัดเจน เมื่อนำ MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C จะได้เป็นอะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ (Al-pill) พบว่า Al-pill มีระยะห่างระหว่างระนาบ  $d_{001}$  ลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียน้ำและหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นองค์ประกอบของ  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  เป็นผลให้ Al-pill ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และขนาดรูพรุนสูงกว่า MMT เริ่มต้น Al-pill ที่เตรียมได้ถูกนำไปศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ สีย้อมสีย้อม 66 (BB 66) สีย้อมไอโพลลาวิน ที (ThT) และสีย้อมไอโชน บี (EOB) โดยระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับคือ 30 นาที 1 และ 2 ชั่วโมง และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่ใช้คือ 50 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก สามารถดูดซับสีย้อมได้มากกว่า Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคปั่นกววน และ MMT เริ่มต้นตามลำดับ โดยเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม 50 มิลลิกรัม/ลิตร ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 1 ชั่วโมง จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมสูงที่สุด

<b>Thesis Title</b>	Preparation of Aluminium-Pillared Clay by Ultrasonic Technique and Their Absorption of Organic Dyes
<b>Student</b>	Miss. Prapaporn Limraungthum
<b>Student ID.</b>	46068803
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Chemistry (Inorganic Chemistry)
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Punnama Siriphannon
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Sakda Trisak

## ABSTRACT

This research work studied on modification of montmorillonite (MMT) with aluminium nitrate ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ) and sodium hydroxide ( $\text{NaOH}$ ). The concentrations of starting substances were 0.4 and 0.8 mol/l. Two modification techniques were used, i.e. sonication and mechanical mixing techniques. After structural modification, aluminium polyhydroxy cation ( $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$ ) intercalated into the MMT structure, resulting in an increase of d-spacing of 001 plane. The MMT modified with sonication technique showed the highest  $d_{001}$  of 16.97 Å. It was, however, the concentrations of starting substances hardly effected on the structural modification of MMT. The  $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  modified MMT was calcined at 400 and 500 °C in order to obtain aluminium-pillared clays (Al-pill). The  $d_{001}$  of calcined Al-pill was decreased due to the decomposition of water and hydroxyl group of  $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$ . Beside, the specific surface area and pore size of Al-pill were higher than those of the starting MMT. The adsorption capacity of Al-pill was studied using three dye solutions, i.e. Basic Blue 66 (BB 66), Thioflavin T (ThT) and Eosin B (EOB). The adsorption times were 30 min, 1 and 2 hrs. The initial dye concentrations were 50, 100 and 200 mg/l. It was found that the adsorption capacities of Al-pill prepared by sonication were higher than those of the Al-pill prepared by mechanical mixing and starting MMT, respectively. The highest percentage of dye removal was obtained when using the initial dye concentration of 50 mg/l and adsorption time of 1 hr.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์ โนน และ รศ.ดร.ศักดิ์ ไตรศักดิ์ เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความเอาใจใส่ ในการดำเนินงานวิจัย และในงานเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยกรุณาแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยกรุณาแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.คุณฤทัย พงษ์เก่า คະชิมา ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยกรุณาแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณสุคติ แก้วหนู นักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ทุกๆ ท่านที่เอื้อเพื่อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่าน สำหรับกำลังใจ ความห่วงใย ความปรารถนาดี และทุกๆ ความช่วยเหลือในขณะที่ทำงานวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจ ความเอาใจใส่ ความรัก และแรงผลักดันจากบิดา มารดา พี่ และน้องๆ

สำหรับคุณงามความดีอันใดซึ่งเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนขอมอบให้ทุกๆ ความปรารถนาดี และความห่วงใยจากทุกๆ ท่านที่มีต่อผู้เขียนตลอดมา

ประภาพร ลืมเรื่องธรรม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	X
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 แร่ดินเหนียว (Clay).....	3
2.2 โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว.....	3
2.3 มอนต์มอริลโลไนต์.....	5
2.3.1 โครงสร้างและสมบัติที่สำคัญของแร่มอนต์มอริลโลไนต์.....	5
2.3.2 หน่วยประกอบพื้นฐานของเคลย์.....	6
2.3.3 สมบัติของแร่ดินเหนียว.....	8
2.4 พิลลาเคลย์.....	9
2.5 สีย้อม (Dyes).....	10
2.5.1 สีแอซิด (Acid dyes).....	11
2.5.2 สีเบสิก (Basic dyes).....	11
2.5.3 สีไคเร็กต์ (Direct dyes).....	12
2.5.4 สีแวต (Vat dyes).....	12
2.5.5 สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes).....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.6 สีดีสเพิร์ส (Disperse dyes).....	13
2.5.7 สีซัลเฟอร์ (Sulfer dyes).....	13
2.6 ปัญหาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	13
2.6.1 ลักษณะน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	14
2.6.2 แนวทางแก้ไข.....	15
2.7 วิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	15
2.8 การดูดซับ (Adsorption).....	16
2.8.1 ประเภทของการดูดซับ.....	17
2.8.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ.....	18
2.8.3 ประเภทของสารดูดซับ.....	18
2.8.4 กลไกการดูดซับ.....	18
2.8.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	19
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	26
3.1 สารเคมี.....	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	26
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	27
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน.....	27
3.3.2 การเตรียมสารตัวอย่าง.....	27
3.3.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT และ Al-pill.....	30
3.3.4 การศึกษาการดูดซับสีย้อมของ MMT และ Al-pill.....	30
3.3.5 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม.....	31
3.3.6 คำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	33
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร.....	34
4.1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF.....	33

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ MMT Al-MMT และ Al-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ.....	33
4.2 ค่า $2\theta$ และ $d_{001}$ ของ MMT Al-MMT และ Al-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ.....	34
4.3 ผลจากเทคนิค FTIR ของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ.....	38
4.4 ผลจากเทคนิค TGA ของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ.....	41
4.5 ค่าพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัตถุดิบ MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ.....	43
4.6 ผลจากเทคนิค FTIR ของ Al-pill สีย้อม BB 66 ThT และ สีย้อม EOB.....	47
4.7 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายสีย้อม.....	47
4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสี BB 66 ของ MMT และ Al-pill ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	48
4.9 ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	49
4.10 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสี ThT ของ MMT และ Al-pill ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	50
4.11 ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	50
4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสี EOB ของ MMT และ Al-pill ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	52
4.13 ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	52
จ-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	76
จ-2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม ThT ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	77
จ-3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม EOB ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	78
ฉ-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	79
ฉ-2 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	79
ฉ-3 ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ถูกดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	80

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ฉ-4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม ThT หลังการดูดซับด้วย MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	80
ฉ-5 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม ThT หลังการดูดซับของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	81
ฉ-6 ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ThT ที่ถูกดูดซับด้วย MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	81
ฉ-7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม EOB หลังการดูดซับด้วย MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	82
ฉ-8 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม EOB หลังการดูดซับของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	82
ฉ-9 ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม EOB ที่ถูกดูดซับของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	83
ช-1 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที.....	84
ช-2 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 1 ชั่วโมง.....	84
ช-3 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมง.....	85
ช-4 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที.....	85
ช-5 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 1 ชั่วโมง.....	86
ช-6 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมง.....	86
ช-7 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที.....	87
ช-8 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ของ MMT และ AI-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 1 ชั่วโมง.....	87

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ช-9 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมง.....	88

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 1:1.....	5
2.2 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 2:1.....	5
2.3 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	6
2.4 (a) ซิลิกอนเตตระไฮดรอกไซด์ และ (b) แผ่นเตตระไฮดรอกไซด์.....	7
2.5 (a) อะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ และ (b) แผ่นออกไซด์ไฮดรอกไซด์.....	7
2.6 แสดงการเกิดพิลลาเคลย์.....	10
2.7 สูตรโครงสร้างของอีโอซิน บี.....	11
2.8 สูตรโครงสร้างของไทโอพลาวิน ที.....	11
2.9 สูตรโครงสร้างของเบสึคิบลู 66.....	12
2.10 การยึดเกาะของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ.....	17
2.11 แผนภาพแสดงลักษณะการดูดซับ.....	17
3.1 แผนภาพแสดงการหาสถานะในการเตรียม Al-pill.....	29
4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ.....	35
4.2 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงภายในระนาบ 001 ของวัตถุดิบ MMT ระหว่างการเตรียม Al-pill.....	37
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค.....	39
4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคปั่นกวน.....	39
4.5 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA/DTG ของวัตถุดิบ MMT Al-MMT-st และ Al-MMT-so ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	41
4.6 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA/DTG ของ Al-MMT-so และ Al-pill-so ที่เผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	42
4.7 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA/DTG ของ Al-MMT-st และ Al-pill-st ที่เผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	42
4.8 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (a) Al-pill-so 0.4-400 ก่อนดูดซับสีข้อม BB 66 และ (b) Al-pill-so 0.4-400 หลังการดูดซับสีข้อม BB 66.....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อม BB 66 และ Al-pill ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม.....	45
4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อม ThT และ Al-pill ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม.....	45
4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อม EOB และ Al-pill ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม.....	46
4.12 กราฟแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 และ 2 ชั่วโมง.....	49
4.13 กราฟแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 และ 2 ชั่วโมง.....	51
4.14 กราฟแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 และ 2 ชั่วโมง.....	53
4.15 แผนภาพแสดงการดูดซับของ MMT.....	54
4.16 แผนภาพแสดงการดูดซับของ Al-pill.....	54
4.17 แผนภาพแสดงการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ของ Al-pill.....	55
4.18 แผนภาพแสดงการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ Al-pill.....	55
4.19 แผนภาพแสดงการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ของ Al-pill.....	55
ก-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัตถุดิบ MMT.....	60
ก-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-MMT-so.....	60
ก-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so-400.....	61
ก-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so-500.....	61
ก-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-MMT-st.....	62
ก-6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-st-400.....	62
ก-7 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-st-500.....	63
ข-1 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ MMT ในบรรยากาศ O <sub>2</sub> .....	64
ข-2 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-MMT-st ในบรรยากาศ O <sub>2</sub> .....	64
ข-3 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-MMT-so ในบรรยากาศ O <sub>2</sub> .....	65
ข-4 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-st-400 ในบรรยากาศ O <sub>2</sub> .....	65
ข-5 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-so-400 ในบรรยากาศ O <sub>2</sub> .....	66
ข-6 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-st-500 ในบรรยากาศ O <sub>2</sub> .....	66
ข-7 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-so-400 ในบรรยากาศ O <sub>2</sub> .....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 พื้นที่ผิวของวัตถุคิบ MMT.....	68
ก-2 พื้นที่ผิวของ Al-pill-st-400.....	68
ก-3 พื้นที่ผิวของ Al-pill-so-400.....	69
ก-4 พื้นที่ผิวของ Al-pill-st-500.....	69
ก-5 พื้นที่ผิวของ Al-pill-so-500.....	70
ก-6 ขนาดรูพรุนของวัตถุคิบ MMT.....	70
ก-7 ขนาดรูพรุนของ Al-pill-st-400.....	71
ก-8 ขนาดรูพรุนของ Al-pill-so-400.....	71
ก-9 ขนาดรูพรุนของ Al-pill-st-500.....	72
ก-10 ขนาดรูพรุนของ Al-pill-so-500.....	72
ง-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายสีย้อม Basic Blue 66 (BB 66).....	73
ง-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so 0.4-400 ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66.....	73
ง-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายสีย้อม Thioflavin T (ThT).....	74
ง-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so 0.4-400 ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT.....	74
ง-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายสีย้อม Eosin B (EOB).....	75
ง-6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so 0.4-400 ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB.....	75
จ-1 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BB 66.....	76
จ-2 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม ThT.....	77
จ-3 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม EOB.....	78

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

MMT	มอนต์มอริลโลไนต์
Al-MMT	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างด้วยสารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$
Al-MMT-st-0.4	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.4 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิคปั่น กวน
Al-MMT-st-0.8	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.8 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิคปั่น กวน
Al-MMT-so-0.4	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.4 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิค อัลตราโซนิก
Al-MMT-so-0.8	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.8 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิค อัลตราโซนิก
Al-pill	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างที่ผ่านการเผาแคลไซน์
Al-pill-st	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างที่ผ่านการเผาแคลไซน์ และเตรียม ด้วยเทคนิคปั่นกวน
Al-pill-so	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างที่ผ่านการเผาแคลไซน์ และเตรียม ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก
Al-pill-st 0.4-400	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.4 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิค ปั่นกวน และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C
Al-pill-st 0.4-500	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.4 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิค ปั่นกวน และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C
Al-pill-st 0.8-400	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.8 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิค ปั่นกวน และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Al-pill-st 0.8-500	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.8 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิคปั่นกววน และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C
Al-pill-so 0.4-400	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.4 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 °C
Al-pill-so 0.4-500	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.4 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C
Al-pill-so 0.8-400	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.8 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 °C
Al-pill-so 0.8-500	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ 0.8 โมล/ลิตร ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C
$d_{001}$	ระยะห่างระหว่างระนาบ 001
Å	อังสตรอม
m/l	มิลลิกรัม/ลิตร
mg/g	มิลลิกรัม/กรัม
nm.	นาโนเมตร
BB 66	ซีลียมเบสิกบลู 66
ThT	ซีลียมไทโอฟลาวิน ที
EOB	ซีลียมอีโอซิน บี
$q_t$	ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายซีลียม
$C_0$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซีลียม
$C_t$	ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายซีลียมหลังการดูดซับ ณ เวลาที่ทำการดูดซับ
$v$	ปริมาตรของสารละลายซีลียมที่ใช้ในการดูดซับ
$W$	น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของงานวิจัย [1]

อุตสาหกรรมฟอกย้อมจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำและสารเคมีโดยเฉพาะสีเป็นปริมาณมาก น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่มีสีขุ่นปนเปื้อน และหากปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่ธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สาเหตุหนึ่งเพราะสีย้อมส่วนใหญ่ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมมีความคงทนต่อแสงและยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ การบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม จำเป็นต้องใช้กระบวนการบำบัดหลายขั้นตอน ทั้งด้วยวิธีการทางเคมี ทางชีวภาพ และทางกายภาพเคมี เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำที่ยอมรับได้หรือได้มาตรฐานน้ำทิ้ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงและส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตสินค้าโดยรวม

วิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม คือ การใช้ตัวดูดซับในการกำจัดสีและสารอินทรีย์อื่นๆ หากแต่ควรปรับปรุงประสิทธิภาพในการกำจัดสี ดังนั้นการหาตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจศึกษา โดยเฉพาะตัวดูดซับที่ผลิตจากวัสดุที่มีราคาต่ำ เช่น ถ่าน ถ้ำลอย แกลบ และแร่ดินเหนียว ซึ่งแร่ดินเหนียวสามารถดัดแปรโครงสร้างได้ด้วยการสอดแทรกด้วยสารประกอบอินทรีย์ หรือ อนินทรีย์เข้าไปในระหว่างโครงสร้างของชั้นซิลิเกตเคลย์ โดยเกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับแคตไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นเคลย์ เช่น โซเดียม และ แคลเซียม เป็นต้น เมื่อให้ความร้อนแก่ไอออนที่อยู่ภายในโครงสร้าง จะทำให้ไอออนนั้นเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพิลลา (Pillar) เรียงตัวภายในชั้นของโครงสร้าง และเกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็กขึ้นอย่างถาวรเรียกว่า พิลลาเคลย์ (Pillared clay, PILC) ทำให้แร่ดินเหนียวมีช่องว่างระหว่างชั้น ปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการคตาไลซิส การดูดซับ และกระบวนการแยก เป็นต้น แร่ดินเหนียวที่นิยมใช้ในการเตรียมพิลลาเคลย์ส่วนมากจะมีโครงสร้างของซิลิกาและอะลูมินาเป็นแบบ 2:1 เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากมีประจุในโครงสร้างมากเพียงพอที่จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถขยายตัวได้มาก

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอะลูมิเนียมพิลลาเคลย์โดยการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  หรือ  $Al_3$  ที่สภาวะต่างๆ ซึ่ง  $Al_3$  จะสอดแทรกเข้าไปในชั้นเคลย์ และ  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  ที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดอินเตอร์คาลชันภายในระหว่างชั้นเคลย์ จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นเคลย์ที่มีขนาดกว้างขึ้น มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น จากนั้นจะนำมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วย  $Al_3$  ไปทำ

การเคลือบที่สภาวะต่างๆเพื่อเตรียมเป็นอะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ (Al-pill) และ Al-pill ที่เตรียมได้นี้จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม ซึ่งสีย้อมที่ทำการดูดซับมี 3 ชนิดคือ เบสิคบลู 66 (Basic Blue 66, BB 66) ไทโอฟลาวิน ที (Thioflavin T, ThT) และ อีโอซิน บี (Eosin B, EOB)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเตรียมและการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยอะลูมิเนียม
2. ทดสอบความสามารถในการดูดซับสีย้อมของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยอะลูมิเนียม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วยสารละลายอะลูมิเนียมไนเตรดกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีปัจจัยศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ใช้คือ 0.4 และ 0.8 โมล/ลิตร เทคนิคการดัดแปรโครงสร้างได้แก่ เทคนิคอัลตราโซนิก และเทคนิคปั่นกววน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเคลือบเพื่อเตรียมเป็นฟิลาเคลย์คือ 400 และ 500 °C เพื่อศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการดัดแปรต่อโครงสร้างของฟิลาเคลย์ จากนั้นนำฟิลาเคลย์ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) เทคนิค Gas Adsorption Analysis FTIR และ TGA หลังจากนั้นนำฟิลาเคลย์ที่เตรียมได้ไปศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมประเภทกรด ได้แก่ สีอีโอซิน บี (Eosin B, EOB) ประเภทเบสได้แก่ สีเบสิคบลู 66 (Basic Blue 66, BB 66) และสีไทโอฟลาวิน ที (Thioflavin T, ThT) โดยมีปัจจัยศึกษาในขั้นตอนนี้ได้แก่ ชนิดของสีย้อม ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงกระบวนการในการเตรียมตัวดูดซับจากเคลย์มอนต์มอริลโลไนต์
2. ทราบถึงกระบวนการในการดูดซับสีย้อมของเคลย์ที่ดัดแปรด้วยอะลูมิเนียม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 แร่ดินเหนียว (Clay) [2]

เคลย์ (Clay) ภาษาไทยแปลว่าดินเหนียว หรือดินโคลน ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิด ขึ้นกับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบที่สำคัญในดิน ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic matter) และความชื้น ในส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์นี้มีแร่ธาตุหรือแร่ดินเหนียวที่สำคัญหลากหลายชนิด กลุ่มที่สำคัญที่สุดคือ กลุ่มแร่ซิลิเกต (Silicate) แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ลักษณะโครงสร้างผลึกหรืออัญรูป เป็นต้น

แร่ดินเหนียวที่สำคัญที่นำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์และนาโนคอมโพสิตคือกลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีจุดเด่นคือมีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วหรือประจุ (Polarity) คือแร่ดินเหนียวกลุ่มสมกไทต์ (Smectite clay) และแร่ดินเหนียวที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้คือ แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite , MMT) แร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆในกลุ่มนี้ที่มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นนาโนเคลย์ได้แก่ซาโปไนต์ (Saponite) และเวอมิกูไลต์ (Vermiculite)

### 2.2 โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว [2-7]

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ทุติยภูมิเกิดจากการผุพังของหิน โดยทั่วไปอนุภาคมีขนาดเล็กมากระดับไมครอน มีธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมี โครงสร้างของแร่ดินเหนียวเป็นสารประกอบจำพวกแอนไฮดรอสลูมิโนซิลิเกตส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่น เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอะลูมิเนียมและซิลิกอน และในระหว่างชั้นจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียมและเหล็กแทรกอยู่ จากโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันนี้ทำให้สามารถจำแนกชนิดของแร่ดินเหนียวออกได้หลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ลักษณะโครงสร้างผลึกหรืออัญรูป สามารถแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆคือพวกที่ไม่มีระบบผลึกและพวกที่มีระบบผลึก นอกจากนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 6 กลุ่มใหญ่ๆได้แก่

1. **กลุ่มเคโอลิไนต์ (Kaolinite)** มีโครงสร้างแบบ 1:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีชั้น ออกตะฮีดรอลของอะลูมินาและชั้นเตตระฮีดรอลของซิลิกาอย่างละชั้นประกอบเป็นหนึ่งหน่วย ซึ่งแต่ละชั้นจะมีความหนาประมาณ 7 Å ชั้นของเคโอลิไนต์จะมีผิวด้านหนึ่งเป็นผิวของออกซิเจนและอีกด้านหนึ่งจะเป็นผิวของไฮดรอกซิล ดังนั้นแต่ละชั้นของเคโอลิไนต์จึงดึงดูดกันด้วย

พันธะไฮโดรเจน จึงทำให้แต่ละชั้นของเคโอลิไนต์จับกันอย่างหนาแน่น เคโอลิไนต์จะไม่ขยายตัวเมื่อเปียกและไม่หดตัวเมื่อแห้ง พื้นที่ผิวน้อยจึงมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำ ทำให้อุ้มน้ำได้น้อย

2. **กลุ่มอิลไลต์หรือไฮดรัสไมกา (Illite หรือ Hydrus mica)** มีโครงสร้างเป็นชนิด 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งในหน่วยโครงสร้างจะมีชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประกบชั้นอะลูมินา 1 ชั้น และในแต่ละหน่วยมีไอออนของโพแทสเซียมแทรกอยู่ ทำให้ดินในกลุ่มนี้ไม่สามารถบวมตัวในน้ำได้

3. **กลุ่มสมกไทต์ (Smectite)** มีโครงสร้างเป็นชนิด 2:1 เหมือนกับอิลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งในชั้นโครงสร้างจะมีโมเลกุลของน้ำและไอออนบวก ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นไอออนของแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และโซเดียม เพื่อทำหน้าที่สะเทินประจุในโครงสร้าง จากการที่มีประจุบวกแทรกอยู่ระหว่างชั้นทำให้แร่กลุ่มนี้มีความสามารถในการบวมตัวในน้ำได้ดี และแร่ที่พบมากที่สุดคือ มอนต์มอริลโลไนต์

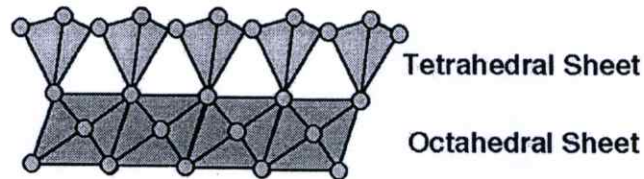
4. **กลุ่มเวอมิกูไลต์ (Vermiculite)** มีโครงสร้างเป็นชนิด 2:1 ซึ่งในหน่วยโครงสร้างจะมีชั้นซิลิกา 2 ชั้น ประกบชั้นอะลูมินา 1 ชั้น ส่วนมากพบในโครงสร้างในลักษณะเดียวกับไมกา ที่ไม่สมดุลเนื่องจากการแทนที่ของอะลูมิเนียมไอออนที่ตำแหน่งของซิลิกอนบนแผ่นไมกา โดยที่แมกนีเซียมไอออนจะเข้าไปแทนที่โพแทสเซียมไอออนที่เชื่อมอยู่ระหว่างชั้นของไมกา เนื่องจากขนาดของแมกนีเซียมไอออนใหญ่กว่าของโพแทสเซียมไอออน จึงทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของเวอมิกูไลต์ กว้างกว่าของไมกา เวอมิกูไลต์มีการขยายตัวในน้ำได้มาก มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง เมื่อเผาแล้วอนุภาคมีลักษณะคล้ายตัวหนอน

5. **กลุ่มคลอไรต์ (Chlorite)** มีการจัดเรียงตัวของชั้นซิลิกาต่อชั้นอะลูมินาแบบ 2:1:1 หรือ 2:2 ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแร่ไมกา โดยมีชั้นของบรูไซต์ (Brucite,  $Mg(OH)_2$ ) เข้าไปแทนที่โพแทสเซียมไอออนทำหน้าที่สะเทินประจุในโครงสร้าง และระหว่างชั้นของคลอไรต์จะยึดติดกันด้วยแรงอิเล็กโตรสตาติกกับกับพันธะไฮโดรเจนผ่านบรูไซต์ จึงทำให้แต่ละชั้นของคลอไรต์ยึดติดกันด้วยแรงที่มากพอสมควร ไม่สามารถยึดหรือหดตัวได้ และไม่พบการใช้งานของกลุ่มคลอไรต์ในอุตสาหกรรม

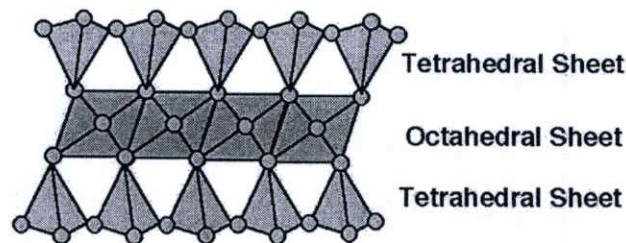
6. **กลุ่มมิกส์เลเยอร์เคลย์ (Mixed layer or interstratified clays)** เป็นเคลย์ที่มีโครงสร้างก้ำกึ่งกันระหว่างกลุ่มเคลย์ต่างๆที่กล่าวมา เพราะว่าเคลย์กลุ่มนี้กำลังอยู่ในระหว่างช่วงของการเปลี่ยนแปลง จึงไม่สามารถจัดเข้า ไปอยู่ในกลุ่มหนึ่งกลุ่มใดได้ เช่น อิลไลต์-มอนต์มอริลโลไนต์อินเตอร์เกรดหรือคลอไรต์-มอนต์มอริลโลไนต์อินเตอร์เกรด

สมบัติต่างๆทั้งทางเคมีและฟิสิกส์ของแร่ดินเหนียวแต่ละกลุ่มที่แตกต่างกัน จึงทำให้การใช้งานแตกต่างกันด้วย แร่ดินเหนียวที่นิยมนำมาใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มแร่เคโอลิไนต์ และสมกไทต์ กลุ่มแร่เคโอลิไนต์นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น กระเบื้อง ถ้วยชาม และสุขภัณฑ์ สำหรับกลุ่มแร่สมกไทต์ที่รู้จักกันมากคือเบนโทไนต์ นิยมนำมาเป็นสารตัวเติมใน

อุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ กระดาษ หรือใช้เป็นหัวเจาะโคลน เป็นสารหล่อลื่น ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามพัฒนาสมบัติของแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้ เพื่อเพิ่มประโยชน์การใช้งานของแร่ดินให้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวให้มีความชอบสารอินทรีย์ หรือที่รู้จักกันในนามของออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (Organophilic clays)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 [8]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 [8]

## 2.3 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) [9]-[11]

### 2.3.1 โครงสร้างและสมบัติที่สำคัญของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

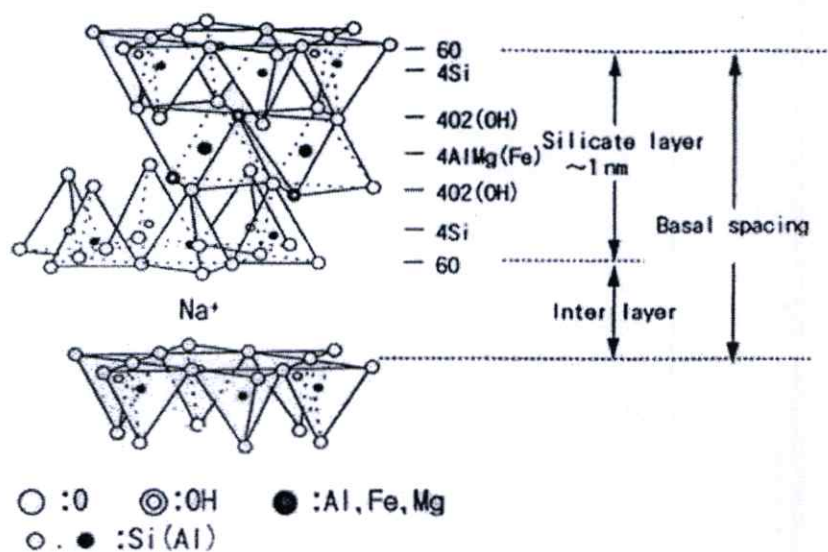
มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ  $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$  จัดอยู่ในแร่ตระกูลไฟโรซิลิเกต (Phyllosilicate) มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส สำหรับในประเทศไทยพบที่บริเวณตำบลถ่านารายณ์ อำเภอบึงสามพัน จังหวัดลพบุรี

แร่ MMT จัดอยู่ในกลุ่มของแร่สเมกไทต์ (Smectite group) ซึ่งเป็นกลุ่มของแร่ดินที่สามารถแสดงการขยายตัว (Expandability) เมื่อใส่น้ำหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างและมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน

MMT เป็นองค์ประกอบหลักของดินเบนโทไนต์ รองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ MMT ทำให้ดินเบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ อย่างไรก็ตามสมบัติของดินก็ยังคงแตกต่างกันในเรื่องของความสามารถ

ในการดูดซับ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของ MMT

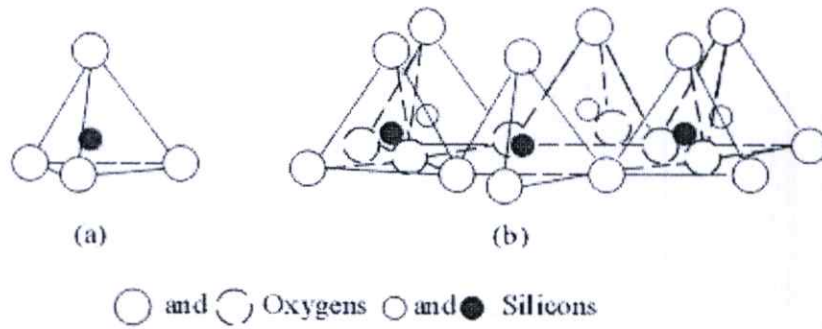
MMT เป็นแร่ดินเหนียวที่มีลักษณะ โครงสร้างแตกต่างจากแร่อื่นๆคือ จะมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ คือชั้นของแผ่นอะลูมินาและชั้นของแผ่นซิลิกา ซ้อนทับกันคล้ายแซนวิช โดยชั้นที่อยู่ตรงกลางจะเป็นชั้นของอะลูมินาซึ่งมีประจุเป็นบวก และประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกาซึ่งมีประจุเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่าแกลเลอรี (Gallery) ในช่องว่างจะมีประจุบวกโซเดียม หรือแคลเซียมเพื่อทำหน้าที่ยึดชั้นของแร่เอาไว้ด้วยกัน ไอออนโซเดียมหรือแคลเซียมในช่องแกลเลอรีนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [12]

