

การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์  
ชนิดแมกนีไทต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม

**MODIFICATION OF MONTMORILLONITE STRUCTURE  
WITH MAGNETITE BY HYDROTHERMAL METHOD  
FOR DYES CONTAINING WASTEWATER TREATMENT**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์  
ชนิดแมกนีไทต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม

MODIFICATION OF MONTMORILLONITE STRUCTURE  
WITH MAGNETITE BY HYDROTHERMAL METHOD  
FOR DYES CONTAINING WASTEWATER TREATMENT



นางสาวจุฑามาศ  
นางสาวภัทรกร  
นายธัญญ์พศุทธิ์

เที่ยงธรรม  
ศรีชัยมูล  
รอดบุญลือ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการปีการศึกษา 2557 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODIFICATION OF MONTMORILLONITE STRUCTURE WITH  
MAGNETITE BY HYDROTHERMAL METHOD FOR DYES CONTAINING  
WASTEWATER TREATMENT



Miss JUTHAMAS THIENGTHUM  
Miss PHATARAKRON SRICHAIMOOL  
Mr. THANPHASUT RODBOONLUA

A SPECIAL PROJECT SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนตมอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม

MODIFICATION OF MONTMORILLONITE STRUCTURE WITH MAGNETITE BY HYDROTHERMAL METHOD FOR DYES CONTAINING WASTEWATER TREATMENT

ชื่อนักศึกษา

นางสาวจุฑามาศ เทียงธรรม รหัสนักศึกษา 54050150

นางสาวภัทรกร ศรีชัยมูล รหัสนักศึกษา 54050238

นายธัญย์พศุทธิ์ รอดบุญลือ รหัสนักศึกษา 54050292

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี




ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา ถตวิรุฬห์ ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจุฑามาศ เทียงธรรม	รหัสนักศึกษา 54050150
	นางสาวภัทรกร ศรีชัยมูล	รหัสนักศึกษา 54050238
	นายธัญย์พศุตม์ รอดบุญลือ	รหัสนักศึกษา 54050292
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
สาขาวิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน	

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ (Fe-MMT) โดยวิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation) โดยใช้สารละลายเหล็กผสมระหว่างสารละลายแอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต  $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$  และสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต  $(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$  ที่อัตราส่วนโดยโมล  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  เป็น 1:1 และ 1:2 จากนั้นนำแร่ดินเหนียวเหล็กที่เตรียมได้ไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์วัสดุประกอบ Fe-MMT จากผลการสังเคราะห์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กผสม ส่งผลให้ปริมาณของเหล็กออกไซด์ในโครงสร้าง MMT เพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างชั้นของ MMT จึงกว้างขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของแร่ดินเหนียว MMT มีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลจาก 80 °C เป็น 100 °C ส่งผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกแมกนีไทต์ในโครงสร้างของ MMT เมื่อเปรียบเทียบระบบสังเคราะห์ที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเหล็กผสมที่แตกต่างกัน พบว่าผลิตภัณฑ์จากระบบที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลเป็น 1:2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าระบบ 1:1 เนื่องจากมีปริมาณของไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  ในระบบสารละลายมากกว่าแร่ดินเหนียวดัดแปรโครงสร้าง Fe-MMT ที่สังเคราะห์ได้สามารถแสดงพฤติกรรมซูเปอร์พาราแมกเนติกได้ โดย Fe-MMT ที่สังเคราะห์จากระบบ 1:2 มีค่าสมบัติแม่เหล็กแบบซูเปอร์พาราแมกเนติกมากกว่า Fe-MMT จากระบบ 1:1 เมื่อนำวัสดุประกอบ Fe-MMT ไปทดสอบการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูและรีแอกทีฟออร์เรนจ์ 16 ที่ระยะเวลาในการดูดซับเป็น 2 ชั่วโมง พบว่าวัสดุประกอบ Fe-MMT ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งมีค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูมากกว่า 90% แต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟออร์เรนจ์ 16 ดังนั้นจึงพัฒนาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟออร์เรนจ์ 16 ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ( $\text{Fe-MMT}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) พบว่าวัสดุประกอบ Fe-MMT สามารถเร่งปฏิกิริยาเฟนตันได้ เมื่อ

เพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กผสมในการสังเคราะห์ Fe-MMT เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟออเรนจ์ 16 เพิ่มขึ้นและมีค่าร้อยละการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 35.18%

คำสำคัญ : มอนต์มอริลโลไนต์ แมกนีไทต์ วิธีการทำให้ชุ่ม ปฏิกิริยาเฟนตัน ไฮโดรเทอร์มอล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Modification of montmorillonite structure with magnetite by hydrothermal method for dyes containing wastewater treatment	
<b>Students</b>	Miss Juthamas Thiengthum	Student ID 54050150
	Miss Phatarakron Srichaimool	Student ID 54050238
	Mr. Thanphasut Rodboonlua	Student ID 54050292
<b>Degree</b>	Bachelor of science (Industrial Chemistry)	
<b>Department</b>	Chemistry	
<b>Academic Year</b>	2014	
<b>Aavisor</b>	Asst. Prof. Dr. Punnama Siriphannon	

### ABSTRACT

This research work studied on modification of montmorillonite structure with magnetite (Fe-MMT) by impregnation method using a mixture solution of ammonium ferrous sulfate hexahydrate ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>FeSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O; Fe<sup>2+</sup>) and ferric chloride (FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O; Fe<sup>3+</sup>), in which the molar ratios of Fe<sup>2+</sup>:Fe<sup>3+</sup> were maintained at 1:1 and 1:2. The as-prepared MMT-iron samples were hydrothermally reacted with sodium hydroxide solution at 80 °C and 100 °C for 2 hours to obtain Fe-MMT composites. It was found that the increase of initial concentration of iron mixtures resulted in the increase of iron oxide content in the MMT structure, therefore, the interlayer spacing of MMT was broadened and the specific surface area and pore volume of MMT were increased. The increase of hydrothermal temperature from 80 °C to 100 °C brought about the perfect crystalline magnetite in the MMT structure. When compare the synthesis systems using different molar ratios of iron mixtures, the products from the 1:2 molar ratio system possessed higher specific surface area and pore volume than those from the 1:1 molar ratio system due to the higher dosage of Fe<sup>3+</sup> in the solution system. The modified Fe-MMT exhibited as superparamagnetic materials. The Fe-MMT composites from the 1:2 molar ratio system possessed superparamagnetism higher than those from the 1:1 molar ratio system. The Fe-MMT products were used in the 2 hours-batch adsorption for removal of methylene blue (MB) and reactive orange 16 (RO16). It was found that the removal capacities of Fe-MMT

composites for MB were >90%, but they could not eliminate the reactive orange 16 (RO16). The RO16 removal ability could be improved using Fenton reaction (Fe-MMT/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). It was found that the Fe-MMT composites could act as the catalyst for Fenton reaction. The increase of initial concentration of iron mixtures used in the syntheses of Fe-MMT products resulted in the increase of RO16 removal efficiency in which the highest removal ability was 35.18%.

**Keywords :** Montmorillonite, Magnetite, Impregnation, Fenton reaction, Hydrothermal



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำโครงการพิเศษนี้ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ คณะกรรมการจาก ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ตรวจสอบ และให้คำแนะนำ รวมถึงชี้แนะแนวทางในการจัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องและ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณนางสาวพัชร์วิภา เขาว์พานิช นางสาวปรัชญาพร เทพมะที และ นางสาวยุวันดา เอี่ยมเผ่าจีน ที่คอยให้คำปรึกษา แนวทางในการทำโครงการพิเศษ และการดูแลเอาใจ ใส่อย่างใกล้ชิด รวมถึงเป็นกำลังใจให้คณะผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ คณะผู้วิจัยตลอดจนโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวจุฑามาศ เทียงธรรม  
นางสาวภัทรกร ศรีชัยมูล  
นายธันย์พศุทธิ์ รอดบุญลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 แร่ดินเหนียว (Clay).....	4
2.1.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	5
2.1.2 หน่วยประกอบพื้นฐานของเคลย์ .....	6
2.1.3 พิลลาร์เคลย์ (Pillared clay).....	7
2.2 ชนิดของเหล็กออกไซด์ .....	8
2.3 แม่เหล็ก .....	12
2.3.1 สภาวะแม่เหล็กและผนังโดเมนแม่เหล็ก.....	12
2.3.2 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนแม่เหล็ก.....	12
2.3.3 ประเภทของสภาวะแม่เหล็ก.....	12
2.3.4 สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนาโน.....	14
2.4 สีย้อม (Dyes) .....	15
2.4.1 ความหมายของสีย้อม.....	15
2.4.2 ประเภทของสีย้อม .....	15
2.4.3 สีย้อมรีแอคทีฟออเรนจ์ 16 (Reactive orange 16).....	17
2.5 วิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม .....	19
2.6 การดูดซับ (Adsorption).....	19
2.6.1 หลักการดูดซับ .....	19
2.6.2 ประเภทของสารดูดซับ .....	20
2.6.3 ประเภทของการดูดซับ .....	20
2.6.4 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี .....	21
2.6.5 กลไกการดูดซับ .....	21
2.6.6 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ .....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ .....	22
2.7 ปฏิกริยาเฟนตัน .....	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	24
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>27</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	27
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	28
3.3.1 การกำจัดสิ่งเจือปนในแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเครื่อง อัลตราโซนิก .....	28
3.3.2 การสังเคราะห์แมกนีไทต์ (Magnetite) บริสุทธิ์ .....	28
3.3.3 การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ ชนิดแมกนีไทต์ โดยวิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation) .....	29
3.3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ .....	34
3.3.5 ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพของ Fe-MMT ในการดูดซับสีย้อม ประเภทในระบบน้ำเสียจำลอง .....	34
3.3.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีเมทิลีนบลู .....	34
3.3.5.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของรีแอกทีฟโอเร็นจ์ 16 .....	35
3.3.5.3 ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการดูดซับ .....	35
3.3.5.4 ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม รีแอกทีฟโอเร็นจ์ 16 ด้วยกระบวนการดูดซับ .....	36
3.3.5.5 ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม รีแอกทีฟโอเร็นจ์ 16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction) .....	37
3.3.5.6 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโอเร็นจ์ 16 ..	38
3.3.5.7 การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) .....	40
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>42</b>
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และ .....	42
มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง (Fe-MMT)	
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของ MMT และ Fe-MMT .....	42
4.1.2 ภูมิภาคผลึกของเหล็กออกไซด์ MMT และ Fe-MMT .....	43
4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊ส .....	49
4.1.4 สมบัติความเป็นแม่เหล็กโดยใช้เทคนิคการสั่นของวัสดุในสนามแม่เหล็ก .....	50
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับและการกำจัดสีย้อม .....	53
4.2.1 การกำจัดของสีย้อม Methylene Blue .....	53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive orange 16.....	54
4.2.2.1 การกำจัดสีย้อม Reactive orange 16 ด้วยกระบวนการดูดซับ....	54
4.2.2.2 การกำจัดสีย้อม Reactive orange 16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน.....	55
4.3 การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration).....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
เอกสารอ้างอิง .....	60
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก.....	64
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติต่างๆของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ 3 กลุ่ม.....	5
3.1 การสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทด์บริสุทธิ์ที่สภาวะต่างๆ.....	28
3.2 การเตรียม Fe-MMT ที่สภาวะต่างๆ.....	29
3.3 ชนิดของสารดูดซับที่ใช้ทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของสีย้อม MB ด้วยกระบวนการดูดซับ.....	35
3.4 ชนิดของสารดูดซับที่ใช้ทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของสีย้อม RO16 ด้วยกระบวนการดูดซับ...	36
3.5 ชนิดของสารดูดซับที่ใช้ทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของสีย้อม RO16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน .... (Fenton reaction)	37
3.6 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 .... ด้วยกระบวนการดูดซับ	38
3.7 ศึกษาอิทธิพลระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 .. โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน	39
3.8 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 ..... โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน	40
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ MMT และ Fe-MMT ที่เตรียมในสภาวะต่างๆ.....	42
4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน BJH ของ MMT และ Fe-MMT.....	49
4.3 ค่าแมกนีไทเซชันสูงสุด ( $M_{max}$ ) ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง ( $M_r$ )..... และค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ( $H_c$ )	52
4.4 ผลการดูดซับสีย้อม MB ของสารตัวอย่าง MMT และ Fe-MMT ..... ด้วยกระบวนการดูดซับ	53
4.5 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของสารตัวอย่าง Fe-MMT ด้วยกระบวนการดูดซับ.....	54
4.6 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	54
4.7 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของสารตัวอย่าง Fe-MMT โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน.....	55
4.8 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของ 0.5:1.0M Fe-MMT100 + 10% $H_2O_2$ ..... ที่มีปริมาณสารดูดซับและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน	56
4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม RO16 โดยเปรียบเทียบสารดูดซับใหม่ ..... และสารดูดซับที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)	57
ข-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อม MB ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	76
ข-2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	77
ค-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม MB.....	78
ค-2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม RO16.....	78
ค-3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม RO16 ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ..... ที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยกระบวนการดูดซับ	78
ค-4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม RO16 ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ..... ที่มีปริมาณสารตัวอย่างและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน	79

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	6
2.2 หน่วยประกอบพื้นฐานของเคลย์ .....	7
2.3 พิลลาร์เคลย์ (Pillared clay).....	8
2.4 ผลึกระบบเฮกซะโกนอลของฮีมาไทต์ .....	8
2.5 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฮีมาไทต์.....	9
2.6 ผลึกแบบระบบบรอมไบฮีดรอลของแมกนีไซต์ .....	10
2.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแมกนีไซต์ .....	10
2.8 รูปผลึกระบบไอโซเมทริกแบบออกตะฮีดรอลของแมกนีไทต์.....	11
2.9 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแมกนีไทต์.....	11
2.10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุแม่เหล็ก.....	12
2.11 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนแม่เหล็ก .....	12
2.12 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กพารา .....	13
2.13 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร.....	13
2.14 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์รี.....	14
2.15 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์โร .....	14
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้ม ของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุต่างๆ .....	15
2.17 สูตรโครงสร้างของ Reactive orange 16.....	18
2.18 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับไปยังตัวดูดซับ .....	22
3.1 แผนภาพขั้นตอนในการกำจัดสิ่งเจือปนของแเรดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์.....	31
3.2 แผนภาพขั้นตอนในการสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์บริสุทธิ์ในอัตราส่วนของ $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ เท่ากับ 1:2 .....	32
3.3 แผนภาพขั้นตอนในการเตรียม Fe-MMT ในอัตราส่วนของ $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ เท่ากับ 1:2 .....	33
4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเหล็กออกไซด์ของระบบสารละลายเหล็กผสม..... $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 .....	44
4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเหล็กออกไซด์ของระบบสารละลายเหล็กผสม..... $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ ในอัตราส่วนโดยโมล 1:2 .....	45
4.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT.....	46
4.4 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ . ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 .....	47
4.5 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม $Fe^{2+} : Fe^{3+}$ . ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 และ 1:2 .....	48
4.6 กราฟ M-H Curve เหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ .....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กราฟ M-H Curve ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$ ..... ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1	51
4.8 กราฟ M-H Curve ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$ ..... ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:2	51
ก-1 พื้นที่ผิวจำเพาะของ MMT .....	64
ก-2 ขนาดรูพรุน BJH ของ MMT .....	65
ก-3 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 1.5:1.5M Fe-MMT100.....	66
ก-4 ขนาดรูพรุน BJH ของ 1.5:1.5M Fe-MMT100 .....	67
ก-5 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 2.0:2.0M Fe-MMT100.....	68
ก-6 ขนาดรูพรุน BJH ของ 2.0:2.0M Fe-MMT100 .....	69
ก-7 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 0.5:1.0M Fe-MMT100.....	70
ก-8 ขนาดรูพรุน BJH ของ 0.5:1.0M Fe-MMT100 .....	71
ก-9 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 1.0:2.0M Fe-MMT100.....	72
ก-10 ขนาดรูพรุน BJH ของ 1.0:2.0M Fe-MMT100 .....	73
ก-11 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 1.5:3.0M Fe-MMT100.....	74
ก-12 ขนาดรูพรุน BJH ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 .....	75
ข-1 เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม MB .....	76
ข-2 เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม RO16 .....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมสิ่งทอโดยเฉพาะในกระบวนการฟอกย้อม มีการใช้น้ำและสีย้อมเป็นจำนวนมาก และในขั้นตอนกระบวนการการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ยังไม่มีเทคโนโลยีที่ใช้สีย้อมในการย้อมผ้าหรือพิมพ์ผ้าได้ทั้งหมดร้อยเปอร์เซ็นต์ จึงทำให้สีย้อมส่วนที่เหลือเจือปนอยู่ในน้ำทิ้ง ซึ่งสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มแม้จะปนเปื้อนอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำทิ้งมีสีเข้มได้ อีกทั้งสีย้อมยังเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งเพื่อให้ น้ำทิ้งมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ก่อนที่จะปล่อยออกสู่บริเวณภายนอกโรงงานหรือลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมมีอยู่หลากหลายวิธีที่ให้ประสิทธิภาพดี เช่น การกรองด้วยแผ่นเลือกผ่าน (Membrane Filtration) การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone Treatment) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีกระบวนการที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายที่สูง

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีที่ง่ายและประหยัดพลังงานมาใช้ โดยการนำแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT) มาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์มีแหล่งวัตถุดิบในประเทศไทย จึงเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก อีกทั้งแร่ดินเหนียวมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ ซึ่งชั้นผลึกเหล่านี้มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบและมีไอออนบวกแทรกอยู่ระหว่างชั้นเพื่อทำหน้าที่ยึดชั้นของแร่ดินเหนียวเอาไว้ด้วยกัน ซึ่งไอออนบวกนี้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนบวกชนิดอื่นได้ จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าวทำให้แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามขนาดช่องว่างระหว่างชั้น (Interlayer) โครงสร้างของแร่ดินเหนียวนั้นมีขนาดเล็กมากประมาณ 1.3 นาโนเมตร จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไม่ค่อยสูงเท่าใดนัก เนื่องจากสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ จึงแพร่เข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวได้ไม่มากนัก

งานวิจัยนี้จึงทำการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ โดยการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียว (Fe-MMT) โดยวิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation) ด้วยสารละลายเหล็กผสมระหว่าง  $Fe^{2+}$  กับ  $Fe^{3+}$  และใช้วิธีการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อทำให้เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์เกิดภายในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้าง (Fe-MMT)

โดยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ทำให้ขนาดช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้าง (Interlayer) ของแร่ดินเหนียวกว้างขึ้น จึงมีความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลใหญ่ได้มากขึ้น นอกจากนี้เหล็ก

ออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตัน (Fenton process) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ เช่น สีย้อม ได้อีกด้วย

นอกจากนั้นเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ยังมีสมบัติแม่เหล็ก ทำให้แร่ดินเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ (Fe-MMT) สามารถใช้แม่เหล็กเป็นตัวช่วยในการแยกได้ด้วยกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสารดัดแปรโครงสร้างเหล็กมีเสถียรภาพทางความร้อน ทนต่อความดันและสารเคมี ทำให้แร่ดินเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ (Fe-MMT) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

โดยแร่ดินเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้าง (Fe-MMT) เตรียมได้จาก  $Fe^{2+}$  กับ  $Fe^{3+}$  ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 และ 1:2 ในสภาวะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กผสมและอุณหภูมิในการไฮโดร-เทอร์มอลที่แตกต่างกัน ซึ่งผลผลิตที่ได้นำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคต่างๆ และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีการดูดซับและปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยมีปัจจัยศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก
2. ตรวจสอบคุณสมบัติแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ด้วยเทคนิค XRD, XRF, VSM และ BET
3. ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม โดยมีปัจจัยศึกษา ได้แก่
  - a. สภาวะของสารดูดซับ
    - แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์
    - แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทด์ ร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์เหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์และดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์
2. แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสี้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีราคาไม่แพง
3. สามารถนำแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แร่ดินเหนียว [1]

คำว่าแร่ดินเหนียว (Clay mineral) หมายถึงกลุ่มแร่อะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate minerals) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นซิลิกา (Silica sheet) และแผ่นอะลูมินา (Alumina sheet) ซ้อนกันแบบ 1:1 หรือ 2:1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. **เคโอลิไนต์ (Kaolinite)** เป็นแร่ดินเหนียวแบบ 1:1 คือมีแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่นประกบแผ่นทับแผ่นอะลูมินาอีกหนึ่งแผ่น ประกอบเป็น 1 หน่วย แผ่นโครงสร้างมีความหนา 7 อังสตรอม มีพันธะระหว่างผลึกเป็นพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกาะกันอย่างเหนียวแน่น ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นผลึกแคบและขยายออกไม่ได้ ซึ่งแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

2. **สเมกไทต์ (Smectite)** เป็นแร่ดินเหนียวแบบ 2:1 คือมีแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ประกบแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น ประกอบเป็น 1 หน่วย แผ่นโครงสร้างและระยะห่างระหว่างแผ่นที่ซ้อนทับกันมีความหนา 9-21 อังสตรอม มีพันธะระหว่างผลึกที่ไม่เป็นพันธะไฮโดรเจน แต่เกิด Oxygen-oxygen linkage ที่มีแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อนๆ โมเลกุลของน้ำและไอออนบวกต่างๆ สามารถแทรกเข้าไปอุดช่องอยู่ที่ผิวภายในโครงสร้างได้ง่าย ทำให้เกิดการพองตัวและเมื่อมีการระเหยเอาน้ำออกแล้วจะมีการหดตัว สเมกไทต์มีสูตรทางเคมีที่ซับซ้อนและไม่แน่นอน สูตรที่เสถียร ได้แก่ Pyrophyllite คือ  $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  แร่ดินเหนียวสเมกไทต์นี้มีอยู่หลายชนิด แต่ที่พบมากที่สุดคือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT)

3. **อิลไลต์ (Illite or hydrous mica)** มีการจัดตัวแบบ 2:1 เช่นเดียวกับกลุ่มสเมกไทต์แต่ในโครงสร้างมีโพแทสเซียมอยู่ทำให้ขยายตัวและหดตัวได้น้อย แผ่นโครงสร้างและระยะห่างระหว่างแผ่นที่ซ้อนทับกันมีความหนา 10 อังสตรอม มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{K}_{1.33}(\text{Si}_{6.66}\text{Al}_{1.33})\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

แร่ดินเหนียวที่สำคัญที่ถูกนำมาพัฒนาสู่เทคโนโลยีนาโนเคลย์และนาโนคอมโพสิต ต้องเป็นกลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีจุดเด่น คือมีโครงสร้างผลึกที่เป็นแผ่นหรืออาจเป็นชั้นเรียงซ้อนทับกัน โดยชั้นผลึกเหล่านี้ต้องมีความยึดหยุ่นและมีความเป็นขั้ว (Polarity) ซึ่งสมบัติของแร่ดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 2.1 โดยแร่ดินเหนียวที่นำมาพัฒนามากที่สุดอยู่ในกลุ่มของแร่ดินเหนียวสเมกไทต์ (Smectite) คือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ 3 กลุ่ม [2]

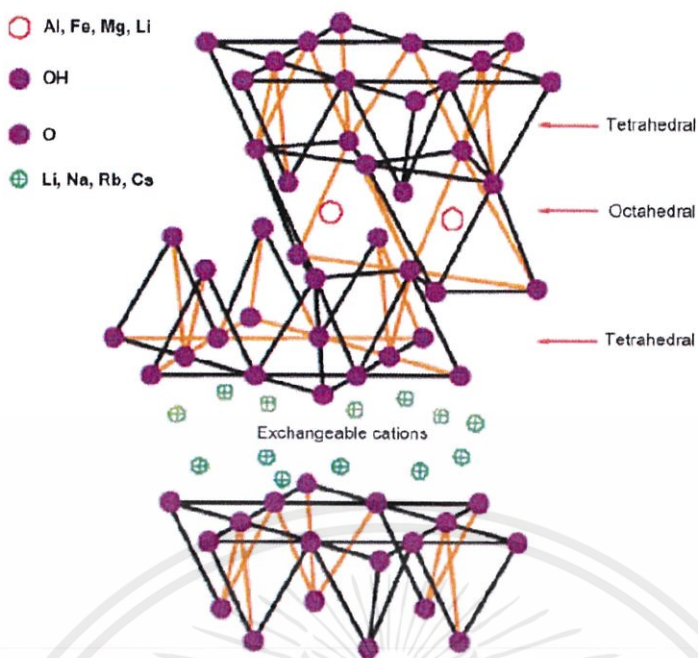
สมบัติ	กลุ่มของแร่ดินเหนียว		
	เคโอลิไนต์	สเมกไทต์	อิลไลต์
ขนาดของผลึก ( $\mu\text{m}$ )	0.1 - 5.0	0.01 - 1.0	0.1 - 2.0
รูปร่าง	แผ่นบาง รูปหกเหลี่ยม	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ
พื้นที่ผิวภายนอก	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
พื้นที่ผิวภายใน	ต่ำ	สูงมาก	ปานกลาง
ความแข็งแรงและสภาพ พลาสติก	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
การขยายตัว	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	3 - 15	800 - 100	15 - 40