### 2.3.2 หน่วยประกอบพื้นฐานของเคลย์

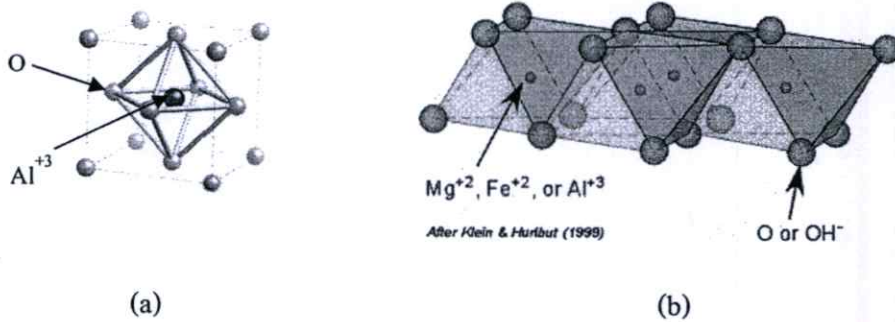
1. หน่วยเตตระฮีดรอล (Tetrahedral unit) หน่วยเตตระฮีดรอลนี้โดยมากประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอน และธาตุออกซิเจน โดยที่ธาตุซิลิกอนจะเกิดพันธะเคมีกับออกซิเจน 4 อะตอม ซึ่งธาตุซิลิกอนจะอยู่ในตำแหน่งตรงกลางของรูปปิรามิดทั้ง 4 ด้าน (Tetrahedral) ส่วนออกซิเจน 4 อะตอมจะอยู่ในตำแหน่ง 4 มุมของรูปปิรามิด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (a)



รูปที่ 2.4 (a) ซิลิกาอนเตตระฮีดรอล และ (b) แผ่นเตตระฮีดรอล [13]

ซิลิกาเตตระฮีดรอลนี้จะรวมตัวกันหลายๆหน่วยโดยใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน ทำให้เกิดแผ่นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral sheet) ดังแสดงไว้ในรูป 2.4 (b)

2. หน่วยออกตะฮีดรอล (Octahedral unit) หน่วยออกตะฮีดรอลนี้โดยมากประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียม (เหล็ก แมกนีเซียม) และออกซิเจนหรือไฮดรอกซิล ธาตุอะลูมิเนียมจะเกิดพันธะเคมีกับออกซิเจน 6 อะตอม โดยที่ธาตุอะลูมิเนียมจะอยู่ตรงกลางรูป 8 ด้าน (Octahedral) ส่วนออกซิเจน 6 อะตอมจะอยู่ในตำแหน่ง 6 มุมของรูป 8 ด้านดังแสดงในรูปที่ 2.5 (a)



รูปที่ 2.5 (a) อะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล [14] และ (b) แผ่นออกตะฮีดรอล [15]

ในทำนองเดียวกันอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอลหลายๆหน่วยจะรวมตัวกันโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน ทำให้เกิดแผ่นออกตะฮีดรอล (Octahedral sheet) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 (b)

### 2.3.3 สมบัติของแร่ดินเหนียว [16]

สมบัติที่สำคัญในการควบคุมพฤติกรรมของแร่ดินเหนียวก็คือ ขนาดของแร่ดินเหนียว ซึ่งเทียบเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) กับสมบัติในการดึงดูดหรือผลักกันของประจุไฟฟ้าของผลึกแร่ซึ่งแสดงออกในรูปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity, CEC)

1. พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) คือพื้นที่ผิวของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยมวล วัสดุที่มีขนาดใหญ่ จะมีพื้นที่ผิวต่อมวลน้อย ดังนั้นพฤติกรรมของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงเนื่องจากมวล (Body force) เสียเป็นส่วนใหญ่ แรงที่กระทำตามผิววัสดุ (Surface force) เช่น แรงเนื่องจากประจุไฟฟ้า จะมีน้อย แต่ถ้าวัสดุมีขนาดเล็กถึงพื้นที่ผิวต่อมวลก็จะเพิ่มขึ้น สำหรับแร่ดินเหนียวซึ่งมีรูปร่างเป็นแผ่นและมีขนาดเล็กระดับไมครอน จะมีพื้นที่ผิวต่อมวลสูงมาก ดังนั้นพฤติกรรมของแร่เหล่านี้จะถูกควบคุมโดยแรงระหว่างผิว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแรงดึงดูด หรือผลักกันกันระหว่างผงดิน ส่วนแรงเนื่องจากมวล จะมีน้อยมาก

2. ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity, CEC) โดยทั่วไปแร่ดินเหนียวควรมีประจุไฟฟ้าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากการเกิด Isomorphic substitution และจากการที่โครงสร้างขยายตัวไม่ได้เต็มที่ ทำให้ขอบของหน่วยโครงสร้างที่ไม่ได้ยึดเกาะกับโครงสร้างอื่นมีประจุไฟฟ้าลบ จึงทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบบนผิวของผงดิน และในการที่จะทำให้ประจุเป็นกลาง ก็จะมีการดึงดูด ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวก จากเกลือซึ่งละลายน้ำอยู่ในดินเหนียว ซึ่งไอออนเหล่านี้เรียกว่าไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable ions) และ ไอออนบางตัวจะถูกดึงดูดมากกว่าตัวอื่น ซึ่งไอออนเหล่านี้สามารถเรียงตามลำดับความแรงของการดึงดูดได้ดังนี้



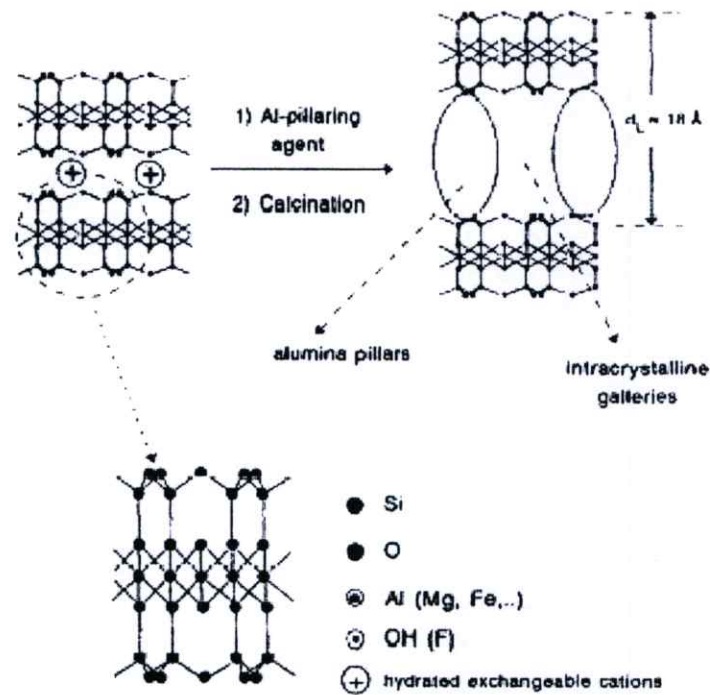
และในการวัดจำนวนของไอออนที่ถูกดูด มักจะใช้ทอมของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity, CEC) ซึ่งหมายถึงปริมาณของการแลกเปลี่ยนไอออนวัดในรูปมิลลิอิควิวาเลนต์ (milli-equivalents) ต่อน้ำหนัก 100 กรัมของดินแห้ง เคโอลิไนต์ซึ่งมีขนาดใหญ่และหนากว่าอิลไลต์ และ มอนต์มอริลโลไนต์ จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ระหว่าง 10-20 ตารางเมตร/กรัม ส่วนอิลไลต์ และ มอนต์มอริลโลไนต์ จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 80 - 100 และ 800 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามอนต์มอริลโลไนต์ จะมีพื้นที่ผิวสูงมากเมื่อเทียบกับแร่ชนิดอื่น จึงมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสูงมาก ในการที่จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างผงดินเหล่านี้ลดลงจนดินอ่อนตัวอยู่ในลักษณะของเหลว ต้องนำเดมลงไปเพื่อแยกเม็ดดินให้ห่างออกจากกันมากขึ้น ค่าพิทช์ของเหลวของมอนต์มอริลโลไนต์ จึงสูงถึง 500-600 เปรอร์เซ็นต์ ซึ่งเทียบกับเคโอลิไนต์ ซึ่งมี

พื้นที่ผิวน้อยกว่า จะมีค่าพิคคของเหลวเพียง 30-60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ชนิดของการแลกเปลี่ยนไอออน ก็มีผลต่อสมบัติของผงดินเหนียว ไอออนที่มีอันตบความแรงของการดูดุดต่ำ จะเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างผิว ทำให้ค่าพิคคของเหลวเพิ่มขึ้น

#### 2.4 พิลลาเคลย์ (Pillared clay) [1]

แร่ดินเหนียวสามารถดัดแปรโครงสร้างได้ด้วยการสอดแทรกด้วยสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์เข้าไปในระหว่างโครงสร้างของชั้นซิลิเกตเคลย์ โดยเกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับแคตไอออนที่อยู่ภายในระหว่างชั้นเคลย์ เช่น โซเดียม และ แคลเซียม เป็นต้น เมื่อให้ความร้อนแก่ไอออนที่อยู่ภายในโครงสร้าง จะทำให้ไอออนนั้นเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพิลลา (Pillar) เรียงตัวภายในชั้นของโครงสร้าง และเกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็กขึ้นอย่างถาวรเรียกว่า พิลลาเคลย์ (pillared clay) ทำให้แร่ดินเหนียวมีช่องว่างระหว่างชั้น ปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการกะตะไลซิส การดูดซับ และกระบวนการแยก ตัวอย่างของสารที่สามารถเกิดเป็นพิลลาภายในโครงสร้าง เช่น อะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรต (Aluminium-chlorohydrate) อะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน (Aluminium polyhydroxy cation) เป็นต้น แร่ดินเหนียวที่นิยมใช้ในการเตรียมพิลลาเคลย์ส่วนมากจะมีโครงสร้างเป็น 2:1 เช่นมอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากมีประจุในโครงสร้างมากเพียงพอที่จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถขยายตัวได้มาก

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอะลูมิเนียมพิลลาเคลย์ โดยการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน [ $Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ ] หรือ  $Al_{13}$  ในการสอดแทรกเข้าไปในชั้นเคลย์และพิลลาเคลย์ที่เตรียมได้นี้จะใช้เป็นตัวดูดซับสีข้อม



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดพิลลาเคลย์

## 2.5 สีย้อม (Dyes) [17]-[21]

สีย้อม คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือ สารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ใน โมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400–700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เห็นด้วยสายตาคออกมาเป็นสีต่างกันไป ทั้งนี้สามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. สีย้อมธรรมชาติ เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีนํ้าเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2. สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dye stuffs) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี สีย้อมสังเคราะห์มีหลายประเภทและมีการใช้งานไม่เหมือนกัน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการผลิต ประเภทของสีย้อมจึงมีอิทธิพลต่อการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานสีย้อมเป็นอย่างมาก ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงประเภทของสีย้อม (Dye Stuff) และประเภทของสีย้อมสังเคราะห์สามารถจำแนกได้ดังนี้

### 2.5.1 สีแอซิด (Acid dyes)

เป็นสีย้อมที่แสดงประจุลบเมื่อละลายน้ำ โดยปกติจะต้องเติมสารเคมีช่วย เช่น กรด เพื่อให้ให้น้ำย้อมเป็นกรด จึงเรียกว่าสีแอซิด สำหรับในงานวิจัยนี้สีแอซิดที่ใช้คือ อีโอซิน บี (Eosin B, EOB) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แอซิดเรด 91 (Acid red 91, AR 91) เป็นสีย้อมที่มีสีแดง มีประโยชน์มากมายทั้งในด้านการแพทย์ วิทยาศาสตร์ ยา และเครื่องสำอาง เป็นต้น ในอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้ในการย้อมสีพวก ไนลอน ไหม และขนสัตว์ มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{20}H_6N_2O_9Br_2Na_2$  โครงสร้างของอีโอซิน บี แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของอีโอซิน บี [20]

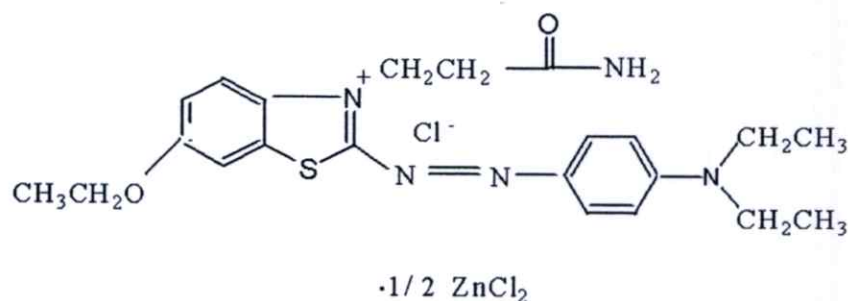
### 2.5.2 สีเบสิค (Basic dyes)

เป็นสีย้อมที่แสดงประจุบวกเมื่อละลายน้ำ ใช้สำหรับย้อมพวกไหม ฝ้าย ขนสัตว์ ใช้เป็น น้ำหมึกในปากกาลูกกลิ้ง ในงานวิจัยนี้สีเบสิคที่ใช้คือ ไทโอฟลาวิน ที (Thioflavin T, ThT) หรือ เบสิคเยลโล 1 (Basic Yellow 1, BY1) ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีสีเหลือง มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{17}H_{19}ClN_2S$  และสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของไทโอฟลาวิน ที [21]

และสีเบสิกที่ใช้ในงานวิจัยอีกชนิดหนึ่งคือ สีเบสิคบลู 66 (Basic Blue 66, BB 66) เป็นสีข้อมที่มีสีน้ำเงิน และมีไนโตรเจนไอออนอยู่ในโครงสร้าง เมื่อละลายน้ำคลอไรด์ไอออนจะเข้าไปในน้ำทำให้สีข้อมมีประจุบวก และประจุบวกนี้จะจับกับตัวดูดซับที่เป็นประจุลบ [19] โครงสร้างของเบสิคบลู 66 แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของเบสิคบลู 66

### 2.5.3 สีไครเรกต์ (Direct dyes)

โดยทั่วไปจะละลายในน้ำข้อมที่เป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย หรือเติมโซเดียมคลอไรด์ หรือโซเดียมซัลเฟต ลงไปในน้ำข้อม ใช้สำหรับข้อมใยฝ้าย กระจาวย เครื่องหนัง ขนสัตว์ ไหม และไหมล่อน

### 2.5.4 สีแวต (Vat dyes)

สีข้อมชนิดนี้สามารถข้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี มีความคงทนต่อการซักล้างและแสงแดดสูงเป็นสีข้อมที่ไม่ละลายในน้ำ แต่จะสามารถละลายในน้ำได้เมื่อถูกรีดิวซ์ในสารละลายที่เป็นด่าง โดยการทำให้ปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเมื่อทำการข้อมจึงต้องทำการรีดิวซ์สีข้อมให้อยู่ในรูปของสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ก่อน เมื่อสีข้อมถูกดูดซับเข้าไปในเส้นใยแล้ว จะทำการออกซิไดส์สีข้อมกลับไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำอย่างเดิมโดยการใช้ออกซิเจนในอากาศ หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

### 2.5.5 สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

เป็นสีข้อมที่ละลายในน้ำได้ดี สามารถข้อมได้โดยตรงกับเส้นใย สีรีแอกทีฟกับเส้นใยจะยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ส่วนมากจะใช้ข้อมใยฝ้ายและเส้นใยเซลลูโลส

### 2.5.6 สีดิสเพิร์ส (Disperse dyes)

ตัวสีไม่ละลายน้ำ แต่กระจายตัวอยู่ในน้ำเป็นละอองสีละเอียดมากใช้สำหรับข้อมไหมล่อน เซลลูโลสอะซิเตต พอลิเอสเตอร์ และเส้นใยอะคริลิก

### 2.5.7 สีซัลเฟอร์ (Sulfer dyes)

เป็นสีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ส่วนมากไม่ละลายน้ำ ต้องละลายในด่าง โซเดียมซัลไฟด์ เมื่อย้อมใยฝ้ายจะได้สีขุ่น ส่วนมากใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

## 2.6 ปัญหาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม [17],[22]-[23]

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการนำเข้าเงินตราต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง เป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามความต้องการของผู้บริโภค เนื่องจากเครื่องนุ่งห่มเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้ กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็นสีย้อม กรด ด่าง สารปรับปรุงคุณภาพต่าง ๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว เป็นต้น และสิ่งที่ขาดไม่ได้ก็คือน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมที่ต้องใช้ในปริมาณที่มาก เพื่อให้ได้ผ้าหรือเส้นด้ายที่มีสีสันทสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ตลอดจนความพอใจ ความรู้สึกของผู้บริโภค

ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเกิดขึ้นจากน้ำและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจึงมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมัน และของเสียไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆปนเปื้อนออกมา นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง มีสภาพเป็นด่าง มีกลิ่นที่แรงและมีสีที่นารังเกียจ เมื่อน้ำเสียที่มีสีถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะหรือสิ่งแวดล้อมจะทำลายความสวยงามของธรรมชาติแล้ว ยังทำให้สมดุลทางธรรมชาติเสียไปอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสีที่พบในน้ำเสียซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์จะไปบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำ ส่งผลกระทบให้พืชที่อยู่ในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนในน้ำลดลง ซึ่งมีผลให้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อยู่ในน้ำอาจตายได้ น้ำเสียก่อนที่จะปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะควรจะต้องมีกระบวนการกำจัดหรือบำบัดน้ำก่อน เพื่อลดปริมาณสี นับเป็นการป้องกันหรือแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและนับว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วย สี ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี กรด-ด่าง สารแขวนลอย ความร้อนและอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ มลสารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี (Dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) โดยส่วนมากแล้วมลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีต่างๆไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้

ด้วยวิธีการดังกล่าว ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสีข้อมนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้ว ยังลดอัตราการนำเข้าของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ จะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ ดังนั้นการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมของโรงงานจึงมีความจำเป็นในการป้องกันปัญหามลพิษที่แหล่งกำเนิดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย โดยมีการศึกษาเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด

สีที่อยู่ในน้ำทิ้งแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ยังสามารถมองเห็นได้ชัดเจนและทำความรำคาญให้ผู้ใช้น้ำทิ้ง สีที่ใสอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิดและแต่ละชนิดยากต่อการย่อยสลายโดยธรรมชาติ ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีทั้งกระบวนการทางกายภาพและเคมีซึ่งบำบัดสีได้น้อย รวมทั้งมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัด เป็นต้น

### 2.6.1 ลักษณะน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

#### 1. ความหลากหลายของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้ง

การฟอกย้อม พิมพ์สิ่งทอเป็นกระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีและสีย้อมชนิดต่างๆมากมาย สารเคมีและสีย้อมเหล่านี้บางส่วนจะดูดซึมไว้ในวัสดุสิ่งทอ แต่จะมีบางส่วนเหลือปะปนออกมากในน้ำทิ้ง สารเคมีและสีย้อมแต่ละชนิดจะมีสมบัติด้านความเป็นพิษ ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและด้านความยากง่ายในการกำจัดที่แตกต่างกันไป

#### 2. ความหลากหลายของน้ำทิ้งในด้านคุณภาพและปริมาณ

น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมจะมีความหลากหลายมาก ทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ย้อม กระบวนการ และชนิดของสีย้อมที่ใช้ ตลอดจนประเภทของเครื่องจักรที่ใช้

#### 3. การมีสีของน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมจะมีสี ทำให้เป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็น และการกำจัดสีจากน้ำทิ้งก็เป็นเรื่องที่ทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงมาก

#### 4. ปริมาณของน้ำทิ้งที่ค่อนข้างมาก

โรงงานฟอกย้อมมีปริมาณน้ำทิ้งที่ค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่น ทำให้ต้องใช้เวลาในการบำบัดน้ำทิ้งมาก ต้นทุนการจัดตั้งระบบบำบัดน้ำทิ้งจึงสูงตามไปด้วย

## 2.6.2 แนวทางแก้ไข อาจกระทำได้หลายทางคือ

1. การเลือกใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสม เนื่องจากสารเคมีและสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมมีความหลากหลายทั้งในด้านความเป็นพิษ ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความยากง่ายในการบำบัด ดังนั้นการเลือกใช้สารเคมีและสีย้อมที่มีผลต่อมลภาวะต่ำ และง่ายต่อการบำบัดจะสามารถช่วยลดปัญหามลภาวะของโรงงาน และยังเป็นการลดภาระในการบำบัดด้วย

2. การนำเทคโนโลยีที่สะอาดมาใช้ในโรงงาน เทคโนโลยีที่สะอาด หมายถึง เทคโนโลยีที่เป็นการผลิตที่ปราศจากของเสียหรือมีของเสียน้อยที่สุด แม้ว่าเทคโนโลยีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีราคาแพง และอาจต้องใช้เวลาในการปรับปรุงโรงงานเพื่อใช้เทคโนโลยีใหม่นี้ค่อนข้างนาน แต่ในระยะยาวการเลือกใช้เทคโนโลยีนี้จะเป็นทางออกที่ดีที่สุด

3. การลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้ง ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งแปรผันตามปริมาณและความสกปรกของน้ำ ดังนั้นการลดปริมาณและความสกปรกของน้ำย้อมสามารถลดภาระในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานลงได้ วิธีลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้งอาจทำได้หลายทางเช่น การใช้น้ำด้วยความประหยัด การเลือกใช้สีที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดคิดในเส้นใยสูง เป็นต้น

4. การนำเทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมีความหลากหลายมาก ทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ จึงควรที่โรงงานจะได้เลือกใช้กรรมวิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของโรงงาน เพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

## 2.7 วิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ของเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยสารเคมีที่มีความรุนแรงของพิษต่างกัน มลพิษจากการฟอกมี 99% ที่แยกออกมาได้โดยการกรอง ซึ่งใช้เทคโนโลยีแผ่นเนื้อเยื่อ (Membrane technology) แต่กระบวนการย้อมสีได้ปล่อยน้ำเสียที่เป็นสีออกมา ซึ่งเทคนิคการกรองไม่สามารถจัดการได้ หลังการบำบัดแล้วก็มีสีปนออกมาด้วย และวิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้

1. วิธีธรรมดา ที่ใช้คือ การใช้สารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ โอโซน เพื่อแก้ปัญหาเรื่องสี แต่สารเคมีเหล่านี้มีอันตรายในตัวเองและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีกายภาพเชิงเคมี (Physicochemical method) จะทำให้น้ำเสียเป็นของแข็งโดยใช้สารเคมีเช่น สารส้ม หรือ เฟอริกซัลเฟต (Ferric sulphate) ฟลอคคูเลท (Flocculate) โดยทำให้ของเสียที่เป็นของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มแยกออกจากของเหลวด้วยการตกตะกอน หรือการหมุนเหวี่ยงตะกอน (Centrifugal separation)

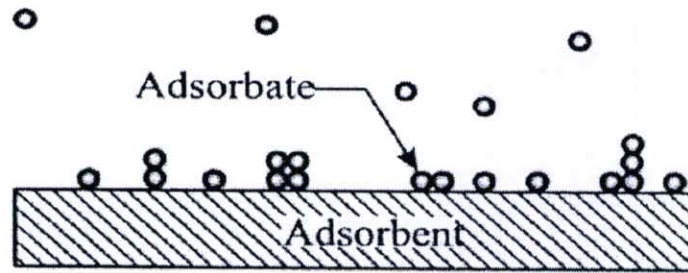
3. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังตกตะกอน เป็นถังคอนกรีตขนาดใหญ่ 2 ถัง น้ำเสียจะไหลลงมายังถังที่หนึ่งจนเต็มเต็มฟลอคคูเลทในถังที่หนึ่ง ของเสียจะตกตะกอนจากนั้นน้ำเสียจะไหลไปยังถังที่สอง น้ำสีอิสระจะไม่มีพิษสามารถปล่อยทิ้งออกไปได้ ส่วนโคลนที่ก้นถังจะเอาออกทุกๆ 2-3 อาทิตย์ ปัญหาของวิธีการนี้คือถังตกตะกอนมีราคาแพง ขนาดใหญ่ ใช้พื้นที่มาก ต้องมั่นคงและต้องระวังรักษา

4. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological method) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียโดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic organisms) วิธีนี้จะลดวัตถุของเสีย ในปัจจุบันวิธีการนี้ แบบและการติดตั้งยังมีราคาแพงไม่เหมาะกับการข้อมลขนาดเล็ก

5. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการดูดซึม ใช้ได้กับวัตถุธรรมชาติและสังเคราะห์ สิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต โดยการใช้วัตถุไม่มีชีวิตเป็นตัวดูดซับเช่น คาร์บอน แร่ดินเหนียว ซึ่งจะเป็นเครื่องกรองธรรมชาติที่ดูดซับสิ่งที่ใช้ข้อมและอื่นๆ การใช้วัตถุไม่มีชีวิตในการบำบัดน้ำเสียจะเป็นวิธีที่ง่ายและมีราคาถูก และเป็นสารเคมีที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical inert) เมื่อรวมกับธาตุอื่น จึงเป็นวิธีการที่พัฒนาเพื่อกิจการข้อมลขนาดเล็ก โดยเฉพาะ และในงานวิจัยนี้ได้ใช้แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโล ไนต์ที่คัดแปร โครงสร้างเป็นตัวดูดซับข้อม ซึ่งข้อมที่ใช้คือ สิทโฮฟลาวิน ที (Thioflavin T) เบสิคบลู 66 (Basic Blue 66) และ อีโอซิน บี (Eosin B)

## 2.8 การดูดซับ (Adsorption) [24]-[25]

การดูดซับถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ.1773 ซึ่งเป็นการดูดซับของก๊าซบนสารดูดซับ และต่อมาในปี ค.ศ.1785 Lowitz ได้ค้นพบการดูดซับของสารละลาย การดูดซับเป็นความสามารถของสารดูดซับในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะติดบนพื้นผิว การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างพื้นผิว (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของ 2 วัสดุ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็งเป็นต้น โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การยึดเกาะของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ [26]

2.8.1 ประเภทของการดูดซับ การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ [27]

2.8.1.1 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption)

เป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูงมาก ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับลักษณะนี้ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) หรือ พันธะไอออนิก (Ionic bond) และความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการดูดซับนั้นสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ คืออยู่ในช่วง  $-40$  ถึง  $-1000$  กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับทางเคมีนี้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเท่านั้น โดยการดูดซับจะเกิดเพียงชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a)

2.8.1.2 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption or Physisorption)

เป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไม่สูง ส่วนมากเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force) และในการดูดซับทางกายภาพนี้เป็นการดูดซับที่เป็นปฏิกิริยาที่เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการดูดซับจะอยู่ในช่วง  $-10$  ถึง  $-40$  กิโลจูลต่อโมล และในการเกิดการดูดซับลักษณะนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในบริเวณใดก็ได้ภายในรูพรุน ไม่ว่าจะเป็บริเวณผิวหน้าของของตัวดูดซับ หรือระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเกิดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับมากกว่า โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดได้หลายชั้น (Multilayer adsorption) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (b)



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงลักษณะการดูดซับแบบ (a) monolayer adsorption และ (b) multilayer adsorption [28]

### 2.8.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ [27]

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่ำกว่าการดูดซับทางเคมี ซึ่งเป็นผลให้การดูดซับทางกายภาพสามารถทำการ desorption ได้ ส่วนการดูดซับทางเคมีนั้นทำได้ยาก และการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับเต็มพื้นที่แล้วจึงไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีอีกได้ เป็นผลให้การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับแบบเกิดเพียงชั้นเดียว ส่วนการดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับเอง ทำให้การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

### 2.8.3 ประเภทของสารดูดซับ [24]-[25]

Kenneth และคณะได้รวบรวมสารดูดซับที่มีอำนาจดูดซับ โมเลกุลต่างๆมาติดผิวไว้หลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone char) และแอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated silica) สารธรรมชาติเหล่านี้มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ มีความสามารถในการดูดซับ โมเลกุล หรือ คอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัด

2. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารดูดซับที่ดีกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1000 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ใช้และเสื่อมแล้วสามารถนำไปรีเจนเนอเรชันและนำกลับมาใช้ได้ใหม่ แต่มีข้อเสียคือ การทำรีเจนเนอเรชันคาร์บอน ต้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและต้องมีคาร์บอนบางส่วนสูญเสียไปเนื่องจากปนกลายเป็นผงละเอียดจนใช้การไม่ได้

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) มีพื้นที่จำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งต่ำกว่าของถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อดีคือสามารถรีเจนเนอเรชันได้ง่าย และรีเจนเนอเรชันมักเป็นสารราคาถูก เช่น เกลือแกง สามารถดูดติดผิวมากกว่าถ่านกัมมันต์

### 2.8.4 กลไกของการดูดซับ [24]-[25]

Kenneth และคณะได้อธิบายการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับในระหว่างเกิดการดูดซับไว้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายภายนอก (Bulk solution) เข้าถึงผิวด้านนอกสารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวด้านนอก

ของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลของสารดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลว เข้าถึงผิวด้านหน้าสารดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal or Pore diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแพร่เข้าสู่ภายในรูเล็กๆจำนวนมากภายในเนื้อสารดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

### 2.8.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ [24]-[25]

Faust และคณะได้กล่าวถึงปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไว้ดังนี้

1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบถ้ามีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์ม เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงทำให้การแพร่ผ่านรูพรุน เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2) ขนาดของสารดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ การลดขนาดของสารดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

3) พื้นที่ผิวของสารดูดซับ พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) ยกเว้นในกรณีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของสารดูดซับ

4) ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับ โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นสารที่ยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดซับได้ดี

5) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ

6) ค่าพีเอช ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับมาก

7) อุณหภูมิ ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนช่วยทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำลดลง การเคลื่อนย้ายสารดูดซับจากสารละลายภายนอกเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P. Salerno และคณะ [1] ได้ทำการเตรียมอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์มอริลโลไนต์จากสารแขวนลอยเคลย์ที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยการนำไฮดรอกซีแคตไอออนแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นเคลย์ และฟิลลาร์เคลย์ที่เตรียมได้จะเป็นของแข็งที่มีรูพรุนขนาดไมโครเมตร เพื่อใช้เป็นคะตะลิสต์หรือเป็นตัวดูดซับ ในการเตรียมนี้จะใช้อัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อเคลย์เท่ากับ 5, 10 และ 30 มิลลิอิกวิวาเลนต์/100 กรัมของเคลย์ จากการศึกษาด้วย XRD พบว่าฟิลลาร์เคลย์ที่เตรียมได้จะมีช่องว่างระหว่างชั้นเท่ากับ 18.1 Å และฟิลลาร์เคลย์ที่ใช้อัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อเคลย์เท่ากับ 10 มิลลิอิกวิวาเลนต์/100 กรัมของเคลย์ จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดคือ 322 ตารางเมตร/กรัม เมื่อทำการดูดซับแอมโมเนียพบว่าฟิลลาร์เคลย์ที่ใช้อัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อเคลย์เท่ากับ 30 มิลลิอิกวิวาเลนต์/100 กรัมของเคลย์ จะดูดซับได้ดีที่สุด

E. Ruiz-Hitzky [29] ได้ทำการเตรียมอะลูมิเนียมฟิลลาร์เคลย์ (Al-PILCs) จากมอนต์มอริลโลไนต์และใช้สารละลายไฮดรอกซีของอะลูมิเนียมแทรกเข้าไปในชั้นเคลย์ โดยใช้อัตราส่วนของ OH/Al เท่ากับ 2.4 เมื่อทำการศึกษาด้วย XRD พบว่าจะมีช่องว่างระหว่างชั้นเท่ากับ 18.5 Å และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 297 ตารางเมตร/กรัม และเมื่อทำการดูดซับคราวน์อีเธอร์และพอลิเอทิลีนออกไซด์ พบว่า จะอยู่ในช่วง 10-20 และ 180 มิลลิโมล/100 กรัมของฟิลลาร์เคลย์ ตามลำดับ และจากการศึกษาการนำไฟฟ้าของฟิลลาร์เคลย์พบว่า ที่อุณหภูมิสูงมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตจากการดูดซับสารประกอบออกซีเอทิลีน

D. L. Guerra และคณะ [30] ได้ทำการดัดแปรเคลย์สเมกไทต์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยใช้สารละลายไฮดรอกซีของอะลูมิเนียมในการสอดแทรกเข้าไปในชั้นเคลย์ และการสอดแทรกส่วนใหญ่จะไปแทนที่แคตไอออนโดยแคตไอออนที่มีขนาดใหญ่กว่า ตามด้วยการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C และเผาเคลย์ที่อุณหภูมิ 450°C เพื่อกำจัดน้ำในระหว่างชั้นเคลย์ วัสดุที่ได้จะมีรูพรุนสูงขึ้น จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค XRD FTIR DTA-TG และหาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน จากการศึกษาด้วย XRD พบว่าจะมีช่องว่างระหว่างชั้นเคลย์ประมาณ 15.3-15.6 Å และ 18.36-18.92 Å เมื่อศึกษาด้วย FTIR จะปรากฏพีคที่ 667 cm<sup>-1</sup> ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสเมกไทต์ถูกสอดแทรกด้วยไอออนขนาดใหญ่ ส่วนผลของ DTA-TG จะให้ผลในลักษณะเดียวกันคือ พีคของการดูดความร้อนจะอยู่ในช่วง 100-200°C และ 500-600°C ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำและการจัดโซ่เลนตามลำดับ เมื่อหาพื้นที่ผิวพบว่าสูงขึ้นไปจาก 51 เป็น 122 ตารางเมตร/กรัม และปริมาณรูพรุนสูงขึ้นจาก 0.0652 เป็น 0.1023 ตารางเซนติเมตร/กรัม

H. Khalaf และคณะ [31] ได้ทำการสังเคราะห์อะลูมิเนียมฟิลลาเคลย์ และการดัดแปรอะลูมิเนียมฟิลลาเคลย์ด้วยสารลดแรงตึงผิว โดยใช้ดินเบนโทไนต์ที่มาจาก Maghnia และ Mostaghanem ทางตะวันตกของอัลจีเรีย ทำการดัดแปร โครงสร้างด้วยสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรตและสารละลายซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) สำหรับสภาวะ

ที่เหมาะสมในการเตรียมอะลูมิเนียมฟิลาและการตัดแปรรอะลูมิเนียมฟิลาด้วย CTAB คือใช้อัตราส่วนของ OH/Al เท่ากับ 1.8 อะลูมิเนียม/เบนโทไนต์ เท่ากับ 4 มิลลิโมล/กรัม และ CTAB/bentonite เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมฟิลาเคลย์จะมีช่องว่างระหว่างชั้นประมาณ 1.8 นาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวระหว่าง 250 และ 300 ตารางเมตร/กรัม สามารถทนความร้อนได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 500°C ส่วนอะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ที่ตัดแปรรด้วยสาร CTAB จะมีช่องว่างระหว่างชั้นประมาณ 2.1 นาโนเมตร แต่จะลดลงถึง 1.4 นาโนเมตรเมื่อให้ความร้อนสูงถึง 500°C และพื้นที่ผิวของอะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ที่ตัดแปรรด้วยสาร CTAB จะต่ำกว่าของอะลูมิเนียมฟิลาเคลย์

J. Q. Jiang และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาผลของชนิดของเคลย์ (มอนต์มอริลโลไนต์ K10, KSF) และสภาวะที่ใช้ในการตัดแปรรที่มีผลต่อโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับของเคลย์ ทั้งที่ยังไม่ได้ตัดแปรรและเคลย์ที่ตัดแปรรด้วยสารละลายอะลูมิเนียม/เหล็ก (Al/Fe) สารลดแรงตึงผิว เฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม (HDTMA) และสารผสมของ Al/Fe กับ HDTMA โดยใช้ XRD วิเคราะห์โครงสร้างของเคลย์และเคลย์ที่ตัดแปรรพบว่า หลังจากการตัดแปรรช่องว่างระหว่างชั้นของเคลย์ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับชนิดของเคลย์และสภาวะที่ใช้ในการตัดแปรร โดยเคลย์ชนิด KSF ที่ตัดแปรรมีช่องว่างระหว่างชั้นใหญ่กว่า K10 เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของเคลย์แต่ละชนิดจากการดูดซับสิ่งเจือปนพวกสารอินทรีย์เช่น ฟีนอล และสิ่งเจือปนพวกสารอนินทรีย์เช่น ทองแดง พบว่า เคลย์ที่ตัดแปรรด้วย Al/Fe สามารถดูดซับสิ่งเจือปนพวกสารอนินทรีย์ได้ดี ในขณะที่เคลย์ที่ตัดแปรรด้วยสารลดแรงตึงผิว HDTMA ดูดซับสิ่งเจือปนพวกสารอินทรีย์ได้ดี ส่วนเคลย์ที่ตัดแปรรด้วยสารผสมของ Al/Fe กับ HDTMA ดูดซับได้ดีทั้งสิ่งเจือปนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เมื่อพิจารณาผลของชนิดของเคลย์พบว่าความสามารถในการดูดซับของเคลย์ KSF ที่ตัดแปรรมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า K10 ที่ตัดแปรร โดยอัตราส่วนระหว่าง โลหะ (มิลลิโมล):สารลดแรงตึงผิว (มิลลิโมล):เคลย์ (กรัม) มีผลต่อความสามารถในการดูดซับซึ่งพบว่าอัตราส่วน 2:0.5-1:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

Y. S. Shin และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและสมบัติความเป็นกรดของอะลูมิเนียมฟิลาอาร์มอนต์มอริลโลไนต์ โดยทำการตัดแปรรโครงสร้างด้วยสารละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกซีพอลิแคดไอออนที่แช่ไว้ 1, 4 และ 7 วัน ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C , 600°C และ 760°C ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ XRD พบว่า มีช่องว่างระหว่างชั้นประมาณ 17 Å อะลูมิเนียมฟิลาอาร์ที่ทำการตัดแปรรโครงสร้างด้วยสารละลายที่แช่ไว้ 1 วัน เมื่อให้ความร้อนจะมีช่องว่างระหว่างชั้นลดลง ส่วนอะลูมิเนียมฟิลาอาร์ที่ทำการตัดแปรรโครงสร้างด้วยสารละลายที่แช่ไว้ 7 วันยังคงเท่าเดิม เมื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนโดยการดูดซับในโครเจนพบว่า พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นตามเวลาที่แช่สารละลายไว้ โดยรูพรุนขนาดไมโครเมตรจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพบว่ามีขนาด 3.3, 3.7 และ 4.3 Å ตามลำดับ เมื่อศึกษาความเป็นกรดโดยใช้

NH<sub>3</sub>-TPD พบพีกของการสลายตัวของแอมโมเนียที่ 230°C และ 430°C ปริมาณกรดสูงสุดที่ใช้ในการคัดแปรโครงสร้างด้วยสารละลายที่แช่ไว้ 7 วัน คือ 86 มิลลิลิตรวาเลนซ์/100 กรัมของเคลย์ ซึ่งมีค่าสูงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์และค่านี้จะลดลงเมื่อให้ความร้อน ดังนั้นเคลย์ที่คัดแปรโครงสร้างนี้สามารถใช้เป็นคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาที่ใช้อุณหภูมิต่ำ

H. Y. Zhu และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาความเป็นรูพรุนและการดูดซับน้ำของอะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์มอริลโลไนต์ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการเตรียมอะลูมิเนียมฟิลลาร์เคลย์ที่สภาวะแตกต่างกัน อะลูมิเนียมฟิลลาร์มอนต์มอริลโลไนต์ที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก จะทำให้พื้นผิวมีความชอบน้ำ และจะทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความดันต่ำ การนำไอออนบวกเข้าไปในอะลูมิเนียมฟิลลาร์ได้โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่พีเอชสูงๆ จะทำให้ความเป็นรูพรุนและพื้นผิวของอะลูมิเนียมฟิลลาร์สูงขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับน้ำจึงดียิ่งขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอะลูมิเนียมฟิลลาร์ที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับแคลเซียม ไอออนจะดูดซับน้ำได้สูงที่สุด ในขณะที่การแลกเปลี่ยนกับลิเทียม ไอออนและแมกนีเซียม ไอออนการดูดซับน้ำจะน้อย

วิมลโรจน์ โอสถานูเคราะห์ [35] ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้แร่ดินร่วมกับสารตกตะกอน โดยในการวิจัยครั้งนี้มุ่งที่จะศึกษาการกำจัดสีข้อม โดยใช้แร่ดินที่สามารถหาได้ในประเทศไทยได้แก่ แร่ดินเบนโทไนต์และเคโอลิไนต์ และการใช้แร่ดินร่วมกับสารตกตะกอนเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม ในสารละลายสีข้อมมาตรฐาน 6 ชนิดที่เตรียมขึ้นในห้องทดลอง 3 ประเภทได้แก่ สีคิสเพิร์ส สีไดเร็กซ์ และสีรีเอกทีฟ ประเภทละ 2 โทนสีคือ สีแดงและสีน้ำเงิน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆดังนี้คือ อิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อสารละลายสีข้อมมาตรฐาน สารตกตะกอนแร่ดิน และปริมาณที่เหมาะสมของสารตกตะกอน แร่ดิน และชนิดของสารตกตะกอนร่วมที่เหมาะสมกับแร่ดิน จากผลการทดลองพบว่า สารตกตะกอนที่สามารถตกตะกอนได้ดีที่สุดเมื่อปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้แก่ อะลัม ส่วนแร่ดินที่สามารถทำการดูดซับได้ดีที่สุดได้แก่ แร่ดินเบนโทไนต์ และพบว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อการดูดซับของแร่ดิน

พรรณนิศา ไสภณ และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาการบำบัดสารละลายสีข้อมชนิดเบสิกโดยใช้แกลบ เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมมีความเข้มข้นของสีสูง และบำบัดโดยวิธีทางกายภาพได้ยาก ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีราคาแพงและมีค่าใช้จ่ายสูงในการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ทดลองใช้แกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นตัวดูดซับแทนการใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าแกลบสามารถลดปริมาณสีข้อมเบสิกบลู 41 เบสิกไวโอเล็ต 7 และเบสิคเรด 14 ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ได้เท่ากับ 99, 98 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ในเวลาเพียง 5 นาที โดยใช้แกลบขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร และพีเอชของระบบเท่ากับ 6.0 และจากการศึกษาความจุสูงสุดในการดูดซับสีพบว่า แกลบสามารถดูดซับสีเบสิคบลู 41

เบสติกไวโอเลต 7 และเบสึครีด 14 ได้เท่ากับ 140, 160 และ 52 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ 186, 319 และ 110 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่า แกลบมีความจุในการดูดซับสีน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ แต่ราคาของแกลบถูกกว่ามากและหาได้ง่าย ดังนั้นการใช้แกลบเป็นตัวดูดซับจึงเป็นทางเลือกใหม่ของการบำบัดน้ำเสียจากการใช้สีเบสติกในประเทศไทย

โชติรส เอี่ยมสะอาด [37] ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ด้วยการดูดซับตัวดูดซับที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ โคลโคซาน ซึ่งได้จากกระบวนการกำจัดหมูอะซิติกของไคติน โคลโคซานที่ใช้ในการวิจัยนี้มี 3 ชนิด คือ โคลโคซานที่ได้จากการกำจัดหมูอะซิติก 79, 87 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย คือ 5, 7 และ 9 และที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50°C สีย้อมที่ละลายน้ำได้ในการทดลองนี้คือ สีแอสิด สีโคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ และสีเบสติก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเป็น 100 มิลลิกรัม/ลิตร จากการทดลองพบว่า ตัวดูดซับโคลโคซานทั้ง 3 ชนิด สามารถกำจัดสีย้อมทั้ง 4 ชนิดได้ โดยปริมาณการดูดซับสีย้อมทั้ง 4 ชนิด ขึ้นกับชนิดของสีย้อม พีเอชเริ่มต้น อุณหภูมิ เปอร์เซ็นต์ของการลดหมูอะซิติกของโคลโคซาน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีแอสิด สีโคเร็กซ์ และสีรีแอคทีฟในสภาวะเป็นกรด (พีเอชต่ำ) ดีกว่าสภาวะเป็นกลางและเบส ส่วนสีเบสติกนั้นที่ สภาวะเป็นเบสดีกว่าที่สภาวะเป็นกลางและกรด สำหรับผลของอุณหภูมิ อุณหภูมิไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีแอสิด ความสามารถในการดูดซับสีโคเร็กซ์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่สีเบสติกนั้นถูกดูดซับได้น้อยลง สีแอสิด สีโคเร็กซ์ และสีรีแอคทีฟถูกดูดซับด้วยโคลโคซานที่มี เปอร์เซ็นต์ของการลดหมูอะซิติกต่ำได้ดีกว่า (79 เปอร์เซ็นต์) ตรงข้ามกับสีเบสติกจะถูกดูดซับโดย โคลโคซานที่มีเปอร์เซ็นต์ของการลดหมูอะซิติกสูงได้ดีกว่า (95 เปอร์เซ็นต์) โคลโคซานสามารถดูดซับสีย้อมทั้ง 4 ชนิดได้ดีขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคของตัวดูดซับมีขนาดอนุภาคเล็กลง

P. Baskaralingam และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยออร์แกนอเบนโทไนด์ ซึ่งสีย้อมที่ใช้ในการดูดซับคือสีแอสิดเรด 151 (AR151) สภาวะที่ใช้ในการศึกษา คือ สารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ปริมาณตัวดูดซับ และพีเอชของสารละลายสีย้อม โดยทำการตัดแปรรูปโครงสร้างเบนโทไนด์ด้วยสารลดแรงตึงผิว 2 ชนิดคือ ซิติลไดเมทิลเบนซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (CDBA) และ ซิติลไพริดีเนียมคลอไรด์ (CP) ทำการวิเคราะห์เคลย์ที่ตัดแปรรูปโครงสร้างโดยใช้ XRD และ FTIR ผลของการทดลองพบว่า จะดูดซับได้ดีที่พีเอชเป็นกรด ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบนโทไนด์ที่ตัดแปรรูปโครงสร้างด้วย CDBA และ CP คือ 357.14 และ 416.66 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเบนโทไนด์ที่ตัดแปรรูปโครงสร้างสามารถใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีจากสีย้อมสิ่งทอได้ดี

A. Sofa Ozcan และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีแอสซิบลู 193 (AB 193) ด้วยโซเดียมเบนโทไนต์ (Na-bentonite) และเบนโทไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างด้วยโคเคคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (DTMA-bentonite) โดยทำการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherms) กลไกการดูดซับ (Adsorption kinetics) อุณหภูมิ และพีเอช พบว่าสารละลายสีที่มีพีเอชเท่ากับ 1.5 จะดูดซับได้ดี และที่อุณหภูมิ 20°C ความสามารถในการดูดซับของ DTMA-bentonite (740.5 มิลลิกรัม/กรัม) จะสูงกว่าของ Na-bentonite (67.1 มิลลิกรัม/กรัม) ข้อมูลของไอโซเทอร์มอลจะอธิบายโดยสมการ Freundlich และเมื่อหาค่าพลังงานการกระตุ้น ( $E_a$ ) พบว่า Na-bentonite มีค่าเท่ากับ 12.6 กิโลจูล/โมล และ DTMA-bentonite มีค่าเท่ากับ 22.4 กิโลจูล/โมล ค่าที่ติดลบของพลังงานอิสระ ( $\Delta G^\circ$ ) ที่อุณหภูมิ 20°C แสดงว่ามีการเกิดขึ้นเอง และค่าที่ติดลบของเอนทัลปี ( $\Delta H^\circ$ ) และเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) แสดงว่าเกิดการคายความร้อนตามธรรมชาติ ทำให้เห็นว่า Na-bentonite และ DTMA-bentonite ที่เตรียมได้มีราคาต่ำเหมาะที่จะเป็นตัวเลือกในการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดสีจากสีย้อมสิ่งทอ

L. Wang และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดซับสีย้อมคองโกเรด (CR) ด้วย MMT ที่ดัดแปร โครงสร้างด้วย octyltrimethylammonium bromide (OTAB) dodecyltrimethylammonium bromide (DTAB) cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) และ stearyltrimethylammonium bromide (STAB) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาในการดูดซับสีย้อมคือ พีเอชของสารละลายสีย้อม (4-9) อุณหภูมิการดูดซับ (30 40 และ 50 °C) ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม จากการศึกษาการดูดซับพบว่า ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมของ CTAB-MMT สูงที่สุดคือ 229 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ OTAB-MMT DTAB-MMT และ STAB-MMT คือ 31.1 83.6 และ 127 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมพบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับของ CTAB-MMT พบว่าเป็นแบบ Langmuir isotherm

Z. Boubberka และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายสี Supranol Yellow 4GL ด้วยเบนโทไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้าง 3 ชนิดคือ เบนโทไนต์ที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับโซเดียม ( $\text{BNa}^+$ ) เบนโทไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างด้วย hydroxyaluminic polycation (BP) และเบนโทไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้างด้วย alkylated polyethylene oxide surfactant (BPS) จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และตัวดูดซับที่ใช้คือ 1 กรัม/ลิตร พบว่า  $\text{BNa}^+$  สามารถกำจัดสีย้อมได้ 37% ภายในเวลา 45 นาที BP กำจัดสีย้อมได้ 60 % ภายใน 30 นาที ในขณะที่ BPS สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุดคือ 99 % ภายในเวลา 15 นาที เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของ

ตัวดูดซับพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ  $\text{BNa}^+$  มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ลดลง ส่วน BP และ BPS เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ข้อมเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงพีเอชของสารละลายที่ข้อมพบว่า การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าลดลง และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับที่ข้อมของ BP และ BPS จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของ  $\text{BNa}^+$  จะลดลง และผลการทดสอบสมดุการดูดซับที่ Supranol Yellow 4GL พบว่า BP และ BPS สอดคล้องกับสมการของ Langmuir ส่วน  $\text{BNa}^+$  สอดคล้องกับสมการของ Freundlich

## บทที่ 3

### การวิจัยและการดำเนินงาน

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite , MMT) บริษัท Thai Nippon Chemical Industry
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Labscan
3. อะลูมิเนียมไนเตรด ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Unilab scan
4. สี Basic Blue 66 เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma Aldrich (dye content 20 %)
5. สี Eosin B เกรดวิเคราะห์ บริษัท Acros Organics (dye content 25 %)
6. สี Thioflavin T เกรดวิเคราะห์ บริษัท Acros Organics (dye content 25 %)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance
2. เครื่องวัดการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectroscopy, XRFs) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS 3400
3. เครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA
4. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrometer) บริษัท Thermo electron corporation รุ่น Helios  $\alpha$
5. เครื่อง Gas Adsorption Analyzer รุ่น Autosorb-1 บริษัท Quantachrome
6. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform infrared Spectrophotometer, FTIR) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น FTIR Spectrum GX
7. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000
8. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isotemp
9. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 225
10. เครื่องควบคุมอัตราการหยดสาร บริษัท Barnant รุ่น 77120-52
11. เครื่องหมุนเหวี่ยง บริษัท Thai Polymerdic ยี่ห้อ Sanyo รุ่น Centaur 2
12. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Fisher Scientific Worldwide รุ่น ULTRASONIK
13. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท Buchi รุ่น B-169
14. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254

15. โถดูดความชื้น
16. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific
17. กล่องพลาสติก ขนาด 16 x 22 x 12 cm<sup>3</sup>
18. บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 150, 250, 600, 1,000 และ 2,000 มิลลิลิตร
19. กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
20. ขวดวัดปริมาตร
21. ครุฑิเบิลชนิดพอสแลนและอะลูมินา
22. หลอดทดลองขนาดกลาง
23. แท่งแม่เหล็กปั่นกวน
24. โกร่งและที่บิด
25. แท่งแก้วคน
26. จานเพาะเชื้อ
27. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บสาร

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอะลูมิเนียมไนเตรดให้มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร แล้วทำการผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายอะลูมิเนียมไนเตรดอย่างช้าๆ โดยใช้เครื่องปั๊มที่มีอัตราการไหล 2 มิลลิลิตร/นาที พร้อมทำการปั่นกวนตลอดเวลา

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอะลูมิเนียมไนเตรด เป็น 0.8 โมล/ลิตร

#### 3.3.2 การเตรียมสารตัวอย่าง

##### ขั้นตอนการตัดแปรโครงสร้าง MMT

##### 1. การเตรียม AI-MMT และ AI-pill ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

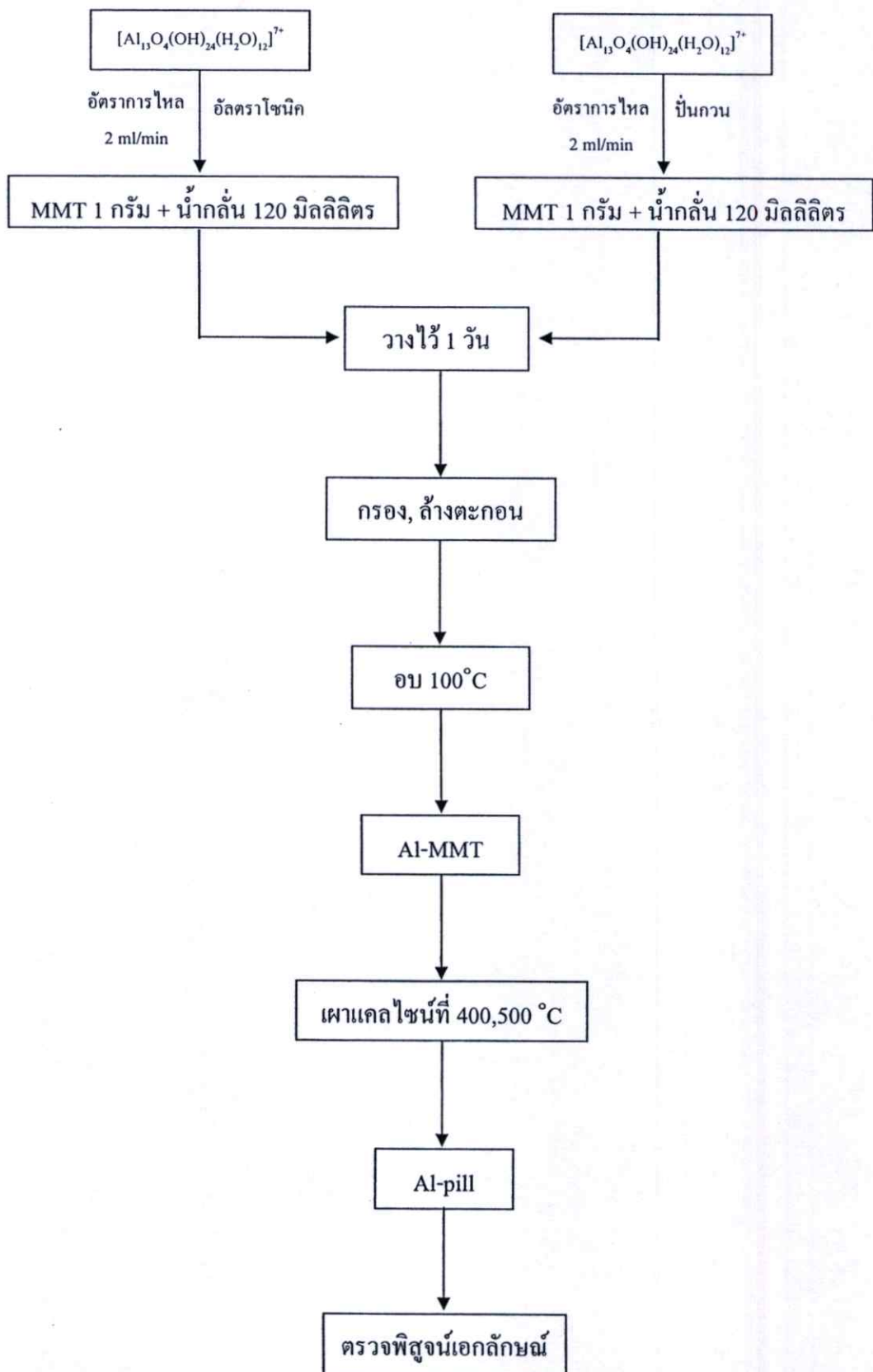
1. ผสม MMT และน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:120 โดยน้ำหนัก
2. หยดสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน ที่มีความเข้มข้น 0.4

โมล/ลิตร ลงในของผสมในข้อ 1.1 โดยใช้เครื่องปั๊มที่มีอัตราการไหล 2 มิลลิลิตร/นาที พร้อมทำการสั่นระบบของผสมด้วยเครื่องอัลตราโซนิกตลอดเวลา เมื่อหยดสารละลายหมดแล้ว วางของผสมไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน

3. กรองของผสมเพื่อแยกตะกอนโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน และล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง
4. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน หรือจนกว่าตะกอนจะแห้ง
5. นำ AI-MMT ที่เตรียมได้จากข้อ 4 มาบดให้ละเอียด
6. นำ AI-MMT ไปทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้อะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ (AI-pill)
7. ทำซ้ำในข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน เป็น 0.8 โมล/ลิตร
8. นำ AI-MMT และ AI-pill ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD XRF TGA FTIR และ Gas Adsorption Analyzer

## 2. การเตรียม AI-MMT และ AI-pill ด้วยเทคนิคปั่นกวน

1. ผสม MMT และน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:120 โดยน้ำหนัก
2. หยดสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน ที่มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร ลงในของผสมในข้อ 1 โดยใช้เครื่องปั่นที่มีอัตราการไหล 2 มิลลิลิตร/นาที พร้อมทำการปั่นกวนตลอดเวลา เมื่อหยดสารละลายหมดแล้วทำการปั่นกวนอีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวางของผสมไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน
3. กรองของผสมเพื่อแยกตะกอนโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน และล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง
4. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วันหรือจนกว่าตะกอนจะแห้ง
5. นำตะกอนที่ได้ในข้อ 4 คือ AI-MMT มาบดให้ละเอียด
6. นำ AI-MMT ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้อะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ (AI-pill)
7. ทำซ้ำในข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน เป็น 0.8 โมล/ลิตร
8. นำ AI-MMT และ AI-pill ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD XRF TGA FTIR และ Gas Adsorption Analyzer



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการหาสถานะในการเตรียม Al-pill

### 3.3.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT Al-MMT และ Al-pill

- ศึกษาวัฏภาคที่เป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

2 $\theta$ เริ่มต้น-สิ้นสุด	1°-40°
Step size	0.040°
Time/step	0.5 sec
- ศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง Gas Adsorption Analyzer ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์	350°C
ปริมาณสารตัวอย่าง	0.02-0.04 g
บรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์	ไนโตรเจน
- หาน้ำหนักที่หายไปของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง TGA ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์	50-700°C
อัตราการให้ความร้อน	10°C/min
อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน	20 ml/min
ปริมาณสารตัวอย่าง	20-30 mg
บรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์	ออกซิเจน
- ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

ปริมาณสารตัวอย่างประมาณ	0.5000 g
ปริมาณกรดบอริกประมาณ	4.5000 g
- ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ด้วยเทคนิค FTIR ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้
 

ความยาวคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์	400-4000 cm <sup>-1</sup>
----------------------------------	---------------------------

### 3.3.4 การศึกษาการดูดซับสีของวัตถุดิบ MMT และ Al-pill

ในขั้นตอนนี้จะศึกษาการดูดซับสารละลายสีของวัตถุดิบ MMT และ Al-pill ที่เตรียมได้จากสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกไซด์แคตไอออนเป็นตัวดูดซับสี ซึ่งมีปัจจัยศึกษาดังนี้

- ชนิดของสี ซึ่งสีที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับมี 3 ชนิดคือ
  - สีไทโอฟลาวิน ที (Thioflavin T, ThT) เป็นสีที่มีสีเหลือง
  - สีเบสิคบลู 66 (Basic Blue 66, BB 66) เป็นสีที่มีสีน้ำเงิน
  - สีอีโอซิน บี (Eosin B, EOB) เป็นสีที่มีสีแดง

## 2. ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับของวัสดุคิบ MMT และ Al-pill คือ 50 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีวิธีการเตรียมสารละลายดังนี้คือ ชั่งน้ำหนักของสีย้อมชนิดละ 50 100 และ 200 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น เทใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

## 3. ระยะเวลาในการดูดซับ

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสีย้อมทั้ง 3 ชนิดของวัสดุคิบ MMT และ Al-pill คือ 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

### วิธีการดูดซับสารละลายสีย้อมของวัสดุคิบ MMT และ Al-pill

1. ผสมวัสดุคิบ MMT และ Al-pill อย่างละ 0.2 กรัม ในสารละลายสีย้อมปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร

2. ทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที 1 และ 2 ชั่วโมง

3. นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที เพื่อแยกตะกอน

4. นำสารละลายสีย้อมทั้ง 3 ชนิดไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต วิชิลิตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่มีสถานะในการวิเคราะห์ ดังนี้

ความยาวคลื่นเริ่มต้น-สิ้นสุด 300-700 nm.