### 2.1.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT)

แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์จัดอยู่ในกลุ่มของแร่สเมกไทต์ (Smectite group) เป็นกลุ่มแร่ดินที่สามารถแสดงการขยายตัว (Expandsibility) เมื่อใส่น้ำหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างและมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีการเรียงตัวเป็นแผ่นซ้อนทับกันระหว่างชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอล (Silica tetrahedral sheet) และชั้นอะลูมินาออกตะฮีดรอล (Alumina octahedral sheet) ในอัตราส่วน 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยชั้นที่อยู่กลางเป็นชั้นอะลูมินาออกตะฮีดรอลมีประจุบวก (Cation) ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอลมีประจุลบ (Anion) ซึ่งใช้ออกซิเจนร่วมกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน เกิด Oxygen-oxygen linkage ที่มีแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อนๆ ระหว่างชั้นผลึกมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่า Interlayer ในช่องว่างนี้มีไอออนบวก เช่น โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) อยู่ที่บริเวณพื้นผิวภายในช่องว่าง และที่บริเวณนี้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไอออนบวกชนิดอื่นได้ แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์จึงเป็นที่นิยมนำมาพัฒนาสู่เทคโนโลยีนาโนเคลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



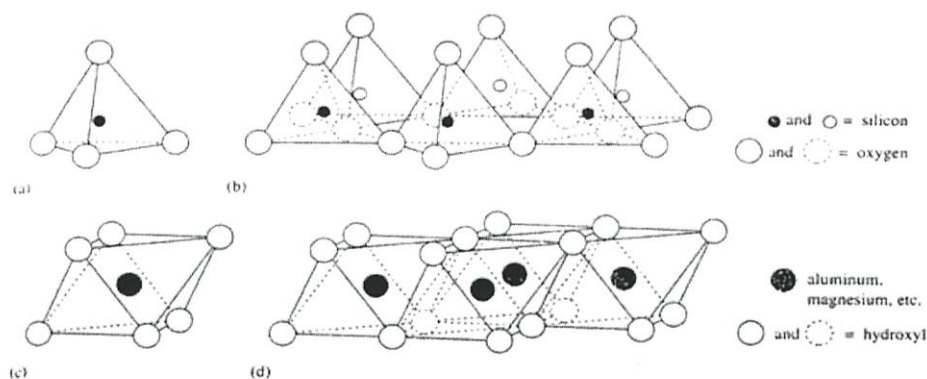
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [3]

### 2.1.2 หน่วยประกอบพื้นฐานของเคลย์ [1-2]

1. หน่วยซิลิกาเตตระฮีดรอล (Silica tetrahedral unit) ประกอบด้วยซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เกิดเป็นโครงสร้างทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) โครงสร้างแผ่นซิลิกา (Silica tetrahedral sheet) เกิดจาก Silica tetrahedral unit เชื่อมต่อกันเป็นแผ่นโปร่งที่มีรูตรงกลางรูปหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (b)

2. หน่วยอะลูมินาออกตะฮีดรอล (Alumina octahedral unit) ประกอบด้วยอะลูมิเนียม 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม เกิดเป็นโครงสร้างทรงแปดหน้า (Octahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (c) หน่วยโครงสร้างแผ่นอะลูมิเนียม (Alumina octahedral sheet) เกิดจาก Alumina octahedral unit เชื่อมต่อกันเป็นแผ่นแน่นทึบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 หน่วยประกอบพื้นฐานของเคลย์ [1]

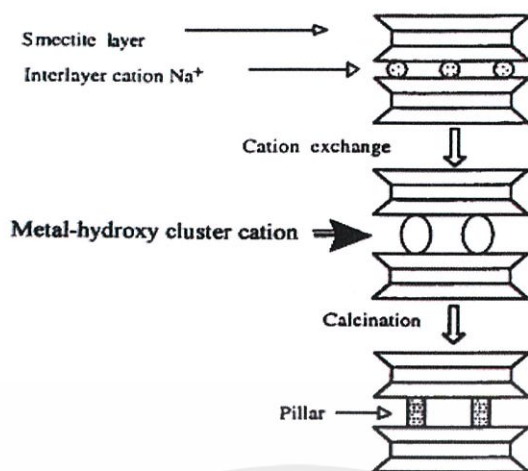
- (a) หน่วยซิลิกาเตตระฮีดรอล (b) แผ่นเตตระฮีดรอล  
(c) หน่วยอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล (d) แผ่นออกตะฮีดรอล

### 2.1.3 พิลลาร์เคลย์ (Pillared clay)

แร่ดินเหนียวสามารถนำมาตัดแปรรูปโครงสร้างได้ด้วยการแทรกสอดหรือแทนที่ ด้วยสารประกอบจำพวกสารอนินทรีย์ ซึ่งสารเหล่านี้จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างที่เป็นช่องว่างระหว่างชั้น (Interlayer) ของแร่ดินเหนียว โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไอออนบวกที่อยู่ภายในระหว่างชั้นดิน ซึ่งกระบวนการเกิดเป็นพิลลาร์เคลย์ คือการให้ความร้อนแก่ไอออนภายในโครงสร้างจะทำให้ไอออนนั้นเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพิลลาร์ (Pillar) ทำให้เกิดการเรียงตัวภายในชั้นของโครงสร้างและเกิดช่องว่างขนาดเล็กขึ้นอย่างถาวรเรียกว่า พิลลาร์เคลย์ (Pillared clay) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่งผลให้แร่ดินเหนียวมีช่องว่างระหว่างชั้น พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น แร่ดินเหนียวที่นิยมใช้ในการเตรียมพิลลาร์เคลย์ส่วนมากจะมีโครงสร้างเป็น 2:1 เช่น แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้ว (Polarity) สามารถแลกเปลี่ยนไอออนและขยายตัวได้ดี ซึ่งประโยชน์ที่ได้จากการตัดแปรรูปเป็นพิลลาร์เคลย์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายแนวทาง เช่น กระบวนการคະตะไลซิส การดูดซับ และกระบวนการแยก เป็นต้น [2]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมพิลลาร์เคลย์ โดยการนำแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) มาทำการตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ (Magnetite) โดยใช้วิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation) เป็นวิธีการบังคับให้ไอออนของสารละลายเหล็กแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างรูพรุนของ MMT แล้วทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลได้เป็นเหล็กออกไซด์เพื่อไปขยายโครงสร้างของ MMT ให้กว้างขึ้น พิลลาร์เคลย์ที่เตรียมได้จะนำไปใช้ทดสอบเป็นตัวดูดซับสีย้อมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

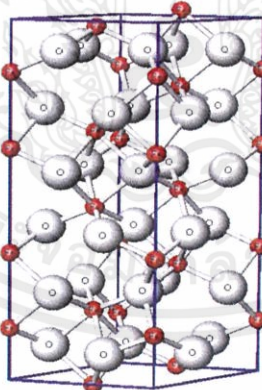


รูปที่ 2.3 พิลลาร์เคลย์ (Pillared clay) [4]

## 2.2 ชนิดของเหล็กออกไซด์ [5]

### 1. ฮีมาไทต์ (Hematite)

ฮีมาไทต์เป็นสินแร่เหล็กที่สำคัญที่สุดสำหรับการผลิตเหล็กกล้า สามารถนำมาใช้เป็นเม็ดสี และเป็นผงขัดหรือถ้าผลึกสีดำอาจใช้อันเป็นอัญมณีได้ ฮีมาไทต์มีการจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกระบบเฮกซะโกนิก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และที่ตำแหน่ง 2θ มีพีกของวงภาคผลึกที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

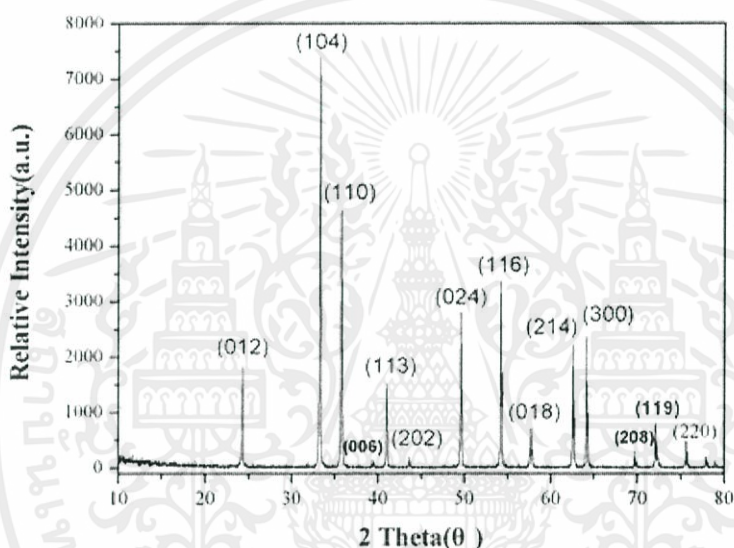


รูปที่ 2.4 ผลึกระบบเฮกซะโกนิกของฮีมาไทต์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมบัติ

ระบบผลึก	เฮกซะโกนอล (Hexagonal)
สูตรโมเลกุล	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
น้ำหนักโมเลกุล	159.69 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	5.6
สี	น้ำตาลอมแดงถึงดำ
ความแข็ง	6 – 6.5
ความวาว	คล้ายโลหะ (Metallic) และด้าน (Dull)

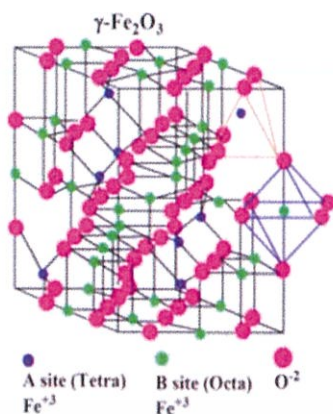


รูปที่ 2.5 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฮีมาไทต์ [7]

## 2. แมกนีไมต์ (Magnetite)

แมกนีไมต์เป็นสินแร่เหล็กที่สำคัญที่สามารถนำมาถลุงเอาโลหะเหล็กได้ และเป็นสิ่งสำคัญหลักของโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กกล้าและเหล็กแปรรูปต่างๆ แมกนีไมต์มีการจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกแบบระบบบรอมโบฮีตรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และที่ตำแหน่ง 20 มีฟีกของวัฏภาคผลึกที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

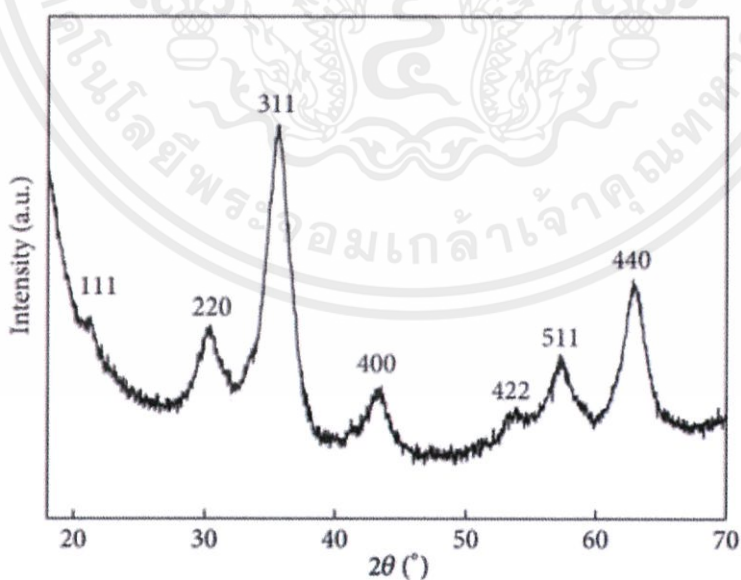
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ผลึกแบบระบบบรอมโบฮีตรอลของแมกนีไมต์ [8]

### สมบัติ

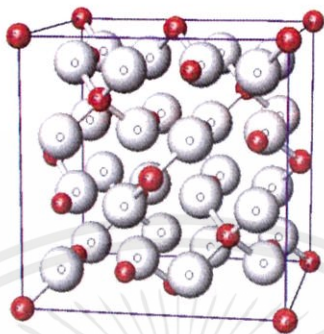
ระบบผลึก	ระบบบรอมโบฮีตรอล (Rhombohedral)
สูตรโมเลกุล	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
น้ำหนักโมเลกุล	159.69 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	4.9-5.3
สี	ดำ เทา และน้ำตาลแดง
ความแข็ง	5-6
ความวาว	วาวคล้ายกึ่งโลหะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแมกนีไมต์ [9]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. แมกนีไทต์ (Magnetite)

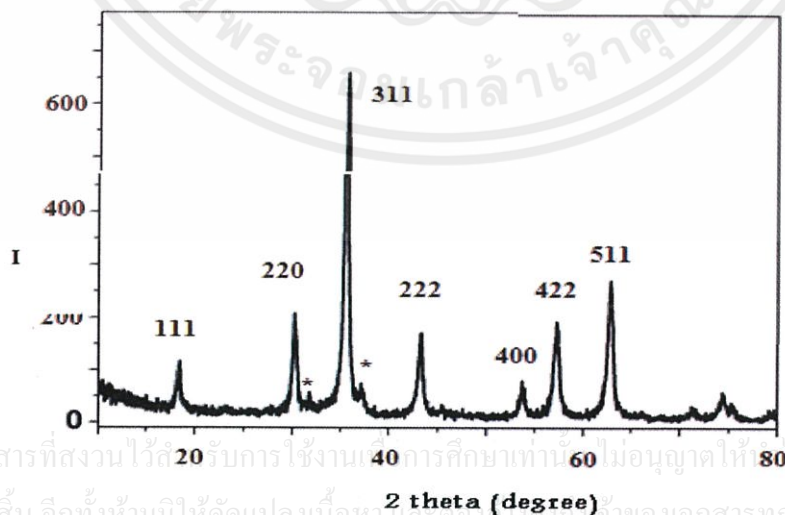
แมกนีไทต์เป็นแหล่งสินแร่ที่สำคัญ สามารถนำไปถลุงเอาโลหะมาใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ ตลอดจนเครื่องใช้ประจำวันแทบทุกชนิด แมกนีไทต์มีการจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกระบบไอโซเมทริกแบบออกตะฮีดรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และที่ตำแหน่ง 2θ มีพีคของวัฏภาคผลึกที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 รูปผลึกระบบไอโซเมทริกแบบออกตะฮีดรอลของแมกนีไทต์ [10]

สมบัติ

ระบบผลึก	ไอโซเมทริก (Isomatrix) แบบออกตะฮีดรอล
สูตรโมเลกุล	$\text{Fe}_3\text{O}_4$ ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )
มวลโมเลกุล	231.533 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	5.2
สี	ดำ
ความแข็ง	5.5 – 6.5
ความวาว	คล้ายโลหะ (Metallic)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 20 วิชาการศึกษานาน 60 ไม่นานุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและเผยแพร่ไปยังผู้ใดของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

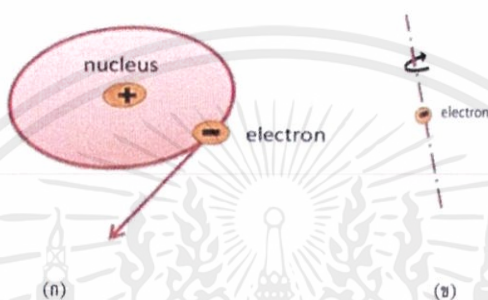
รูปที่ 2.9 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแมกนีไทต์ [11]

## 2.3 แม่เหล็ก [12]

ความเป็นแม่เหล็ก (Magnetism) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุชนิดหนึ่งเกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลักกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งปัจจุบันนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น การยกของ มอเตอร์ ไดนาโม หม้อแปลง ลำโพง ทีวี เซนเซอร์และทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

### 2.3.1 สภาวะแม่เหล็กและวัสดุแม่เหล็ก (Magnetism and Magnetic Materials)

แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุ เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส (Nucleus) ดังแสดงในรูป 2.10 (ก) และอิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง ดังรูปที่ 2.10 (ข)

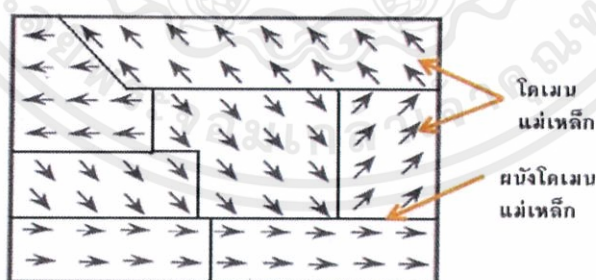


รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุแม่เหล็ก [12]

(ก.) อิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส (ข.) อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง

### 2.3.2 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนแม่เหล็ก

โดเมนแม่เหล็กเป็นบริเวณที่โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กมีทิศทางขนานกัน และผนังโดเมนเป็นพื้นที่ระหว่างโดเมนแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.11

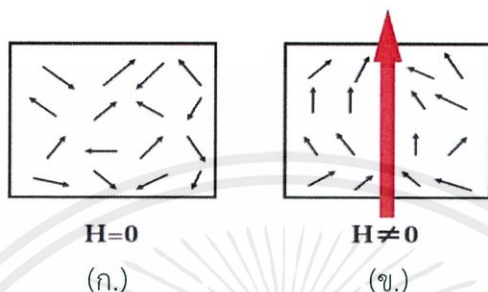


รูปที่ 2.11 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนแม่เหล็ก [12]

### 2.3.3 ประเภทของสภาวะแม่เหล็ก

1. สภาวะแม่เหล็กไดอา (Diamagnetism) คือสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) ของอะตอมในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก ส่งผลให้ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility;  $X_m$ ) มีค่าเป็นลบเล็กน้อย

2. **สภาวะแม่เหล็กพารา (Paramagnetism)** คือสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมเรียงตัวแบบสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กทำให้โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิเป็นศูนย์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กเป็นบวกเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลทำให้สภาวะเหล็กแบบสารแม่เหล็กพาราขึ้นลดลง



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กพารา [12]  
(ก.) ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (ข.) มีสนามแม่เหล็กภายนอก

3. **สภาวะแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Anti-ferromagnetism)** คือสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมในวัสดุมีทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ทำให้เกิดการหักล้างกัน เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่มีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ส่วนโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ทำให้ผลรวมแม่เหล็กสุทธิไม่เป็นศูนย์ วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร เช่น แมงกานีส (Mn) และโครเมียม (Cr)



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร [12]

4. **สภาวะแม่เหล็กเฟอร์ริ (Ferrimagnetism)** คือสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2.14 โมเมนต์แม่เหล็กจะไม่หักล้างกันหมด จะยังคงมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิในทิศทางหนึ่ง โมเมนต์แม่เหล็กเหล่านี้ทำให้วัสดุนี้สามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กได้ โดยส่วนใหญ่จะพบในวัสดุเซรามิกที่ประกอบด้วยไอออนต่างชนิดกัน ซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็กมากน้อยแตกต่างกัน วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ จึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.14 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์รี [12]

5. **สถานะแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism)** คือสถานะแม่เหล็กที่สามารถคงสภาพแม่เหล็กอยู่ได้ โดยไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกและทิศทางโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมไปทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แตกต่างจากสารแม่เหล็กไดอะ ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้ เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปเท่านั้นหรือสารแม่เหล็กพาราที่แสดงสถานะแม่เหล็กเมื่อมีสนามภายนอกและไม่มีอำนาจแม่เหล็ก เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรมวัสดุและอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) และนิกเกิล (Ni) สมบัติสารแม่เหล็กเฟอร์โรของธาตุแทรนซิชันเหล่านี้ เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อยู่ระดับพลังงานย่อยชั้น 3d จำนวน 4 3 และ 2 ตามลำดับ จึงทำให้เหล็กโคบอลต์และนิกเกิลแสดงสมบัติสภาพแม่เหล็กเฟอร์โรได้

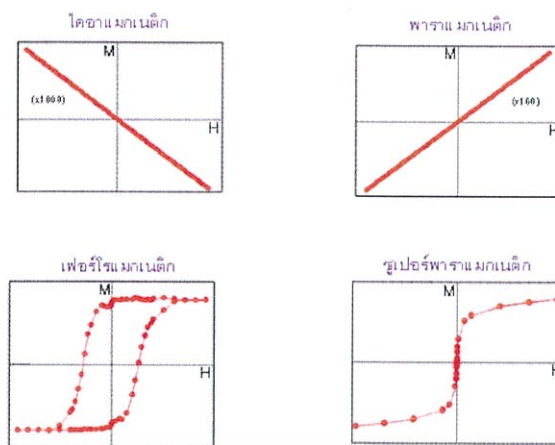


รูปที่ 2.15 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์โร [12]

### 2.3.4 สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนาโน [13]

โดยปกติแล้ววัสดุที่มีสถานะแม่เหล็กเฟอร์โรจะประกอบไปด้วยโดเมนแม่เหล็กหลายโดเมน โดยที่แต่ละโดเมนถูกคั่นด้วยกำแพงโดเมน (Domain wall) แต่เมื่อวัสดุที่มีสถานะแม่เหล็กเฟอร์โรมีขนาดเล็กลงจนถึงค่าวิกฤติค่าหนึ่ง จะทำให้พลังงานของกำแพงโดเมนมีค่าไม่มั่นคง ส่งผลทำให้อนุภาคทั้งอนุภาคกลายเป็นเสมือนกับโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว (Single magnetic domain) ซึ่งจะทำให้เกิดสมบัติทางแม่เหล็กแบบใหม่ขึ้นมา นั่นคือ “ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic phenomenon)” โดยอนุภาคที่มีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกมีสมบัติแม่เหล็กที่ไม่มั่นคงอันเนื่องมาจากการแปรปรวนของอุณหภูมิ โดยอนุภาคเหล่านี้จะแสดงสมบัติแม่เหล็กเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุต่างๆ มีลักษณะความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16

ความอนุภาคซูเปอร์พาราแมกเนติกสามารถนำไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่น การใช้นำส่งยาหรือสารออกฤทธิ์ไปยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกร่างกาย เป็นต้น



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Magnetization (M) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุต่างๆ [12]

## 2.4 สีย้อม (Dye) [14]

### 2.4.1 ความหมายของสีย้อม

สีย้อม (Dye stuffs) คือสีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400–700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างกันไปซึ่งสายตาสารสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาสายตาออกมาเป็นสีต่างกัน

### 2.4.2 ประเภทของสีย้อม [15]

1. สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuffs) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาสัตว์ เช่น สีม่วงแดงจากครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม
2. สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuffs) เป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกิดขึ้นไปใช้จากกระบวนการทางเคมี ละลายได้ดีและกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในตัวกลาง สีของผลิตภัณฑ์

ที่เกิดจากสีย้อมสังเคราะห์จะสว่างสดใสแต่ความคงทนของสีต่อแสงต่ำ และเกิดการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสีได้ง่าย ส่งผลให้สีซีดจางเร็วและอาจเกิดการแพ้หรือความเป็นพิษต่อผู้ใช้งานได้ โดยกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม ได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท ดังนี้

### 2.1 สีแอซิด (Acid dye)

สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีแอซิดไม่ทนการซักและไม่ทนเหงื่อ

### 2.2 สีเบสิก (Basic or Cationic dye)

สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อม เส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบ จะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

### 2.3 สีไดเรกต์ (Direct dye)

สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซัก สีตกง่าย ทนแสง

### 2.4 สีดีสเพอร์ส (Disperse dye)

สีชนิดนี้เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดีสามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดีแต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมแอมมีโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (Ethanalamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

### 2.5 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)

สีชนิดนี้เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สีอะโซอิก (Azoic dye)

สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้ง เซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

## 2.7 สีแว้ต (Vat dye)

สีชนิดนี้เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว้ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดซ์เป็นสีแว้ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือสีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (Antraquinoid)

## 2.8 สีมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or Chrome dye)

สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่เกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมต์ได้ดี

## 2.9 สีอินเกรน

สีชนิดนี้เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้าย

## 2.10 สีออกซิเดชัน (Oxidation dye)

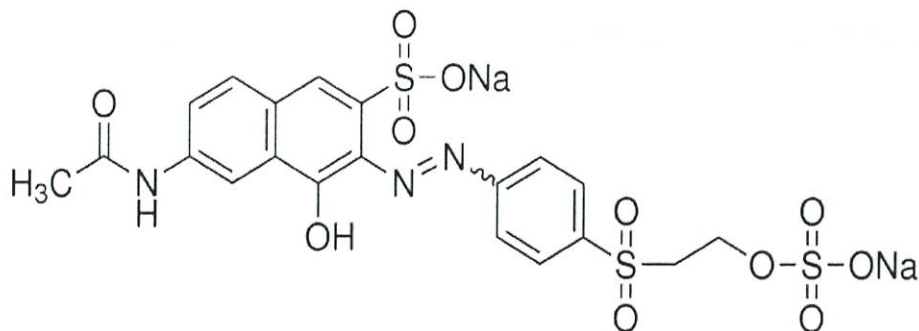
สีชนิดนี้เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้ายและขนสัตว์

## 2.11 สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye)

สีชนิดนี้เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

### 2.4.3 สีย้อมรีแอคทีฟ ออเรนจ์ 16 (Reactive orange 16) [16-17]

สีรีแอคทีฟ ออเรนจ์ 16 มีชื่อทางเคมีว่า Disodium-(3E)-6-acetamido-4-oxo-3-[[4-(2-sulfonatoxyethylsulfonyl)phenyl]hydrazinylidene]naphthalene-2-sulfonate มีลักษณะเป็นผงสีแดงส้ม ละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำสีย้อมจะให้ประจุลบ มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{20}H_{17}N_3Na_2O_{11}S_3$  และมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 617.54 กรัมต่อโมล ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 388 นาโนเมตร และ 494 นาโนเมตร และมีสูตรโครงสร้างโมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 สูตรโครงสร้างของ Reactive orange 16 [16]

สีรีแอคทีฟเป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่ใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) และสำหรับเส้นใยโปรตีน (Protein fiber) เส้นใยไนลอน (Nylon fiber) ดังนั้นกลไกในการย้อมสีรีแอคทีฟบนเส้นใยนั้น หมู่ labile ( $-O-SO_3Na$ ) ของสีรีแอคทีฟจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของเส้นใยเซลลูโลสสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงทำให้ทนทานต่อการซักล้าง

#### ส่วนประกอบของสีรีแอคทีฟ



S = Solubilising group

C = Chromophore

B = Bridge

R = Reactive group

- **Chromophore** เป็นกลุ่มเคมีที่ทำให้เกิดสีประกอบด้วยหมู่ของ Azo, Metal-complex azo, Anthraquinone และ Phthalocyanine

- **Reactive group** เช่น Trichoropyrimidine, Monochorotriazine, Vinyl sulphone, Monofluorotriazine, Dichoropyrimidine, Difluorotriazine และ Dichlorotriazine

#### การเกิดปฏิกิริยาของสีรีแอคทีฟมีอยู่ 2 แบบ

1. **Nucleophilic Substitution** ได้แก่ Triazine, Pyrimidine, Pyrazine และ Quinoxaline

2. **Nucleophilic Addition** ได้แก่ Vinyl sulphone, Acrylamide กลุ่มนี้จะทนต่อการไฮโดรไลซิส เนื่องจากทนกรดได้ดีกว่ากลุ่มแรกจึงสามารถนำมาย้อมเส้นใยขนสัตว์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 วิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม [18]

### กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายประการ สามารถแบ่งออกได้ 4 ประการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

1. **กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit operations)** คือวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Comminution) การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) และการกำจัดตะกอนหนัก (Grit removal)

2. **กระบวนการทางเคมี (Chemical unit processes)** คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกมลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนผลึก (Precipitation) การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection)

3. **กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit processes)** คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัย การย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศ ได้แก่ Activated Sludge, Trickling Filter, Aerated Lagoon, Anaerobic Filter, Anaerobic Pond และ Stabilization Pond เป็นต้น

4. **กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical unit processes)** คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทางกายภาพและทางเคมีรวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ Ion Exchange, Carbon Adsorption, Reverse Osmosis และ Electrodialysis เป็นต้น

## 2.6 การดูดซับ (Adsorption) [19]

### 2.6.1 หลักการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่เป็นที่ยึดเกาะของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent โดยในที่นี้จะพิจารณาแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

### 2.6.2 ประเภทของสารดูดซับ

ตัวดูดซับ คือสารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด แบ่งได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีข้อจำกัด

2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์สามารถนำไปรีเจนเนอเรชันและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ขั้นตอนการรีเจนเนอเรชันคาร์บอนต้องเผาที่อุณหภูมิสูงมากทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

4. วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชี้อ้อย ไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าวเปลือกไม้ ถั่วแกลบดำ เป็นต้น

5. สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย

### 2.6.3 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

#### 1. การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โมโนอนุภาคนี้ไม่ใช่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน โดยมีพันธะเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง ประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ โดยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

### 2.6.4 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีเลือกเฉพาะบริเวณที่เกิดพันธะได้เท่านั้น
3. การดูดซับทางกายภาพโมเลกุลเกิดได้หลายชั้น (Multilayer) ส่วนการดูดซับทางเคมีเกิดได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพอาจเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของการดูดซับทางเคมีก็ได้
4. การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นทันทีโดยการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับซึ่งต้องใช้เวลานานพอสมควร และการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นทันทีเช่นเดียวกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น

### 2.6.5 กลไกการดูดซับ [20]

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

### 2.6.6 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

ในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

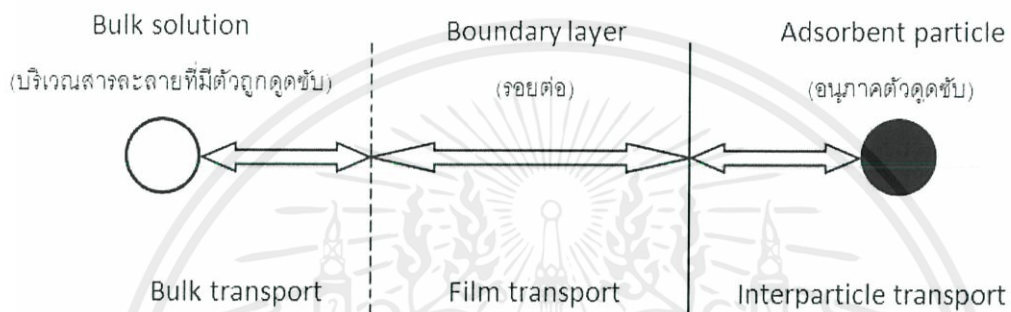
นอกจากนี้ยังมีขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจากชั้นของของเหลวบางๆ ไปยังผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ ซึ่งขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจากชั้นของของเหลวบางๆ ไปยังผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับนี้ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และลักษณะของตัวดูดซับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลว บางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่าน ฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูก ละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน

โดยอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลมีขั้นตอนในการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภาพขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ [20]

### 2.6.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. ธรรมชาติของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะว่าก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อัตราเร่งการปั่นกววน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นกับการขนส่งโมเลกุลของระบบ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม และการแพร่เข้าสู่โพรง ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าการปั่นกววนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าการปั่นกววนสูงจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4. อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับลดลง

5. ผลของความเป็นกรด-เบส ขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรดต่ำส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) บนพื้นผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น มีผลทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) บนพื้นผิวดูดซับมากขึ้นและสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีสภาพความเป็นกรด-เบส มากกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

## 2.7 ปฏิริยาเฟนตัน [21]

กระบวนการเฟนตันเป็น วิธีการหนึ่งของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes; AOPs) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี โดยเป็นการเติมสารอินทรีย์ลงไปให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical;  $HO^\cdot$ ) ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการเฟนตัน ถูกค้นพบโดย H.J.H. Fenton ในปี 1876 หรือเมื่อ 136 ปีที่แล้ว โดย Fenton พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) จะเกิดปฏิริยาทางเคมี ที่มีลักษณะเฉพาะและสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสารเคมีที่เป็นพิษได้โดยมีออกซิโดซ์ระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กระบวนการนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปน เช่น ฟีนอล สารประกอบอะโรมาติก หรือ สารเคมีที่มาจากวัสดุสีย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก ยาง เป็นต้น กระบวนการเฟนตันที่ประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจะช่วยลดค่า BOD COD กลิ่น สี รวมทั้งช่วยในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ

ปฏิริยาเฟนตันเป็นปฏิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ซึ่งหลังปฏิริยาจะเกิดอนุมูล-อิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical;  $HO^\cdot$ ) ดังนี้



จากปฏิกิริยา (2.1) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีส่วนประกอบของสารประกอบของสารอินทรีย์ ส่งผลให้เกิดการเหนียวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้สารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงและความเป็นพิษในน้ำเสียน้อยลงปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นต่อเนื่อง ดังแสดงในสมการที่ (2.2) ส่งผลให้เฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น และเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ลดลงจนหมดส่งผลให้ปฏิกิริยาหยุดลง แต่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้อีกและเกิดอย่างต่อเนื่องเมื่อปฏิกิริยาได้รับการกระตุ้นจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบของในแสงอาทิตย์ นั่นคือเมื่อมีแสงอาทิตย์ส่องไปยังปฏิกิริยาเฟนต์จะทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของน้ำเสียในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ )

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Xuan และคณะ [22] ได้ทำการสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ที่มีผลึกขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่ง  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  สังเคราะห์ได้จากเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) นำไปละลายในน้ำกลั่น จากนั้นทำการปั่นกววนและค่อยๆ หยดโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 0.6 โมลาร์ ลงไปจนหมดตั้งทิ้งไว้ 10 นาที แล้วทำการเติม Ascorbic acid ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ) แล้วปั่นกววนต่ออีก 15 นาที จากนั้นถ่ายลงในอโต้เคลฟ (autoclave) ขนาด 40 มิลลิลิตร นำไปไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงแยกตะกอน (Centrifuge) นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและแอลกอฮอล์ ตะกอนที่ได้จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า เมื่อเติม Ascorbic acid มากกว่า 0.12 กรัม จะทำให้เกิดเฟอร์รัสคาร์บอเนต ( $\text{FeCO}_3$ ) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้อยลง และจากผลการคำนวณขนาดอนุภาคสมการของ Scherrer's equation พบว่า  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเท่ากับ 5.2 นาโนเมตร

N.K. Daud และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารละลายสีย้อมชนิดแอซิด โดยใช้แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็ก  $\text{Fe}^{2+}$  ร่วมกับปฏิกิริยาเฟนต์ โดยศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายเหล็กเฟอร์ริกไนเตรต-นาโนไฮเดรต ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ด้วยวิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation) และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบการดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 1 (Acid red 1) ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทดสอบ 150 นาที จากการทดลอง พบว่าสถานะที่ใช้ปริมาณเหล็กเฟอร์ริก 0.14 ร้อยละโดยมวล ตัวเร่งปฏิกิริยาความเข้มข้น 16 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร สีย้อม พีเอช 2.5 และทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัซวาล แซ่เต็ง และพรสุดา การะเกตุ [24] ได้ทำการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ด้วยออกไซด์ผสมระหว่างเฟอร์ริสคลอไรด์เตตระไฮเดรต ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) และเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  เท่ากับ 1:2 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารผสมเป็น 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นแร่ดินเหนียวเหล็ก (Fe-MMT) หลังจากนั้นผสมลงในสารละลายโซเดียมอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) ปั่นกวน 24 ชั่วโมง นำไปกรองและอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส บดให้ละเอียดและเผาแคลไซน์ (Calcination) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้เป็นแร่ดินเหนียวเหล็กฟิลลาร์ (Fe-Pill) นำมาทดสอบการดูดซับสีย้อมเบสิคบลู 66 (Basic Blue 66; BB 66) และสีแอซิดเรด 91 (Acid Red 91; AR 91) ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการทดสอบด้วยวิธีการดูดซับแบบกะ ตัวดูดซับ Fe-Pill มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB 66 เฉลี่ยประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวดูดซับชนิด 0.5 Fe-Pill มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด เท่ากับ 98.48 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สีย้อม AR 91 มีประสิทธิภาพในการดูดซับเฉลี่ยน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวดูดซับชนิด 0.5 Fe-Pill มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด เท่ากับ 6.04 เปอร์เซ็นต์ โดยที่การทดสอบด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและเฟนตันเชิงแสง ตัวดูดซับชนิด 0.5 Fe-Pill พบว่าการทดสอบการกำจัดสีย้อม AR 91 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตันเชิงแสงมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากที่สุด เท่ากับ 44.3 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปฏิกิริยาเฟนตันมีประสิทธิภาพในการกำจัด เท่ากับ 38.41 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และฉายแสงยูวีจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมากที่สุด

S. Ahmadi และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ที่มีอนุภาคนาโน จาก  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{NaOH}$  ในอัตราส่วน 1:2:8 โดยวิธีการสังเคราะห์อย่างง่ายด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis) โดยใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน คือ 100 150 และ 200 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าความเป็นผลึกและขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคผลึกที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น

S. Komarneni และคณะ [26] ทำการสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งการสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและการสังเคราะห์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ที่อุณหภูมิ 80-150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-16 นาที โดยสังเคราะห์จาก  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$  และ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  จากการทดลอง พบว่าการสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์ที่อุณหภูมิห้องอนุภาคมีขนาด 40-50 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ส่งผลทำให้อนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าอิมิตาทิวแมกนีไทต์มีค่าประมาณ 57.4-89.0 emu/g

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R. Djellabi และคณะ [27] ได้ทำการกำจัดสี้อมอินทรีย์โดยไทเทเนียมมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO-M) ในสภาวะที่ใช้แสงและไม่ใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเตรียมได้จากไททาเนียมเตตระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) เจือจางผสมกับไดคลอโรมีเทน ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) เติมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ลงในสารละลายข้างต้นพร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองแยกแร่ดินเหนียว แล้วอบให้แห้งและนำมาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไปทดสอบการกำจัดสี้อมอินทรีย์ 5 ชนิด ได้แก่ Cristal violet, Rhomdamine B, Methylene blue, Congo red และ Methyl orange จากการศึกษาในสภาวะไม่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) พบว่าอัตราการกำจัดสี้อมเท่ากับ 58.8, 45.0, 67.6, 6.2 และ 14.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าอัตราการกำจัดสี้อม เท่ากับ 97.15, 79.8, 13.2, 22.6 และ 36.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมได้ดีขึ้น

L. Cottet และคณะ [28] ทำการดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ (MtMIO) เพื่อใช้ในการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลู โดยสังเคราะห์เหล็กออกไซด์จาก  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$  และ  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ pH ประมาณ 11-12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) จากนั้นนำเหล็กแมกนีไทต์มากระจายตัวในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เติมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมากรองและทำให้แห้ง จากการทดลอง พบว่าอนุภาคของเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 25 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่บนผิวของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ และ MtMIO มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 71.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน นอกจากนี้ MtMIO ที่สังเคราะห์ได้ยังสามารถกำจัดสี้อมที่มีประจุบวกชนิดอื่นได้ดีเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT) Mac gel บริษัท Thai Nippon Chemical Industry
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์บริษัท Carlo erba reagents
3. เพอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lobal Chemic
4. แอมโมเนียมเพอร์รัสซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์บริษัท LobaChemie Pvt. Ltd. India
5. รีแอคทีฟออเรนจ์ 16 (Reactive Orange 16) เกรดวิเคราะห์บริษัท Sigma-aldrich
6. เมทิลีนบลู (Methylene Blue) เกรดวิเคราะห์บริษัท Sigma-aldrich
7. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เกรดวิเคราะห์บริษัท Qrec chemical

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. เครื่องวัดการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence spectroscopy; XRF) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS 3400
3. เครื่องตรวจสอบปริมาณพื้นที่ผิวโดยวิธีของ Brunauer Emmett Teller (BET) รุ่น Autosorb-1 บริษัท Autosorb
4. เครื่องวัดความเป็นแม่เหล็ก (Vibrating sample magnetometer; VSM) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) บริษัท Scientific รุ่น Evolution 201
6. เครื่อง Gas Adsorption Analyser บริษัท Quantachrome รุ่น Autosorb-1
7. เตาเผา (Furnace) บริษัท Thermolyne รุ่น Furnance 6000
8. ตู้อบสาร (Oven) บริษัท JEIO Tech รุ่น Lab.companion
9. เครื่องหมุนเหวี่ยงแยกตะกอน (Centrifuge machine) บริษัท Labquip รุ่น 1000 series
10. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic horn) บริษัท Cole-Parmer รุ่น 8892
11. เครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker)
12. เครื่องกวนสาร (Stirrer) บริษัท IKA รุ่น RO 5 power IKAMAG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการนำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เครื่องกวนสารแบบแกนหมุน (Overhead stirrer) บริษัท IKA รุ่น RW 20
14. เครื่องกรองลดความดัน (Vacuum Aspirator) บริษัท Sibata รุ่น WJ-20
15. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น SI-234
16. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
17. ครุชีเบิลชนิดพอสเลน
18. แท่งแม่เหล็กปั่นกวน
19. ตะแกรงร่อน
20. โกร่งและที่บด

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.3.1 การกำจัดสิ่งเจือปนในแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก

1. เตรียมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ 10 กรัม กระจายตัวในน้ำ 1,000 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 30 นาที
2. ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบแกนหมุน (Overhead stirrer) 30 นาที และกำจัดสิ่งเจือปนที่ลอยบนผิวน้ำออก
3. อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
4. บดให้ละเอียดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 400 เมช

#### 3.3.2 การสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์ (Magnetite) บริสุทธิ์

ตารางที่ 3.1 การสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์บริสุทธิ์ที่สภาวะต่างๆ

ระบบสารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	ความเข้มข้น $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	ความเข้มข้น NaOH	อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอล (°C)
1:1	1.0M:1.0M	0.5M	80
	1.5M:1.5M	0.5M	80
	1.0M:1.0M	0.5M	100
	1.5M:1.5M	0.5M	100
1:2	0.5M:1.0M	4.0M	100
	1.0M:2.0M	8.0M	100
	1.5M:3.0M	12.0M	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เตรียมสารละลายเหล็กผสมระหว่างแอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 และ 1:2 ปริมาตร 6 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขวดไฮโดรเทอร์มอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังตารางที่ 3.1
3. หยดสารละลายเหล็กลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนหมด
4. ปิดฝาขวดไฮโดรเทอร์มอลให้สนิท และนำไปไฮโดรเทอร์มอลเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. นำไปกรองลดความดันและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
6. นำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และ VSM

### 3.3.3 การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กแมกนีไทต์ วิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation)

ตารางที่ 3.2 การเตรียม Fe-MMT ที่สภาวะต่างๆ

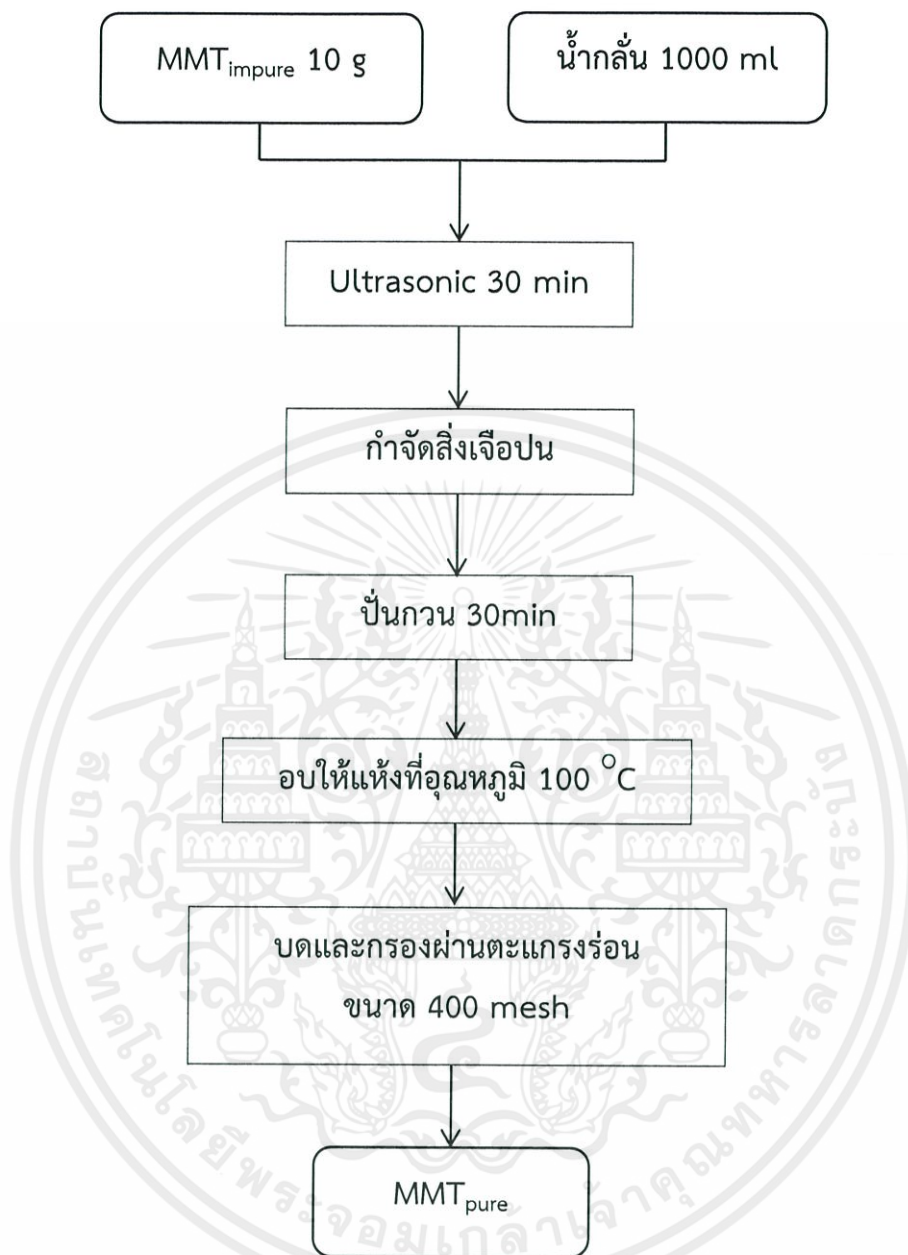
ระบบ สารละลาย เหล็กผสม $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$	MMT (g)	ความเข้มข้น $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$	ความเข้มข้น NaOH	อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอล ( $^{\circ}\text{C}$ )
1:1	0.6	1.0M:1.0M	0.5M	80
	0.6	1.5M:1.5M	0.5M	80
	0.6	1.0M:1.0M	0.5M	100
	0.6	1.5M:1.5M	0.5M	100
1:2	0.6	0.5M:1.0M	4.0M	100
	0.6	1.0M:2.0M	8.0M	100
	0.6	1.5M:3.0M	12.0M	100

1. เตรียมสารละลายผสมระหว่างแอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 และ 1:2 ปริมาตร 6 มิลลิลิตรต่อ MMT 0.6 กรัม
2. นำสารละลายเหล็กมาผสมกับ MMT โดยค่อยๆ หยดสารละลายเหล็กผสมลงใน MMT จนมีลักษณะชุ่ม (Impregnation) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-15 นาที แล้วทำซ้ำจนสารละลายเหล็กหมด
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 คืน ประมาณ 15-18 ชั่วโมง ให้แห้งสนิท
4. นำมาบดให้ละเอียดได้เป็นแร่ดินเหนียวเหล็ก และเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังตารางที่ 3.2

5. จากนั้นค่อยๆ เทแร่ดินเหนียวที่กลึงในสารละลาย NaOH พร้อมปั่นจนเข้าๆ
6. ปิดฝาขวดไฮโดรเทอร์มอลให้สนิทและนำไปไฮโดรเทอร์มอลเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
7. นำไปกรองลดความดันและอบให้แห้ง ได้เป็นวัสดุประกอบ Fe-MMT
8. นำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, XRF, VSM และการดูดซับแก๊ส