เพื่อหาค่าความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมก่อนและหลังการดูดซับที่ความยาวคลื่นนั้นๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

### 3.3.5 กำหนดหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม โดยใช้สูตรดังนี้

$$\% \text{ adsorption} = \left( \frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) * 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (mg/l)

$C_t$  คือ ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม ณ เวลาที่ทำการดูดซับ (mg/l)

### 3.3.6 กำหนดหาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม

เมื่อทราบถึงระยะเวลาที่สมดุลที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ โดยใช้สูตรดังนี้

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{W} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

- เมื่อ  $q_t$  คือ ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม (mg/g)  
 $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (mg/l)  
 $C_t$  คือ ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อมหลังการดูดซับ ณ เวลาที่ทำการดูดซับ (mg/l)  
 $v$  คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อมที่ใช้ในการดูดซับ (l)  
และ  $W$  คือ น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร

##### 4.1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

เมื่อนำวัตถุดิบตั้งต้น MMT MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารละลาย  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  (Al-MMT) ที่เตรียมได้ที่สภาวะต่างๆ และ Al-MMT ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ได้เป็นฟิลลาเคลย์ (Al-pill) ไปศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค XRF ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ

สารตัวอย่าง	ธาตุองค์ประกอบ				
	Al (wt%)	Si (wt%)	Na (wt%)	อื่นๆ (wt%)	อัตราส่วนโดยโมล ของ Al/Si
MMT	5.9	30.4	5.1	58.5	0.2
Al-MMT-st 0.4	13.9	29.4	2.6	54.1	0.5
Al-MMT-so 0.4	16.5	25.0	1.9	56.6	0.7
Al-MMT-st 0.8	13.7	28.7	2.5	54.4	0.5
Al-MMT-so 0.8	16.3	25.9	1.8	56.8	0.6
Al-pill-st 0.4-400	13.9	29.2	2.5	54.5	0.5
Al-pill-so 0.4-400	16.5	24.9	1.8	56.9	0.7
Al-pill-st 0.8-400	13.7	28.5	2.7	54.9	0.5
Al-pill-so 0.8-400	16.3	25.7	2.1	55.7	0.6
Al-pill-st 0.4-500	13.9	29.1	2.6	55.2	0.5
Al-pill-so 0.4-500	16.5	24.8	2.2	55.8	0.7
Al-pill-st 0.8-500	13.7	28.6	2.6	55.1	0.5
Al-pill-so 0.8-500	16.3	25.8	2.2	55.7	0.6

จากตารางที่ 4.1 พบว่า AI-MMT ที่ได้จากการคัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วยสารละลาย  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิกและเทคนิคปั่นกววน มีปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมและอัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si สูงกว่าสารตั้งต้น MMT ในขณะเดียวกันปริมาณ Na ใน AI-MMT ที่สังเคราะห์ได้ มีค่าต่ำกว่าในวัตถุดิบ MMT จากผลดังกล่าวสันนิษฐานว่ามีอะลูมิเนียมจากสารละลายแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของวัตถุดิบ MMT โดยการแลกเปลี่ยนกับ  $Na^+$  ที่อยู่ระหว่างชั้นของวัตถุดิบ MMT

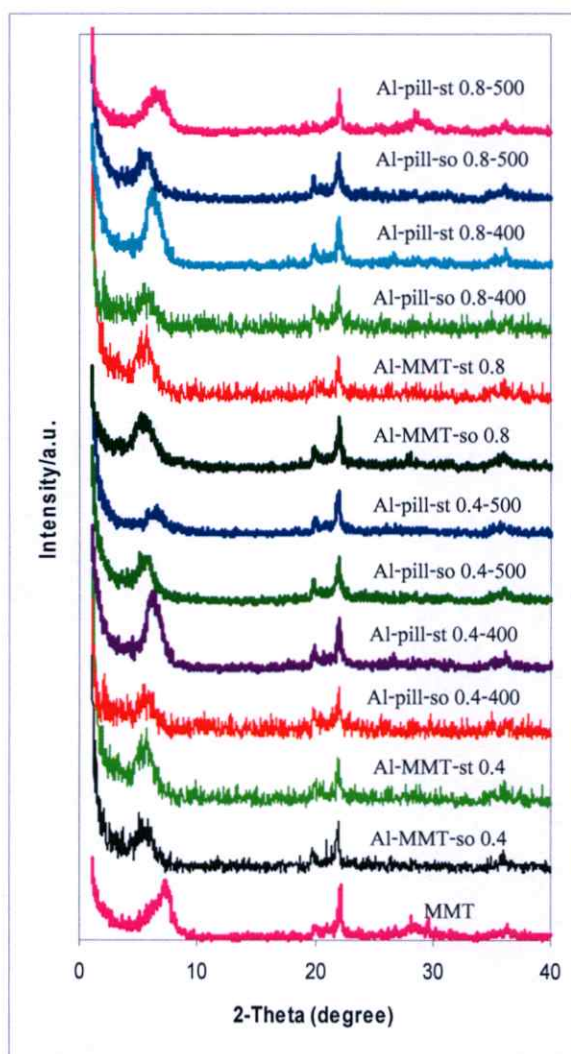
เมื่อพิจารณา AI-MMT ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคแตกต่างกันพบว่า AI-MMT ที่เตรียมโดยเทคนิคอัลตราโซนิก (AI-MMT-so) มีปริมาณอะลูมิเนียมสูงกว่า AI-MMT ที่เตรียมโดยเทคนิคปั่นกววน (AI-MMT-st) จากผลดังกล่าวแสดงว่า เทคนิคอัลตราโซนิกสามารถทำให้อะลูมิเนียมแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของวัตถุดิบ MMT ได้มากกว่าเทคนิคปั่นกววน เป็นเพราะในการเตรียมโดยเทคนิคอัลตราโซนิกเป็นการใช้คลื่นความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่น ทำให้อนุภาคของ MMT ที่จับกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็ก และกระจายตัวได้ดีในสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน จึงเพิ่มโอกาสให้อะลูมิเนียมแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของ MMT ได้มากขึ้น ส่วน AI-MMT ที่เตรียมโดยเทคนิคปั่นกววนซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยแรงเฉือนของการหมุนของแท่งแม่เหล็ก แต่เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นไม่สูงนัก ทำให้ MMT มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นการเคลื่อนที่และการแทรกตัวของ  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  เข้าไปในชั้นของวัตถุดิบ MMT ได้ไม่ดี จึงมีปริมาณของอะลูมิเนียมน้อยกว่าของ AI-MMT ที่เตรียมโดยเทคนิคอัลตราโซนิก

เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย  $[Al_3O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  โดยเลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 0.4 และ 0.8 โมล/ลิตร พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 0.4 โมล/ลิตร ในการเตรียม AI-MMT-so และ AI-MMT-st ซึ่ง AI-MMT ที่ได้จะมีอัตราส่วน โดยโมลของ Al/Si เท่ากับ 0.7 และ 0.5 ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 0.8 โมล/ลิตร พบว่า AI-MMT-so และ AI-MMT-st มีอัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si เท่ากับ 0.6 และ 0.5 ตามลำดับ

เมื่อศึกษาผลของการเผาแคลไซน์ โดยนำ AI-MMT ที่สังเคราะห์ได้ไปเผาแคลไซน์ที่ 400 และ 500 °C ก็จะได้พิลลาเคลย์ (AI-pill) หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบใน AI-pill พบว่า อัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si ทั้งก่อนและหลังการเผาแคลไซน์มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเผาแคลไซน์จาก 400 เป็น 500 °C ค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si ก็ยังมีค่าคงเดิม เช่น เมื่อพิจารณา AI-MMT-so 0.4 เทียบกับ AI-pill-so 0.4-400 และ AI-pill-so 0.4-500 ซึ่งจะมีค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si เท่ากับ 0.7 จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า อะลูมิเนียมที่แทรกอยู่ในชั้นของ MMT มีความคงทนต่อความร้อน จึงทำให้ปริมาณของอะลูมิเนียมที่มีอยู่ใน AI-pill ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการเผาแคลไซน์

#### 4.1.2 เทคนิค XRD

เมื่อนำวัตถุดิบ MMT และ Al-MMT ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ โดยการใช้เทคนิคอัลตราโซนิก และเทคนิคปั่นกวน ทั้งก่อนและหลังการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยทำการวัดที่มุม 2 $\theta$  ตั้งแต่ 1° ถึง 40° ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 สามารถสรุปค่า  $2\theta$  และ  $d_{001}$  ของ MMT Al-MMT และ Al-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ ได้ดังในตาราง ที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า  $2\theta$  และ  $d_{001}$  ของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ

สารตัวอย่าง	$2\theta_{001}$	$d_{001}(\text{\AA})$
MMT	$7.24^\circ$	12.21
Al-MMT-st 0.4	$5.59^\circ$	15.81
Al-MMT-so 0.4	$5.20^\circ$	16.97
Al-MMT-st 0.8	$5.59^\circ$	15.81
Al-MMT-so 0.8	$5.27^\circ$	16.74
Al-pill-st 0.4-400	$6.20^\circ$	14.25
Al-pill-so 0.4-400	$5.42^\circ$	16.25
Al-pill-st 0.8-400	$6.20^\circ$	14.25
Al-pill-so 0.8-400	$5.49^\circ$	16.08
Al-pill-st 0.4-500	$6.48^\circ$	13.62
Al-pill-so 0.4-500	$5.71^\circ$	15.48
Al-pill-st 0.8-500	$6.34^\circ$	13.92
Al-pill-so 0.8-500	$5.49^\circ$	15.48

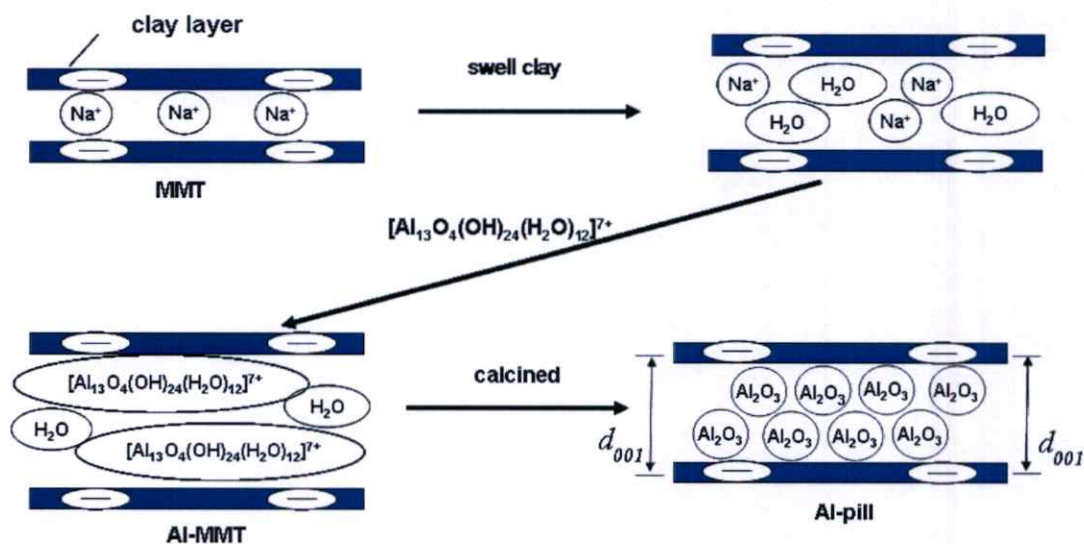
จากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่าวัตถุดิบ MMT มีค่า  $2\theta$  ของระนาบ 001 เท่ากับ  $7.24^\circ$  สามารถนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ( $d_{001}$ ) ได้จากสมการ  $n\lambda = 2d \sin\theta$  (เมื่อ  $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ ) พบว่ามีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ  $12.21 \text{ \AA}$  และเมื่อทำการตัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบ MMT ด้วยสารละลาย  $[\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  ซึ่งเตรียมโดยการใช้เทคนิคอัลตราโซนิกและเทคนิคปั่นกวน พบว่าพิก  $d_{001}$  ของ Al-MMT ที่เตรียมได้ทั้งสองวิธี มีค่า  $2\theta$  ต่ำลง ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างระนาบ 001 มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลของอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออนแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างระนาบ 001 ของวัตถุดิบ MMT

เมื่อพิจารณาผลของเทคนิคการเตรียม Al-MMT ที่แตกต่างกันพบว่า Al-MMT ที่เตรียมโดยเทคนิคอัลตราโซนิกมีระยะห่างระหว่างระนาบสูงกว่า Al-MMT ที่เตรียมโดยเทคนิคปั่นกวน ตัวอย่างเช่น Al-MMT-so ที่เตรียมด้วยสารละลาย  $[\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  0.4 โมล/ลิตร ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเดียวกันมีค่า  $d_{001}$  เท่ากับ  $16.97 \text{ \AA}$  ในขณะที่ Al-MMT-st มีค่า  $d_{001}$  เท่ากับ  $15.81 \text{ \AA}$  ทั้งนี้เนื่องจากอัลตราโซนิกทำให้วัตถุดิบ MMT เกิดการกระจายตัวได้มากขึ้น และสารละลาย  $[\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  มีการเคลื่อนที่จากแรงสั่นของอัลตราโซนิกมากกว่าเทคนิคปั่นกวน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ทำให้อะลูมิเนียมแทรกเข้าไปในช่องว่างของ MMT ได้ดีกว่าเทคนิคปั่นกวน

เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  โดยใช้เทคนิคเดียวกันพบว่า ความเข้มข้นของสารตั้งต้นไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อ Al-MMT ที่เตรียม ดังนั้นค่า  $d_{001}$  ของ Al-MMT จึงมีค่าใกล้เคียงกัน เช่น เมื่อใช้เทคนิคอัลตราโซนิคจะมีค่า  $d_{001}$  เท่ากับ 16.74 Å และเทคนิคปั่นกวนมีค่า  $d_{001}$  เท่ากับ 15.81 Å

จากการทดลองจะพบว่าเทคนิคการเตรียมมีผลต่อการเตรียม Al-MMT มากกว่าความเข้มข้นของสารละลาย  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบ MMT ดังนั้นจึงใช้ความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร ไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

เมื่อนำ Al-MMT ที่เตรียมได้ที่สภาวะต่างๆ ไปทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C พบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ Al-pill ที่ได้ภายหลังการเผาแคลไซน์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเผาแคลไซน์จะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลจากสารละลาย  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  ที่แทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของวัตถุดิบ MMT เกิดการสลายตัว อีกทั้งเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกไซด์ไอออนเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่แทรกอยู่ระหว่างระนาบ 001 ของ MMT จึงทำให้ค่า  $2\theta$  เพิ่มขึ้น แสดงถึงระยะห่างระหว่างระนาบลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ลดต่ำกว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C ทั้งนี้เพราะการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C จะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลจากสารละลาย  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  เกิดการสลายตัวได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 400°C ดังนั้นระยะห่างระหว่างระนาบจึงต่ำกว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงภายในระนาบ 001 ของวัตถุดิบ MMT ระหว่างการเตรียม Al-pill

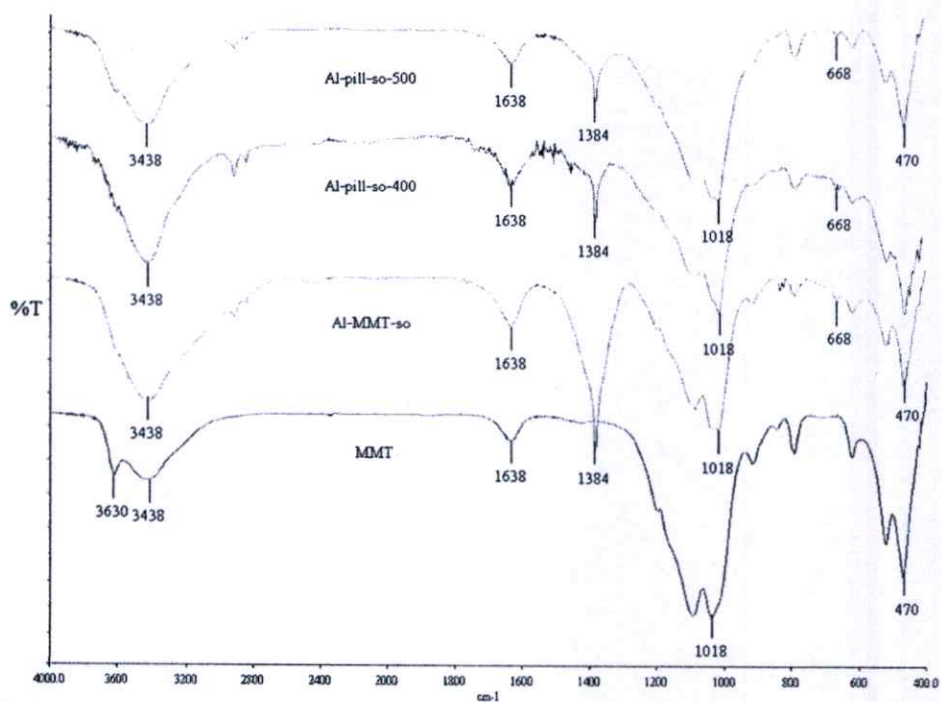
จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระนาบ 001 ในระหว่างการสังเคราะห์ Al-pill โดยในขั้นแรกเมื่อนำวัตถุดิบ MMT ไปแช่ในน้ำ วัตถุดิบ MMT เกิดการบวมตัว เนื่องจากมีโมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้น ทำให้มีระยะห่างระหว่างระนาบสูงขึ้นจากเดิมเล็กน้อย และเมื่อเติมสารละลาย  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  โมเลกุลของ  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  แทรกเข้าไปในชั้นของวัตถุดิบ MMT และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่าง  $Na^+$  และ  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  ทำให้ชั้นของวัตถุดิบ MMT กว้างขึ้น แต่เมื่อนำ Al-MMT ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลสลายตัวไป จึงทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบลดลง

#### 4.1.3 การตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ ด้วย FTIR

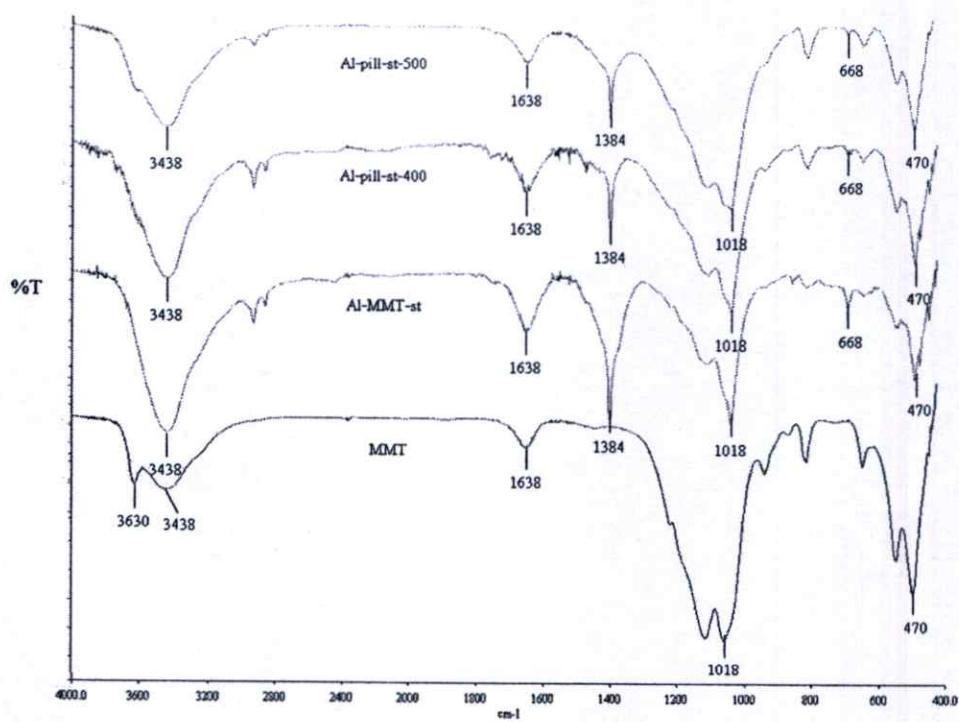
จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์หาหมู่ฟังก์ชันของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่ง Al-MMT ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคจะแสดงในรูปที่ 4.3 และ Al-MMT ที่เตรียมด้วยเทคนิคปั่นกวนแสดงในรูปที่ 4.4 (ภาคผนวก ก) และได้สรุปฟังก์ชันสำคัญดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลจากเทคนิค FTIR ของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

สารตัวอย่าง	$\nu_{max}$ (cm <sup>-1</sup> )						
	O-H, s	O-H, s	H-O-H, b	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , s	Si-O, s	Al-O-Al, b	Si-O-Si, b
MMT	3630	-	1638	-	1090,1018	-	470
Al-MMT-st 0.4	-	3438	1638	1384	1090,1018	668	470
Al-MMT-so 0.4	-	3438	1638	1384	1090,1018	668	470
Al-pill-st 0.4-400	-	3438	1638	1384	1090,1018	668	470
Al-pill-so 0.4-400	-	3438	1638	1384	1090,1018	668	470
Al-pill-st 0.4-500	-	3438	1638	1384	1090,1018	668	470
Al-pill-so 0.4-500	-	3438	1638	1384	1090,1018	668	470



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุคิปี MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิค อัลตราโซนิก



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุคิปี MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคปั่นกวน

จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก และเทคนิคปั่นกวนตามลำดับ ซึ่งจากสเปกตรัมของวัตถุดิบ MMT จะพบสัญญาณหลักของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่น  $3630\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของ O-H stretching ของน้ำที่อยู่ระหว่างชั้นของวัตถุดิบ MMT สัญญาณที่เลขคลื่น  $1638\text{ cm}^{-1}$  เป็นของ H-O-H bending สัญญาณที่เลขคลื่น  $1090, 1018\text{ cm}^{-1}$  เป็นของ Si-O stretching และสัญญาณที่เลขคลื่น  $470\text{ cm}^{-1}$  เป็นของ Si-O-Si bending

เมื่อทำการตัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบ MMT ด้วยสารละลาย  $[\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  พบว่าทั้ง Al-MMT-so และ Al-MMT-st พบพีกสัญญาณหลักที่เลขคลื่น  $3438\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีค่าความเข้มสูงกว่าที่พบในวัตถุดิบ MMT เป็นพีกของ O-H stretching ของ  $\text{OH}^-$  ที่มีอยู่ในสารละลาย  $[\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  สัญญาณที่เลขคลื่น  $1638\text{ cm}^{-1}$  เป็นของ H-O-H bending ความเข้มของพีกจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ Si-O-Si เนื่องจากสารละลาย  $[\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  มีหมู่ไฮดรอกซิลและน้ำ สัญญาณที่เลขคลื่น  $1384\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ  $\text{NO}_3^-$  stretching ที่มีอยู่ในสารตั้งต้น  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  ที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างของวัตถุดิบ MMT จึงทำให้พีกชัดเจนขึ้นกว่าเดิม และที่เลขคลื่น  $668\text{ cm}^{-1}$  เป็น Al-O-Al bending

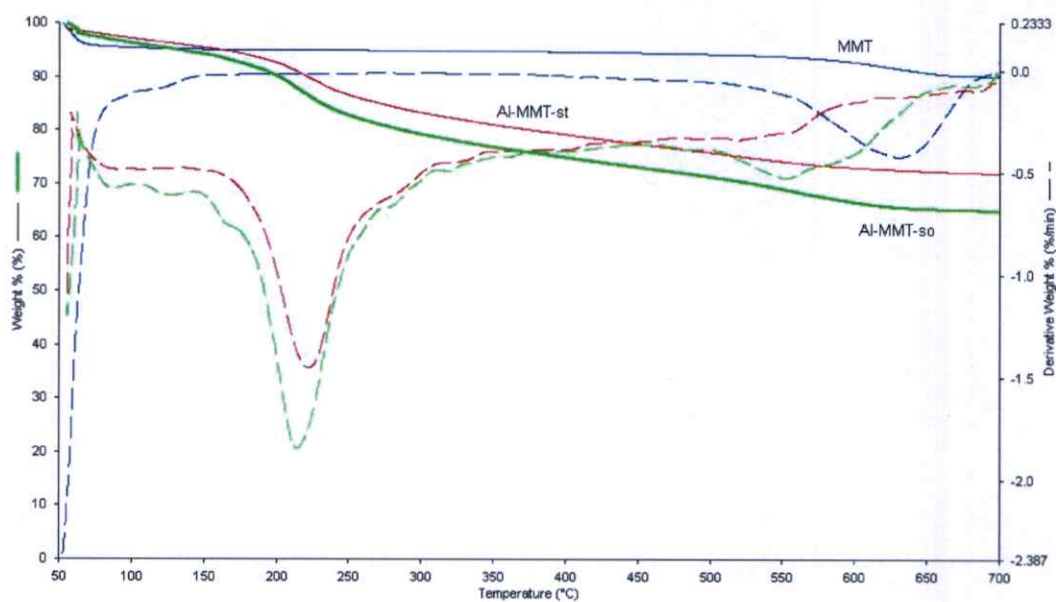
เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $400$  และ  $500^\circ\text{C}$  พบว่าทั้ง Al-pill-so และ Al-pill-st สัญญาณหลักยังคงเหมือนเดิม และที่เลขคลื่น  $3438$  และ  $1638\text{ cm}^{-1}$  หมู่  $\text{OH}^-$  จะลดลง สืบเนื่องได้จากความสูงของพีกที่หายไปเพราะมีการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลและน้ำ

#### 4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย TGA

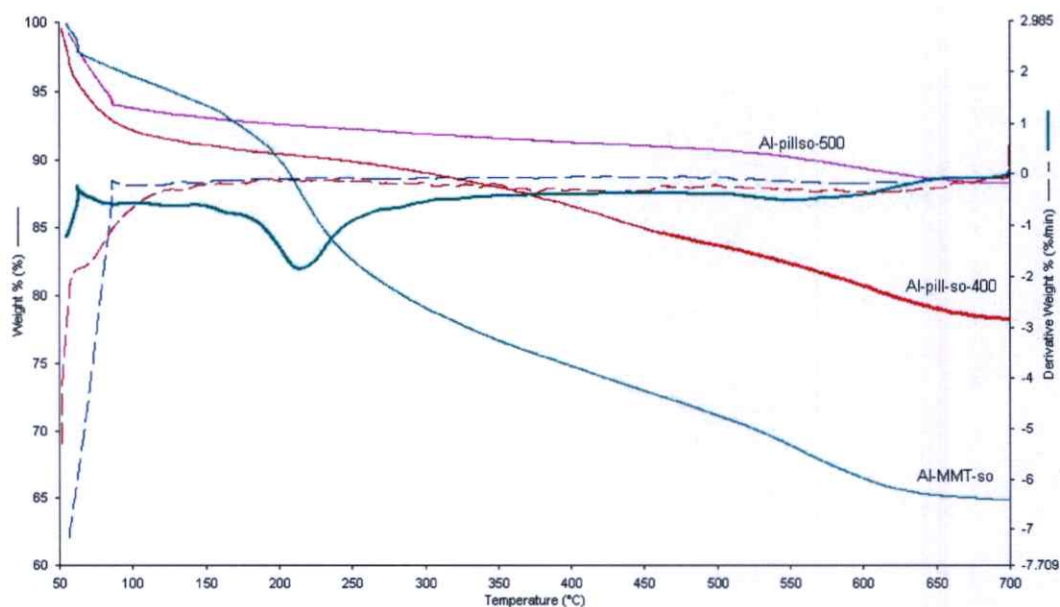
เมื่อนำวัตถุดิบ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกและเทคนิคปั่นกวนไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อหาน้ำหนักของสารที่สลายตัว ได้ผลดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.4 ผลจากเทคนิค TGA ของวัสดุคิป์ MMT Al-MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

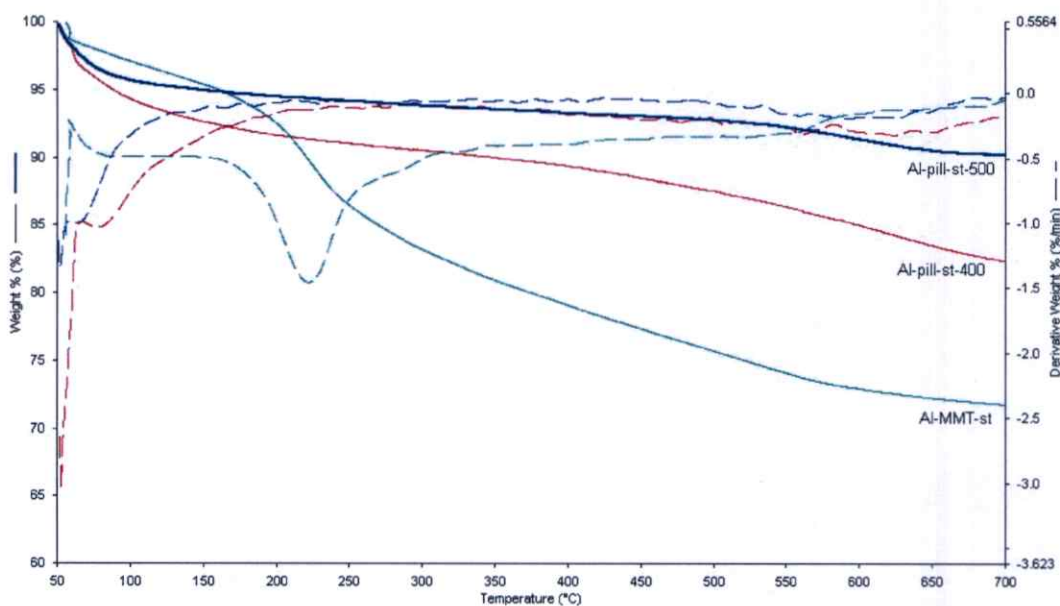
สารตัวอย่าง	% Weight loss จาก TGA (บรรยากาศ O <sub>2</sub> )
MMT	9.71
Al-MMT-st 0.4	28.15
Al-MMT-so 0.4	35.07
Al-pill-st 0.4-400	17.32
Al-pill-so 0.4-400	21.33
Al-pill-st 0.4-500	9.98
Al-pill-so 0.4-500	11.24



รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA/DTG ของวัสดุคิป์ MMT Al-MMT-st และ Al-MMT-so ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 4.6 เทอร์โมแกรม TGA/DTG ของ Al-MMT-so และ Al-pill-so ที่เผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 4.7 เทอร์โมแกรม TGA/DTG ของ Al-MMT-st และ Al-pill-st ที่เผาแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 พบว่าวัสดุคิบ MMT เริ่มมีการสลายตัวของสารที่อุณหภูมิ 100 °C และมีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวน้อยกว่า Al-MMT-so 0.4 และ Al-MMT-st 0.4

Al-MMT-so 0.4 มีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวสูงกว่า Al-MMT-st 0.4 และ Al-MMT ที่เตรียมได้ทั้ง 2 วิธี มีการสลายตัว 2 ช่วงคือ ช่วงอุณหภูมิ 150-350 °C และ 500-600 °C ซึ่งเป็นการสลายตัวของ

หมู่ไฮดรอกซิลและน้ำจาก  $[Al_3O_4(OH)_2(H_2O)_{12}]^{7+}$  ที่แทรกตัวอยู่ใน MMT ซึ่งการสลายตัวดังกล่าว ทำให้  $[Al_3O_4(OH)_2(H_2O)_{12}]^{7+}$  เปลี่ยนวิฤภาคเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ในลักษณะที่มีโครงสร้างเป็นพิลลา Al-MMT-so 0.4 มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปสูงกว่า Al-MMT-st 0.4 แสดงว่ามี  $[Al_3O_4(OH)_2(H_2O)_{12}]^{7+}$  แทรกเข้าไปใน MMT ได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD และ XRF