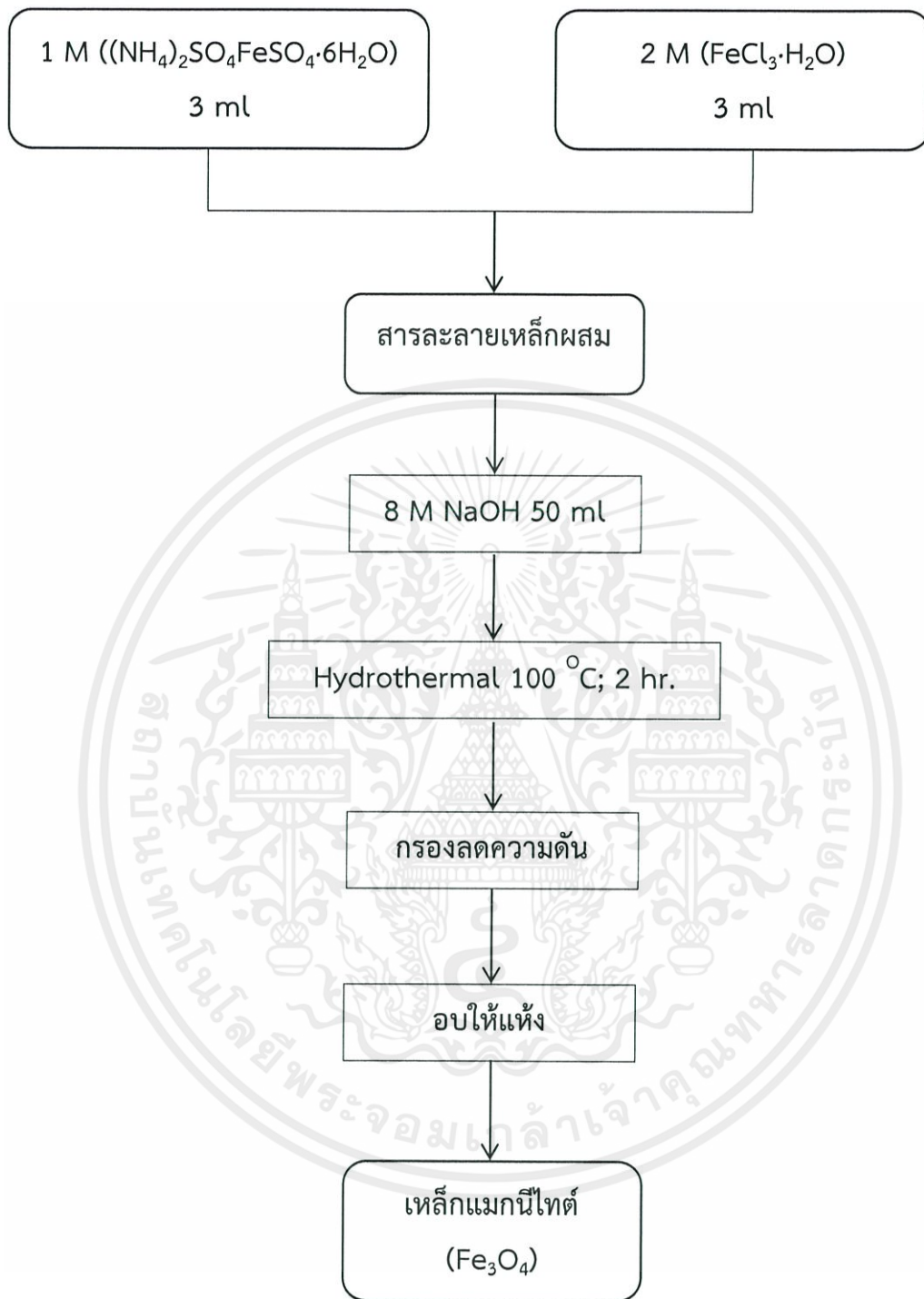


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



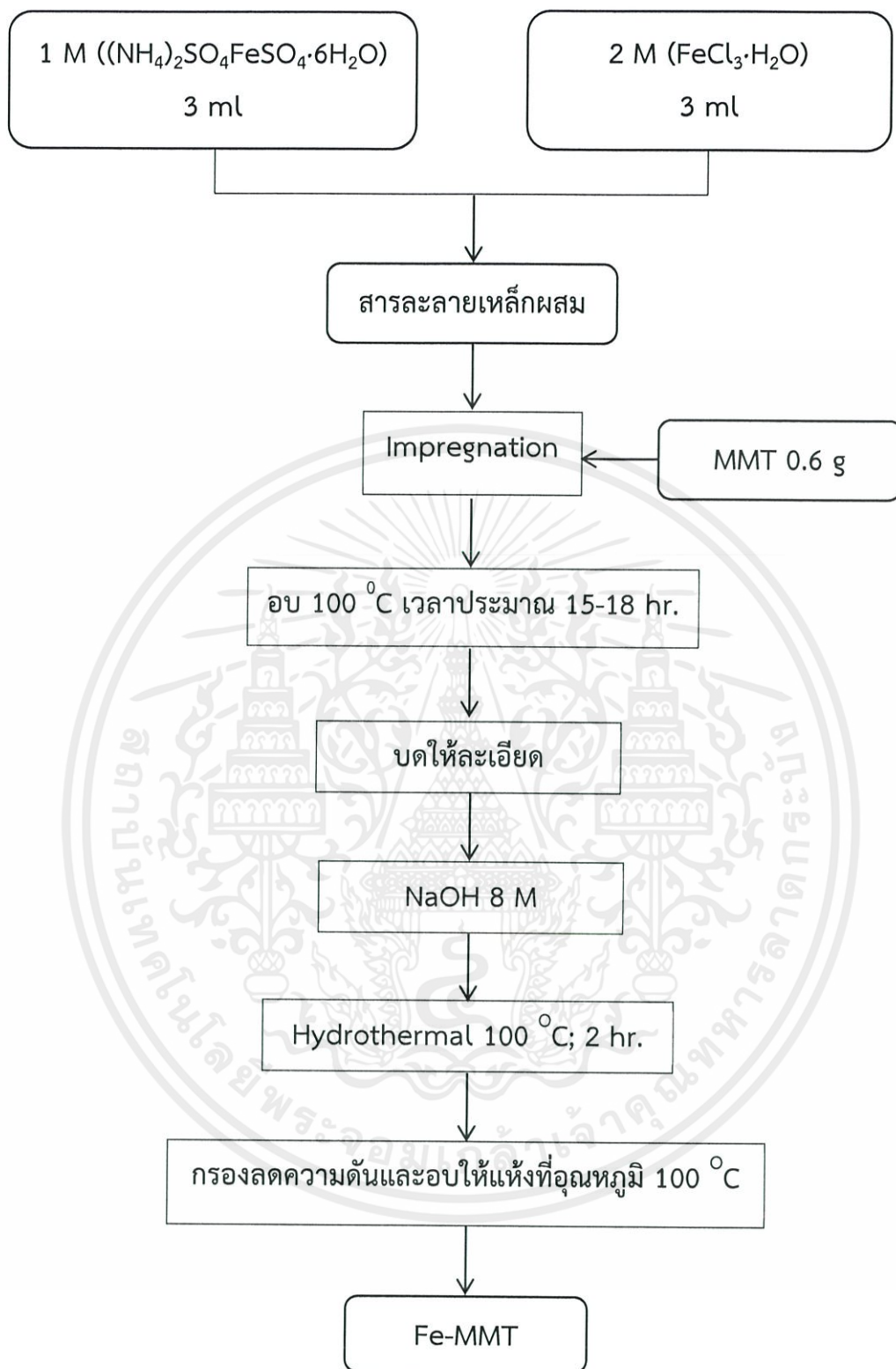
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนในการกำจัดสิ่งเจือปนของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนในการสังเคราะห์เหล็กแมกนีไทต์บริสุทธิ์  
ในอัตราส่วนของ Fe<sup>2+</sup> : Fe<sup>3+</sup> เท่ากับ 1:2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนในการเตรียม Fe-MMT ในอัตราส่วนของ  $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$  เท่ากับ 1:2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์

- ศึกษาวัฏภาคที่เป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

2 $\theta$ เริ่มต้น-สิ้นสุด	20° - 70°
Step size	0.040°
Time/step	1.0 sec
- ศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊ส โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์	300 °C
ปริมาณสารตัวอย่าง	0.05 g
บรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์	ไนโตรเจน
- ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

ปริมาณสารตัวอย่างประมาณ	0.5000 g
ปริมาณกรดบอริกประมาณ	4.5000 g
- ศึกษาสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้
 

ช่วงความเข้มของสนามแม่เหล็ก	-10000 – 10000 Oe
อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์	25 °C

### 3.3.5 ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพของ Fe-MMT ในการดูดซับสีย้อมในระบบน้ำเสียจำลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการดูดซับสีย้อม 2 ชนิด คือ สีเบสิกและสีรีแอคทีฟ ดังนี้

- สีย้อมชนิดเบสิก ได้แก่ Methylene Blue; MB ( $\lambda_{\max}$  = 664 nm)
- สีย้อมชนิดรีแอคทีฟ ได้แก่ Reactive Orange 16; RO16 ( $\lambda_{\max}$  = 388 nm)

#### 3.3.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีเมทิลีนบลู

- เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อม MB ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเจือจางให้มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 ถึง 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- นำสารละลายสีย้อม MB ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) 664 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์ แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมที่เตรียม
- บันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ แล้วนำค่าที่วัดได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานโดยการพลอตระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีรีแอคทีฟที่ฟอเรนจ์ 16

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานสีรีแอคทีฟ RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วเจือจางให้มีความเข้มข้นตั้งแต่ 5.0 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำสารละลายสีรีแอคทีฟ RO16 ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) 388 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่น เป็นแบลนด์ แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีรีแอคทีฟที่เตรียม
3. บันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ แล้วนำค่าที่วัดได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน โดยการพลอตระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

### 3.3.5.3 ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ 3.3 ชนิดของสารดูดซับที่ใช้ทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของสีรีแอคทีฟ MB ด้วยกระบวนการดูดซับ

ระบบ สารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอล ( $^{\circ}C$ )	สารดูดซับ
1:2	100	MMT
		0.5:1.0M Fe-MMT100
		1.0:2.0M Fe-MMT100
		1.5:3.0M Fe-MMT100

1. เตรียมสารละลายสีรีแอคทีฟ MB ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เติมสารดูดซับ 0.1 กรัม ลงในสารละลายสีรีแอคทีฟ MB ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. นำไปผสมด้วยเครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. แยกสารดูดซับออกจากสารละลายสีรีแอคทีฟ MB ด้วยการกรองธรรมดาและหมุนเหวี่ยง แยกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
6. คำนวณหาความเข้มข้นหลังการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีรีแอคทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.4 ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอคทีฟที่ฟอเรนจ์ 16 ด้วยกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ 3.4 ชนิดของสารดูดซับที่ใช้ทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของสีย้อม RO16 ด้วยกระบวนการดูดซับ

ระบบสารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอล (°C)	สารดูดซับ
-	-	MMT
1:1	80	1.5:1.5M Fe-MMT80
		2.0:2.0M Fe-MMT80
	100	1.5:1.5M Fe-MMT100
		2.0:2.0M Fe-MMT100
1:2	100	0.5:1.0M Fe-MMT100
		1.0:2.0M Fe-MMT100
		1.5:3.0M Fe-MMT100

1. เตรียมสารละลายสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เติมสารดูดซับ 0.1 กรัม ลงในสารละลายสีย้อม RO16 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. นำไปผสมด้วยเครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. แยกสารดูดซับออกจากสารละลายสีย้อม RO16 ด้วยการกรองธรรมดาและหมุนเหวี่ยงแยกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
6. คำนวณหาค่าความเข้มข้นหลังการกำจัดและร้อยละการดูดซับสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.5 ทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟที่ฟอเรนจ์ 16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction)

ตารางที่ 3.5 ชนิดของสารดูดซับที่ใช้ทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของสีย้อม RO16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction)

ระบบสารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอล (°C)	สารตัวอย่าง
1:1	80	1.5:1.5M Fe-MMT80
		2.0:2.0M Fe-MMT80
	100	1.5:1.5M Fe-MMT100
		2.0:2.0M Fe-MMT100
1:2	100	0.5:1.0M Fe-MMT100
		1.0:2.0M Fe-MMT100
		1.5:3.0M Fe-MMT100

1. เตรียมสารละลายสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เติมสารตัวอย่าง 0.1 กรัม ลงในสารละลายสีย้อม RO16 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. เติม  $H_2O_2$  10% โดยปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในสารละลายสีย้อม
4. นำไปผสมด้วยเครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. แยกสารตัวอย่างออกจากสารละลายสีย้อม RO16 ด้วยการกรองธรรมดาและ หมุนเหวี่ยงแยกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
7. คำนวณหาความเข้มข้นหลังการกำจัดและร้อยละการกำจัดสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.6 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟอเรนจ์ 16

#### 3.3.5.6.1 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟอเรนจ์ 16 ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ด้วยกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ 3.6 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 ด้วยกระบวนการดูดซับ

สีย้อม	ปริมาณสารดูดซับ 1.5:3.0M Fe-MMT100 (กรัม)	เวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง)
RO16	0.1	1
RO16	0.1	2
RO16	0.1	3
RO16	0.1	4
RO16	0.1	5

1. เตรียมสารละลายสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เติม 1.5:3.0M Fe-MMT100 0.1 กรัม ลงในสารละลายสีย้อม RO16 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. นำไปผสมด้วยเครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง
4. แยก 1.5:3.0M Fe-MMT100 ออกจากสารละลายสีย้อม RO16 ด้วยการกรองธรรมดาและหมุนเหวี่ยงแยกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
6. คำนวณหาความเข้มข้นหลังการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.6.2 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟออเรนจ์ 16 ของ 0.5:1.0M Fe-MMT100 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction)

ตารางที่ 3.7 ศึกษาอิทธิพลระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน

สีย้อม	ปริมาณสารดูดซับ 0.5:1.0M Fe-MMT100 (กรัม)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
RO16	0.1	1
RO16	0.1	2
RO16	0.1	3
RO16	0.1	4
RO16	0.1	5
RO16	0.1	6

1. เตรียมสารละลายสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เติม 0.5:1.0M Fe-MMT100 0.1 กรัม ลงในสารละลายสีย้อม RO16 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. เติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10% โดยปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในสารละลายสีย้อม
4. นำไปผสมด้วยเครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง
5. แยก 0.5:1.0M Fe-MMT100 ออกจากสารละลายสีย้อม RO16 ด้วยการกรองธรรมดาและหมุนเหวี่ยงแยกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
7. คำนวณหาความเข้มข้นหลังการกำจัดและร้อยละการกำจัดสีย้อม
8. นำสารตัวอย่าง 0.5:1.0M Fe-MMT100 ไปปรับสภาพโดยการเผา เพื่อนำสารตัวอย่างดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) และทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 เพื่อนำไปทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.6.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด สีย้อมรีแอกทีฟออเรนจ์ 16 ของ 0.5:1.0M Fe-MMT100 โดยใช้ ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction)

ตารางที่ 3.8 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน

สีย้อม	ปริมาณสารดูดซับ 0.5:1.0M Fe-MMT100 (กรัม)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
RO16	0.025	2
RO16	0.050	2
RO16	0.750	2
RO16	0.100	2

1. เตรียมสารละลายสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เติม 0.5:1.0M Fe-MMT100 ปริมาณ 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.1 กรัม ลงในสารละลายสีย้อม RO16 ปริมาตร 50 มิลลิตร
3. เติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10% โดยปริมาตร 5 มิลลิตร ลงในสารละลายสีย้อม
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. แยก 0.5:1.0M Fe-MMT100 ออกจากสารละลายสีย้อม RO16 ด้วยการกรองธรรมดาและหมุนเหวี่ยงแยกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
7. คำนวณหาความเข้มข้นหลังการกำจัดและร้อยละการกำจัดสีย้อม

### 3.3.5.7 การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

1. กรองสารดูดซับ 0.5:1.0M Fe-MMT100 ที่ผ่านการดูดซับแล้ว อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจนแห้งสนิท
2. นำไปเผาในเตาเผา (Furnace) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำสารดูดซับที่ปรับสภาพแล้ว ชั่ง 0.1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. เติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10% โดยปริมาตร 5 มิลลิตร ลงในสารละลายสีย้อม
5. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker) ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แยก 0.5:1.0M Fe-MMT100 ออกจากสารละลายสีขุ่น ด้วยการกรองธรรมดา และหมุนเหวี่ยงแยกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที
7. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer
8. คำนวณหาความเข้มข้นหลังการกำจัดและร้อยละการกำจัดสีขุ่น นำมาเปรียบเทียบกับสารดูดซับที่สังเคราะห์ใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง (Fe-MMT)

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของ MMT และ Fe-MMT

นำ MMT และ Fe-MMT ที่สังเคราะห์ได้ที่สภาวะต่างๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescent; XRF) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ MMT และ Fe-MMT ที่เตรียมในสภาวะต่างๆ

ระบบ สารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$ *	ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี					
		Al (wt%)	Si (wt%)	Fe (wt%)	อื่น (wt%)	อัตรา ส่วนโดย โมล Al/Si	อัตรา ส่วนโดย โมล Fe/Si
-	MMT	7.41	35.00	0.95	56.72	0.22	0.01
1:1	1.5:1.5M Fe-MMT80	3.62	13.10	41.10	42.18	0.29	1.57
	2.0:2.0M Fe-MMT80	3.13	11.50	44.80	40.57	0.28	1.95
	1.5:1.5M Fe-MMT100	3.52	13.50	37.40	45.58	0.27	1.39
	2.0:2.0M Fe-MMT100	2.81	10.40	40.80	45.99	0.28	1.97
1:2	0.5:1.0M Fe-MMT100	4.29	13.90	35.70	46.11	0.32	1.29
	1.0:2.0M Fe-MMT100	2.76	8.61	45.30	43.33	0.33	2.64
	1.5:3.0M Fe-MMT100	1.99	6.07	51.60	40.34	0.34	4.26

\*สารละลายเหล็กผสมที่ใช้ในการ Impregnation

จากตารางที่ 4.1 พบว่า MMT ตั้งต้น มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ Si 35.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ Al 7.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อนำแร่ดินเหนียว MMT มาดัดแปรโครงสร้างด้วยสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมลเป็น 1:1 โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กผสมที่ต่างกันคือ 1.5 M และ 2.0 M แล้วนำไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 80 และ 100 °C พบว่า Fe-MMT ที่เตรียมได้ในทุกสภาวะมีค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Al/Si ใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับค่าของ MMT ตั้งต้น แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็กผสมที่ใช้ในการดัดแปร-

โครงสร้างและอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มอลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ MMT แต่เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Fe/Si พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เหล็กผสมจาก 1.5 M เป็น 2.0 M ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Fe/Si สูงขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มอลไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Fe/Si อย่างไม่มีนัยสำคัญ

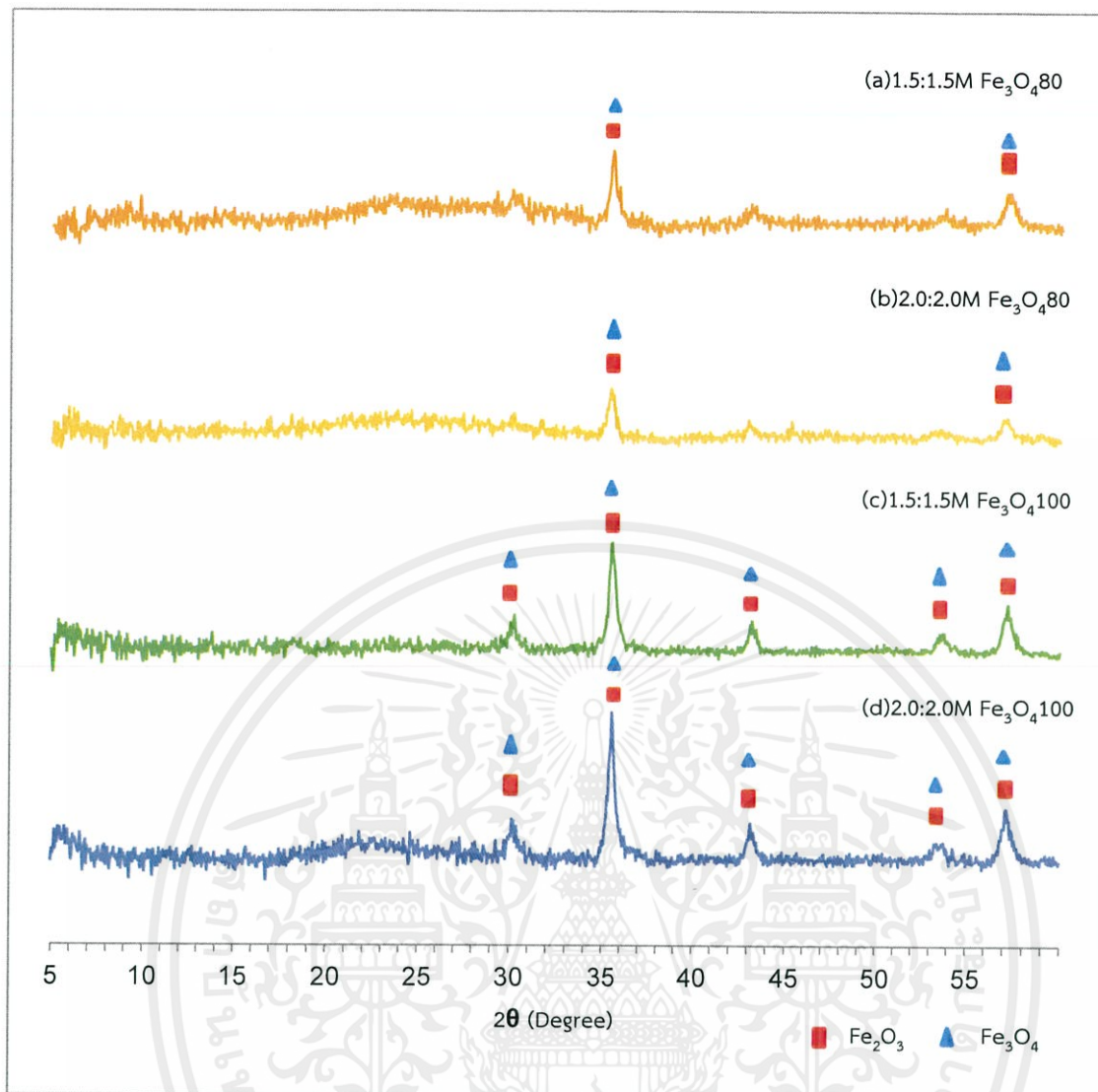
เมื่อพิจารณาสารละลายผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ในอัตราส่วนโดยโมลเป็น 1:2 โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กผสมที่ต่างกันคือ 0.5 M, 1.0 M และ 1.5 M นำไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 °C พบว่า Fe-MMT ที่เตรียมได้ทุกสภาวะ มีค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Al/Si ใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับค่าของ MMT ตั้งต้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำสารละลายเหล็กผสมมา ดัดแปรโครงสร้าง ไม่ส่งผลใดๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ MMT และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กผสม ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Fe/Si เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับผลของระบบอัตราส่วนโดยโมล 1:1 ที่กล่าวข้างต้น

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Fe/Si ของวัสดุประกอบที่เตรียมได้ ในระบบ 1:1 และ 1:2 พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมในระบบ 1:2 มีค่าอัตราส่วนโดยโมล Fe/Si สูงกว่าวัสดุประกอบในระบบ 1:1 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากระบบ 1:2 มีปริมาณเหล็กในการเตรียมสารละลายเหล็กผสมตั้งต้นที่มากกว่า ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Fe/Si ในระบบ 1:2 มากกว่าในระบบ 1:1

#### 4.1.2 วัฏภาคผลึกของเหล็กออกไซด์ MMT และ Fe-MMT

เมื่อนำเหล็กออกไซด์ MMT และ Fe-MMT ที่สภาวะต่างๆ ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่มุม 2 $\theta$  ตั้งแต่ 5° ถึง 60° ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

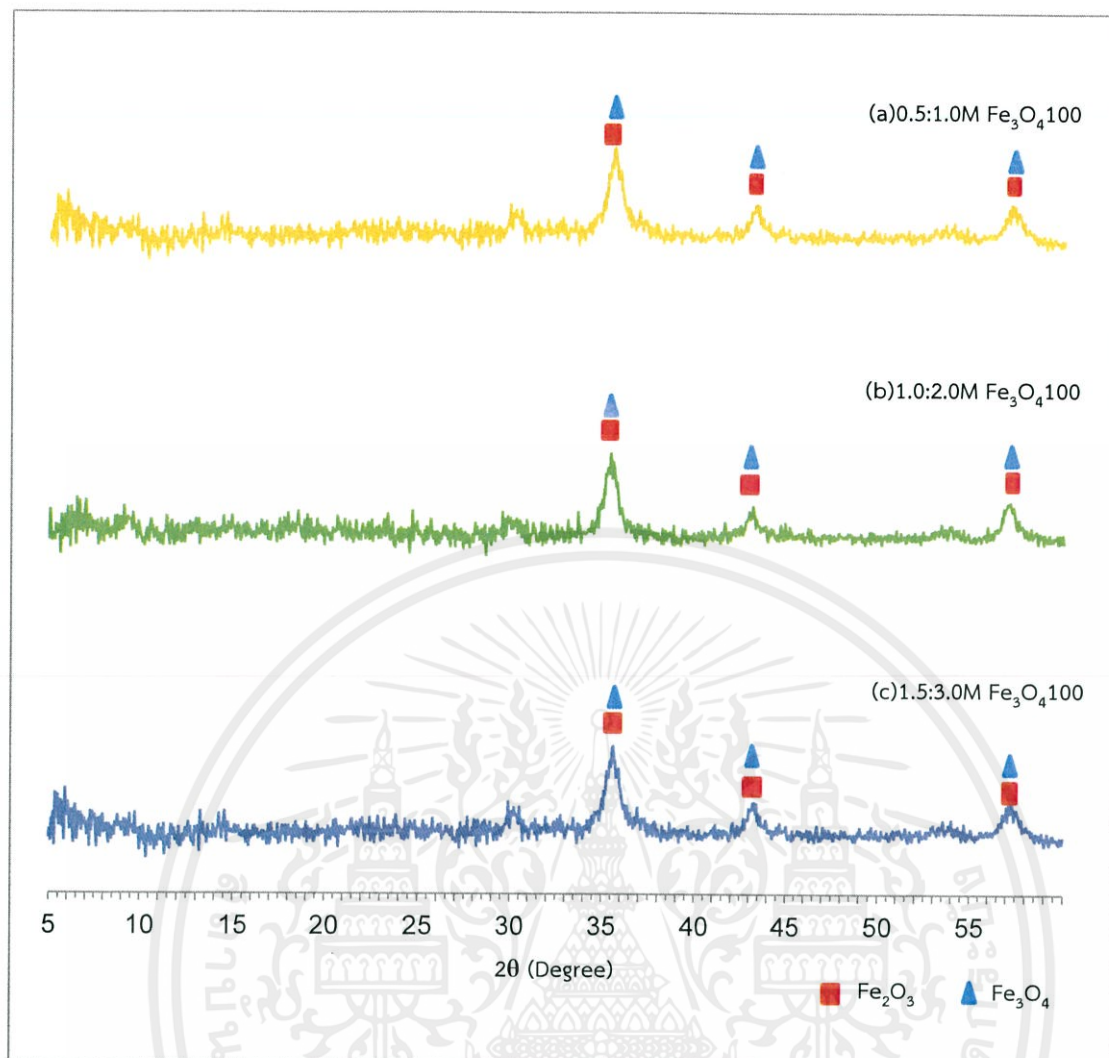
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเหล็กออกไซด์ของระบบสารละลายเหล็กผสม  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1

จากรูปที่ 4.1(a) – 4.1(d) พบว่าเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 เมื่อใช้อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลที่ 80 °C พบว่าปรากฏพิกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 35.63 และ 57.18° ซึ่งสันนิษฐานว่าพิกที่ปรากฏ คือวัฏภาคผลึก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลเป็น 100 °C พบว่าแผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แสดงวัฏภาคผลึก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ที่ชัดเจนมากขึ้น โดยมีพิกสำคัญที่ตำแหน่งที่  $2\theta$  เท่ากับ 30.28 43.38 และ 53.73° ดังรูปที่ 4.1(c) และ 4.1(d) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลส่งผลให้การก่อผลึกของวัฏภาค  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  สมบูรณ์มากขึ้น

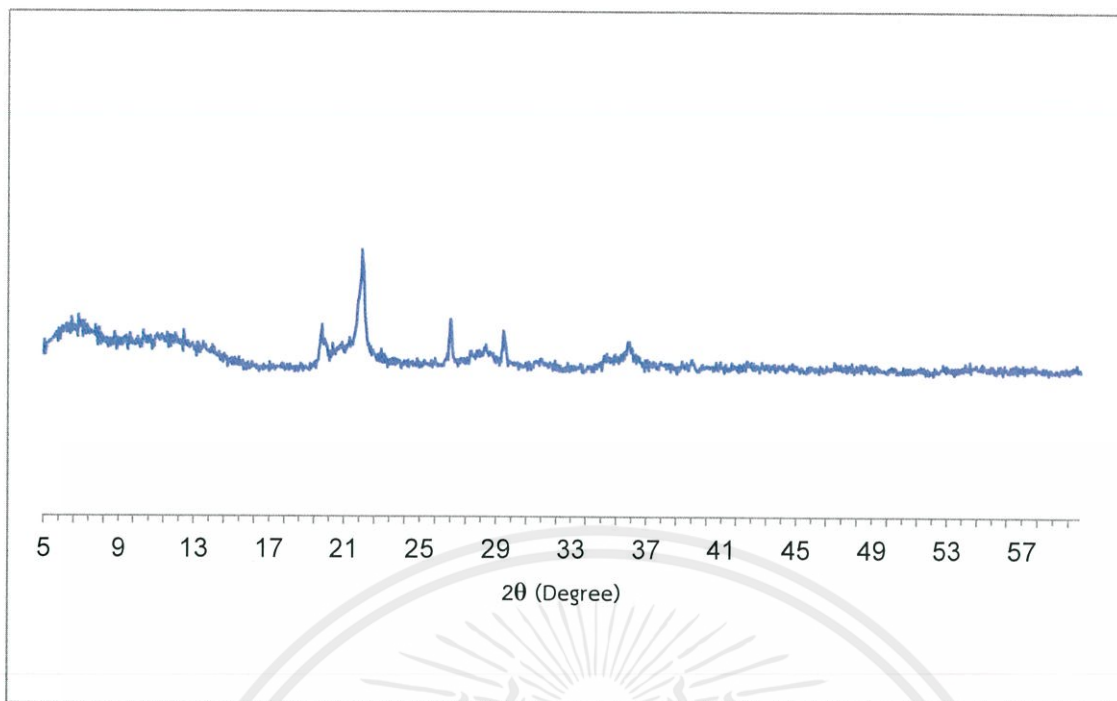
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเหล็กออกไซด์ของระบบสารละลายเหล็กผสม  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  ในอัตราส่วนโดยโมล 1:2

เมื่อพิจารณาในระบบสารละลายเหล็กผสม  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:2 ภายหลังจากทำปฏิกิริยาอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลที่  $100^\circ\text{C}$  ที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายเหล็กผสมต่างๆ พบว่าอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ประกอบด้วยวัฏภาคผลึก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ซึ่งปรากฏพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $35.63$ ,  $43.38$  และ  $57.18^\circ$  ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กผสมไม่ส่งผลต่อการเกิดวัฏภาคผลึก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

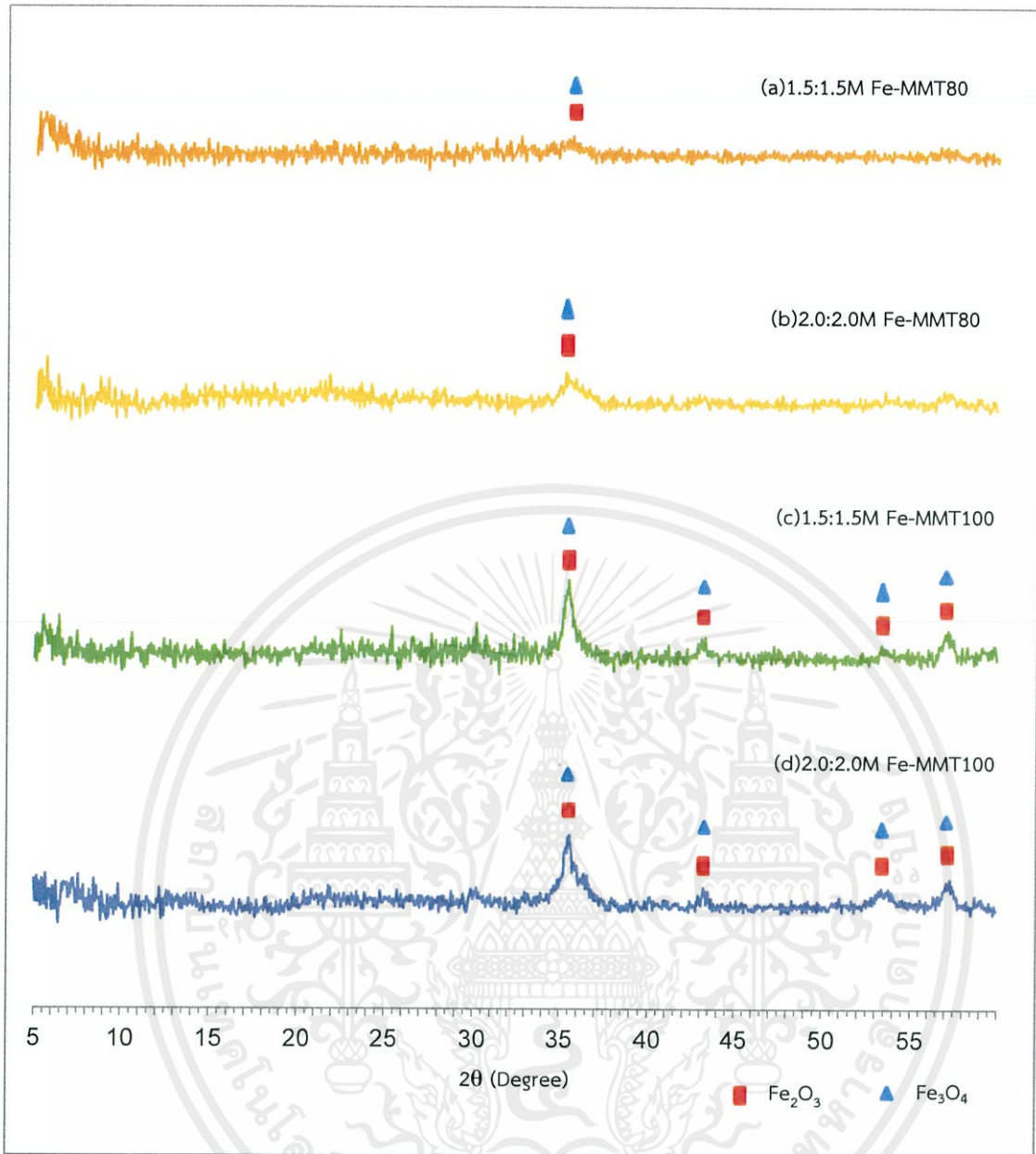
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT

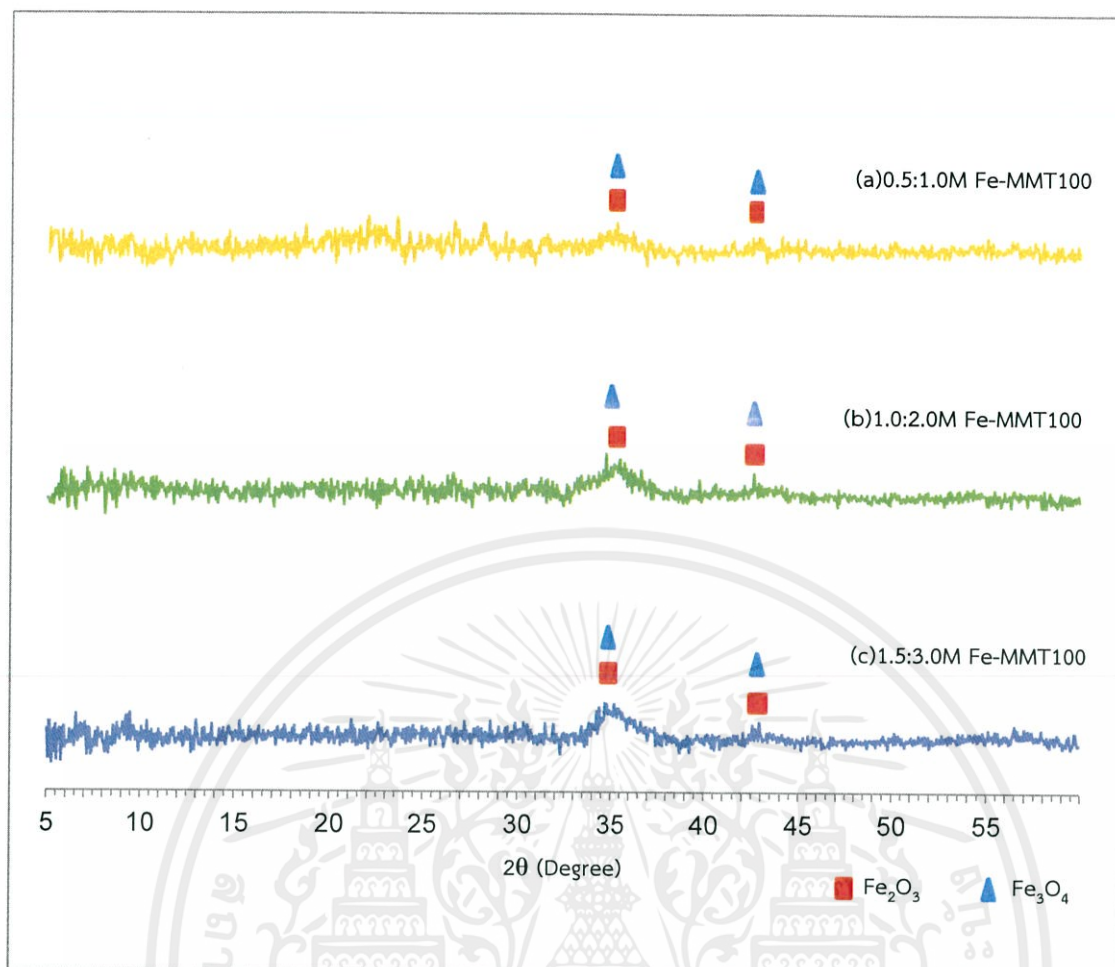
จากรูปที่ 4.3 พบว่าสารตั้งต้น MMT ปรากฏฟีกของระนาบ 001 ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $7.16^\circ$  ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ได้จากสมการ  $n\lambda = 2d \sin\theta$  พบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ MMT มีค่าเท่ากับ  $12.33 \text{ \AA}$  นอกจากนี้ยังปรากฏฟีกของ MMT ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $22^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1

จากรูปที่ 4.4 ทำการสังเคราะห์ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 ภายใต้อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลที่  $80^{\circ}C$  พบว่าปรากฏฟีกของวัฏภาคผลึก  $Fe_2O_3$  และ  $Fe_3O_4$  ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $35.63^{\circ}$  ดังรูปที่ 4.4(a) และ 4.4(b) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลเป็น  $100^{\circ}C$  พบว่าแผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แสดงวัฏภาคผลึก  $Fe_2O_3$  และ  $Fe_3O_4$  ที่ชัดเจนมากขึ้น โดยมีฟีกสำคัญที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $43.38$ ,  $53.73$  และ  $57.18$  ดังรูปที่ 4.4(c) และ 4.4(d) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลส่งผลให้การก่อผลึกของวัฏภาค  $Fe_2O_3$  และ  $Fe_3O_4$  สมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 4.5 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:2

เมื่อพิจารณาการสังเคราะห์ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:2 โดยใช้อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอลที่  $100^{\circ}C$  ปรากฏพีกของวัฏภาคผลึก  $Fe_2O_3$  และ  $Fe_3O_4$  ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $35.63^{\circ}$  และ  $43.38^{\circ}$  ดังรูปที่ 4.5(a) 4.5(b) และ 4.5(c) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามสารละลายเหล็กผสมทั้งในระบบ 1:1 และ 1:2 พีกของวัฏภาคผลึก  $Fe_2O_3$  และ  $Fe_3O_4$  ใน Fe-MMT มีพีกไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับพีกของเหล็กออกไซด์ ดังรูป 4.1 เนื่องจากพีกของวัฏภาคผลึก  $Fe_2O_3$  และ  $Fe_3O_4$  บางส่วนถูกบดบังด้วย MMT

เมื่อพิจารณา Fe-MMT ของระนาบ 001 ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $7.16^{\circ}$  และพีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $22^{\circ}$  ของ MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 และ 1:2 พบว่าพีกของ MMT ที่ตำแหน่งดังกล่าวหายไป จากผลการทดลองสันนิษฐานได้ว่า สารประกอบเหล็กออกไซด์บางส่วนสามารถแทรกอยู่ภายในโครงสร้างของ MMT และบางส่วนเกิดเป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์อยู่นอกโครงสร้างของ MMT

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊ส

เมื่อนำ MMT และ Fe-MMT ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ส่วนการหาขนาดรูพรุนได้จากสมการของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77.35 K ด้วยเครื่อง Autosorp ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน BJH ของ MMT และ Fe-MMT

ระบบสารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+} : Fe^{3+}$	สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิว จำเพาะ ( $m^2/g$ )	ปริมาตร รูพรุน ( $cm^3/g$ )	ขนาด รูพรุน BJH (nm)
-	MMT	64.79	0.1395	3.8
1:1	1.5:1.5M Fe-MMT100	130.82	0.3111	3.8
	2.0:2.0M Fe-MMT100	76.53	0.2488	3.8
1:2	0.5:1.0M Fe-MMT100	98.43	0.2186	3.8
	1.0:2.0M Fe-MMT100	212.82	0.3219	3.8
	1.5:3.0M Fe-MMT100	215.86	0.3297	3.8

จากผลการวิเคราะห์ MMT พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ  $64.79 m^2/g$  ปริมาตรรูพรุน  $0.1395 cm^3/g$  และขนาดรูพรุน BJH  $3.752 nm$  เมื่อนำไปดัดแปรโครงสร้าง Fe-MMT ทั้งระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+} : Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 และ 1:2 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่ามีเหล็กออกไซด์เข้าไปแทรกภายในโครงสร้างของ MMT ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้น (Interlayer) ของ MMT กว้างขึ้น ทำให้พื้นที่ในการยึดจับแก๊สมากขึ้น

เมื่อพิจารณาในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+} : Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 และ 1:2 พบว่าในระบบ 1:2 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนจะเพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าปริมาณเหล็กที่มากขึ้นทำให้เหล็กออกไซด์สามารถเข้าไปแทรกภายในโครงสร้างของ MMT ได้มากขึ้นเช่นกัน แต่ในระบบ 1:1 พบว่าสารตัวอย่าง 1.5:1.5M Fe-MMT100 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากกว่าสารตัวอย่าง 2.0:2.0M Fe-MMT สันนิษฐานได้ว่าเป็นผลเนื่องจากกระบวนการทำให้ชุ่ม (Impregnation) บางช่วงของการหยดสารละลายเหล็กลงบน MMT อาจใช้ปริมาณมากเกินไปในแต่ละครั้ง ทำให้มีเหล็กบางส่วนที่เข้าไปในโครงสร้างของ MMT ไม่ได้ เกิดการเกาะอยู่บนบริเวณพื้นผิวของ MMT ส่งผลให้การหยดสารละลายเหล็กผสมในครั้งต่อไปเข้าไปภายในรูพรุนยากขึ้น ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนลดน้อยลง

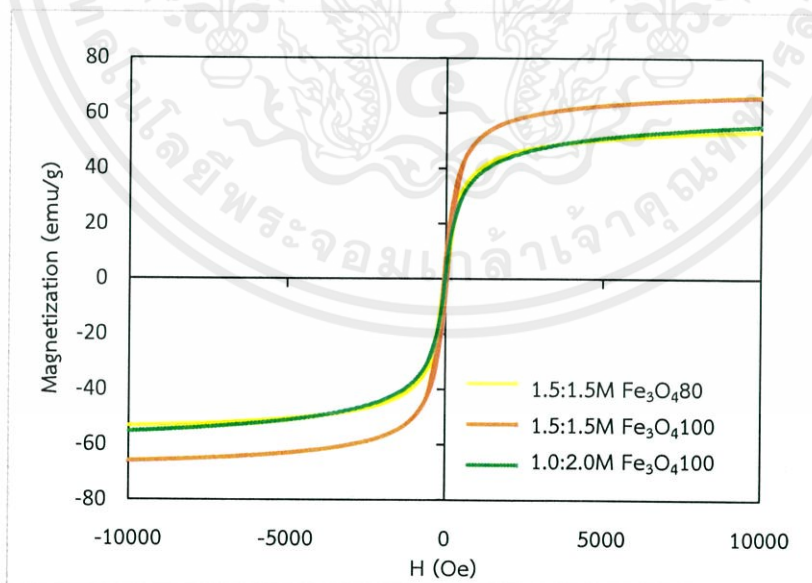
เมื่อพิจารณาในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+} : Fe^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:2 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าปริมาณเหล็กที่มากขึ้นทำให้เหล็กออกไซด์สามารถเข้าไปแทรกในโครงสร้างของ MMT ได้มากขึ้น

โดยที่สารตัวอย่าง 1.5:3.0M Fe-MMT100 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากที่สุด เท่ากับ  $215.86 \text{ m}^2/\text{g}$  และ  $0.3297 \text{ cm}^3/\text{g}$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดรูพรุน ดังแสดงในภาคผนวก (ก-1)-(ก-12) พบว่าสารตัวอย่างทุกตัวมีขนาดรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 3.80 นาโนเมตร โดยสารตัวอย่าง MMT จะมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนเพียงช่วงเดียว แสดงถึงความสม่ำเสมอของขนาดรูพรุนในโครงสร้าง แต่เมื่อตัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียว พบว่ามีฟังก์ชันของการกระจายตัวของขนาดรูพรุนลักษณะเป็นช่วงกว้าง แสดงถึงขนาดของรูพรุนมีหลายค่า แต่รูพรุนส่วนใหญ่ยังมีขนาดประมาณ 3.80 นาโนเมตร ทั้งนี้ เนื่องจากมีเหล็กออกไซด์เข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างชั้นของ MMT ทำให้ขนาดรูพรุนกว้างขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวอย่างในระบบ 1:1 และ 1:2 พบว่าสารตัวอย่างในระบบ 1:2 มีสัดส่วนของรูพรุนที่มีขนาด 3.80 นาโนเมตร ในปริมาณที่สูงกว่าสารตัวอย่างในระบบ 1:1 โดยสารตัวอย่าง 1.5:3.0M Fe-MMT100 มีสัดส่วนของรูพรุนที่มีขนาด 3.8 นาโนเมตร ในปริมาณที่สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบรูพรุนที่มีขนาดในช่วง 4-10 นาโนเมตร ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในสารตัวอย่าง Fe-MMT มีรูพรุนหลายขนาดและมีลักษณะรูพรุนหลายแบบ

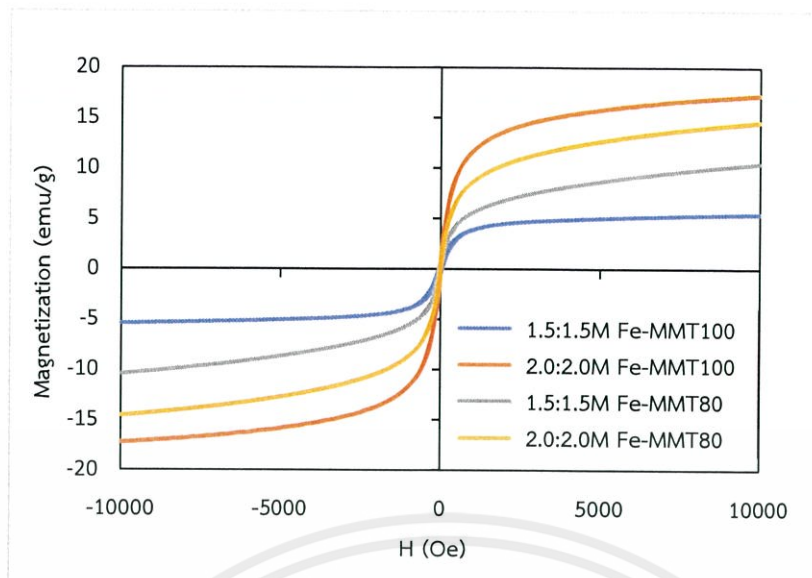
#### 4.1.4 สมบัติความเป็นแม่เหล็กโดยใช้เทคนิคการสั่นของวัสดุในสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำสารตัวอย่างเหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) และ Fe-MMT มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการสั่นของวัสดุในสนามแม่เหล็ก (Vibrating sample magnetometer; VSM) โดยทำการควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกให้อยู่ในช่วง -10,000 ถึง 10,000 Oe ที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 และดังแสดงในตารางที่ 4.3

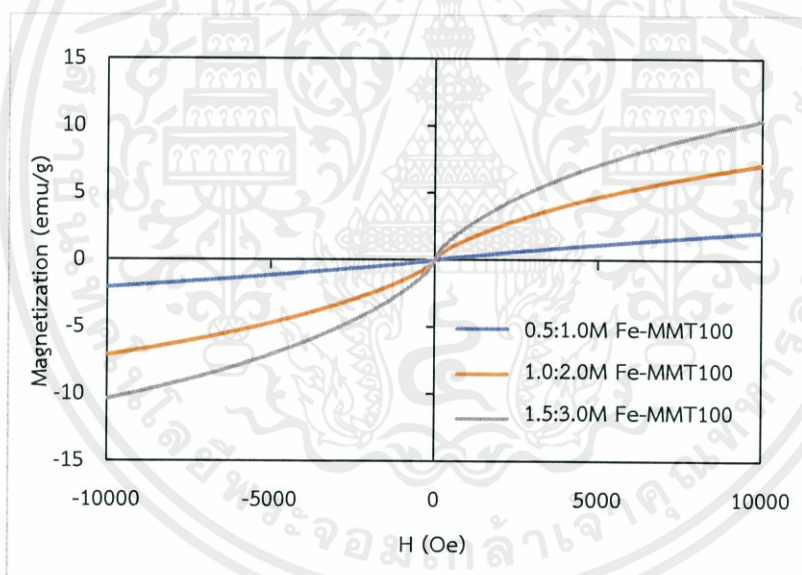


รูปที่ 4.6 กราฟ M-H Curve เหล็กออกไซด์บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณำใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟ M-H Curve ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1



รูปที่ 4.8 กราฟ M-H Curve ของ Fe-MMT ในระบบสารละลายเหล็กผสม  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:2

จากรูปที่ 4.6 – 4.8 พบว่ากราฟ M-H Curve มีลักษณะกราฟเป็น S-Curve ซึ่งมีค่า  $M_r$  และ  $H_c$  เข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่ามีสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic) โดยเหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) มีค่าแมกเนไทเซชันสูงสุด ( $M_{\text{max}}$ ) สูงกว่าวัสดุประกอบ Fe-MMT เนื่องจากอนุภาคเหล็กออกไซด์แทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง MMT จึงทำให้สมบัติความเป็นแม่เหล็กถูกบดบัง

ตารางที่ 4.3 ค่าแมกเนไทเซชันสูงสุด ( $M_{max}$ ) ค่าแมกเนไทเซชันคงค้าง ( $M_r$ ) และค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ( $H_c$ )

ระบบสารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	สารตัวอย่าง	$M_{max}$ (emu/g)	$M_r$ (emu/g)	$H_c$ (Oe)
1:1	1.5:1.5M $Fe_3O_4$ 80	53.42	5.09	49.57
	1.5:1.5M $Fe_3O_4$ 100	66.07	7.29	52.30
1:2	1.0:2.0M $Fe_3O_4$ 100	55.40	0.94	8.12
1:1	1.5:1.5M Fe-MMT80	10.45	0.44	20.43
	2.0:2.0M Fe-MMT80	14.56	0.69	23.37
	1.5:1.5M Fe-MMT100	5.44	0.61	57.80
	2.0:2.0M Fe-MMT100	17.26	0.79	18.18
1:2	0.5:1.0M Fe-MMT100	2.08	4.76	7.00
	1.0:2.0M Fe-MMT100	7.11	14.18	3.25
	1.5:3.0M Fe-MMT100	10.40	9.56	1.39

เมื่อ  $M_{max}$  คือ ค่าแมกเนไทเซชัน (Maximum Magnetization)

$M_r$  คือ ค่าแมกเนไทเซชันคงค้าง (Remnant Magnetization)

$H_c$  คือ ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Coercivity)

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.3 พบว่าทั้งในระบบ 1:1 และ 1:2 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นตั้งต้นของสารละลายเหล็กผสม ส่งผลให้ค่า  $M_{max}$  เพิ่มขึ้นในทุกสารตัวอย่าง โดยการสังเคราะห์เหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ ( $Fe_3O_4$ ) มีค่า  $M_{max}$  สูงกว่าวัสดุประกอบ Fe-MMT เนื่องจากอนุภาคเหล็กออกไซด์แทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง MMT จึงทำให้สมบัติความเป็นแม่เหล็กถูกบดบัง ซึ่งโดยปกติแล้วสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic) มีค่า  $M_r$  และ  $H_c$  เข้าใกล้ศูนย์ จากตารางแสดงผลเมื่อพิจารณาเหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ พบว่าเหล็กออกไซด์ 1.0:2.0M  $Fe_3O_4$  100 มีค่า  $M_r$  และ  $H_c$  เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดและเมื่อพิจารณา Fe-MMT พบว่า 1.5:3.0M Fe-MMT100 มีค่า  $M_r$  และ  $H_c$  เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด ซึ่งแสดงพฤติกรรมคล้ายซูเปอร์พาราแมกเนติก ส่วนสารตัวอย่างอื่นๆ มีค่า  $M_r$  และ  $H_c$  ค่อนข้างสูง ดังนั้นน่าจะแสดงพฤติกรรมซูเปอร์พาราแมกเนติกชั่วคราว (Soft-Superparamagnetic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับและการกำจัดสียอม

### 4.2.1 การดูดซับสียอม Methylene Blue

ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสียอม MB ของ MMT และ Fe-MMT ที่อัตราส่วนโดยโมล  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  เท่ากับ 1:2 คือ 0.5:1.0M Fe-MMT100, 1.0:2.0M Fe-MMT100 และ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ที่ระยะเวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการดูดซับสียอม MB ของสารตัวอย่าง MMT และ Fe-MMT ด้วยกระบวนการดูดซับ

สารดูดซับ	ความเข้มข้นหลังการกำจัด (mg/L)	ร้อยละการดูดซับ
MMT	0.13	99.74
0.5:1.0M Fe-MMT100	0.28	99.44
1.0:2.0M Fe-MMT100	1.43	97.44
1.5:3.0M Fe-MMT100	4.04	91.92

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่าสารดูดซับ 0.5:1.0M Fe-MMT100 มีร้อยละการดูดซับสียอม MB สูงที่สุด รองลงมาคือ 1.0:2.0M Fe-MMT100 และ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ MMT ตั้งต้น พบว่าสารดูดซับกลุ่ม Fe-MMT มีค่าร้อยละการกำจัดที่ต่ำกว่า MMT ตั้งต้นเพียงเล็กน้อย สันนิษฐานว่าสารดูดซับกลุ่ม Fe-MMT และ MMT มีพื้นผิวของสารดูดซับที่เป็นประจุลบจึงสามารถดูดซับสารละลายสียอม MB ประจุบวกได้ดี แต่พบว่าสารดูดซับกลุ่ม Fe-MMT มีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่า MMT ตั้งต้น สันนิษฐานว่าเมื่อมีเหล็กออกไซด์อยู่ในโครงสร้างของ MMT อาจทำให้โครงสร้างรูพรุนมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้สารละลายสียอมแทรกเข้าไปดูดซับได้ยาก จึงส่งผลทำให้มีค่าร้อยละในการดูดซับสียอมต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.2 การกำจัดสีย้อม Reactive orange 16

### 4.2.2.1 การกำจัดสีย้อม Reactive orange 16 ด้วยกระบวนการดูดซับ

ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 ของ Fe-MMT ที่อัตราส่วนโดยโมล  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  เท่ากับ 1:1 และ 1:2 ทดสอบที่ระยะเวลาในการกำจัดที่ 2 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของสารตัวอย่าง Fe-MMT ด้วยกระบวนการดูดซับ

ระบบสารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	สารตัวอย่าง	การกำจัดที่ 2 ชั่วโมง	
		ความเข้มข้นหลัง การดูดซับ (mg/L)	ร้อยละการดูดซับ
1:1	1.5:1.5M Fe-MMT80	77.12	N/A
	2.0:2.0M Fe-MMT80	57.59	N/A
	1.5:1.5M Fe-MMT100	71.47	N/A
	2.0:2.0M Fe-MMT100	53.47	N/A
1:2	0.5:1.0M Fe-MMT100	54.47	N/A
	1.0:2.0M Fe-MMT100	51.47	N/A
	1.5:3.0M Fe-MMT100	47.76	4.48

จากตารางที่ 4.5 ได้ทำการทดสอบการกำจัดสีย้อม RO16 ของ Fe-MMT ทั้งในระบบ 1:1 และ 1:2 พบว่ามีเพียงสารตัวอย่าง 1.5:3.0M Fe-MMT100 เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่สามารถกำจัดสีย้อม RO16 ได้เล็กน้อย จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับของ 1.5:3.0M Fe-MMT ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม RO16 โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับ ดังนี้ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ที่ระยะเวลาต่างๆ

ปริมาณสารดูดซับ (g)	เวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลัง การดูดซับ (mg/L)	ร้อยละการดูดซับ
0.1	1	49.52	0.96
0.1	2	47.76	4.48
0.1	3	45.82	8.36
0.1	4	45.18	9.64
0.1	5	45.64	8.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการดูดซับจาก 1 ถึง 3 ชั่วโมง ค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงที่ 4 จากนั้นค่าร้อยละการดูดซับมีค่าลดลง จนถึง 8.72 ที่ระยะเวลาการดูดซับที่ 5 ชั่วโมง เนื่องจากสีย้อม RO16 เกิดการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงอ่อนๆ ทำให้โมเลกุลของสีย้อม RO16 หลุดออกมาได้ง่าย เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับจึงอาจทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำลง นอกจากนี้การเพิ่มเวลาในการดูดซับสีย้อม RO16 ไม่ส่งผลทำให้ค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมมีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้สันนิษฐานว่าสารดูดซับ MMT และ Fe-MMT มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบจึงไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของ RO16 ซึ่งแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาวะสารละลาย การดูดซับที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นการดูดซับทางกายภาพ จึงทำให้มีค่าการดูดซับสีย้อมที่ไม่แน่นอนเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ดังนั้นจึงทำการศึกษาวิธีการกำจัดสีย้อม RO16 ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ในหัวข้อต่อไป

#### 4.2.2.2 การกำจัดสีย้อม Reactive orange 16 โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน

จากวิธีการกำจัดสีย้อม RO16 ของ Fe-MMT ด้วยกระบวนการการดูดซับ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม RO16 ที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงทำการกำจัด RO16 ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทดสอบที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 2 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของสารตัวอย่าง Fe-MMT โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน

ระบบสารละลาย เหล็กผสม $Fe^{2+}:Fe^{3+}$	สารตัวอย่าง	การกำจัดที่ 2 ชั่วโมง	
		ความเข้มข้นหลัง การกำจัด (mg/L)	ร้อยละการกำจัด
1:1	1.5:1.5M Fe-MMT80	61.47	N/A
	2.0:2.0M Fe-MMT80	54.29	N/A
	1.5:1.5M Fe-MMT100	57.65	N/A
	2.0:2.0M Fe-MMT100	51.62	N/A
1:2	0.5:1.0M Fe-MMT100	45.94	8.12
	1.0:2.0M Fe-MMT100	44.41	11.18
	1.5:3.0M Fe-MMT100	37.18	25.64

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาในการกำจัด 2 ชั่วโมง มีเฉพาะสารตัวอย่างในระบบสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:2 ที่สามารถกำจัดสีย้อมได้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กที่มีผลต่อความสามารถของ Fe-MMT ในการกำจัดสีย้อม RO16 ในระบบ 1:2 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่มากขึ้น ทำให้มี

ปริมาณเหล็กซึ่งเป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาเฟนตันมากขึ้น เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; OH<sup>·</sup>) ซึ่งสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม RO16 หรือทำให้มีขนาดเล็กลง จึงส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยพบว่าสารตัวอย่าง 1.5:3.0M Fe-MMT มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม RO16 สูงที่สุด เท่ากับ 25.64 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสีย้อม RO16 ของ 0.5:1.0M Fe-MMT100 ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันคือ ระบบการกำจัดที่ใช้ 0.5:1.0M Fe-MMT100 ปริมาณ 0.025, 0.05, 0.075 และ 0.100 กรัม และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.8 ผลการกำจัดสีย้อม RO16 ของ 0.5:1.0M Fe-MMT100 + 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่มีปริมาณสารดูดซับและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

ปริมาณสารดูดซับ (g)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นหลังการกำจัด (mg/L)	ร้อยละการกำจัด
0.025	2	46.12	7.76
0.050		45.53	8.94
0.075		44.76	10.48
0.100		42.00	16.00
	1	48.12	3.76
	2	42.00	16.00
	3	40.59	18.82
	4	37.94	24.12
	5	36.82	26.36
	6	35.71	28.58

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารดูดซับ 0.5:1.0M Fe-MMT100 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยใช้เวลาการกำจัดเป็น 2 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวอย่างในการทำปฏิกิริยา ทำให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อม RO16 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ 0.5:1.0M Fe-MMT100 ที่มากขึ้น ทำให้มีปริมาณเหล็กซึ่งเป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาเฟนตันมากขึ้น ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; OH<sup>·</sup>) ซึ่งสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อม RO16 หรือทำให้มีขนาดเล็กลง จึงส่งผลให้ค่าร้อยละการกำจัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาในการกำจัดสีย้อม RO16 ที่ใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.5:1.0M Fe-MMT100 เท่ากับ 0.1 กรัม พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 1 ถึง 4 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม RO16 มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงระยะเวลา 5-6 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ

### 4.3 การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

เมื่อสารดูดซับถูกใช้งานไปรูพรุนของสารดูดซับจะอุดตันไปด้วยโมเลกุลของสีย้อม ทำให้สารดูดซับหมดประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม จึงต้องนำสารดูดซับที่หมดประสิทธิภาพมาฟื้นฟูคุณภาพเพื่อให้สามารถนำมาใช้ใหม่ โดยการนำไปกำจัดโมเลกุลของสีย้อมที่อุดตันอยู่ภายในรูพรุนก่อน โดยนำสารดูดซับไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโมเลกุลสีย้อม แล้วนำไปทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม RO16 โดยเปรียบเทียบสารดูดซับใหม่และสารดูดซับที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

ระบบ สารละลาย เหล็กผสม Fe <sup>2+</sup> :Fe <sup>3+</sup>	สารตัวอย่าง	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 10%v/v	ความเข้มข้นหลัง การกำจัด (mg/L)	ร้อยละการ กำจัด
1:2	0.5M Fe-MMT	✓	42.00	16.00
	0.5M Fe-MMT (Regeneration)	✓	46.53	6.92

พบว่าสารตัวอย่างภายหลังจากการปรับสภาพ มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมลดลง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากโมเลกุลสีย้อมที่แทรกอยู่ในช่องว่างของชั้น MMT เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงเกิดเป็นเขม่าดำ ซึ่งอาจไปอุดตันในรูพรุนของ Fe-MMT อีกทั้งปริมาณเหล็กออกไซด์ที่อยู่ใน Fe-MMT ลดลง ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเฟ้นตันในการกำจัด RO16 ในครั้งแรก จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

- ผลของการตัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

งานวิจัยนี้สามารถตัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ (Fe-MMT) โดยวิธีการทำให้ชุ่ม (Impregnation) ด้วยสารละลายเหล็กผสมระหว่างสารละลายแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  กับ สารละลายเพอร์คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต  $(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$  ที่อัตราส่วนโดยโมล  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  เป็น 1:1 และ 1:2 โดยใช้วิธีการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ในการตัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ (Fe-MMT) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเหล็กผสมเริ่มต้นที่ใช้ในการตัดแปร ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวกว้างขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ทำให้โครงสร้างรูพรุนมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำไปดูดซับสีย้อมทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ต่ำ เนื่องจากการขัดขวางของอนุภาคเหล็กอยู่ ทำให้สีย้อมแทรกเข้าไปดูดซับได้ยาก

ในการสังเคราะห์วัสดุประกอบแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ (Fe-MMT) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มอลจาก 80 °C เป็น 100 °C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความเป็นผลึกที่สมบูรณ์ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว MMT

วัสดุประกอบ Fe-MMT ที่เตรียมได้จากสารละลายเหล็กผสมระหว่าง  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงกว่า 1:1 และแร่ดินเหนียว MMT ตั้งต้น เนื่องจากมีปริมาณของไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  ในระบบสารละลายมากกว่า ทำให้เกิดเหล็กออกไซด์ภายในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว MMT มีปริมาณมากกว่าอัตราส่วนโดยโมล 1:1 และนอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมล 1:2 มีค่าสมบัติแม่เหล็กแบบซูเปอร์พาราแมกเนติกได้มากกว่าอัตราส่วนโดยโมลเป็น 1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความสามารถในการกำจัดสีย้อม

#### สีเมทิลีนบลู

ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระยะเวลาในการดูดซับที่ 2 ชั่วโมง พบว่าแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  (Fe-MMT) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากกว่า 90 %

#### สีรีแอกทีฟออเรนจ์ 16

ในการศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟออเรนจ์ พบว่าแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  (Fe-MMT) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟออเรนจ์ 16 ที่ต่ำมาก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากสารดูดซับที่เตรียมได้ มีประจุบนพื้นผิวเป็นลบจึงไม่เกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลสีย้อมรีแอกทีฟออเรนจ์ 16 ที่เป็นประจุลบได้

ในการพัฒนาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมประจุลบด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน (Fe-MMT/ $H_2O_2$ ) พบว่า 1.5:3.0M Fe-MMT100 ซึ่งมีความเข้มข้นของสารละลายเหล็กผสมในการดัดแปรโครงสร้างมากที่สุด มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟออเรนจ์ 16 สูงที่สุด คือมีค่าร้อยละการกำจัดเท่ากับ 25.64 เนื่องจากเหล็กออกไซด์ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน เพื่อให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัว ( $H_2O_2$ ) เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical;  $OH^{\cdot}$ ) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลสีย้อม ย่อยให้โมเลกุลสีย้อมมีขนาดเล็กลง จึงเป็นผลทำให้ร้อยละการกำจัดมีค่าสูงขึ้น

จากผลการศึกษาข้างต้น แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมหลากหลายชนิดของแร่ดินเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้าง (Fe-MMT) สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในอุตสาหกรรมได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาปริมาณของสารละลายเหล็กผสม  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$  ตั้งต้น ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียว MMT
2. จากการศึกษา Fe-MMT ทำปฏิกิริยาเฟนตัน (Fe-MMT/ $H_2O_2$ ) พบว่าความสามารถในการดึงดูแม่เหล็กของเหล็กออกไซด์ชนิดแมกนีไทต์ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว MMT เกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้โครงสร้างของเหล็กแมกนีไทต์เสียสภาพ ดังนั้นเหล็กแมกนีไทต์จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียว MMT

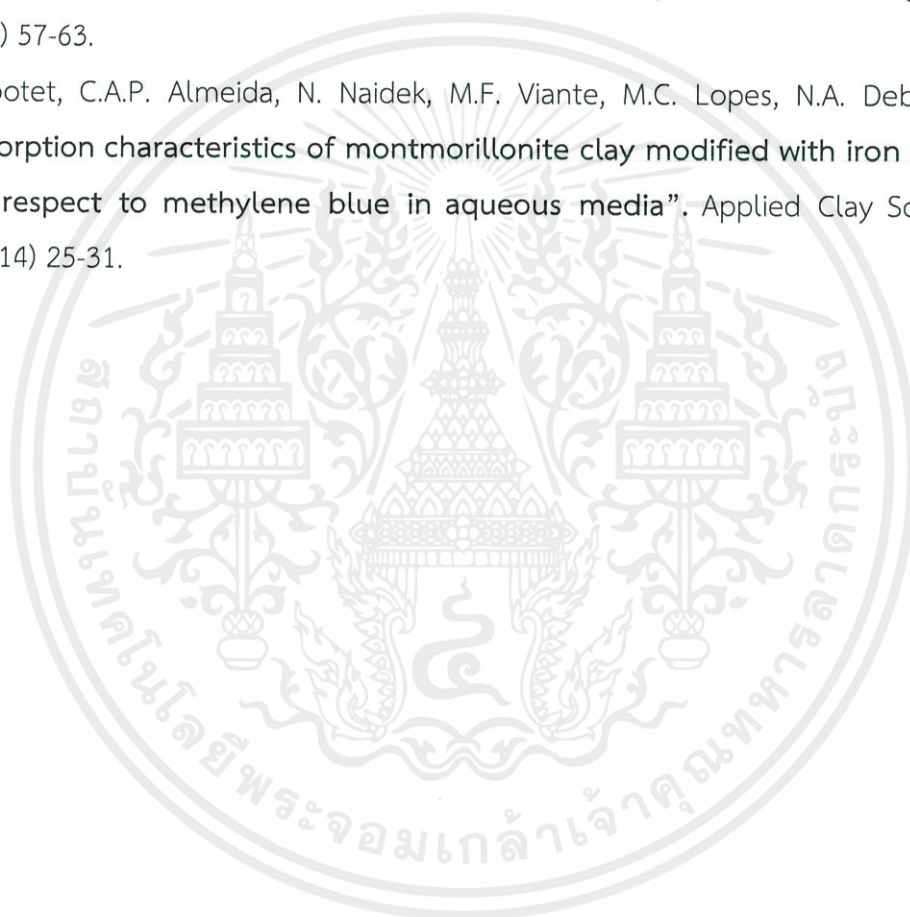
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. นิวัติ อนงค์รักษ์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. คณะเกษตรศาสตร์. ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ. สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษ์. ปฐพีศาสตร์เบื้องต้น. 2551. [online]. Available: [http://mis.agri.cmu.ac.th/download/course/lec\\_361212\\_%BA%B7%B7%D5%E8%20%20%CA%C1%BA%D1%B5%D4%E0%A4%C1%D5%A2%CD%A7%B4%D4%B9](http://mis.agri.cmu.ac.th/download/course/lec_361212_%BA%B7%B7%D5%E8%20%20%CA%C1%BA%D1%B5%D4%E0%A4%C1%D5%A2%CD%A7%B4%D4%B9).
2. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. คณะเกษตร. ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2554. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 14 -15
3. Manja K and Majda Sfiligoj S. University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Department for Textile Materials and Design, Slovenia. 2012. **Polymer Nanocomposite Hydrogels for Water Purification**. ISBN 978-953-51-0762-0. [online]. Available: <http://www.intechopen.com/books/nanocomposites-new-trends-and-development/polymer-nanocomposite-hydrogels-for-water-purification>
4. Francisco R, Valenzuela D, Pérsio de Souza S. Escola Politécnica Universidade. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais . 2001. **Studies on the acid activation of brazilian smectitic clays**. ISSN 0100-4042. [online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422001000300011>
5. แร่ออกไซด์ [online]. Available: <http://www.gemandart.rbru.ac.th/elearning/mineral-03>
6. ผลึกระบบเฮกซะโกนอลของฮีมาไทต์ [online]. Available: [http://www.geocities.jp/ohba\\_lab\\_ob\\_page/structure6.html](http://www.geocities.jp/ohba_lab_ob_page/structure6.html) [7 January 2014]
7. XRD ของฮีมาไทต์ [online]. Available: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/jm/c2jm34826h#divAbstract> [22 July 2012]
8. ผลึกแบบระบรอมโบฮีดรอลของแมกนีไมต์ [online]. Available: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12648-014-0627-y> [18 December 2014]
9. XRD ของแมกนีไมต์ [online]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/jchem/2013/412079/3>.
10. รูปผลึกระบบไอโซเมทริกแบบออกตะฮีดรอนของแมกนีไทต์ [online]. Available: [http://www.geocities.jp/ohba\\_lab\\_ob\\_page/structure6.html](http://www.geocities.jp/ohba_lab_ob_page/structure6.html)
11. XRD ของแมกนีไทต์ [online]. Available: <http://article.sapub.org/10.5923.j.nn.20130303.01.html>

12. แม่เหล็ก [online]. Available: [https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc\\_upload/20120308121450.pdf](https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20120308121450.pdf)
13. สมบัติแม่เหล็กของวัสดุนาโน [online]. Available: [http://www.neutron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com\\_content&task=view&id=470&Itemid=0&limit=1&limitstart=6](http://www.neutron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=470&Itemid=0&limit=1&limitstart=6)
14. ขนิษฐา. 2007. สีย้อม. [online]. Available: [http://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php?BookID=370&pageid=3&read=true&count=true](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?BookID=370&pageid=3&read=true&count=true) [16 January 2007]
15. ขนิษฐา. 2007. ประเภทของสีย้อม. [online]. Available: [http://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true)
16. สีย้อมรีแอคทีฟออเรนจ์ 16. [online]. Available: [http://www.thaitextile.org/tdc/?Page\\_id=955.htm](http://www.thaitextile.org/tdc/?Page_id=955.htm)
17. ส่วนประกอบของสีรีแอคทีฟ [online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/306509?lang=en&region=TH.htm>
18. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ และคณะ. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. สยามสแตนเนอรีซ์พลาซัส. กรุงเทพมหานคร. หน้า 72-73.
19. พัฒนา. กระบวนการดูดซับ. [online]. Available: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>
20. พัฒนา. กลไกการดูดซับ. [online]. Available: <http://pradthana.wordpress.com/tag/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%94%E0%B8%B9%E0%B8%94%E0%B8%8B%E0%B8%B1%E0%B8%9A/>. [19 March 2008]
21. ปฏิภานเพนตัน. [online]. Available: <http://www.energysavingmedia.com/news/page.php?a=10&n=107&cno=4086>
22. S. Xuan, LingyunHao, W. Jiang, X. Gong, Y. Hu, Z. Chen. "Preparation of water-soluble magnetite nanocrystals through hydrothermal approach". Journal of Magnetism and Magnetic Materials 308 (2007) 210-213.
23. N.K. Daud, M.A. Ahmad and B.H. Hameed "Decolorization of Acid Red 1 dye solution by Fenton-like process using Fe-Montmorillonite K10 catalyst". Chemical Engineering Journal 165 (2010) 111-116.
24. ชัชวาล แซ่เต็ง และพรสุดา การะเกตุ. "การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยออกไซด์ผสมของเหล็ก (II) และเหล็ก (III) (Preparation of mixed oxide of iron (II) and iron (III)". สาขาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมีอวิเคราะห์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.

25. S.Ahmadi, C.Chia, S.Zakaria, K. saeedfar, N. Asim. "Synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanocrystals using hydrothermal approach". Journal of Magnetism and Magnetic Materials 324 (2012) 4147–4150.
26. S. Komarneni, W. Hu, Y.D. Noh, A.V. Orden, S. Feng, C. Wei, H.Pang, F. Geo, Q. Lu and H. Katsuki "Magnetite synthesis from room temperature to  $150^\circ\text{C}$  with and without microwaves". Ceramic International 38(2012) 2563-2568.
27. R. Djellabi, M.F. Ghorab, G. Cerrato, S. Morandi, S. Gatto, V. Oldani, A. Di Michele and C.L. Bianchi "Photoactive  $\text{TiO}_2$ -montmorillonite composite for degradation of organic dyes in water". Journal of Photochemistry and Photobiology 295 (2014) 57-63.
28. L. Cootet, C.A.P. Almeida, N. Naidek, M.F. Viante, M.C. Lopes, N.A. Debacher "Adsorption characteristics of montmorillonite clay modified with iron oxide with respect to methylene blue in aqueous media". Applied Clay Science 95(2014) 25-31.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

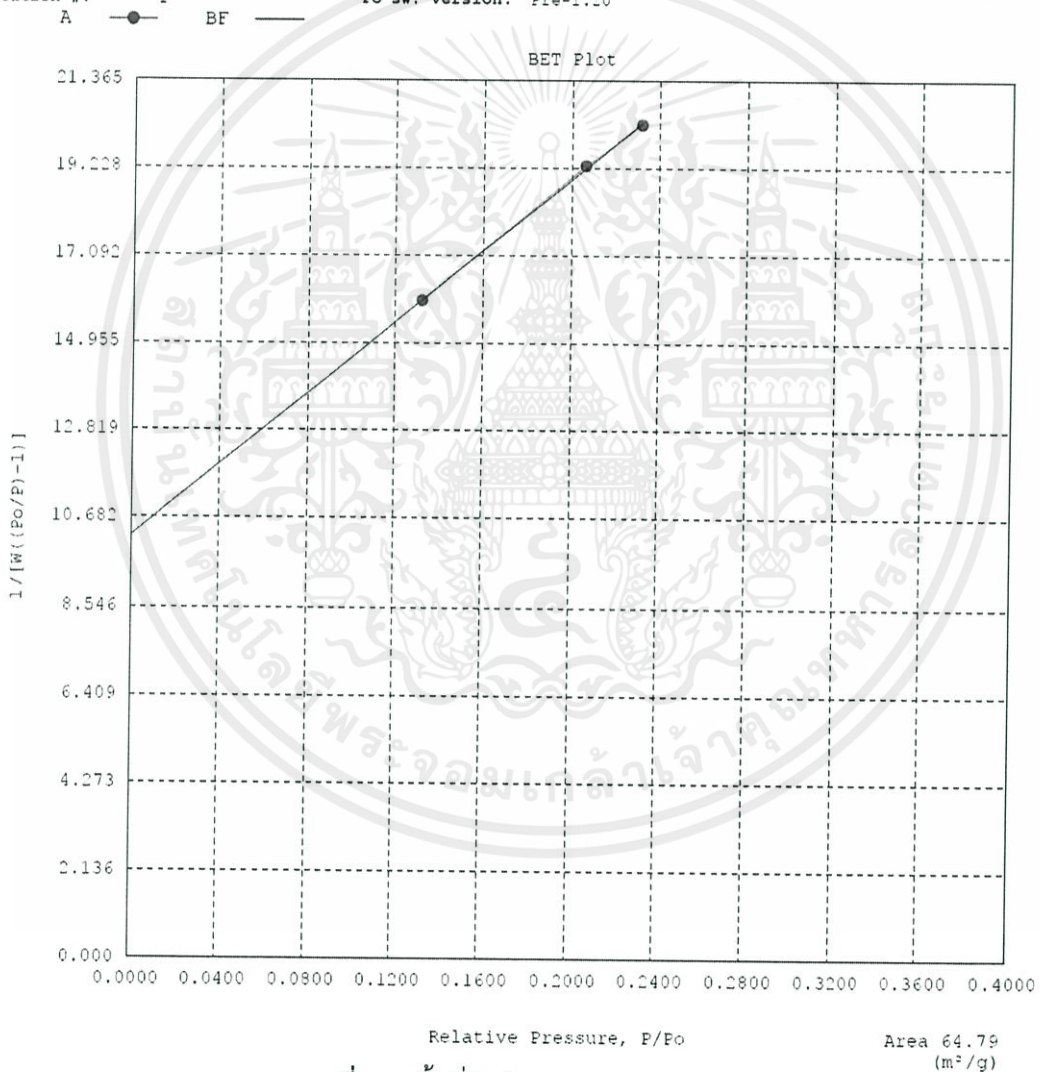
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน BJH ของ MMT และ Fe-MMT