Al-pill-so 0.4 ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C จะเห็นการสลายตัวอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิประมาณ 250-600 °C น่าจะสันนิษฐานได้ว่าเป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่เหลือในโครงสร้างของ Al-pill โดย Al-pill-so 0.4-400 มีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวมากกว่า Al-pill-so 0.4-500 °C เพราะ  $[Al_3O_4(OH)_2(H_2O)_{12}]^{7+}$  ได้เปลี่ยนเป็นพิลลาแล้ว

#### 4.1.5 ศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเทคนิค Gas Adsorption Analysis

เมื่อนำวัตถุดิบ MMT และ Al-pill ที่เตรียมโดยใช้สารละลาย  $[Al_3O_4(OH)_2(H_2O)_{12}]^{7+}$  0.4 โมล/ลิตร ไปทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเทคนิค Gas Adsorption Analysis ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาคผนวก ก

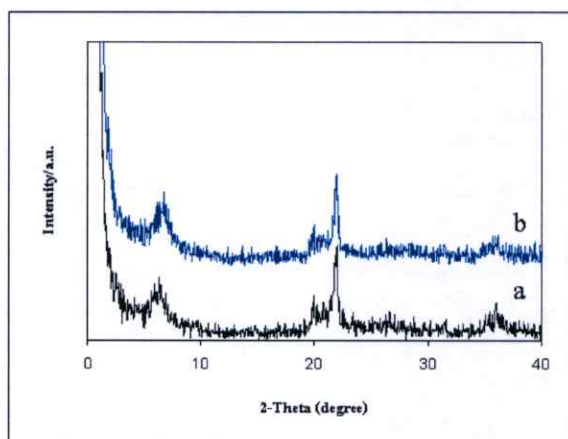
ตารางที่ 4.5 ค่าพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัตถุดิบ MMT และ Al-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

สารตัวอย่าง	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Average pore diameter (Å)
MMT	35.76	37.27
Al-pill-st 0.4-400	55.04	41.54
Al-pill-so 0.4-400	92.24	74.48
Al-pill-st 0.4-500	67.52	84.90
Al-pill-so 0.4-500	107.17	75.63

จากการวิเคราะห์พบว่า Al-pill ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C แล้ว จะมีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนสูงกว่าวัตถุดิบ MMT เนื่องจากการดัดแปรโครงสร้างของ MMT จะมีอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแทรกเข้าไปในระนาบ 001 ของ MMT เมื่อทำการเผาแคลไซน์ อะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีเปลี่ยนไปเป็นพิลลาออกไซด์แทรกอยู่ในระหว่างระนาบ 001 ของ MMT จึงทำให้พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น และ Al-pill ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C มีพื้นที่ผิวมากกว่า Al-pill ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเพราะที่อุณหภูมิ 500 °C มีหมู่ไฮดรอกซิลสลายตัวไปมากกว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 °C จึงทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น

#### 4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Al-pill ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อมด้วยเทคนิค XRD

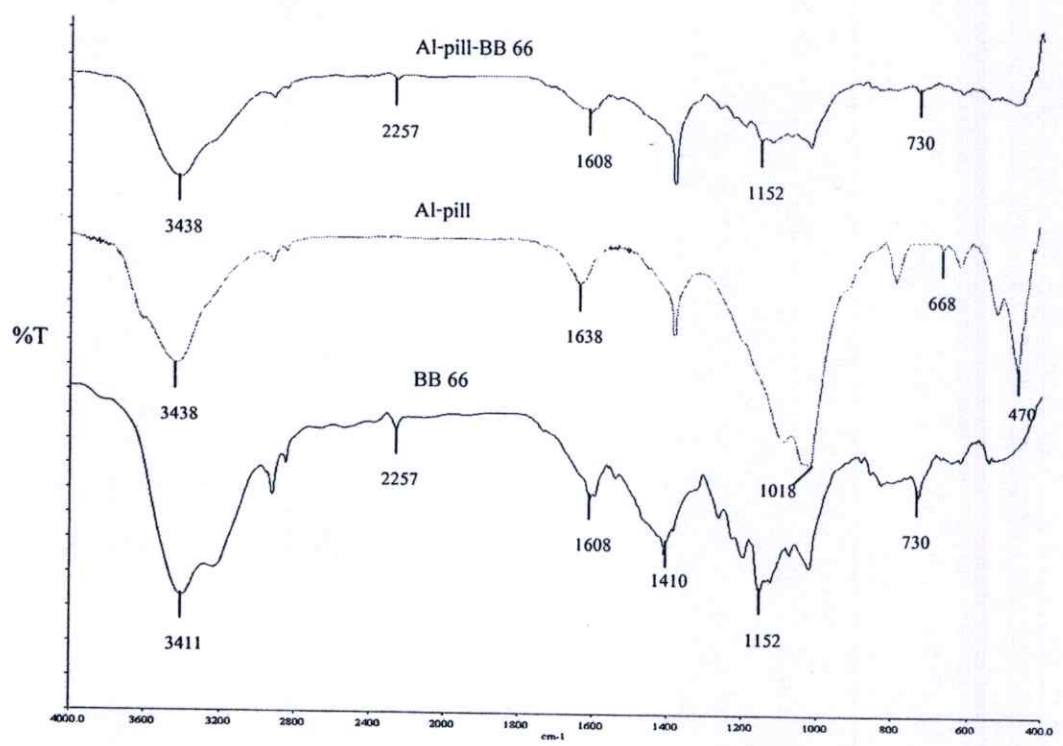
เมื่อนำ Al-pill ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ThT และ EOB ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยทำการวัดที่มุม  $2\theta$  ตั้งแต่  $1^\circ$  ถึง  $40^\circ$  พบว่า ระยะห่างระหว่างระนาบของ Al-pill ที่ผ่านการดูดซับสีย้อม ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับ Al-pill ก่อนทำการดูดซับสารละลายสีย้อม ทั้งนี้เป็นเพราะ สีย้อมถูกดูดซับอยู่บนโครงสร้างของฟิลลาออกไซด์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เสถียร เนื่องจากผ่านการเผาแคลไซน์แล้ว ดังนั้นการดูดซับสีย้อมจึงไม่ทำให้โครงสร้างของ Al-pill เกิดการขยายตัว ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.8



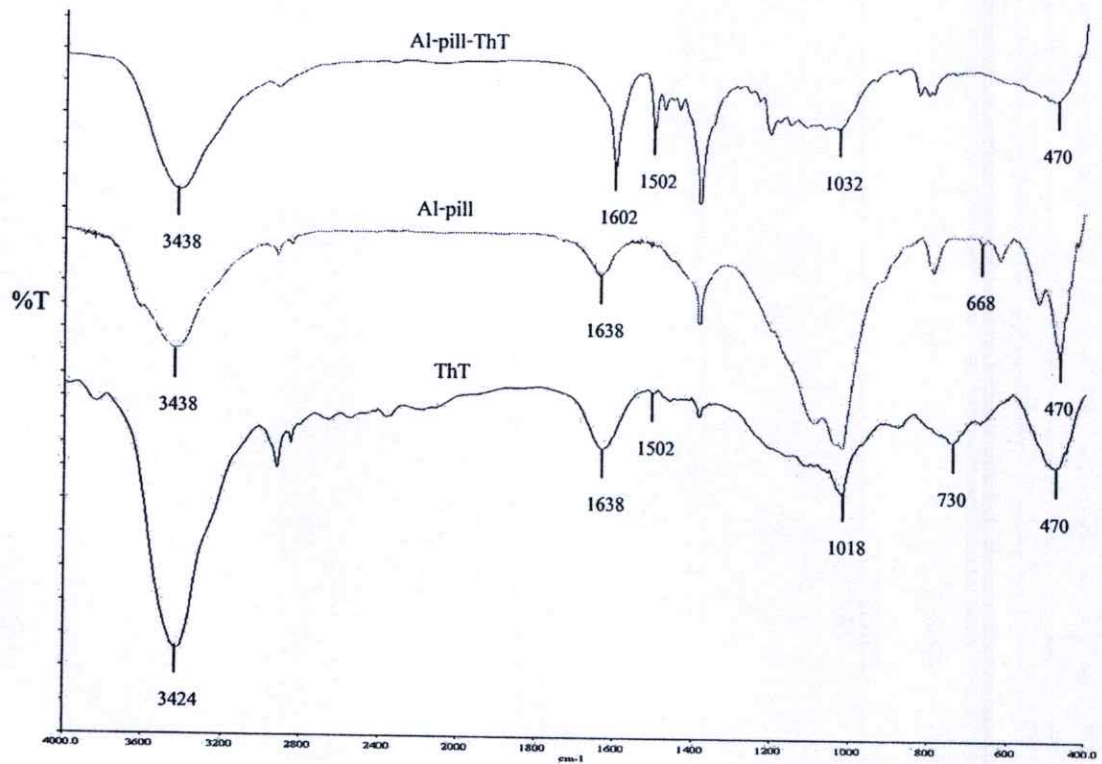
รูปที่ 4.8 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (a) Al-pill-so 0.4-400 ก่อนดูดซับสีย้อม BB 66 และ (b) Al-pill-so 0.4-400 หลังการดูดซับสีย้อม BB 66

#### 4.3 การตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของ Al-pill ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อม ด้วยเทคนิค FTIR

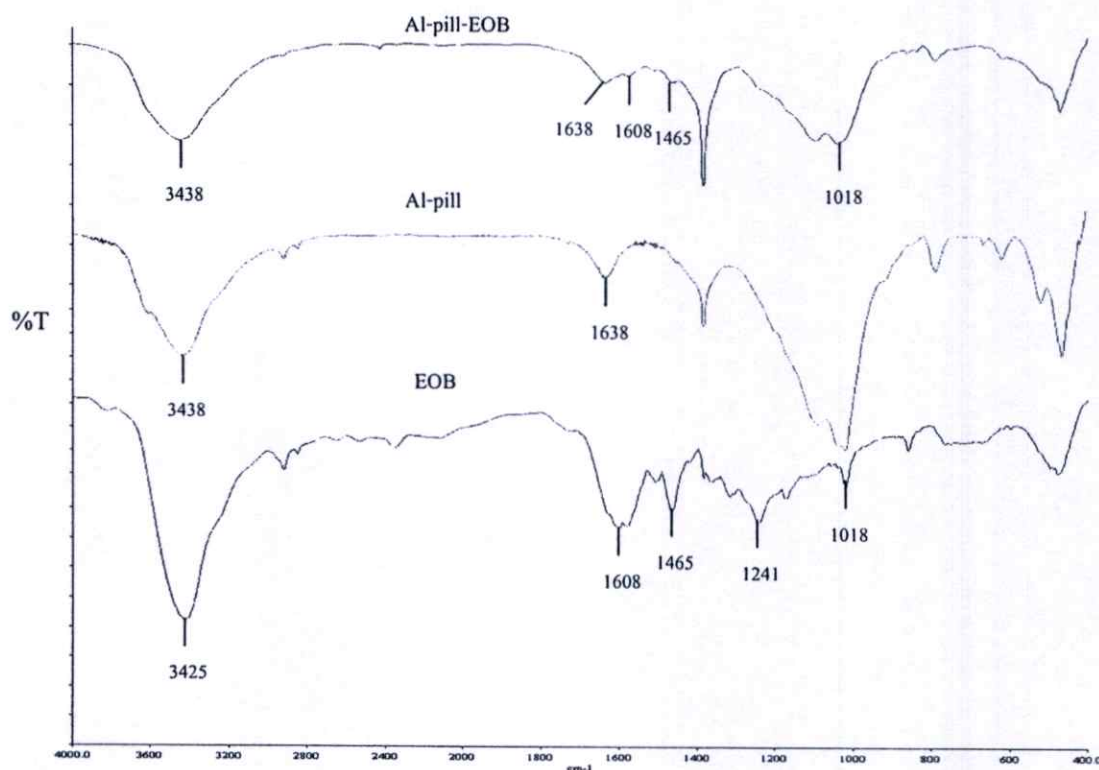
จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์หาหมู่ฟังก์ชันของ Al-pill ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ThT และสีย้อม EOB ด้วยเทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.11 (ภาคผนวก ง)



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อม BB 66 และ Al-pill ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม



รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อม ThT และ Al-pill ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม



รูปที่ 4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อม EOB และ Al-pill ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม

จากรูปที่ 4.9-4.11 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของสีย้อม BB 66 ThT EOB และ Al-pill ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม ซึ่ง Al-pill พบสัญญาณหลักของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่น  $3438\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ O-H stretching และที่เลขคลื่น  $668\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ Al-O-Al bending

สีย้อม BB 66 จะพบสัญญาณหลักของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่น  $3411\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณของ N-H stretching ของ  $-\text{NH}_2$  ที่เลขคลื่น  $1608\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C=O stretching ที่เลขคลื่น  $1152\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-N stretching และที่เลขคลื่น  $730\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C=C-H bending ของวงอะโรมาติก

สีย้อม ThT พบสัญญาณหลักของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่น  $3424\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ N-H stretching ที่เลขคลื่น  $1638\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C=C stretching และที่เลขคลื่น  $730\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C=C-H bending

สีย้อม EOB พบสัญญาณหลักของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่น  $3425\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ O-H stretching ที่เลขคลื่น  $1608\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C=O stretching ที่เลขคลื่น  $1465\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-O stretching ของ  $\text{COO}^-$  และที่เลขคลื่น  $1241\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ O=C=O-bending ของ  $\text{COO}^-$

Al-pill ที่ดูดซับสารละลายสีย้อมแล้วจะประกอบด้วยสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันของ Al-pill และสีย้อมร่วมกัน แสดงว่า Al-pill สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมได้จริง ตัวอย่างเช่น Al-pill ที่ดูดซับสีย้อม BB 66 พบสัญญาณหลักของหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่น  $3438\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ O-H stretching ที่เลขคลื่น  $1608\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C=O stretching และที่เลขคลื่น  $1152\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-N stretching ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลจากเทคนิค FTIR ของ Al-pill สีย้อม BB 66 ThT และสีย้อม EOB

สารตัวอย่าง	$\nu_{\max} (\text{cm}^{-1})$										
	O-H,s	N-H,s	H-O-H,b	C=C,s	C=O,s	C-O,s	$\text{NO}_2, \text{s}$	O=C=O,b	C-N,s	Si-O, s	Al-O-Al, b
Al-pill	3438	-	1638	-	-	-	1384	-	-	1090,1018	668
สีย้อม BB 66	-	3411	-	-	1608	-	-	-	1152	1018	-
สีย้อม ThT	-	3424	-	1638	-	-	-	-	-	-	-
สีย้อม EOB	3425	-	-	-	1608	1465	-	1241	-	-	-
Al-pill + BB 66	3438	-	-	-	1608	-	1384	-	1152	-	-
Al-pill + ThT	3438	-	-	-	-	-	1384	-	-	1032	-
Al-pill + EOB	3438	-	-	1638	1608	1465	1384	-	-	1018	-

#### 4.4 การศึกษาการดูดซับสีย้อมของวัสดุคิบ MMT และ Al-pill

เมื่อนำสารละลาย สีย้อมสีย้อม 66 (BB 66) สีย้อมไทโอฟลาวิน ที (ThT) และสีย้อมอีโอซิน บี (EOB) ไปหาค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจนถึงช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายสีย้อม

ชนิดสีย้อม	ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (nm.)
สีย้อมสีย้อม 66 (BB 66)	612
สีย้อมไทโอฟลาวิน ที (ThT)	413
สีย้อมอีโอซิน บี (EOB)	519

เมื่อนำวัสดุคิบ MMT และ Al-pill ที่เตรียมจากสารละลาย  $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$  0.4 โมล/ลิตร และผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ไปทำการดูดซับสารละลายสีย้อมทั้ง 3 ชนิด ที่มีความเข้มข้น 50 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับคือ 30 นาที 1 และ 2 ชั่วโมง จากผลการดูดซับสารละลายสีย้อมสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมได้ดังต่อไปนี้

#### 4.4.1 ผลการดูดซับสารละลาย BB 66

เมื่อนำวัสดุคืบ MMT และ Al-pill ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ไปทำการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 และสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมได้จากสมการที่ 3.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมแสดงในตาราง ที่ 4.8 และภาคผนวก จ และ ฉ

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสี BB 66 ของ MMT และ Al-pill ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับ (% โดยน้ำหนัก)								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	21	34	34	17	29	31	15	25	26
Al-pill-st 0.4-400	52	76	79	48	71	72	46	67	68
Al-pill-so 0.4-400	76	96	96	64	93	95	65	90	91
Al-pill-st 0.4-500	55	79	79	50	71	71	47	69	70
Al-pill-so 0.4-500	79	96	96	65	93	93	65	90	91

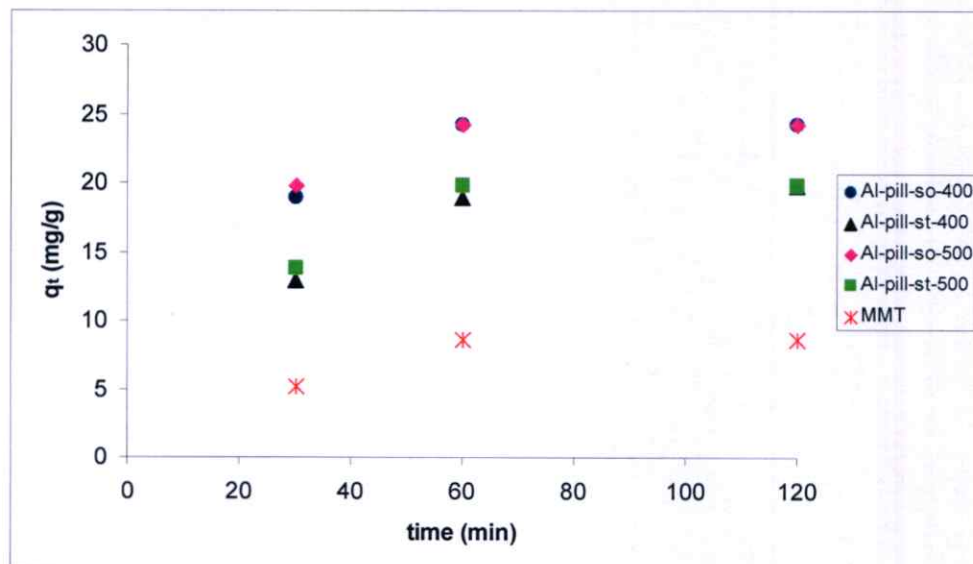
จากตารางที่ 4.8 เมื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของชนิดตัวดูดซับต่อความสามารถในการกำจัดสีย้อม โดยพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเริ่มต้น และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับค่าเดียวกัน พบว่า Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C (Al-pill-so 0.4-400 และ Al-pill-so 0.4-500) ปริมาณสีย้อมที่ถูกกำจัดมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากที่สุด ส่วน Al-pill-st 0.4-400 Al-pill-st 0.4-500 และ MMT ปริมาณสีย้อมที่ถูกกำจัดจะน้อยลงตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าว จึงได้นำ MMT และ Al-pill ที่ดูดซับสารละลายสีย้อมที่ระยะเวลาต่างๆ ไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมต่อไป

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเริ่มต้น และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับค่าเดียวกันพบว่า Al-pill-so 0.4-400 และ Al-pill-so 0.4-500 ปริมาณสีย้อมที่ถูกกำจัดมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากที่สุด สำหรับ Al-pill-st 0.4-400 Al-pill-st 0.4-500 และ MMT ปริมาณสีย้อมที่ถูกกำจัดมีค่าน้อยลงตามลำดับ

เมื่อเพิ่มเวลาของการดูดซับสารละลายสีย้อมจาก 30 นาที เป็น 1 ชั่วโมงพบว่า ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมงจะพบว่า ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเมื่อเทียบกับระยะเวลาการดูดซับที่ 1 ชั่วโมงไม่แตกต่างกัน เมื่อนำปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับที่ระยะเวลาต่างๆ ไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับโดยใช้สูตรในการคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 3.2 และค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ได้จากการคำนวณ แสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.12 (ภาคผนวก ช)

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม (mg/g)		
	50 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	5.17	8.62	8.62
Al-pill-st 0.4-400	12.93	18.96	19.83
Al-pill-so 0.4-400	18.96	24.14	24.14
Al-pill-st 0.4-500	13.79	19.83	19.83
Al-pill-so 0.4-500	19.83	24.14	24.14



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ของ MMT และ Al-pill พบว่า เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีเป็น 1 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 ชั่วโมงพบว่า ความสามารถในการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาของการดูดซับ 1 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาที่เพียงพอในการดูดซับสารละลายสีย้อม

#### 4.4.2 ผลการดูดซับสารละลาย ThT

เมื่อนำวัตถุดิบ MMT และ Al-pill ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ไปทำการดูดซับสารละลาย ThT สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ดังแสดงในตาราง 4.10 ภาคผนวก จ และ ภาคผนวก ฉ

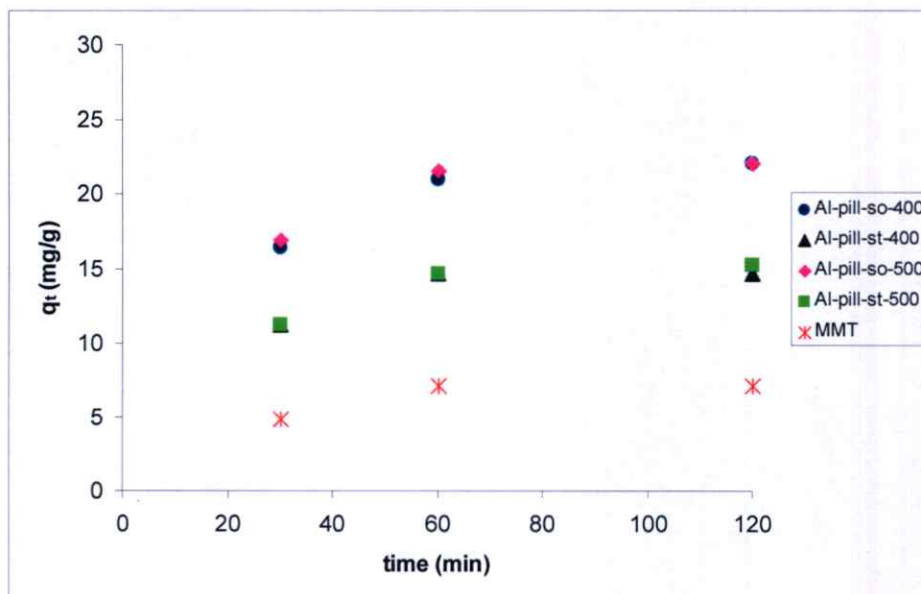
ตารางที่ 4.10 เปอร์เซนต์การดูดซับ ThT ของวัตถุดิบ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ปริมาณสีที่ย้อมที่ถูกดูดซับ (% โดยน้ำหนัก)								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	19	29	29	11	21	21	8	14	14
Al-pill-st 0.4-400	45	59	59	31	52	53	25	44	44
Al-pill-so 0.4-400	65	84	88	60	75	76	51	63	65
Al-pill-st 0.4-500	45	59	61	30	53	53	25	42	43
Al-pill-so 0.4-500	68	86	88	61	75	76	52	64	64

เมื่อนำค่าการดูดซับสารละลายสีที่ย้อมที่ระยะเวลาต่างๆของการดูดซับ ไปคำนวณหาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีที่ย้อมที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ของตัวดูดซับ โดยใช้สมการที่ 3.2 จะได้ผลดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.13 (ภาคผนวก ช)

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีที่ย้อม ThT ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีที่ย้อม		
	50 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	4.88	7.18	7.18
Al-pill-st 0.4-400	11.21	14.65	14.65
Al-pill-so 0.4-400	16.38	20.98	22.13
Al-pill-st 0.4-500	11.21	14.65	15.23
Al-pill-so 0.4-500	16.95	21.55	22.13



**รูปที่ 4.13** กราฟแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมและเวลาที่ใช้ในการดูดซับเดียวกันพบว่า เมื่อทำการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ MMT และ Al-pill พบว่า Al-pill-so 0.4-400 และ Al-pill-so 0.4-500 สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมได้ใกล้เคียงกันและมีค่ามากที่สุดสำหรับ Al-pill-st 0.4-400 Al-pill-st 0.4-500 และ MMT จะมีค่าความสามารถในการดูดซับน้อยลงตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับการดูดซับสีย้อม BB 66

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.13 เมื่อศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสีย้อมของ Al-pill-so 0.4-500 พบว่า ที่ระยะเวลาในการดูดซับเป็น 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม ThT ใกล้เคียงกันและมีค่าสูงที่สุด

#### 4.4.3 ผลการดูดซับสารละลายสี EOB

เมื่อนำวัตถุดิบ MMT และ Al-pill ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ไปทำการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีได้ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ภาคผนวก จ และ ภาคผนวก ฉ

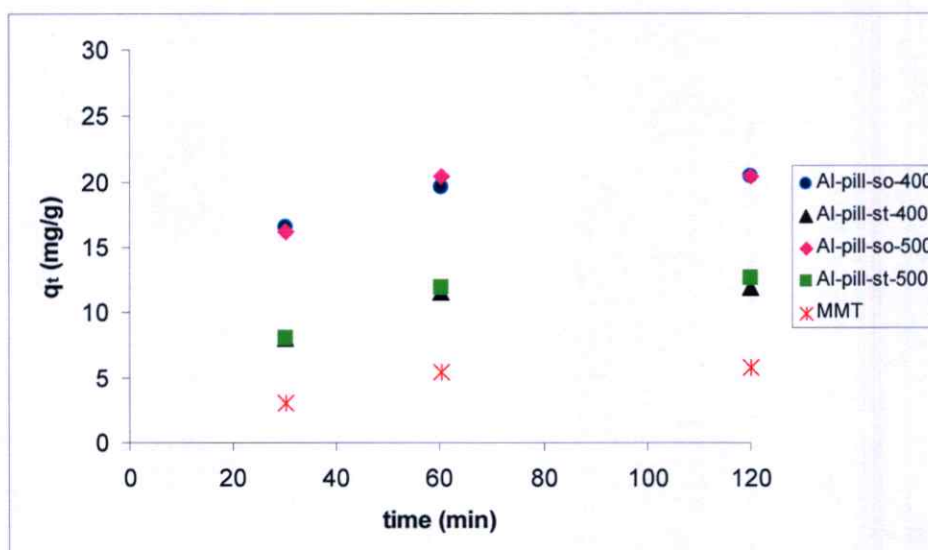
ตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสี EOB ของวัตถุคิบ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ปริมาณสีที่ยอมที่ถูกดูดซับ (% โดยน้ำหนัก)								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	12	21	23	8	15	15	3	11	11
Al-pill-st 0.4-400	32	46	48	27	40	41	19	31	35
Al-pill-so 0.4-400	66	78	81	51	71	73	42	58	58
Al-pill-st 0.4-500	32	48	51	28	41	42	23	35	38
Al-pill-so 0.4-500	65	81	81	51	72	74	42	58	58

และเมื่อนำค่าการดูดซับสารละลายสีที่ยอมที่ระยะเวลาต่างๆ ไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีที่ยอมที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ของตัวดูดซับจะได้ผลดังในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 (ภาคผนวก ช)

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีที่ยอม EOB ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีที่ยอม		
	50 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	3.08	5.38	5.77
Al-pill-st 0.4-400	8.08	11.54	11.92
Al-pill-so 0.4-400	16.54	19.61	20.38
Al-pill-st 0.4-500	8.08	11.92	12.69
Al-pill-so 0.4-500	16.15	20.38	20.38



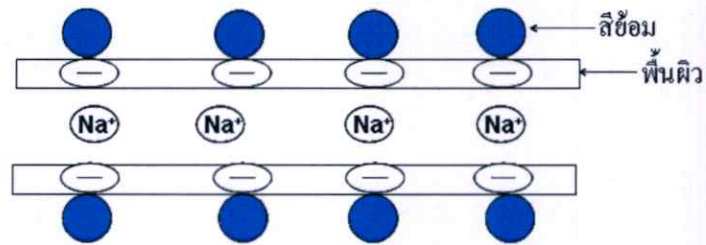
**รูปที่ 4.14** กราฟแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีข้อม EOB ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.12 เมื่อพิจารณาถึงตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสีข้อมและความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมเดียวกันพบว่า Al-pill-so 0.4-400 และ Al-pill-so 0.4-500 สามารถดูดซับสารละลายสีข้อมได้ใกล้เคียงกันและมีค่ามากที่สุด ส่วน Al-pill-st 0.4-400 Al-pill-st 0.4-500 และ MMT จะดูดซับสารละลายสีข้อมได้น้อยตามลำดับ

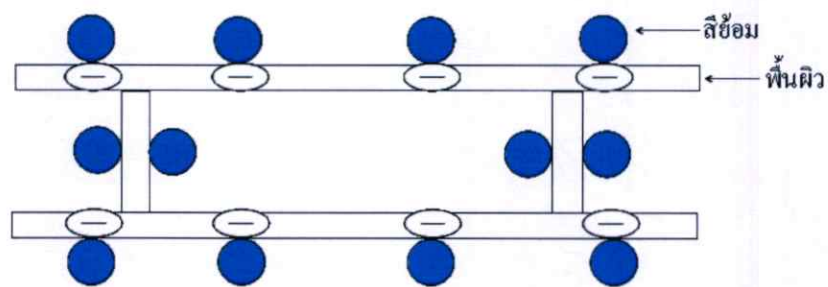
และจากตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการดูดซับของสารละลายสีข้อมพบว่า Al-pill ที่เตรียมด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก มีแนวโน้มในการดูดซับสารละลายสีข้อม EOB เช่นเดียวกับการดูดซับสารละลายสีข้อมของ BB 66 และ ThT คือที่ระยะเวลา 30 นาที ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีข้อมจะมีค่าน้อย แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มเป็น 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับจะมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองการดูดซับสารละลายสีข้อมทั้ง 3 ชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้คือ เมื่อพิจารณาผลของชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสีข้อมพบว่า Al-pill-so 0.4-400 และ Al-pill-so 0.4-500 สามารถดูดซับสารละลายสีข้อมทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุด รองลงมาคือ Al-pill-st 0.4-400 Al-pill-st 0.4-500 และ MMT ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะ Al-pill-so 0.4-400 และ Al-pill-so 0.4-500 ที่เตรียมได้มีระยะห่างระหว่างระนาบ มีพื้นที่ผิวสูงกว่า Al-pill-st 0.4-400 Al-pill-st 0.4-500 และ MMT จึงทำให้สามารถดูดซับสารละลายสีข้อมได้มากกว่า

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถของตัวดูดซับชนิดเดียวกันในการดูดซับสารละลายสีข้อมพบว่า Al-pill ดูดซับสีข้อมได้ดีกว่า MMT เพราะใน MMT การดูดซับสีข้อมจะเกิดบนพื้นผิวด้านนอกของ MMT เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ในขณะที่ Al-pill การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวด้านนอกและภายในโครงสร้างของ Al-pill ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งภายในโครงสร้างของ Al-pill จะมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ที่มีความว่องไว (Active site) ในการสร้างพันธะ ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.19 จากแผนภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Al-pill มีโอกาสจะดูดซับสีข้อมได้มากกว่า MMT