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: D:\4A BET\10\580115\_1.RAW  
 Sample ID: clay Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: Aui Sample weight: 0.0467 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 15.0 hrs Analysis Time: 273.2 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 01/15/2015 13:54  
 Station #: 1 PC sw. version: Pre-1.20

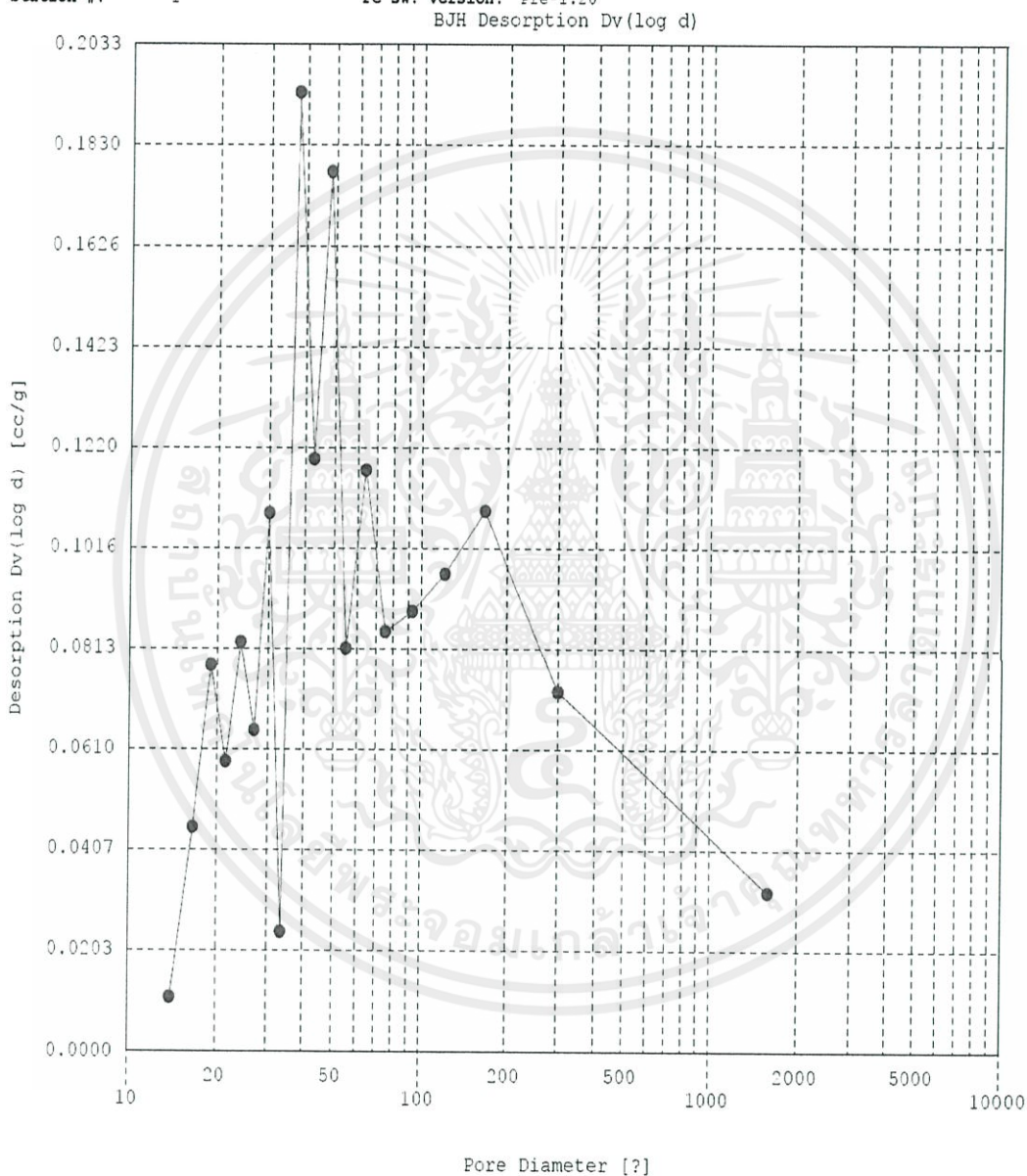


รูปที่ ก-1 พื้นที่ผิวจำเพาะของ MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: D:\QA BET\12\580115\_1.RAW  
 Sample ID: clay Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: Aui Sample weight: 0.0467 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsorbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 15.0 hrs Analysis Time: 273.2 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 01/15/2015 13:54  
 Station #: 1 PC sw. version: Pre-1.20

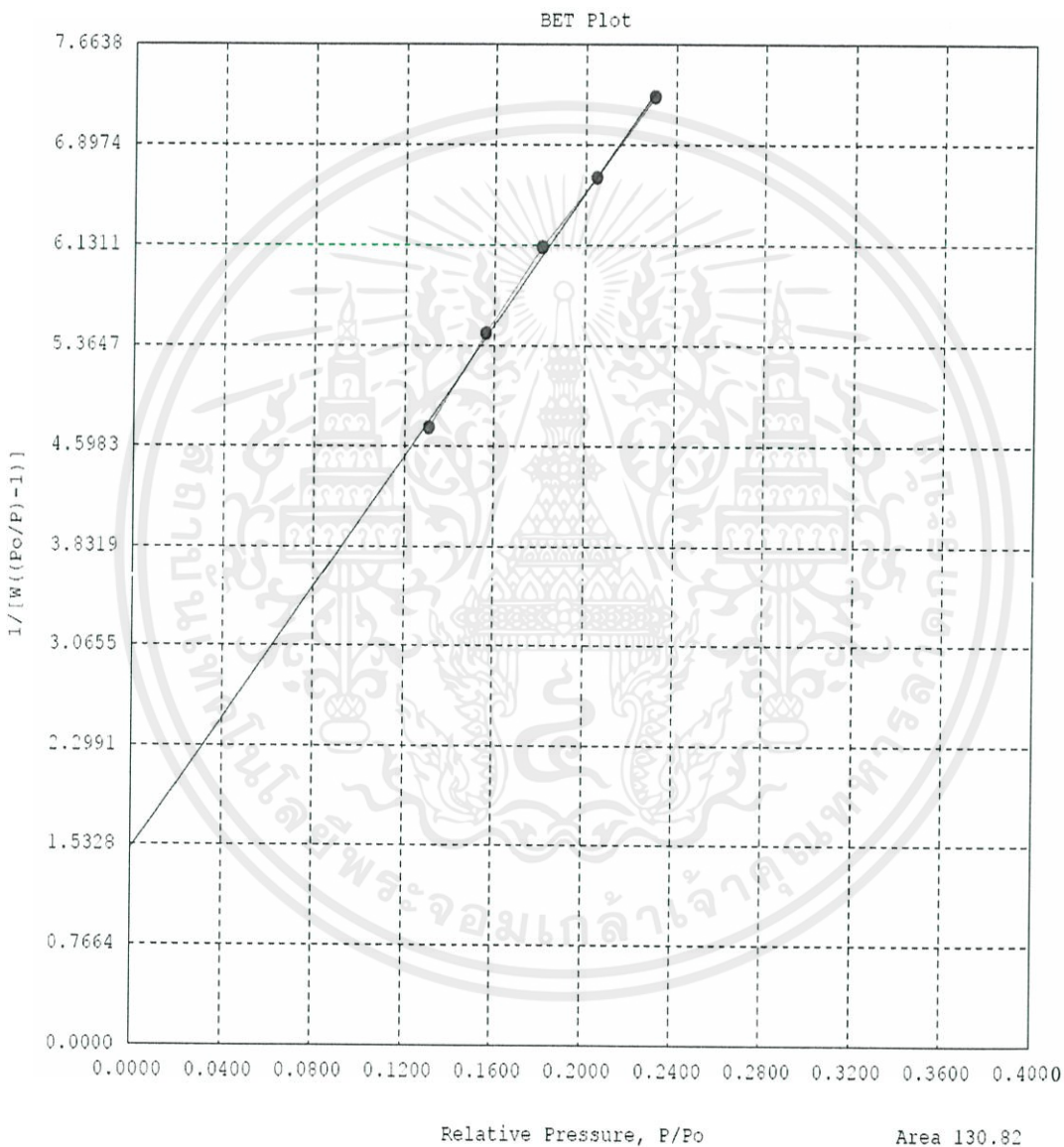


รูปที่ ก-2 ขนาดรูพรุน BJH ของ MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: D:\4A BET\12\580115\_2.RAW  
 Sample ID: Fe3O4 1.5 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: Aui Sample weight: 0.0446 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsorbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 5.4 hrs Analysis Time: 340.1 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 01/15/2015 20:53  
 Station #: 1 PC sw. version: Pre-1.20



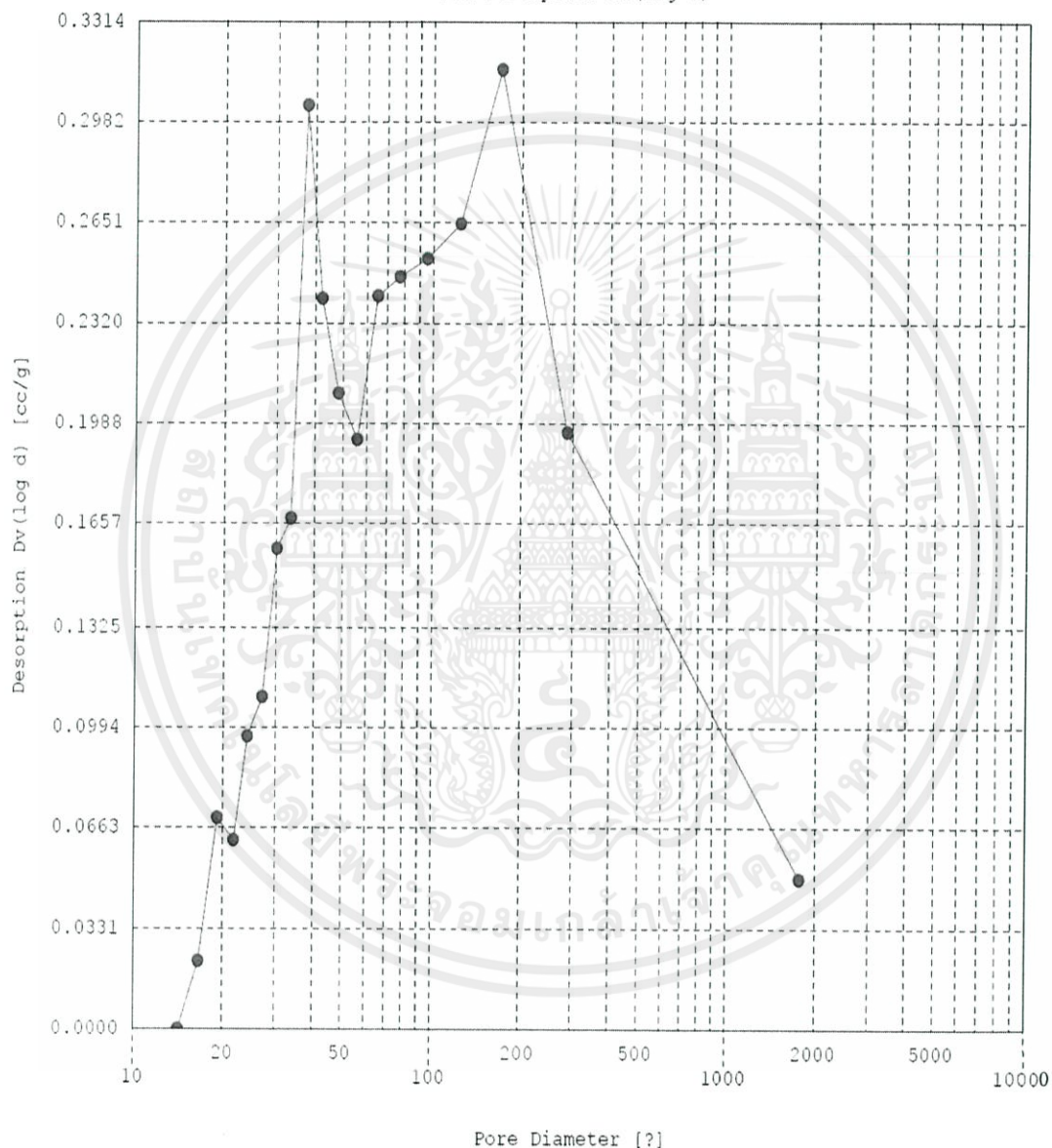
รูปที่ ก-3 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 1.5:1.5M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: D:\QA BET\12\580115\_2.RAW  
 Sample ID: Fe304 1.5      Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: Aui      Sample weight: 0.0446 g  
 Analysis gas: NITROGEN      X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec      Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsorbate (DRP): Nitrogen      Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C      Outgas Time: 5.4 hrs      Analysis Time: 342.1 min  
 P/Po tolerance: 2      Equil. time: 3      End of run: 01/15/2015 20:53  
 Station #: 1      PC sw. version: Pre-1.20

BJH Desorption Dv(log d)

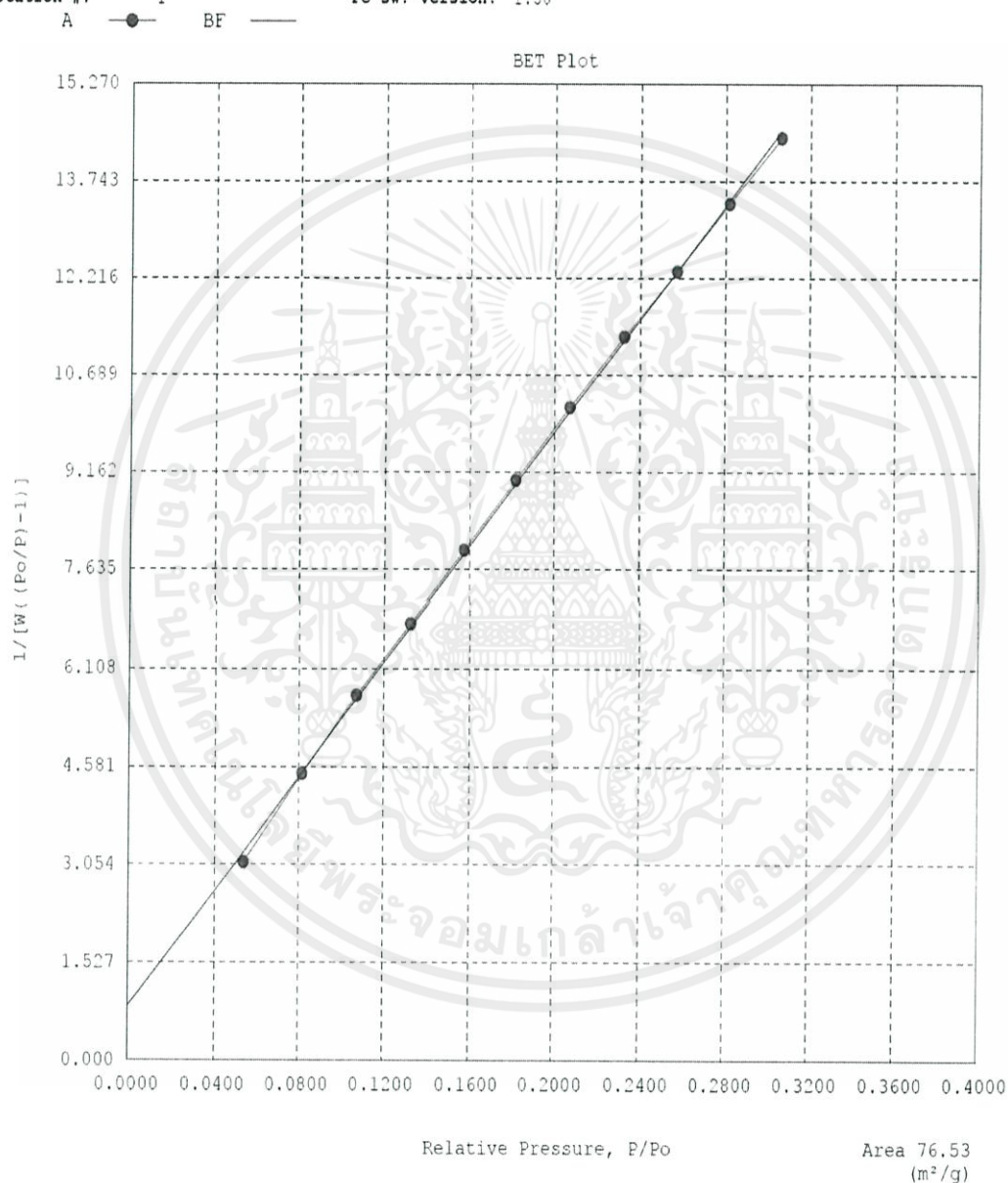


รูปที่ ก-4 ขนาดรูพรุน BJH ของ 1.5:1.5M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: D:\QA BET\12\580116\_1.RAW  
 Sample ID: Fe304 2 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: fern Sample weight: 0.0543 g  
 Analysis gas: Nitrogen X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 17.7 hrs Analysis Time: 347.9 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 01/16/2015 15:05  
 Station #: 1 PC sw. version: 1.50



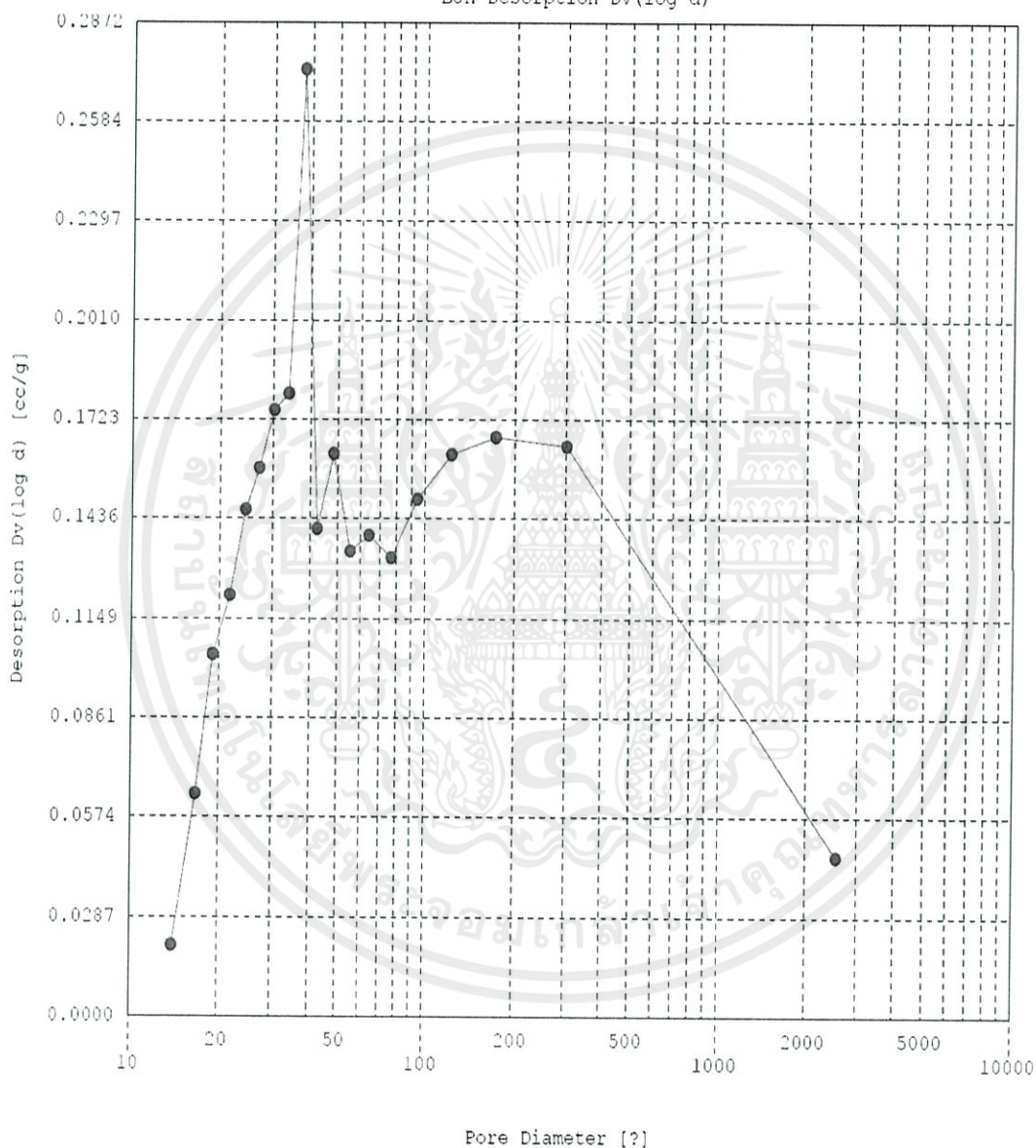
รูปที่ ก-5 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 2.0:2.0M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: D:\QA BET\12\580116\_1.RAW  
 Sample ID: Fe304 2      Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: fern      Sample weight: 0.0543 g  
 Analysis gas: Nitrogen      X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec      Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen      Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C      Outgas Time: 17.7 hrs      Analysis Time: 347.9 min  
 P/Po tolerance: 2      Equil. time: 3      End of run: 01/16/2015 15:05  
 Station #: 1      PC sw. version: 1.50

BJH Desorption Dv(log d)



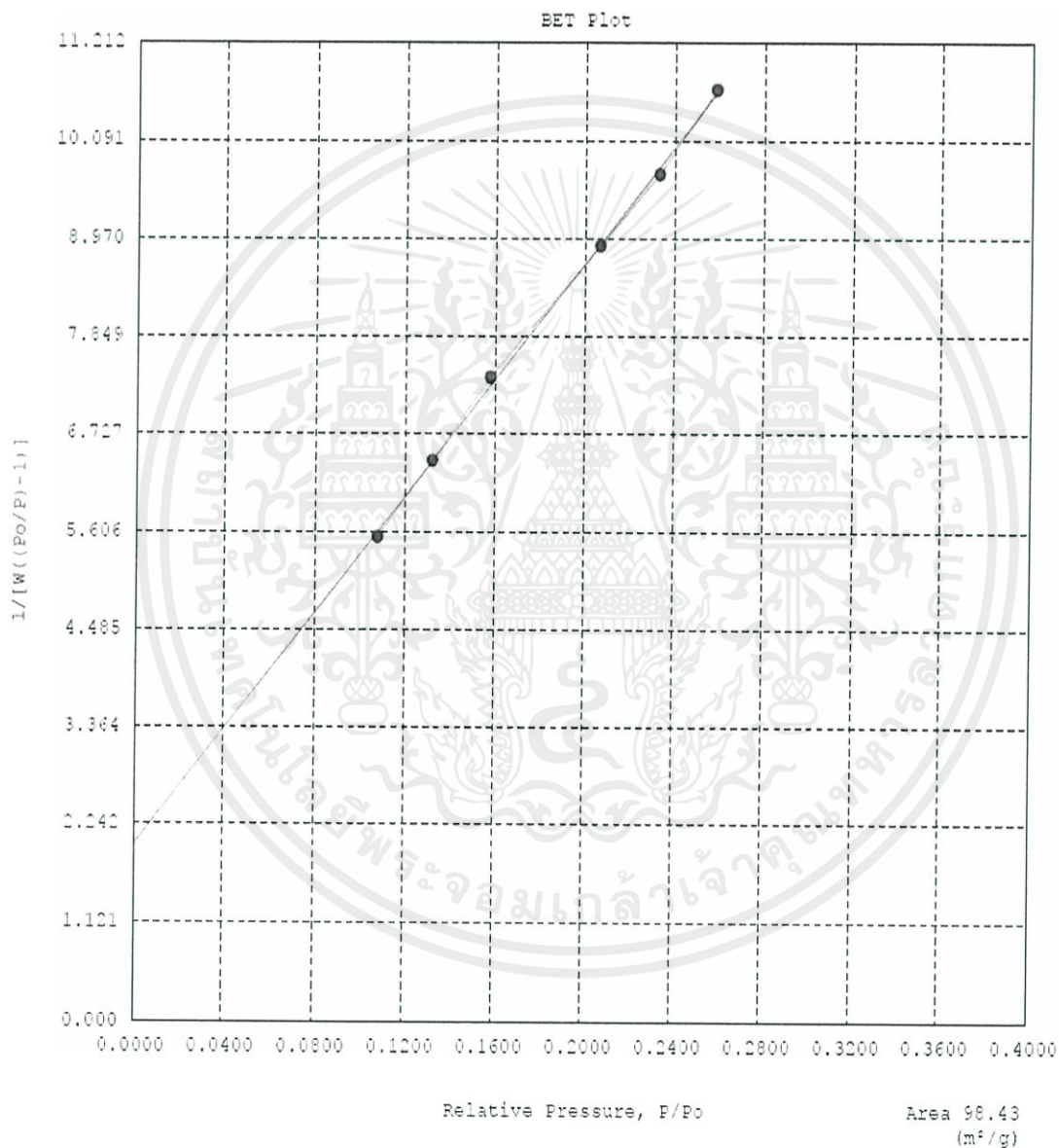
รูปที่ ก-6 ขนาดรูพรุน BJH ของ 2.0:2.0M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: C:\QCdata\44 BET\50\5\Aut\500521\_1.RAW  
 Sample ID: 1 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: Beot Sample weight: 0.0244 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsorbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 18.3 hrs Analysis Time: 351.5 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 05/21/2015 16:14  
 Station #: 1 PC sw. version: Pre-1.20

A ● BF —

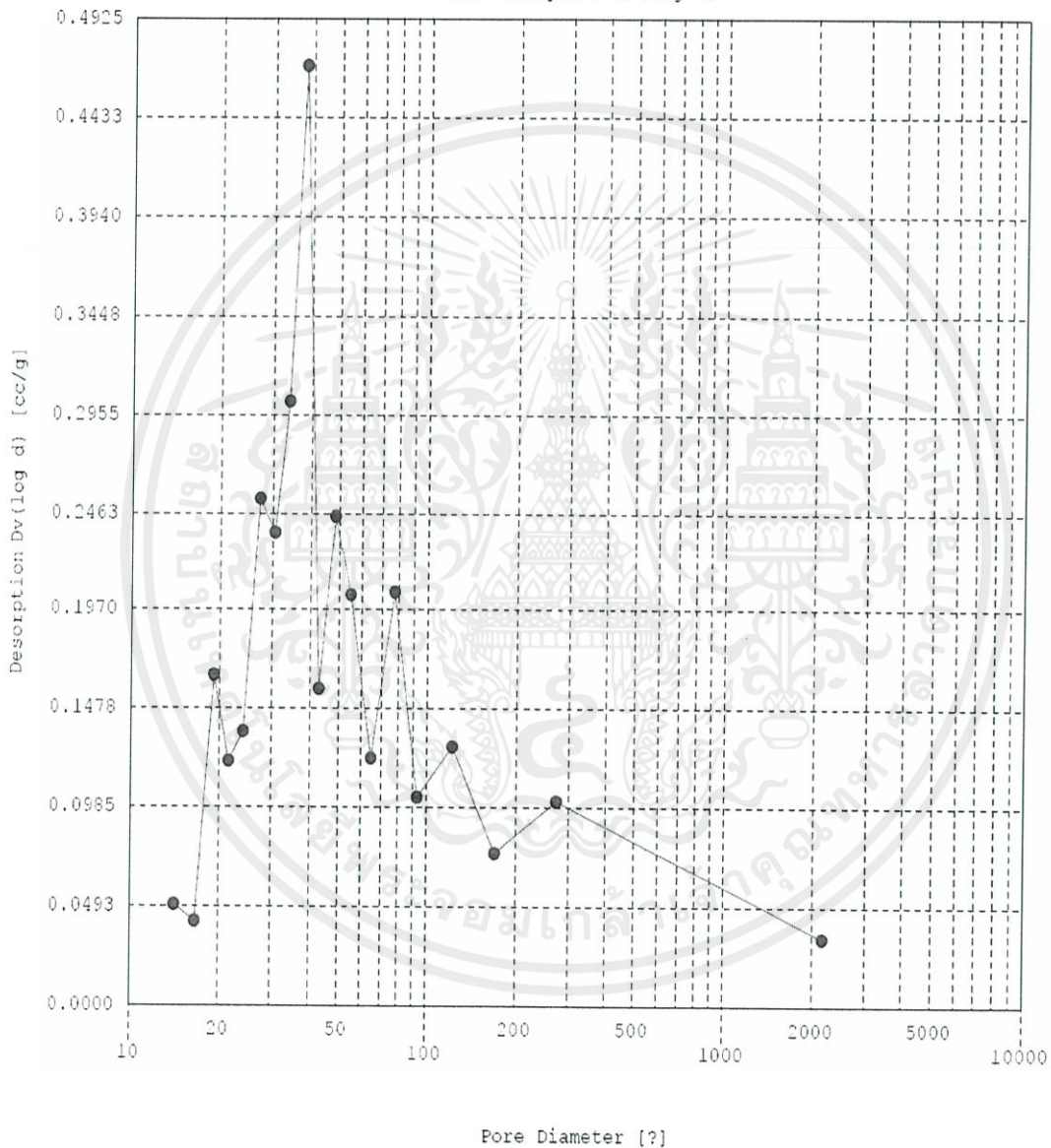


รูปที่ ก-7 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 0.5:1.0M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: C:\QCdata\AA BET\59\5\Aui\580501\_1.FAW  
 Sample ID: 1 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: Beet Sample weight: 0.0244 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 18.3 hrs Analysis Time: 351.5 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 05/21/2015 16:14  
 Station #: 1 PC sw. version: Pre-1.20  
 BJH Description Dv(log d)

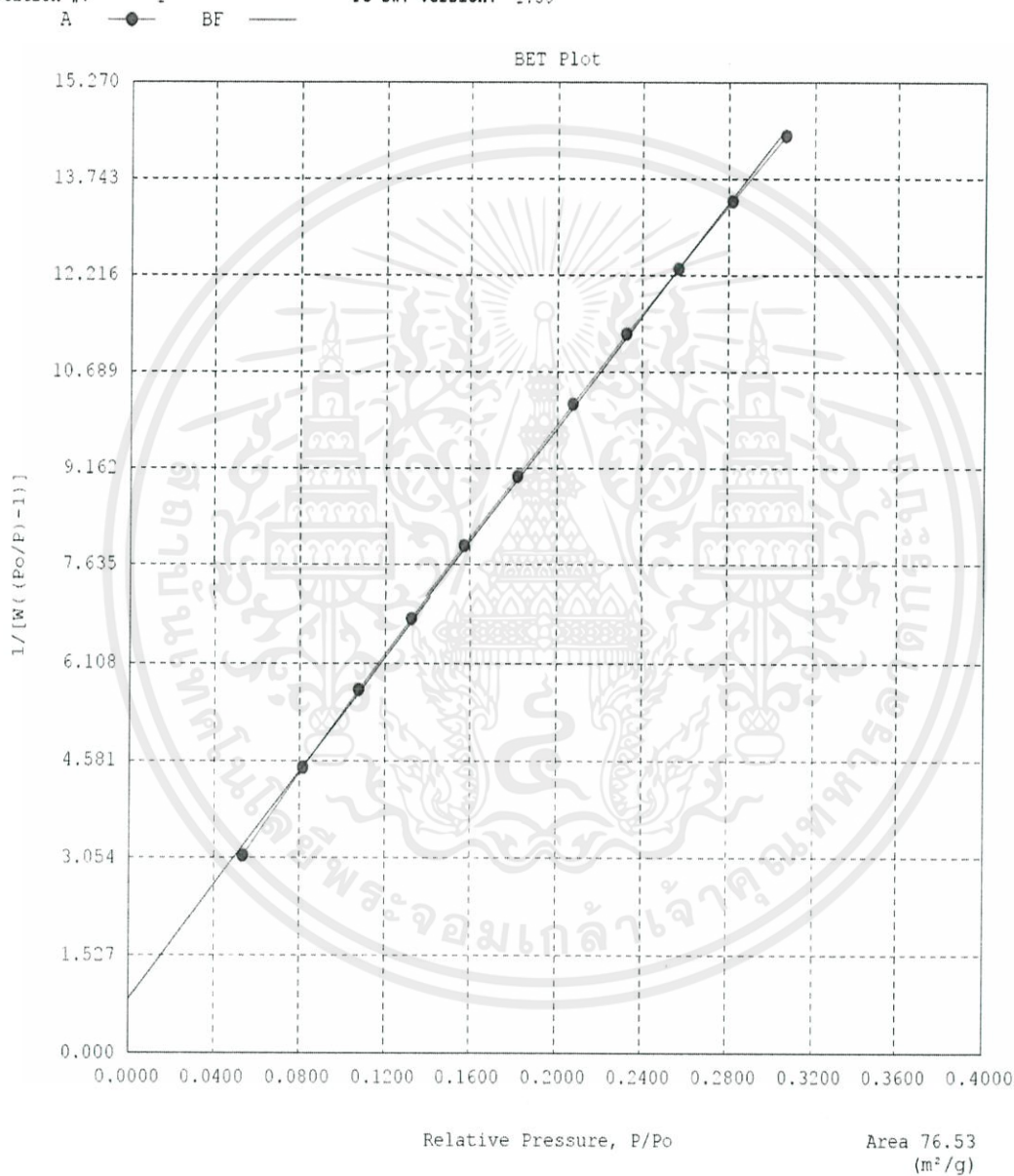


รูปที่ ก-8 ขนาดรูพรุน BJH ของ 0.5:1.0M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: D:\QA BET\12\580116\_1.RAW  
 Sample ID: Fe304 2 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: fern Sample weight: 0.0543 g  
 Analysis gas: Nitrogen X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 17.7 hrs Analysis Time: 347.9 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 01/16/2015 15:05  
 Station #: 1 PC sw. version: 1.50

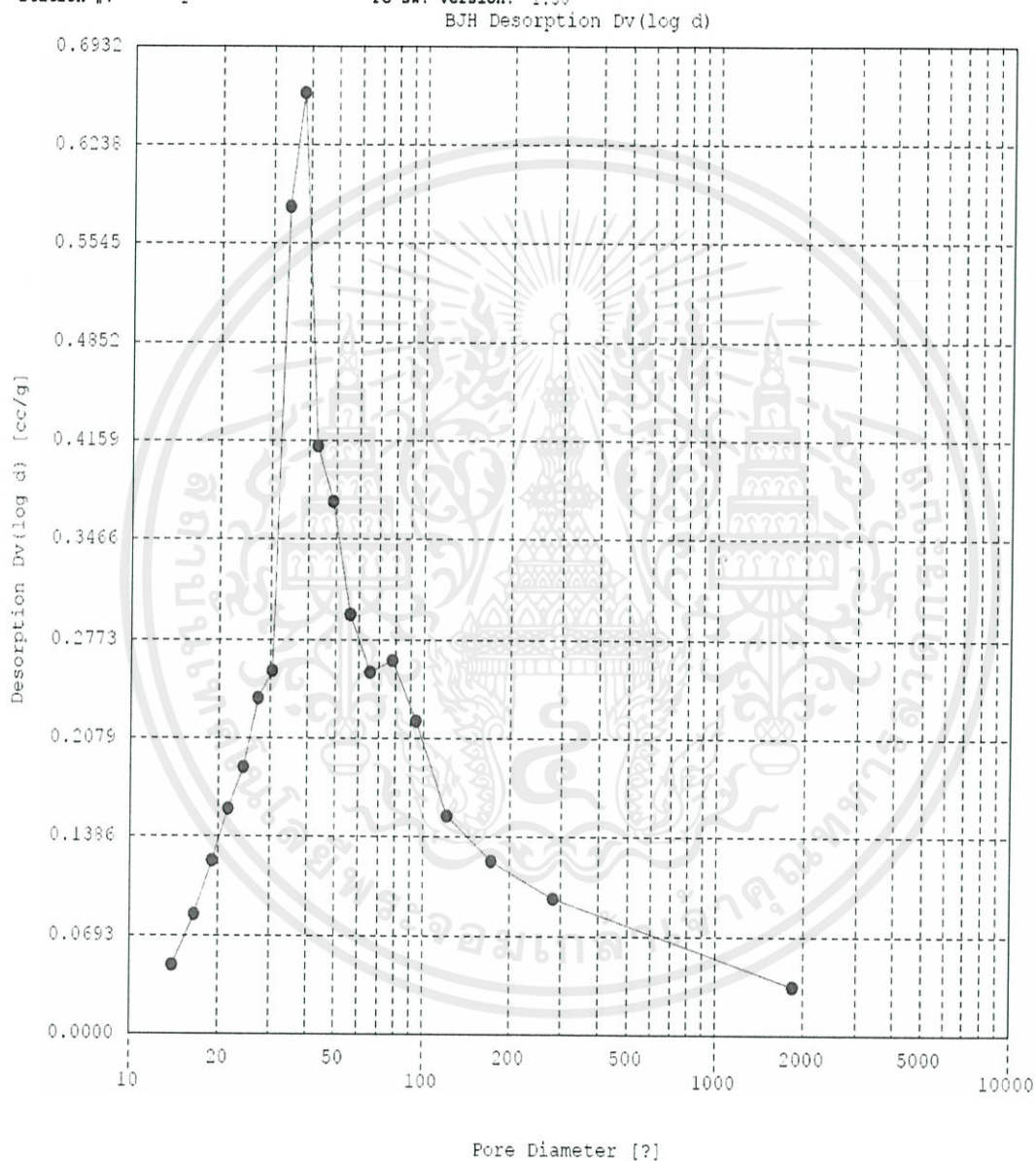


รูปที่ ก-9 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 1.0:2.0M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: C:\QCdata\A BET\58\5\Aui\580502\_1.PAW  
 Sample ID: 2 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: BomB Sample weight: 0.0615 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.56e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 22.9 hrs Analysis Time: 459.7 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 05/22/2015 19:01  
 Station #: 1 PC sw. version: 1.50



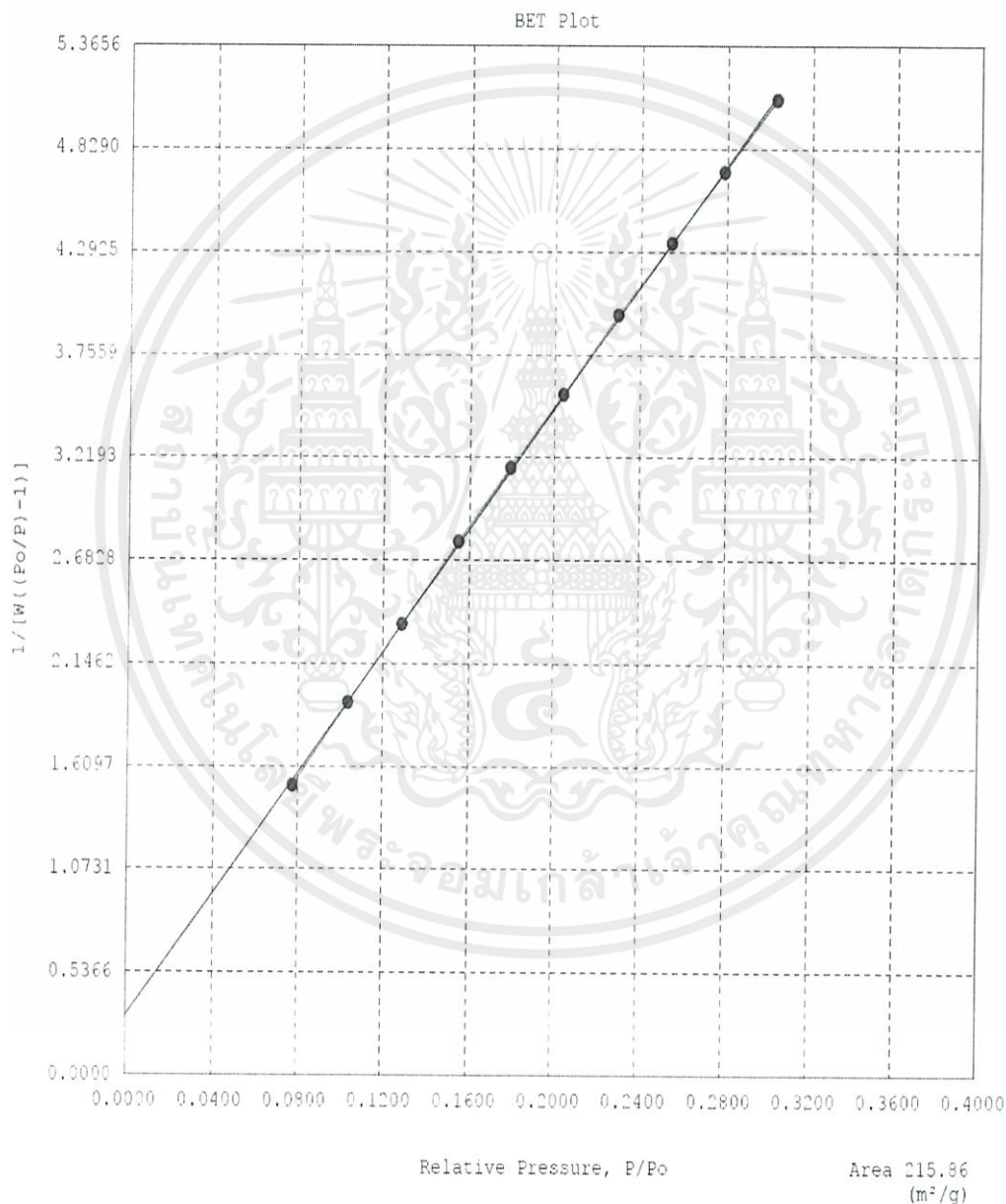
รูปที่ ก-10 ขนาดรูพรุน BJH ของ 1.0:2.0M Fe-MMT100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: C:\QCdata\44 BET\58\5\Aut\580522\_2.RAW  
 Sample ID: 3 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: BomB Sample weight: 0.0491 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 16.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.58e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 6.1 hrs Analysis Time: 406.6 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 05/23/2015 02:32  
 Station #: 1 PC sw. version: Pre-1.20

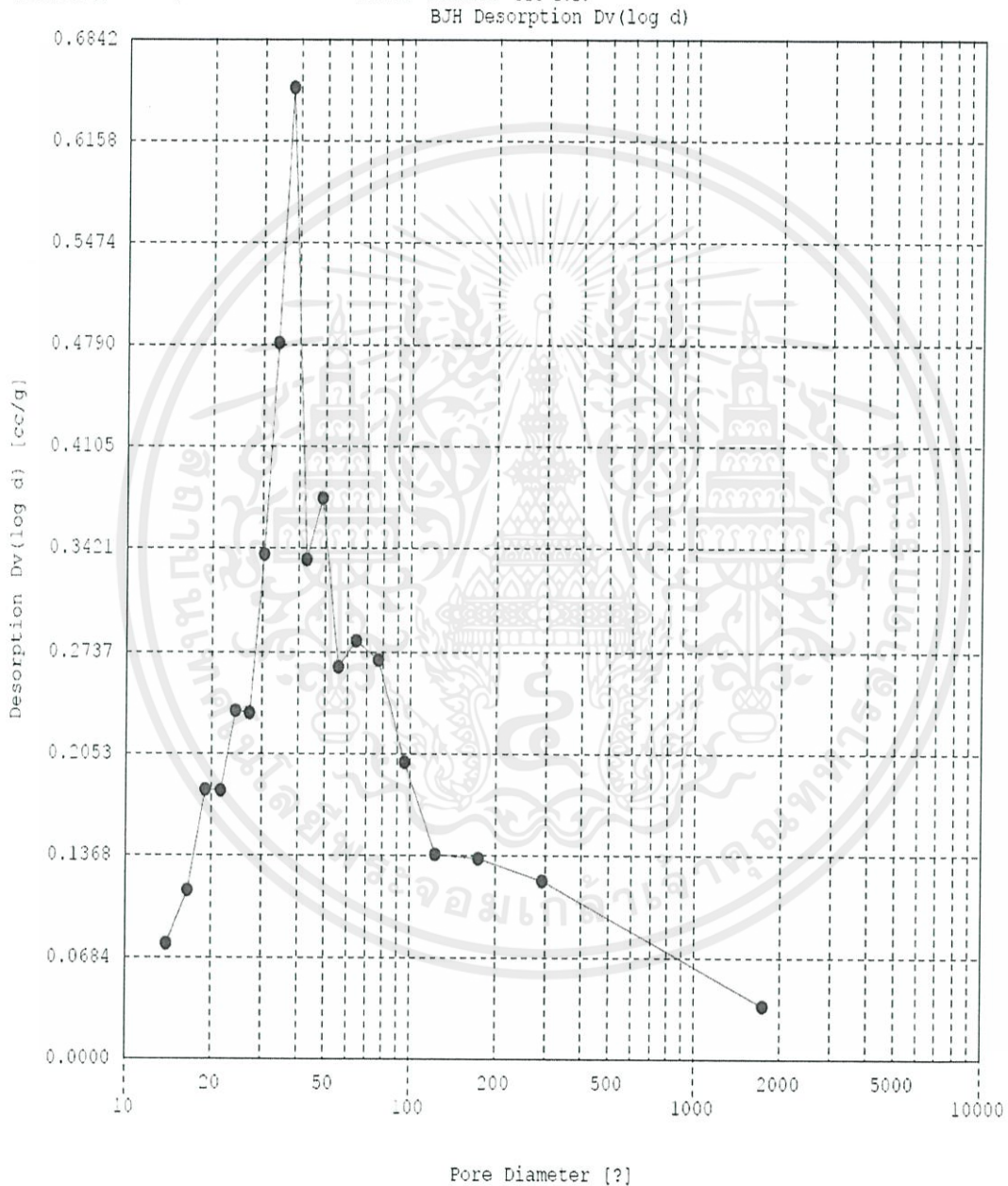
A ● BF —



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งรูปที่ ก-11 พื้นที่ผิวจำเพาะของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 คำนวณไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Instruments  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb 1 for Windows 1.50

File name: C:\QCDATA\4A BET\58\51\Ami\580520\_2.RAW  
 Sample ID: 3 Description: Ads 22 Pts Des 22 Pts BET 11 pts  
 Comments:  
 Operator: BomB Sample weight: 0.0491 g  
 Analysis gas: NITROGEN X sect. area: 18.2 Å<sup>2</sup>/molec Non-ideality: 6.56e-05  
 Adsbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.35  
 Outgas Temp: 300.0 °C Outgas Time: 8.1 hrs Analysis Time: 406.6 min  
 P/Po tolerance: 2 Equil. time: 3 End of run: 05/23/2015 02:32  
 Station #: 1 PC sw. version: Pre-1.20



รูปที่ ก-12 ขนาดรูพรุน BJH ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100

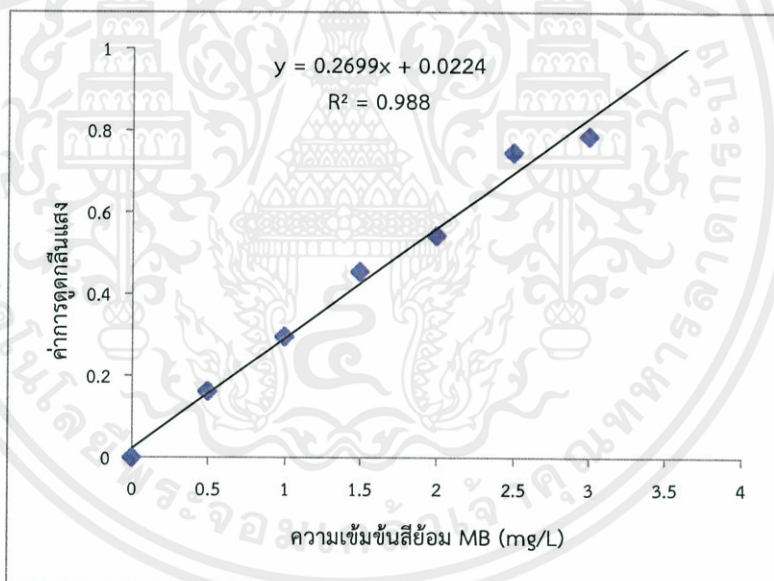
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม

ตารางที่ ข-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อม MB ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น MB (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
0.5	0.162
1.0	0.296
1.5	0.455
2.0	0.543
2.5	0.747
3.0	0.787

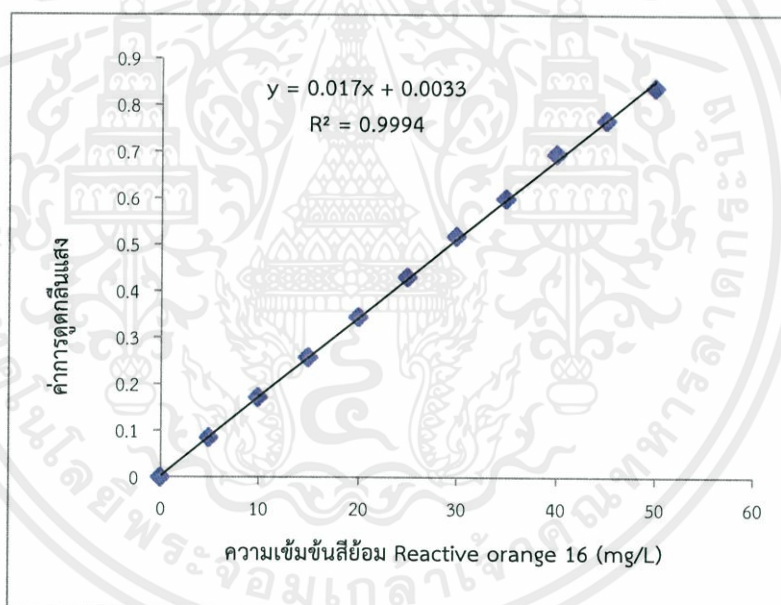


รูปที่ ข-1 เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม MB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อม RO16 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น RO16 (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
5	0.085
10	0.172
15	0.258
20	0.345
25	0.431
30	0.519
35	0.600
40	0.696
45	0.768
50	0.838



รูปที่ ข-2 เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม RO16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ข้อมูลแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมหลังการดูดซับ

ตารางที่ ค-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม MB

สารตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง
MMT	0.056
0.5:1.0M Fe-MMT100	0.097
1.0:2.0M Fe-MMT100	0.406
1.5:3.0M Fe-MMT100	1.109

ตารางที่ ค-2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม RO16

ระบบสารละลาย เหล็กผสม Fe <sup>2+</sup> :Fe <sup>3+</sup>	สารตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสง	
		กระบวนการดูดซับ	ปฏิกิริยาเฟนตัน
1:1	1.5:1.5M Fe-MMT80	1.314	1.048
	2.0:2.0M Fe-MMT80	0.982	0.926
	1.5:1.5M Fe-MMT100	1.218	0.983
	2.0:2.0M Fe-MMT100	0.912	0.881
1:2	0.5:1.0M Fe-MMT100	0.929	0.784
	1.0:2.0M Fe-MMT100	0.878	0.758
	1.5:3.0M Fe-MMT100	0.815	0.635