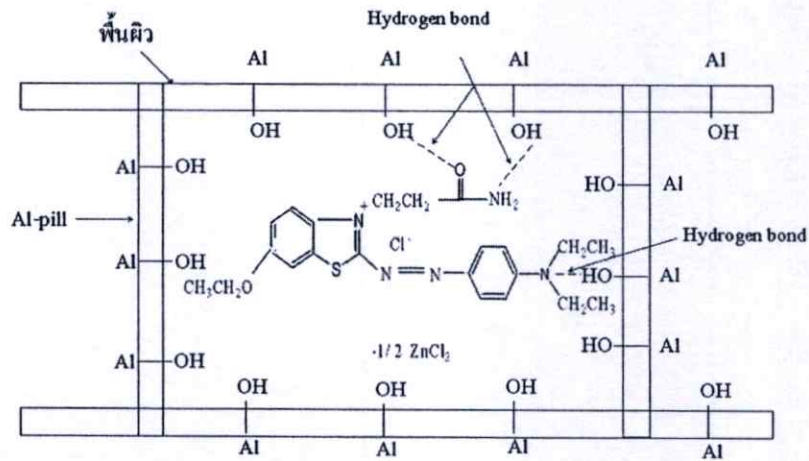


รูปที่ 4.15 แผนภาพแสดงการดูดซับของ MMT

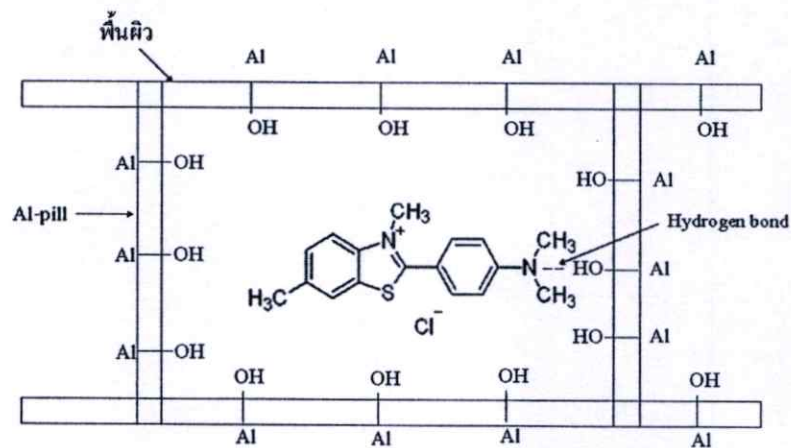


รูปที่ 4.16 แผนภาพแสดงการดูดซับของ Al-pill

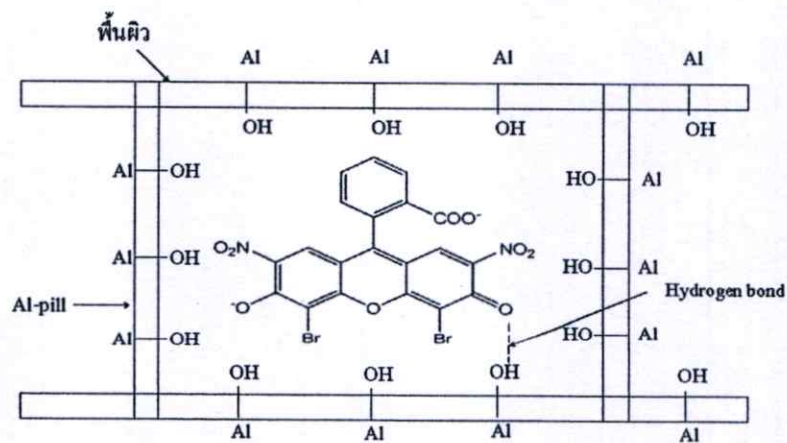
เมื่อพิจารณาชนิดของสารละลายสีข้อมที่ใช้ในการดูดซับพบว่า สีข้อม BB 66 ถูกดูดซับได้มากที่สุด รองลงมาคือสี ThT และ EOB ตามลำดับ เนื่องจากสีข้อม BB 66 และ ThT มีโมเลกุลขนาดเล็กและน่าจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบน Al-pill ได้ ส่วนสีข้อม EOB มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับสีข้อมต่ำลง



รูปที่ 4.17 แผนภาพแสดงการดูดซับสารละลายสี้อม BB 66 ของ Al-pill



รูปที่ 4.18 แผนภาพแสดงการดูดซับสารละลายสี้อม ThT ของ Al-pill



รูปที่ 4.19 แผนภาพแสดงการดูดซับสารละลายสี้อม EOB ของ Al-pill

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

#### 1. ผลของการดัดแปรโครงสร้างของ MMT

เมื่อนำ MMT มาดัดแปรโครงสร้างด้วยสารละลายอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคดไอออน โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิกและเทคนิคปั่นกววนพบว่า Al-MMT ที่เตรียมได้มีระยะห่างระหว่างระนาบมากกว่า MMT ก่อนเริ่มต้น เนื่องจากมี  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  แทรกเข้าไปในระหว่างชั้น MMT ก่อนเริ่มต้นมีค่า  $d_{001}$  เท่ากับ 12.21 Å และ Al-MMT-so มีระยะห่างระหว่างระนาบกว้างขึ้นประมาณ 5 Å และมีระยะห่างระหว่างระนาบสูงกว่า Al-MMT-st และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการสอดแทรกพบว่า ไม่มีผลต่อการแทรกตัวของ  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$

เมื่อนำ Al-MMT ที่เตรียมได้ไปเผาแคลไซน์ พบว่า ทั้ง Al-pill-so และ Al-pill-st มีระยะห่างระหว่างระนาบลดลงประมาณ 1 Å เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลและน้ำสลายตัวไป และเมื่อนำ Al-pill ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ไปหาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนพบว่า Al-pill-so และ Al-pill-st มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก MMT ตอนเริ่มต้น

#### 2. ผลการดูดซับสารละลายสีย้อม

Al-MMT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้ว เมื่อนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายสีย้อม ซึ่งสีเบสิกที่ใช้ในการดูดซับ ได้แก่ สี BB 66 และ สี ThT และสีแอซิด ได้แก่ สี EOB พบว่า Al-pill สามารถดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิดได้ดีกว่า MMT ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้าง จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า Al-pill สามารถใช้กำจัดสีย้อมชนิดกรดและเบสได้

เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมพบว่า ที่ 1 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาที่การดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิดเข้าสู่สมดุลและให้ค่าการดูดซับที่สูงที่สุด

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วยไอออนชนิดอื่น เช่น  $Fe^{3+}$  และ  $Si^{4+}$  เป็นต้น
2. ศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวชนิดอื่น
3. ควรศึกษาถึง pH และ อุณหภูมิของสารละลายสีย้อมที่ใช้ในการดูดซับ เพื่อที่จะได้เห็นถึงความแตกต่างของการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Salerno and S. Mendioroz. "Preparation of Al-Pillared Clay Montmorillonite from Concentrated Dispersion". *Appl. Clay Sci.* 2002, Vol. 22. 115-123.
- [2] รัตนาวรรณ มกรพันธ์. "นาโนเคลย์/นาโนคอมโพสิต (Nanoclay/Nanocomposites)" [online]. Available : <http://www.thaiscience.com/lab-vol/p18/18 นาโนเคลย์.html>. 2005.
- [3] "Terramin-Premium Calcium Montmorillonite-Red Desert Clay" [online]. Available : <http://www.thepetalalternative.com/terramin.html>. 2005.
- [4] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. "วัตถุอันตรายดิน" [online]. Available : <http://www.environnet.in.th>. 2006.
- [5] S. Kincheloe. "Efficient Fertilizer Use – The Soil Defined" [online]. Available : <http://www.back-to-basics.net/efu/pdfs/soil.pdf>. 2005.
- [6] "The Clay Mineral Group" [online]. Available : <http://www.galleries.com/minerals/silicate/clays.htm>. 2006.
- [7] สุพจน์ โตตระกูล. แร่วิทยาและเคมีดินเบื้องต้น. เชียงใหม่. 2536.
- [8] Octahedral Sheet. [online]. Available : <http://www.classes.colgate.edu/.../silicates/phyllo.htm>. 2006.
- [9] สรินทร ลีปนาค. โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว. [online]. Available : <http://www.material.chula.ac.th/Radio45/April/radio4-2.htm>. 2002
- [10] กรมทรัพยากรธรณี. ดิน. [online]. Available: [http://www.dmr.go.th/knowledge/BMR\\_Publication/Min\\_Assess/\\_private/Clay](http://www.dmr.go.th/knowledge/BMR_Publication/Min_Assess/_private/Clay). 2006
- [11] คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.
- [12] [online]. Available : <http://www.aero.fcu.edu.tw/.../image002.jpg>. 2006.
- [13] Clay Minerals. [online]. Available : <http://www.mala.bc.ca/~earles/geol212/lectures/unit01/uiuc-clays.pdf>. 2006.
- [14] [online]. Available : <http://www.msm.cam.ac.uk/.../austenite.carbon.2.jpg>. 2006.
- [15] Octahedral. [online]. Available : <http://www.tulane.edu/.../eens211/phyllosilicates.htm>. 2006.

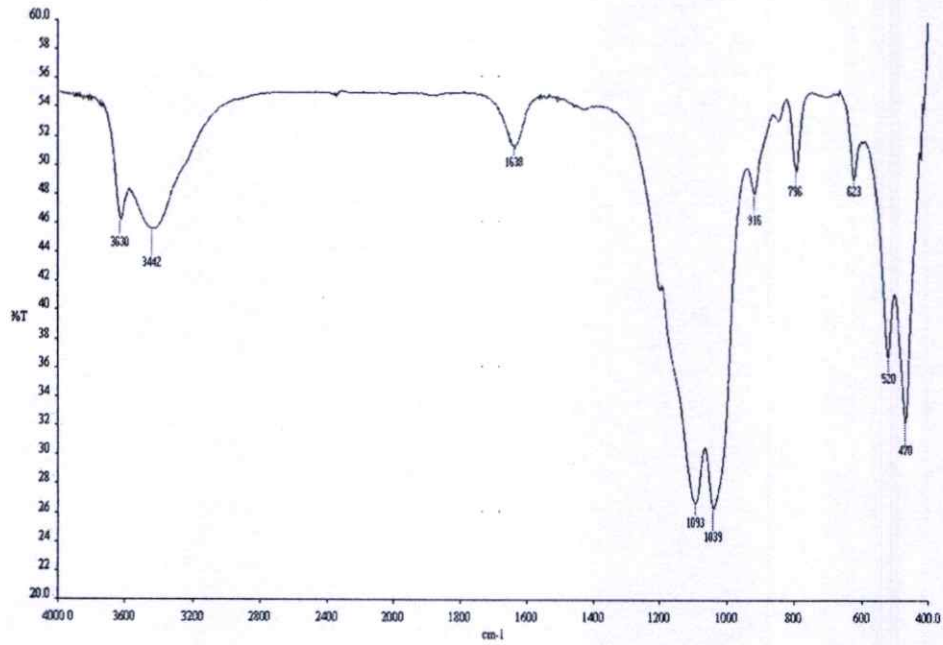
- [16] สิ้นแร่ดินเหนียว. [online]. Available :  
<http://www.classroom.psu.ac.th/users/japichai/books/soilmech/ch03/clay.htm>. 2007.
- [17] ขนิษฐา. บำบัดน้ำเสีย. [online]. Available :  
[http://www.tpa.or.th/writer/author\\_des](http://www.tpa.or.th/writer/author_des). 2007.
- [18] อภิชาติ สนธิสมบัติ. “กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ”. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
 ราชมงคล. กรุงเทพฯ. 2543.
- [19] wikipedia. **Dye**. [online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Dye>. 2000.
- [20] Stainsfile. **Index of Dyes**. [online]. Available :  
<http://stainsfile.info/StainsFile/dyes/49005.htm>. 2005.
- [21] J. Orthman. **Basic Blue 66**. Individual Inquiry. 2000.
- [22] ล้นทม จอนจอบทรง. การบำบัดและจัดการน้ำเสียจากการย้อมสี. “วารสารเทคโนโลยี  
 ที่เหมาะสม”. 2535, Vol.10,4 (ตค.-ธค.). 38-43.
- [23] ลมโซย โบบิน. แนวทางการแก้ปัญหามลภาวะจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม  
 ฟอกย้อมสิ่งทอ. “อุตสาหกรรมสาร”. 2536, Vol.36,1 (มค.-มีค.) 55-58.
- [24] D. F. Samuel. and M. A. Osman. “**Adsorption Processes for Water Treatment**”.  
 Stoneham : Butterworth. 1987. 1-100.
- [25] E. Kenneth, V. Gounaris and H. Wain-Sue. “**Adsorption Technology for Air and  
 Water Pollution Control**”. Michigan. 1992. 1-45.
- [26] B. Hans-Jurgen, G. Karlheinz, and K. Michael. “**Physics and Chemistry of Interfaces**”.  
 New York. 2003. 177-205.
- [27] M.M. Elaine. “**Surface Chemistry**”. Oxford University. New York. 2001. 54-55.
- [28] I.M. Richard. “**Principles of Adsorption and Reaction on Solid Surface**”. John Wiley &  
 Sons, Inc. New York. 1996. 111.
- [29] E. Ruiz-Hitzky, J. C. Galvan, J. Merino, B. Casal, P. Aranda and A. Jimenez-Morales.  
 “Proton Conductivity in Al-Montmorillonite Pillared Clays”. **Solid State Ionics**. 1996,  
 Vol. 85 313-317.
- [30] D. L. Guerra, V. P. Lemos, R. S. Angelica and M. L. Costa. “Synthesis and  
 Characterization of Pillared Smectites with Al”. **Appl. Miner.** 1997, Vol. 8. 65 – 68.
- [31] H. Khalaf, O. Bouras and V. Perrichon. “Synthesis and Characterization of Al-Pillared and  
 Cationic Surfactant Modified Al-Pillared Algerian Bentonite”. **Microporous Mater.**  
 1997, Vol. 8 141-150.

- [32] J.Q. Jiang and Z. Zeng. "Comparison of Modified Montmorillonite Adsorbents Part II: The Effects of the Type of Raw Clays and Modification Conditions on the Adsorption Performance". **Chemosphere**. 2003, Vol. 53 53-62.
- [33] Y. S. Shin, S. Oh and B. Ha. "Pore Structure and Acidities of Al-Pillared Montmorillonite". **Korean J. Chem. Eng.** 2003, Vol. 20 77-82.
- [34] H. Y. Zhu, W. H. Gao and E. F. Vansant. "The Porosity and Water Adsorption of Alumina Pillared Montmorillonite". **J. Colloid Interface Sci.** 1995, Vol. 171 377-385.
- [35] วิมลโรจน์ โอสถานุเคราะห์. "สมบัติการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้แร่ดินร่วมกับการจับก้อนสารเคมี". วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2536.
- [36] พรรณิศา ไสภณ, ไพทีย์ ชีรเวชญาณ, วรณันต์ นาคบรรพต และ ภาวินี ชัยประเสริฐ. "การบำบัดสารละลายสีย้อมชนิดเบสิกโดยใช้แกลบ". สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2006.
- [37] โชติรส เข็มสะอาด. "การกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ด้วยการดูดซับโดยใช้ไคโตซาน". วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [38] P. Baskaralingam. M. Pulikesi. D. Elango. V. Ramamurthi and S. Sivanesan. "Adsorption of Acid Dye onto Organobentonite". **J. Hazard. Mater.** 2006, Vol. 128. 138-144.
- [39] A. Sofa Ozcan. B. Erdem and A. Ozcan. "Adsorption of Acid Blue 193 from Aqueous Solutions onto Na-bentonite and DTMA-Bentonite". **J. Colloid Interf. Sci.** 2004, Vol. 280. 44-54.
- [40] L. Wang. and A. Wang. "Adsorption Properties of Congo Red from Aqueous Solution onto Surfactant-Modified Montmorillonite". **J. Hazard. Mater.** 2008, 1-8.
- [41] Z. Bouberka. S. Kacha. M. Kameche. S. Elmaleh. and Z. Derriche. "Sorption Study of an Acid Dye from an Aqueous Solution Using Modified Clays". **J. Hazard. Mater.** 2005, Vol. 119. 117-124.

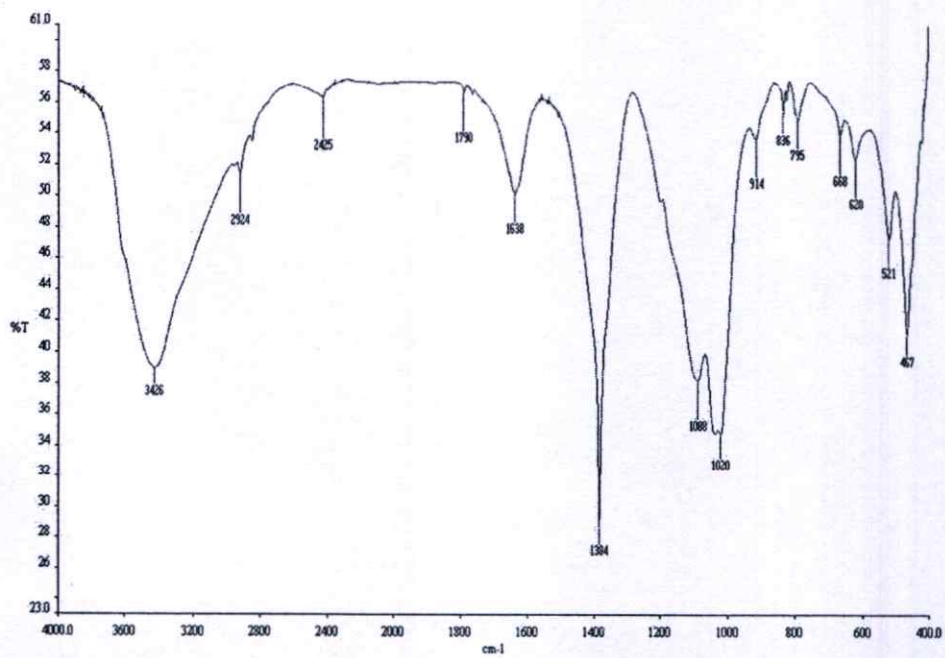
## ภาคผนวก ก

## อินฟราเรดสเปกตรัมของ MMT Al-MMT และ Al-pill

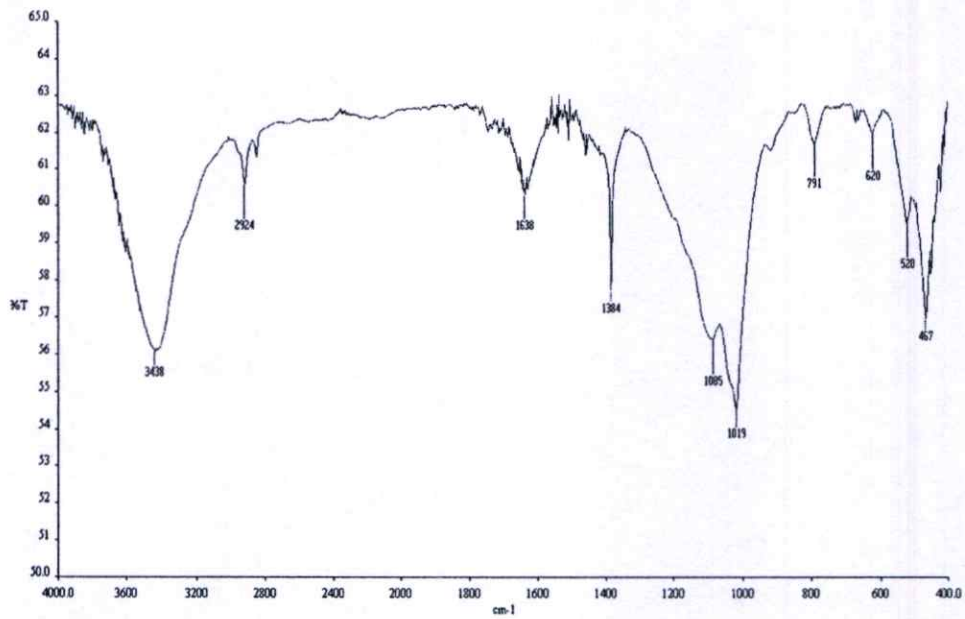
## จากเทคนิค FTIR



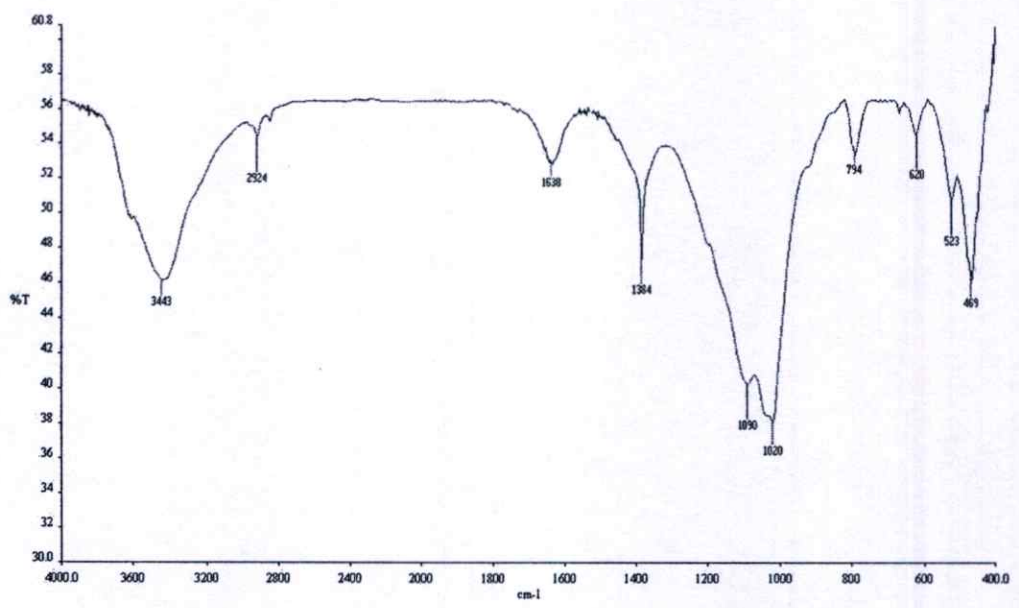
รูปที่ ก-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัตถุดิบ MMT



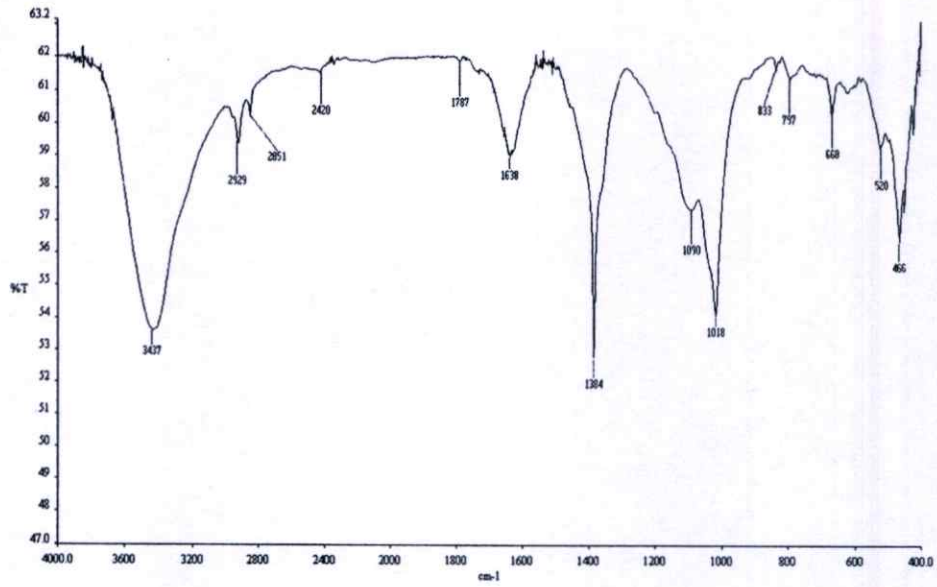
รูปที่ ก-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-MMT-so 0.4



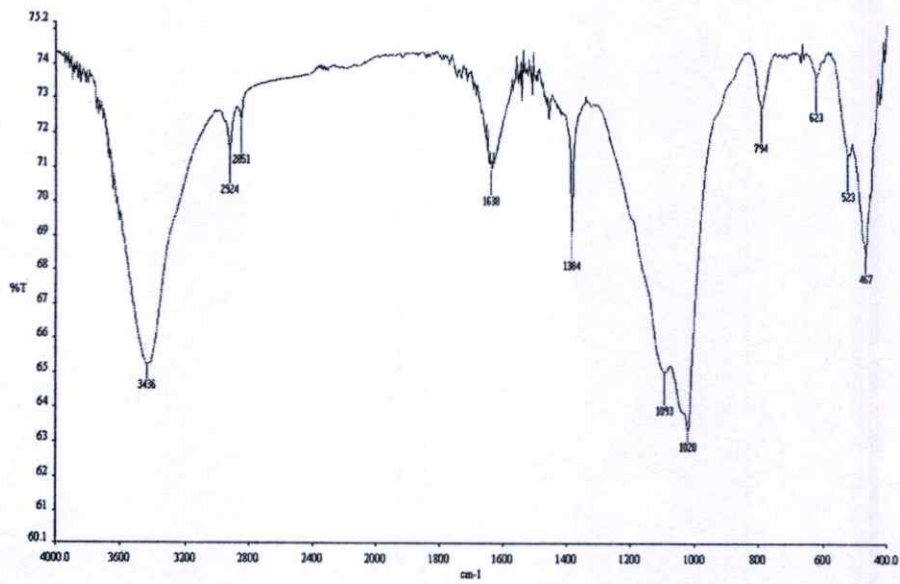
รูปที่ ก-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so 0.4-400



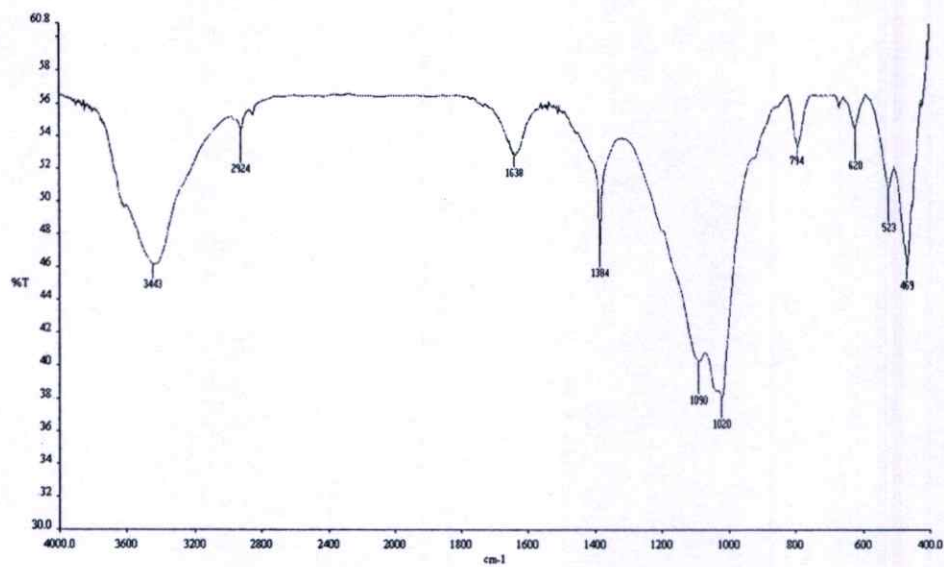
รูปที่ ก-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so 0.4-500



รูปที่ ก-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-MMT-st 0.4

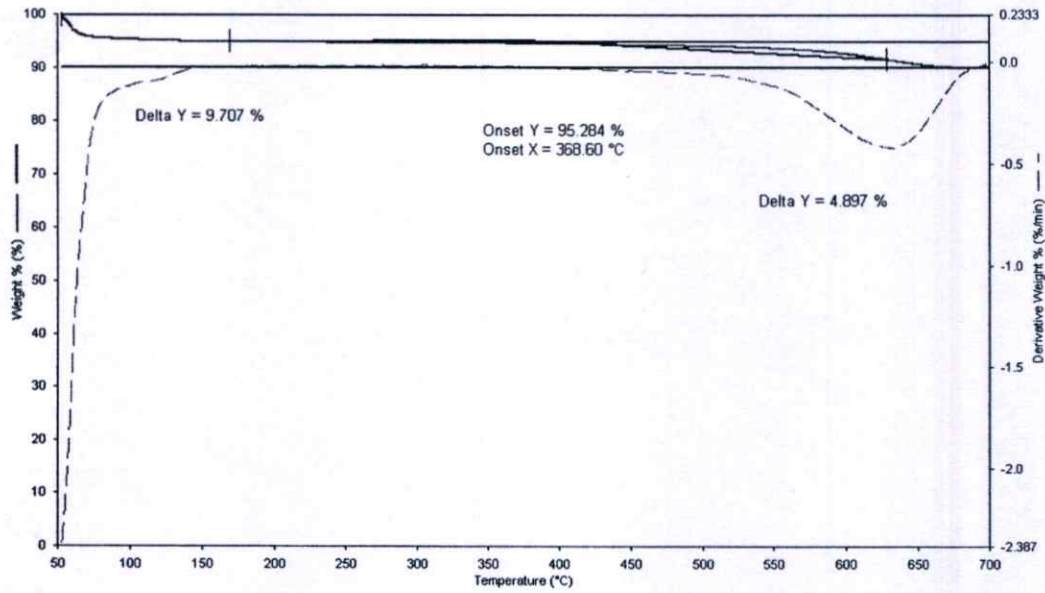


รูปที่ ก-6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-st 0.4-400

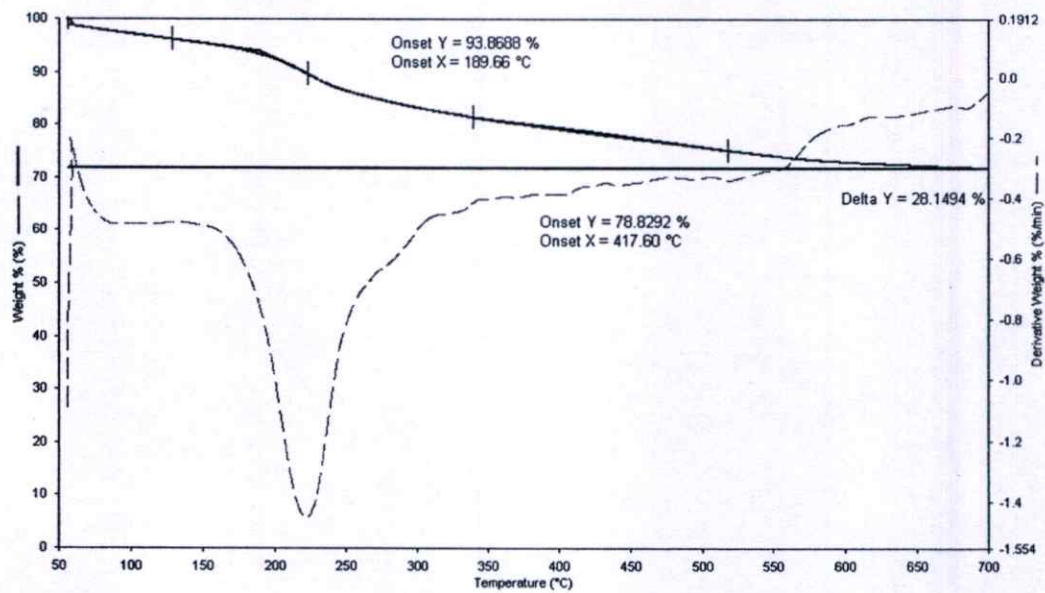


รูปที่ ก-7 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-st 0.4-500

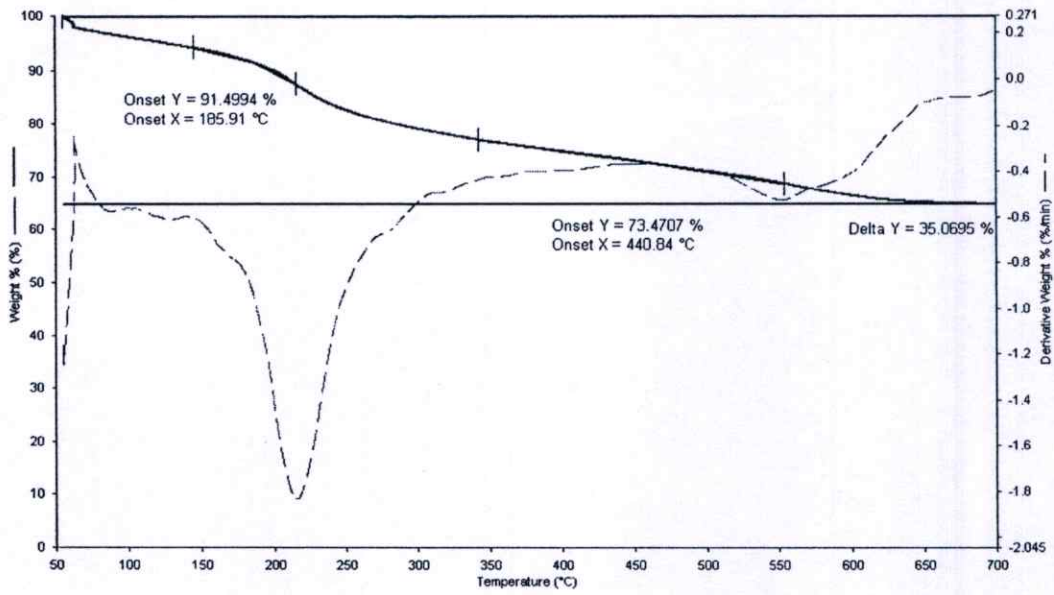
ภาคผนวก ข  
สมบัติทางความร้อนจากเทคนิค TGA



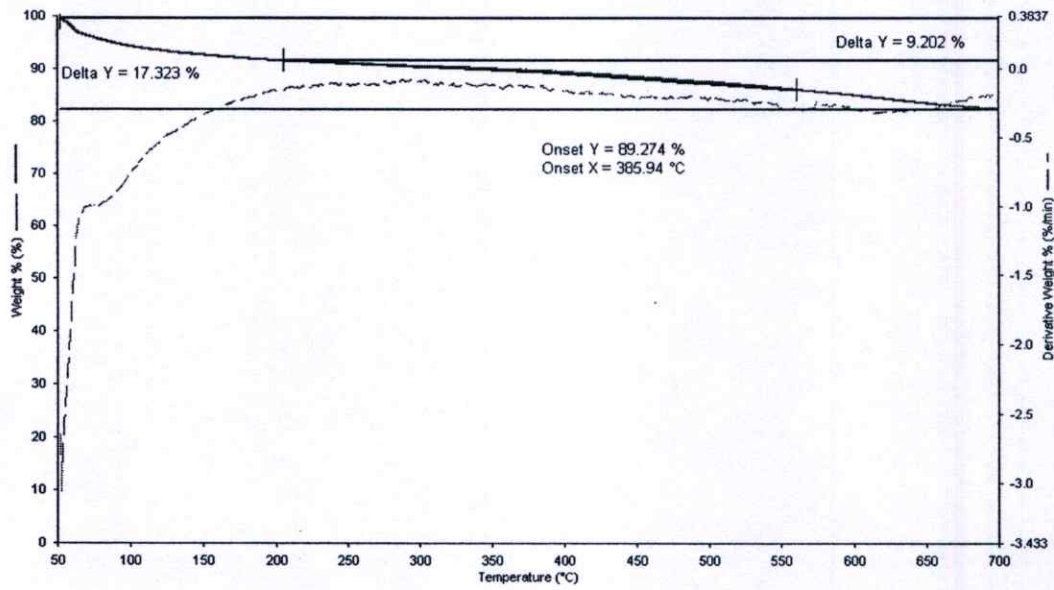
รูปที่ ข-1 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ MMT ในบรรยากาศ O<sub>2</sub>



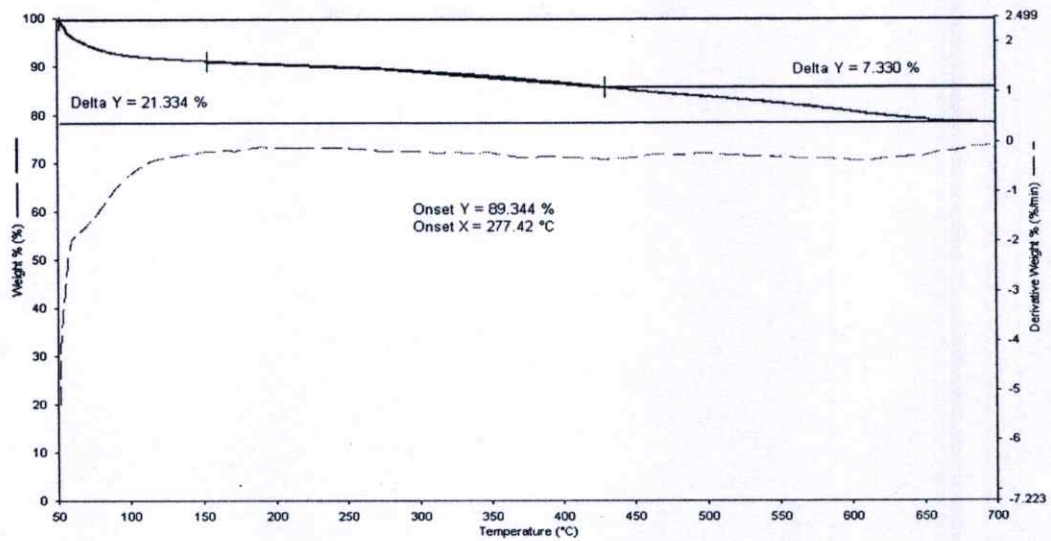
รูปที่ ข-2 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-MMT-st 0.4 ในบรรยากาศ O<sub>2</sub>



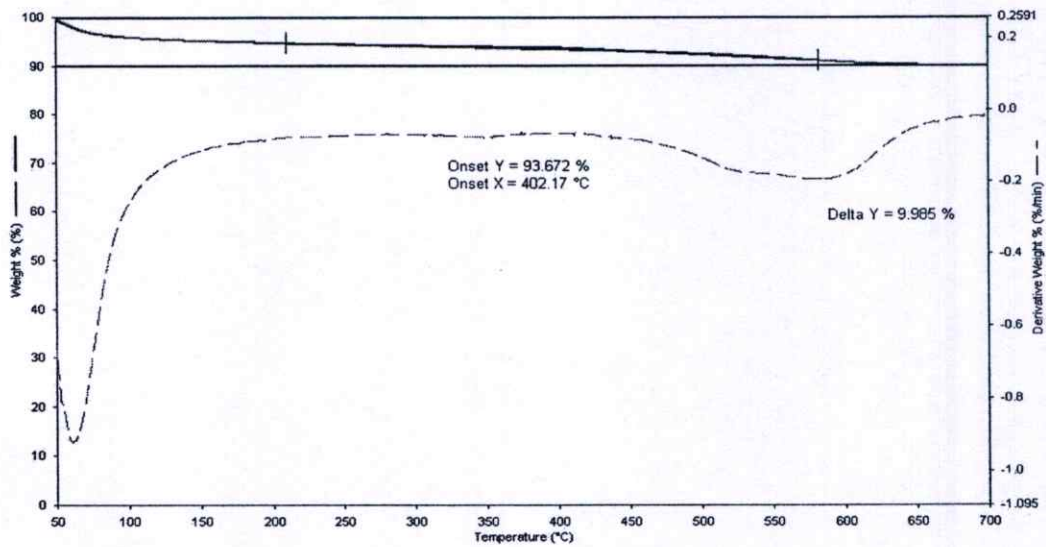
รูปที่ ข-3 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-MMT-so 0.4 ในบรรยากาศ O<sub>2</sub>



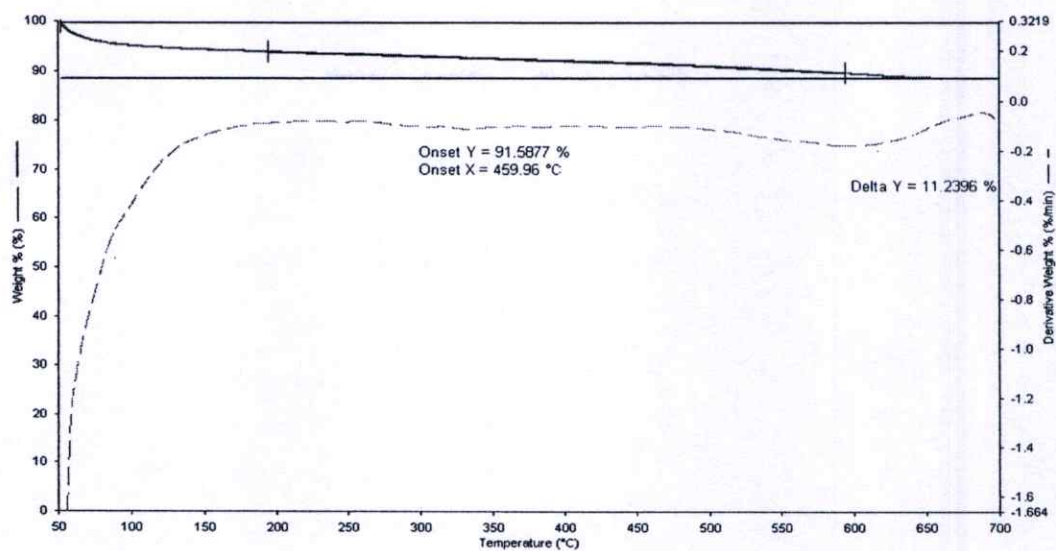
รูปที่ ข-4 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-st 0.4-400 ในบรรยากาศ O<sub>2</sub>



รูปที่ ข-5 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-so 0.4-400 ในบรรยากาศ  $O_2$



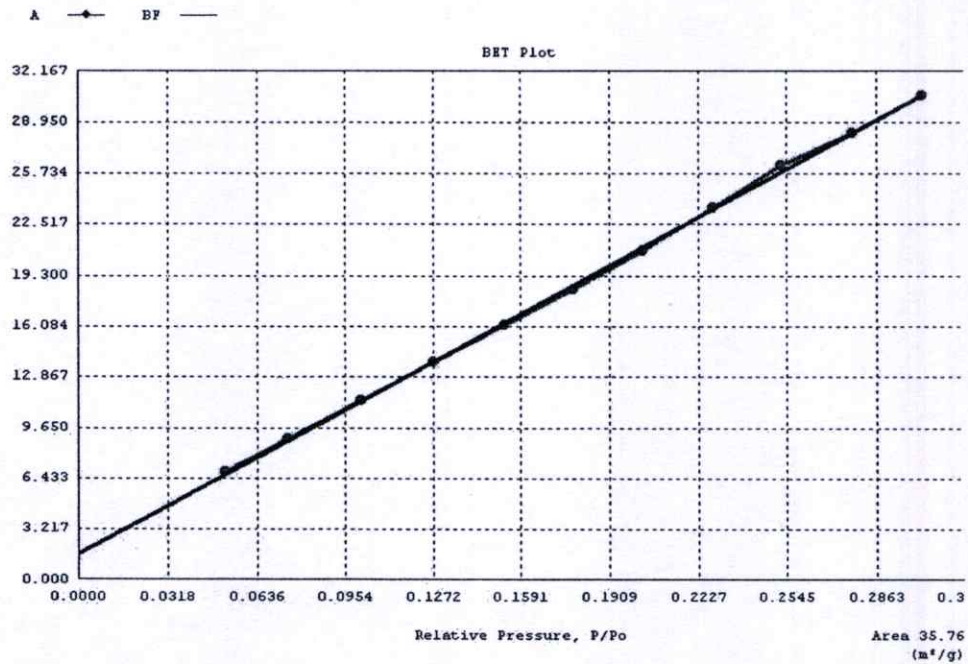
รูปที่ ข-6 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-st 0.4-500 ในบรรยากาศ  $O_2$



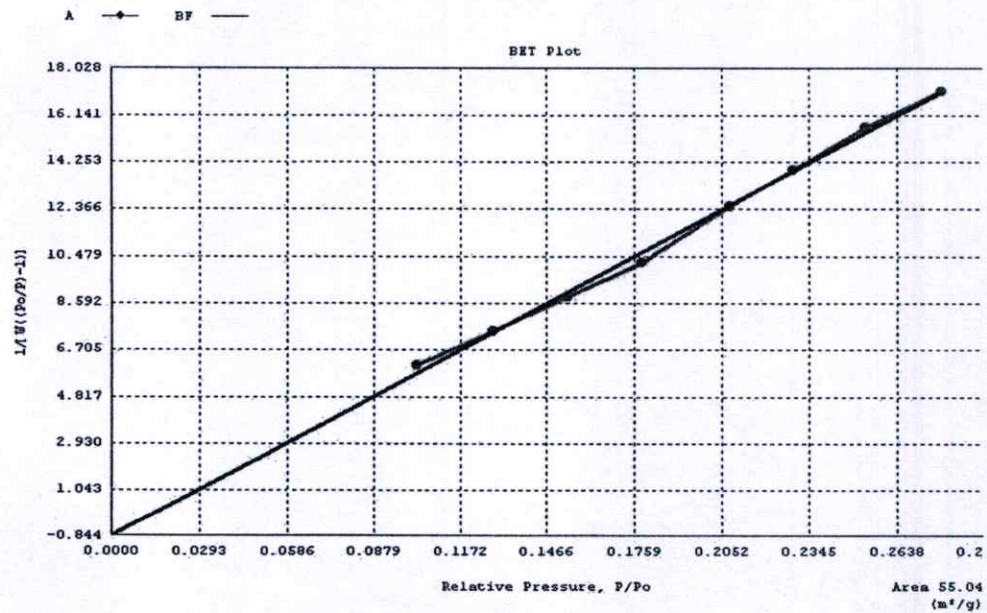
รูปที่ ข-7 เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ Al-pill-so 0.4-500 ในบรรยากาศ O<sub>2</sub>

## ภาคผนวก ค

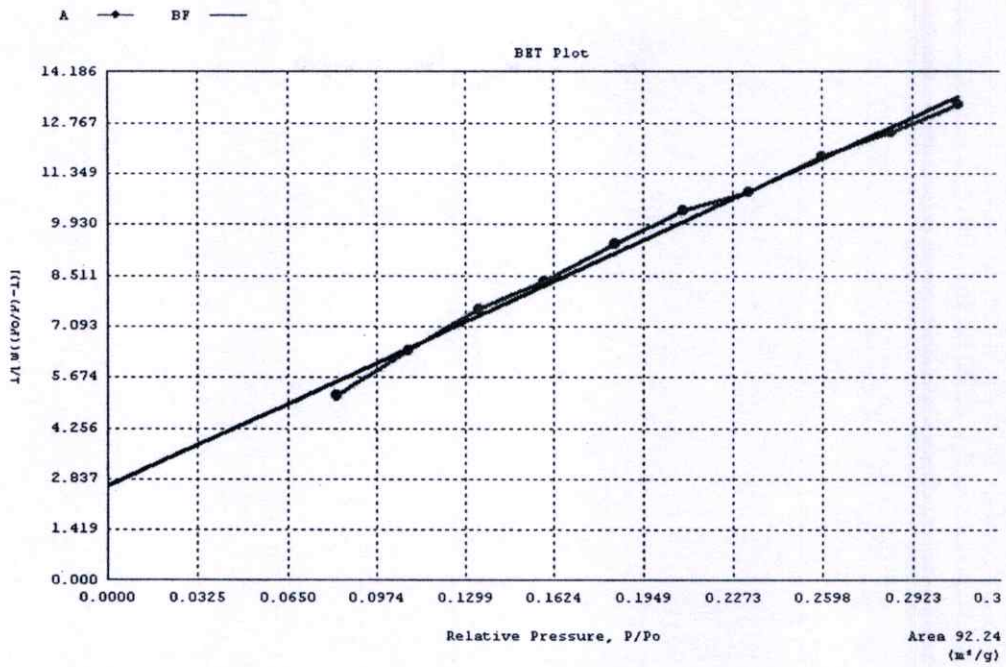
## พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุคิบบ MMT และ Al-pill



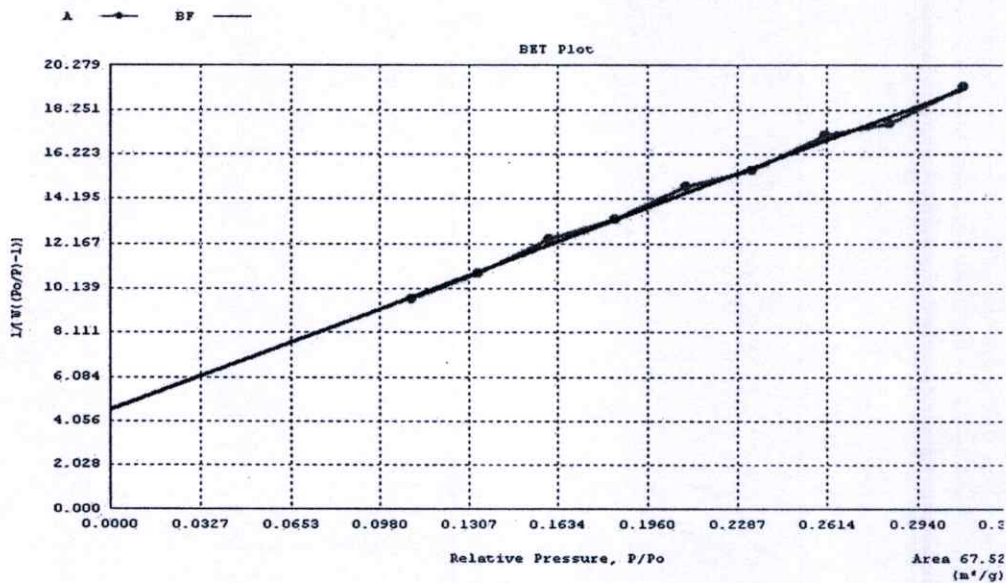
รูปที่ ค-1 พื้นที่ผิวของวัสดุคิบบ MMT



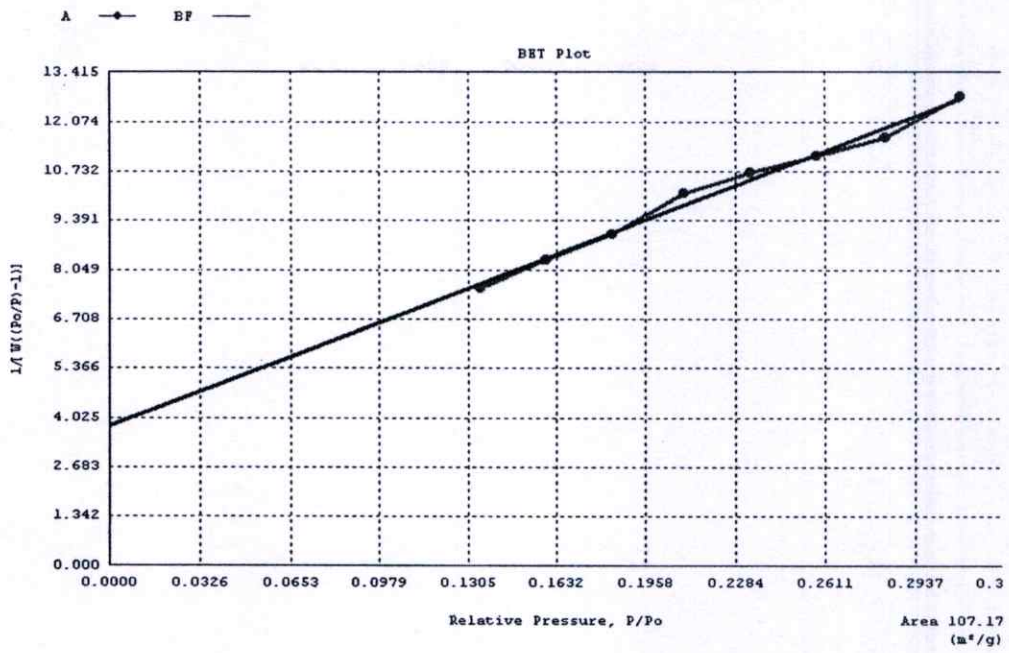
รูปที่ ค-2 พื้นที่ผิวของ Al-pill-st 0.4-400



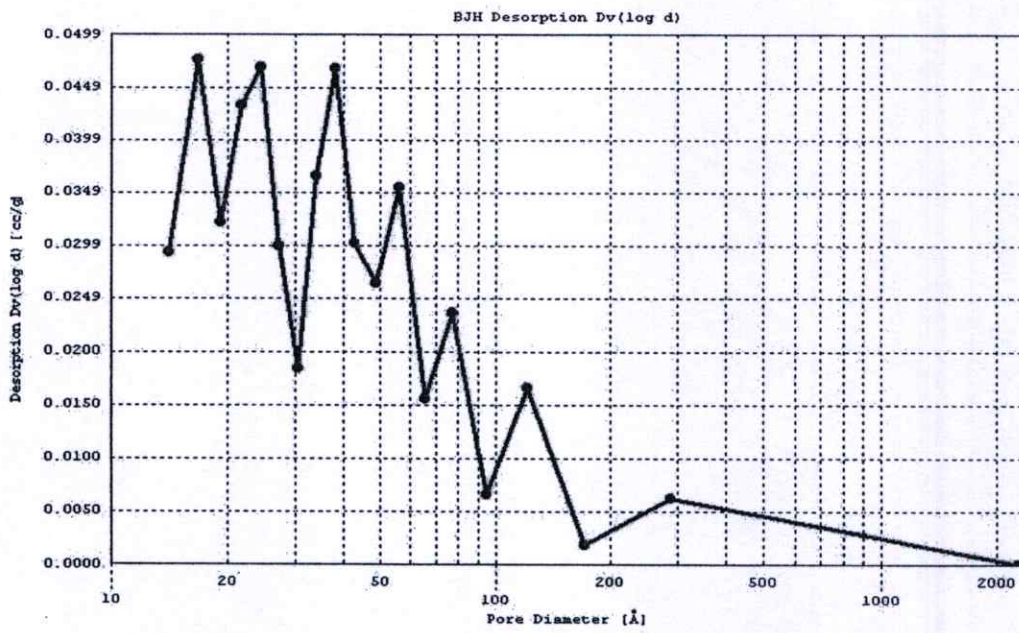
รูปที่ ค-3 พื้นที่ผิวของ Al-pill-so 0.4-400



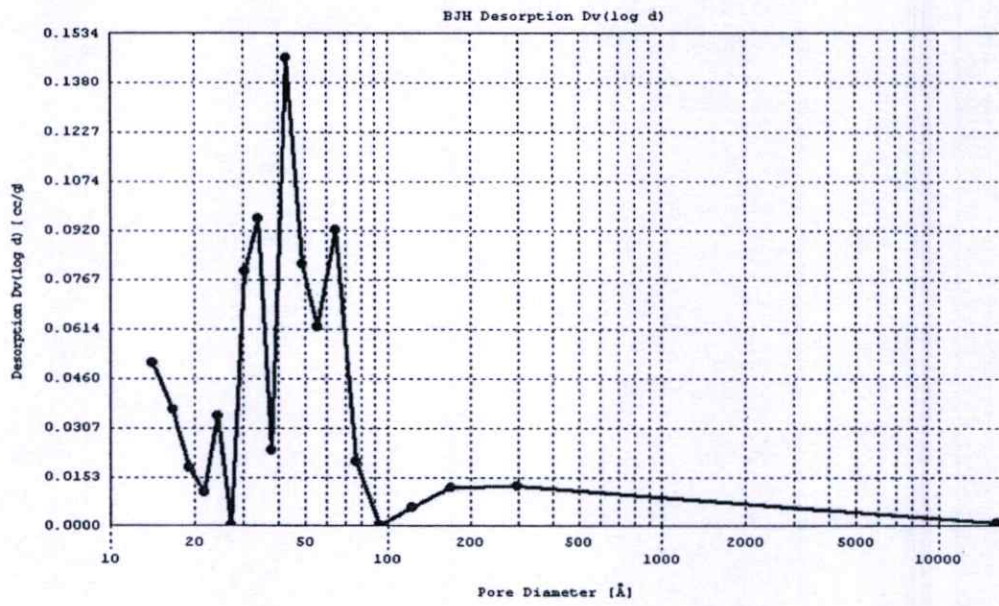
รูปที่ ค-4 พื้นที่ผิวของ Al-pill-st 0.4-500



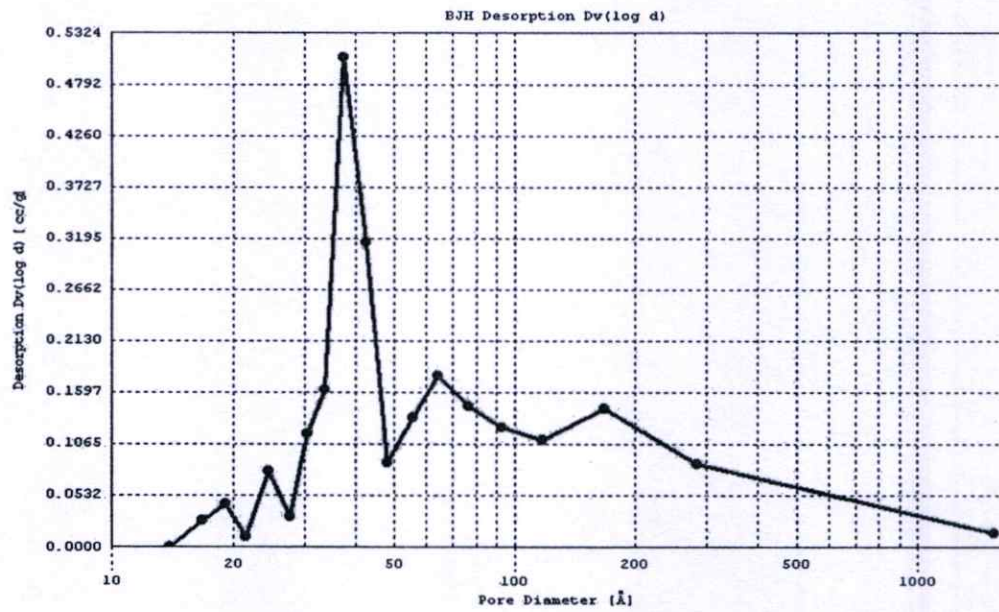
รูปที่ ค-5 พื้นที่ผิวของ Al-pill-so 0.4-500



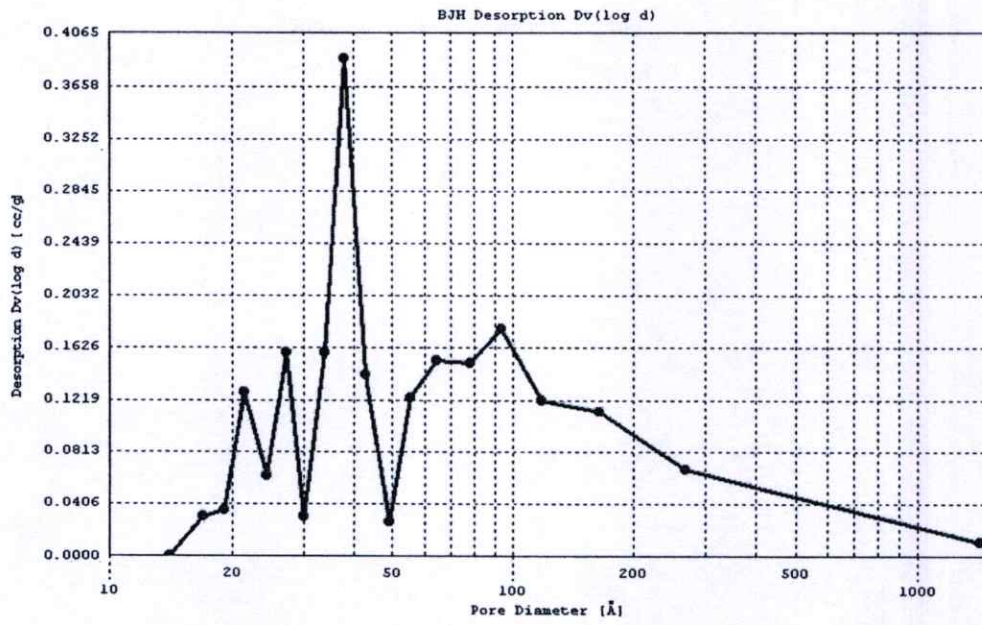
รูปที่ ค-6 ขนาดรูพรุนของวัตถุดิบ MMT



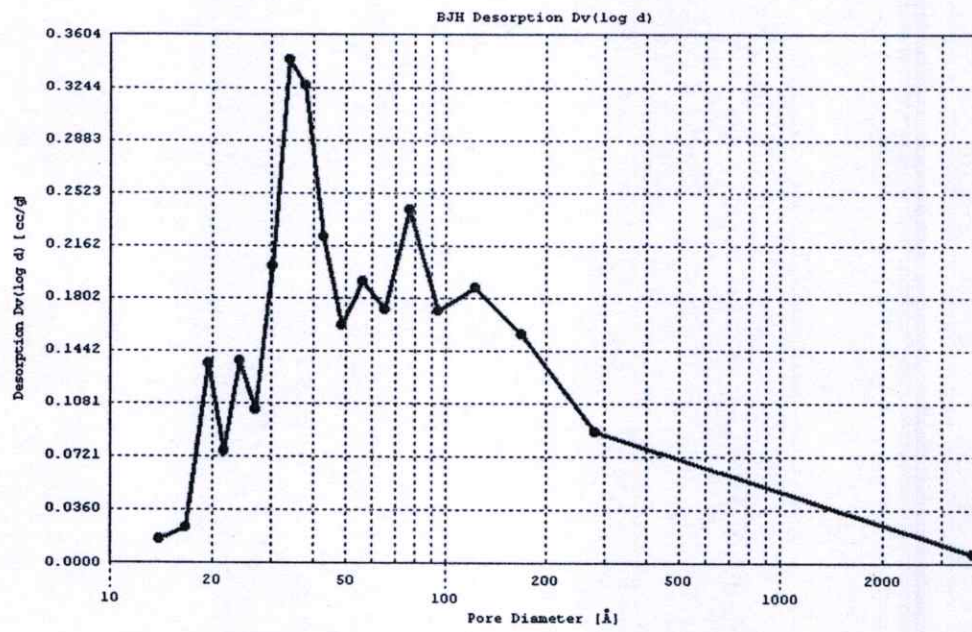
รูปที่ ๗ ขนาดรูพรุนของ Al-pill-st 0.4-400



รูปที่ ๘ ขนาดรูพรุนของ Al-pill-so 0.4-400



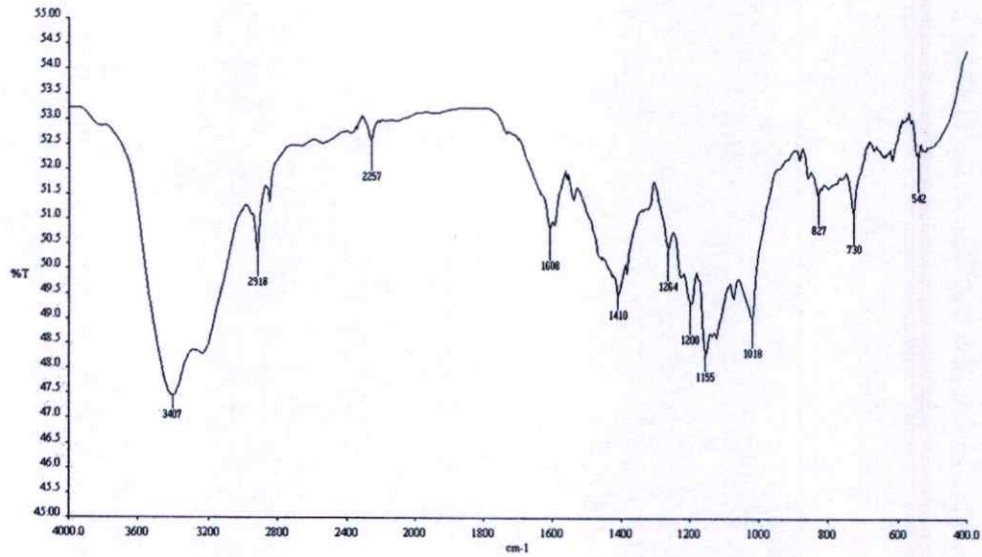
รูปที่ ค-9 ขนาดรูพรุนของ Al-pill-st 0.4-500



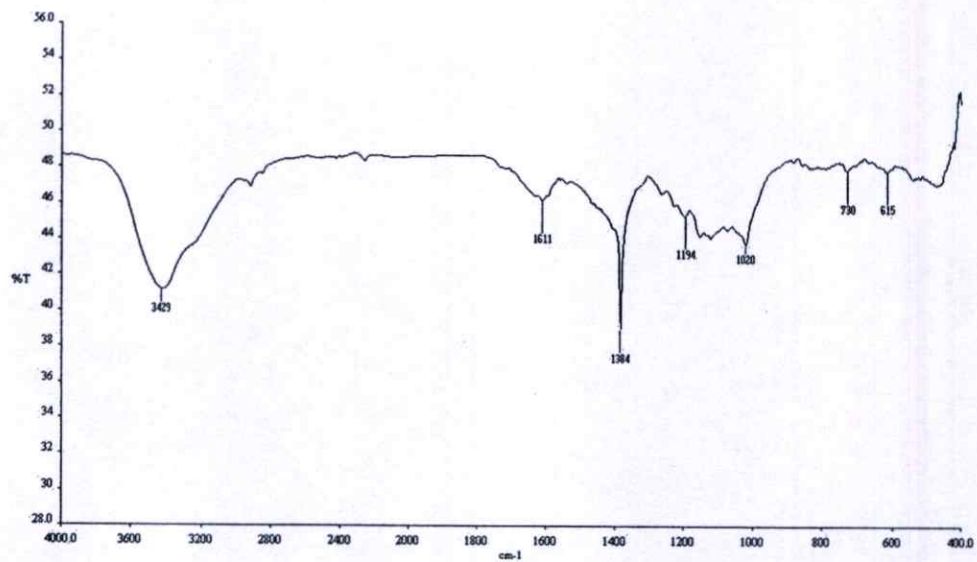
รูปที่ ค-10 ขนาดรูพรุนของ Al-pill-so 0.4-500

## ภาคผนวก ง

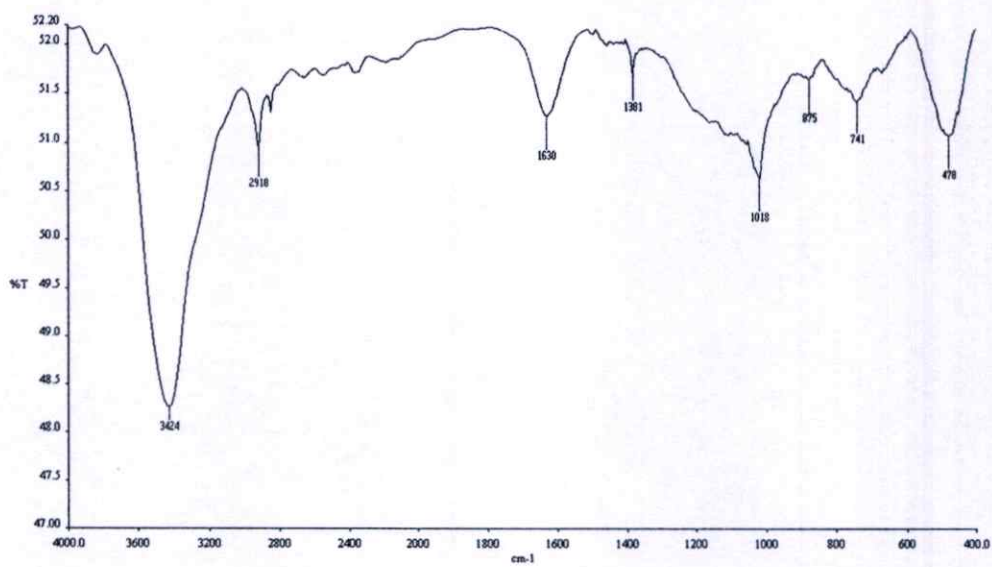
อินฟราเรดสเปกตรัมของ AI-pill ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีข้อม  
จากเทคนิค FTIR



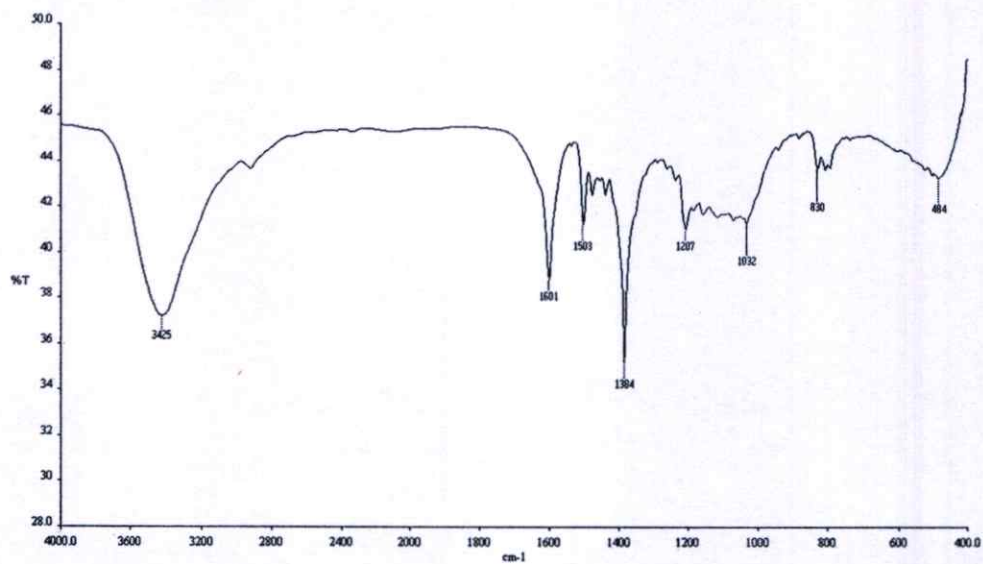
รูปที่ ง-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายสีข้อม Basic Blue 66 (BB 66)



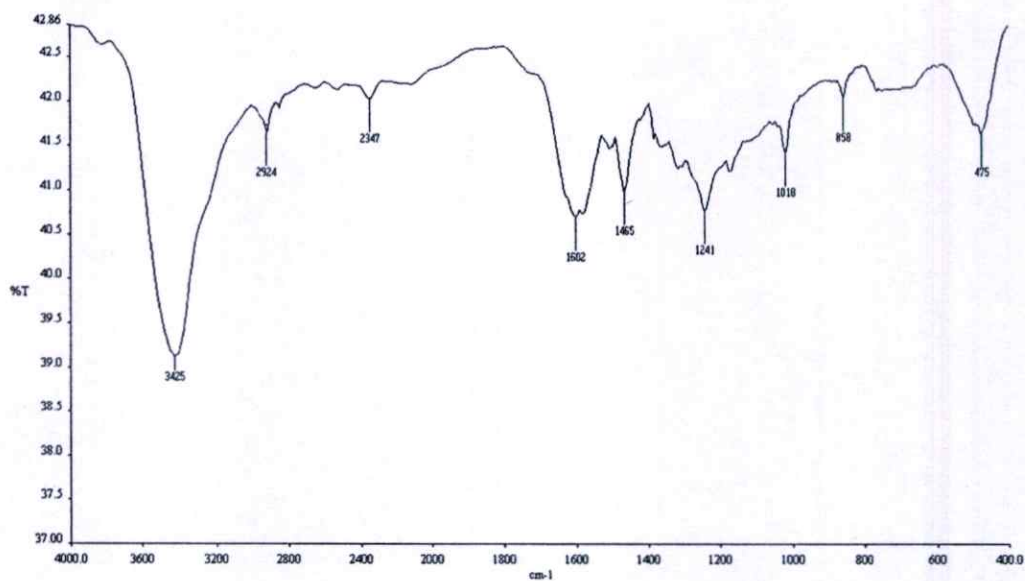
รูปที่ ง-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ AI-pill-so 0.4-400 ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีข้อม BB 66



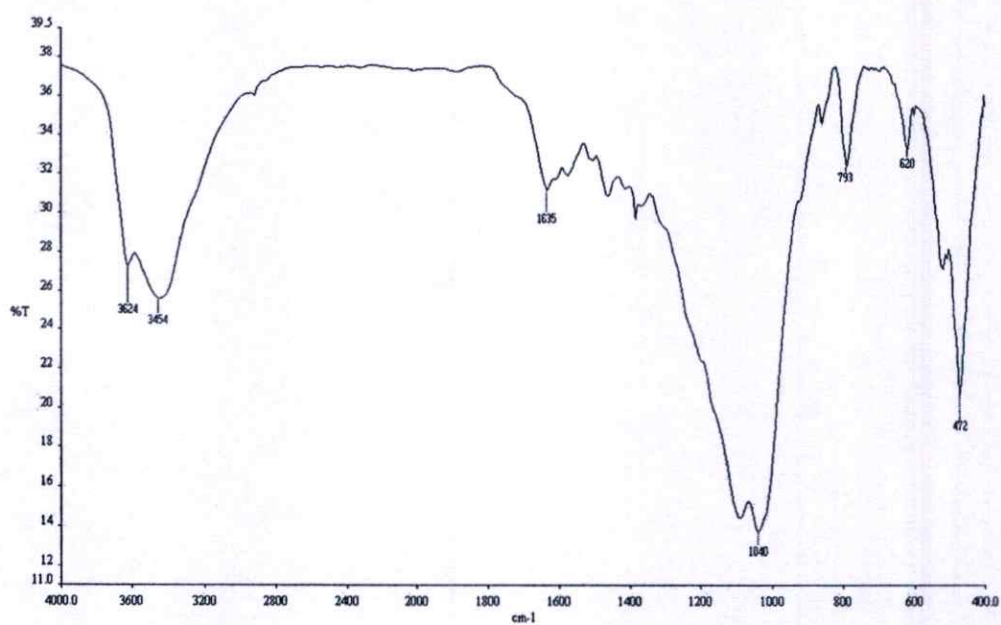
รูปที่ ง-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายสีข้อม Thioflavin T (ThT)



รูปที่ ง-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so 0.4-400 ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีข้อม ThT



รูปที่ ง-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายสีชมพู Eosin B (EOB)



รูปที่ ง-6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ Al-pill-so 0.4-400 ที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีชมพู EOB

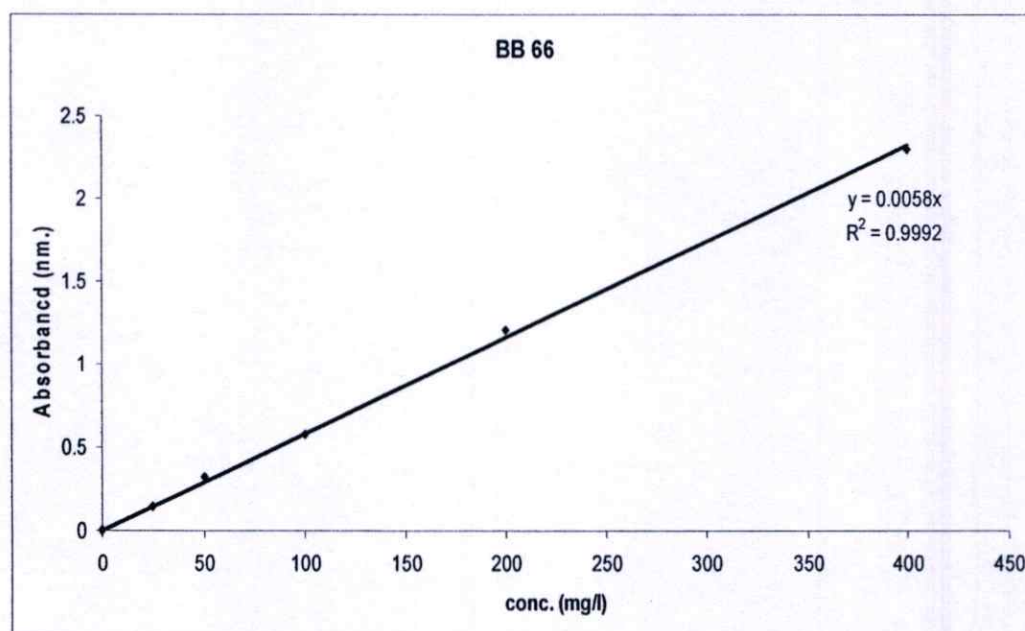
## ภาคผนวก จ

## เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีส้ม

ตารางที่ จ-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีส้ม BB 66 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง (nm.)
25	0.14
50	0.32
100	0.58
200	0.12*
400	0.23*

หมายเหตุ \* เจือจางความเข้มข้น 10 เท่า

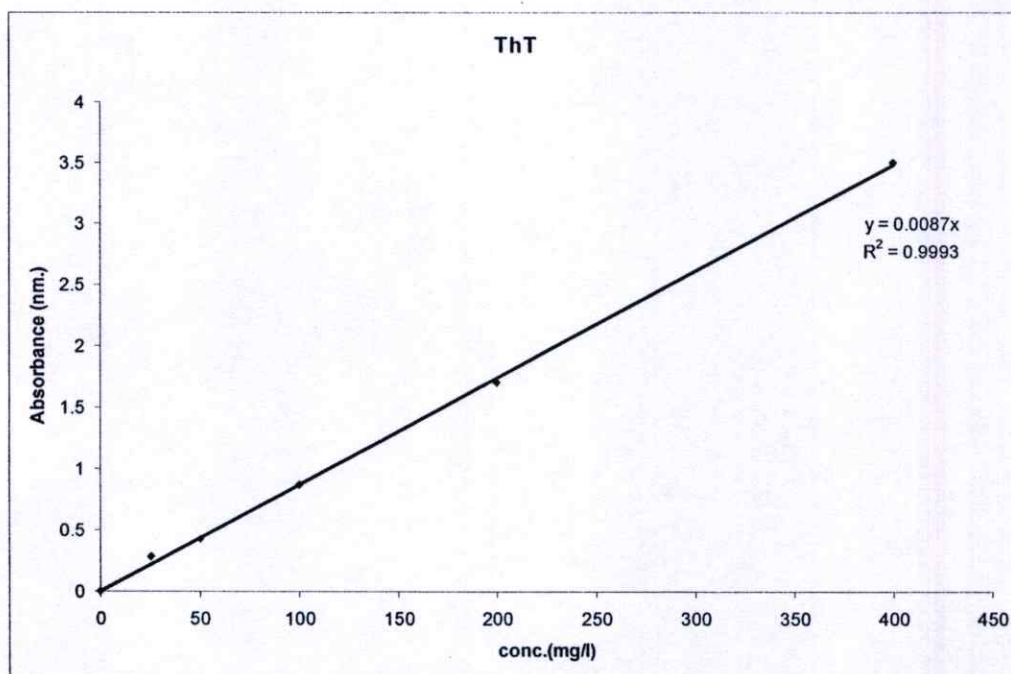


รูปที่ จ-1 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีส้ม BB 66

ตารางที่ จ-2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีข้อม ThT ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง (nm.)
25	0.28
50	0.42
100	0.87
200	0.17*
400	0.35*

หมายเหตุ \* เจือจางความเข้มข้น 10 เท่า

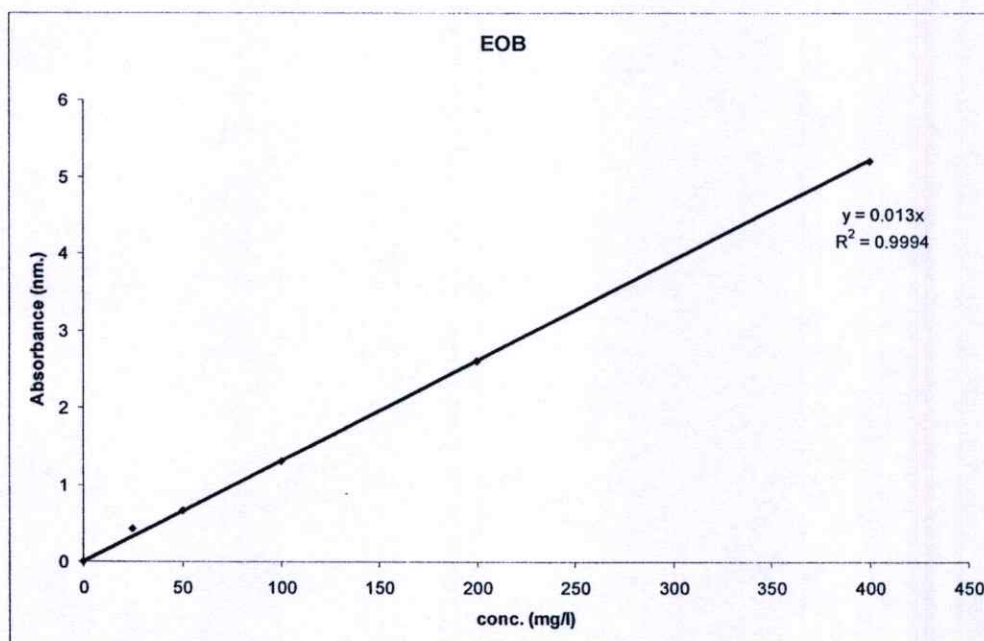


รูปที่ จ-2 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อม ThT

ตารางที่ จ-3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีข้อม EOB ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง (nm.)
25	0.43
50	0.65
100	0.13*
200	0.26*
400	0.52*

หมายเหตุ \* เจือจางความเข้มข้น 10 เท่า



รูปที่ จ-3 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อม EOB

## ภาคผนวก ฉ

## ข้อมูลแสดงค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลาย สีย้อมหลังการดูดซับ

**ตารางที่ ฉ-1** แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง (nm.)								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	0.23	0.19	0.19	0.48	0.41	0.38	0.99	0.87	0.86
Al-pill-st 0.4-400	0.14	0.07	0.06	0.30	0.17	0.17	0.62	0.38	0.36
Al-pill-so 0.4-400	0.07	0.01	0.01	0.21	0.04	0.04	0.41	0.11	0.10
Al-pillst 0.4-500	0.13	0.06	0.06	0.29	0.17	0.17	0.61	0.36	0.35
Al-pill-so 0.4-500	0.06	0.01	0.01	0.20	0.04	0.04	0.40	0.11	0.10

**ตารางที่ ฉ-2** ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	39.65	32.76	32.76	82.76	70.69	65.52	170.69	150.00	148.27
Al-pill-st 0.4-400	24.14	12.07	10.34	51.72	29.31	29.31	106.90	65.52	62.07
Al-pill-so 0.4-400	12.07	1.71	1.72	36.21	6.90	6.90	70.69	18.96	17.24
Al-pill-st 0.4-500	22.41	10.34	10.34	50.00	29.31	29.31	105.17	62.07	60.34
Al-pill-so 0.4-500	10.34	1.72	1.72	65.52	6.90	6.90	69.96	18.96	17.24

ตารางที่ ๓-3 ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ถูกดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	10.34	17.24	17.24	17.24	29.31	34.48	29.31	50.00	51.72
Al-pill-st 0.4-400	25.86	37.96	39.65	48.27	70.69	70.69	93.10	134.48	137.93
Al-pill-so 0.4-400	37.93	48.27	48.27	63.79	93.10	93.10	129.31	181.03	182.76
Al-pill-st 0.4-500	27.59	39.65	39.65	50.00	70.69	70.69	94.83	137.93	139.65
Al-pill-so 0.4-500	39.65	48.27	48.27	65.52	93.10	93.10	131.03	181.03	182.76

ตารางที่ ๓-4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม ThT หลังการดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง (nm.)								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	0.35	0.31	0.31	0.77	0.70	0.69	0.16*	0.15*	0.15*
Al-pill-st 0.4-400	0.24	0.18	0.18	0.60	0.42	0.41	0.13*	0.98	0.98
Al-pill-so 0.4-400	0.15	0.07	0.05	0.35	0.22	0.21	0.85	0.64	0.61
Al-pill-st 0.4-500	0.24	0.18	0.17	0.61	0.41	0.41	0.13*	0.10*	0.99
Al-pill-so 0.4-500	0.14	0.06	0.05	0.34	0.22	0.21	0.84	0.63	0.62

หมายเหตุ \* เจือจางสารละลายสีย้อม 10 เท่า

ตารางที่ ๕-5 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม ThT หลังการดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	40.23	35.63	35.63	88.50	80.45	79.31	183.91	172.41	172.41
Al-pill-st 0.4-400	27.59	20.69	20.69	68.96	48.27	47.13	149.42	112.64	112.64
Al-pill-so 0.4-400	17.24	8.04	5.75	40.23	25.29	24.14	97.70	73.56	70.11
Al-pill-st 0.4-500	27.59	20.69	19.54	70.11	47.13	47.13	149.42	114.94	113.79
Al-pill-so 0.4-500	16.09	6.90	5.75	39.08	25.29	24.14	96.55	72.41	84.61

ตารางที่ ๕-6 ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ThT ที่ถูกดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	9.77	14.37	14.37	11.49	19.54	20.69	16.09	27.59	27.59
Al-pill-st 0.4-400	22.41	29.31	29.31	31.03	51.72	52.87	50.57	87.36	87.36
Al-pill-so 0.4-400	32.76	41.95	44.25	59.77	74.71	75.86	102.30	126.44	129.88
Al-pill-st 0.4-500	22.41	29.31	25.38	29.88	52.87	52.87	50.57	85.06	86.21
Al-pill-so 0.4-500	33.91	43.10	40.77	60.92	74.71	75.86	103.45	127.59	128.73

ตารางที่ ๗-7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายซีรัม EOB หลังการดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง (nm.)								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	0.57	0.51	0.50	0.12*	0.11*	0.11*	0.25*	0.23*	0.23*
Al-pill-st 0.4-400	0.44	0.35	0.34	0.95	0.78	0.76	0.21*	0.18*	0.17*
Al-pill-so 0.4-400	0.22	0.14	0.12	0.64	0.37	0.35	0.15*	0.11*	0.11*
Al-pill-st 0.4-500	0.44	0.34	0.32	0.94	0.76	0.75	0.20*	0.17*	0.16*
Al-pill-so 0.4-500	0.23	0.12	0.12	0.63	0.36	0.34	0.15*	0.11*	0.11*

หมายเหตุ \* เจือจางสารละลายซีรัม 10 เท่า

ตารางที่ ๗-8 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายซีรัม EOB หลังการดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายซีรัม								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	43.85	39.23	38.46	92.31	84.61	84.61	192.31	176.92	176.92
Al-pill-st 0.4-400	33.85	26.92	26.15	73.08	60.00	58.46	161.54	138.46	130.77
Al-pill-so 0.4-400	16.92	10.77	9.23	49.23	28.46	26.92	115.38	84.61	84.61
Al-pill-st 0.4-500	33.85	26.15	24.61	72.31	58.46	57.69	153.85	130.77	123.08
Al-pill-so 0.4-500	17.69	9.23	9.23	48.46	27.69	26.15	115.38	84.61	84.61

ตารางที่ ๑-๑ ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม EOB ที่ถูกดูดซับด้วย MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม								
	50 mg/l			100 mg/l			200 mg/l		
	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	30 นาที	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง
MMT	6.15	10.77	11.54	7.69	15.38	15.38	7.69	23.08	23.08
Al-pill-st 0.4-400	16.15	23.08	23.85	26.92	40.00	41.54	38.46	61.54	69.23
Al-pill-so 0.4-400	33.07	39.23	40.77	50.77	71.54	73.08	84.61	115.38	115.38
Al-pill-st 0.4-500	16.15	23.85	25.38	27.69	41.54	42.31	46.15	69.23	76.92
Al-pill-so 0.4-500	32.31	40.77	40.77	51.54	72.31	73.85	84.61	115.38	115.38

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม

ตารางที่ ข-1 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)
MMT	39.65	5.17	82.76	8.62	170.69	14.65
Al-pill-st 0.4-400	24.14	12.93	51.72	25.00	106.90	47.41
Al-pill-so 0.4-400	12.07	18.96	36.21	32.76	70.69	65.52
Al-pill-st 0.4-500	22.41	13.79	50.00	24.14	105.17	46.55
Al-pill-so 0.4-500	10.34	19.83	65.52	31.90	69.96	64.65

ตารางที่ ข-2 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 1 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)
MMT	32.76	8.62	70.69	14.65	150.00	25.00
Al-pill-st 0.4-400	12.07	18.96	29.31	35.34	65.52	67.24
Al-pill-so 0.4-400	1.71	24.14	6.90	46.55	18.96	90.52
Al-pill-st 0.4-500	10.34	19.83	29.31	35.34	62.07	68.96
Al-pill-so 0.4-500	1.72	24.14	6.90	46.55	18.96	90.52

ตารางที่ ข-3 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)
MMT	32.76	8.62	65.52	17.24	148.27	25.86
Al-pill-st 0.4-400	10.34	19.83	29.31	35.34	62.07	68.96
Al-pill-so 0.4-400	1.72	24.14	6.90	46.55	17.24	91.38
Al-pill-st 0.4-500	10.34	19.83	29.31	35.34	60.34	69.83
Al-pill-so 0.4-500	1.72	24.14	6.90	46.55	17.24	91.38

ตารางที่ ข-4 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)
MMT	40.23	4.88	88.50	5.75	183.91	8.04
Al-pill-st 0.4-400	27.59	11.21	68.96	15.52	149.42	25.89
Al-pill-so 0.4-400	17.24	16.38	40.23	29.88	97.70	51.15
Al-pill-st 0.4-500	27.59	11.21	70.11	14.94	149.42	25.29
Al-pill-so 0.4-500	16.09	16.95	39.08	30.46	96.55	51.72

ตารางที่ ข-5 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ MMT และ

Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 1 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)
MMT	35.63	7.18	80.46	9.77	172.41	13.79
Al-pill-st 0.4-400	20.69	14.65	48.27	25.86	112.64	43.68
Al-pill-so 0.4-400	8.04	20.98	25.29	37.36	73.56	63.22
Al-pill-st 0.4-500	20.69	14.65	47.13	26.44	114.94	42.53
Al-pill-so 0.4-500	6.70	21.55	25.29	37.36	72.41	63.79

ตารางที่ ข-6 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม ThT ของ MMT และ

Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)
MMT	35.63	7.18	79.31	10.34	172.41	13.79
Al-pill-st 0.4-400	20.69	14.65	47.13	26.44	112.64	43.68
Al-pill-so 0.4-400	5.75	22.13	24.14	37.93	70.11	64.94
Al-pill-st 0.4-500	19.54	15.23	47.13	26.44	113.79	43.10
Al-pill-so 0.4-500	5.75	22.13	24.14	37.93	84.61	64.37

ตารางที่ ข-7 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 30 นาที

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)
MMT	43.85	3.08	92.31	3.85	192.31	3.85
Al-pill-st 0.4-400	33.85	8.08	73.08	13.46	161.54	19.23
Al-pill-so 0.4-400	16.92	16.54	49.23	25.38	115.38	42.31
Al-pill-st 0.4-500	33.85	8.08	72.31	13.85	153.85	23.08
Al-pill-so 0.4-500	17.69	16.15	48.46	25.77	115.38	42.31

ตารางที่ ข-8 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม EOB ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 1 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)	$C_t$ (mg/l)	$q_t$ (mg/g)
MMT	39.23	5.38	84.61	7.69	176.92	11.54
Al-pill-st 0.4-400	26.92	11.54	60.00	20.00	138.46	30.77
Al-pill-so 0.4-400	10.77	19.61	28.46	35.77	84.61	57.69
Al-pill-st 0.4-500	26.15	11.92	58.46	20.77	130.77	34.61
Al-pill-so 0.4-500	9.23	20.38	27.69	36.15	84.61	57.69

ตารางที่ ๙-๑ ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีข้อม EOB ของ MMT และ Al-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมง

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายสีข้อม					
	50 (mg/l)		100 (mg/l)		200 (mg/l)	
	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)	$C_i$ (mg/l)	$q_i$ (mg/g)
MMT	38.46	5.77	84.61	7.69	176.92	11.54
Al-pill-st 0.4-400	26.15	11.92	58.46	20.77	130.77	34.61
Al-pill-so 0.4-400	9.23	20.38	26.92	36.54	84.61	57.69
Al-pill-st 0.4-500	24.61	12.69	57.69	21.15	123.08	38.46
Al-pill-so 0.4-500	9.23	20.38	26.15	36.92	84.61	57.69

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวประภาพร ล้อมเรื่องธรรม  
ภูมิลำเนา นครศรีธรรมราช  
ที่อยู่ 48 ซ.มิตรสัมพันธ์ ถนนพัฒนาการคูขวาง ตำบลในเมือง อำเภอเมือง  
จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000  
การศึกษา -ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนโยธินบำรุง  
-ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เอกเคมี)  
คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี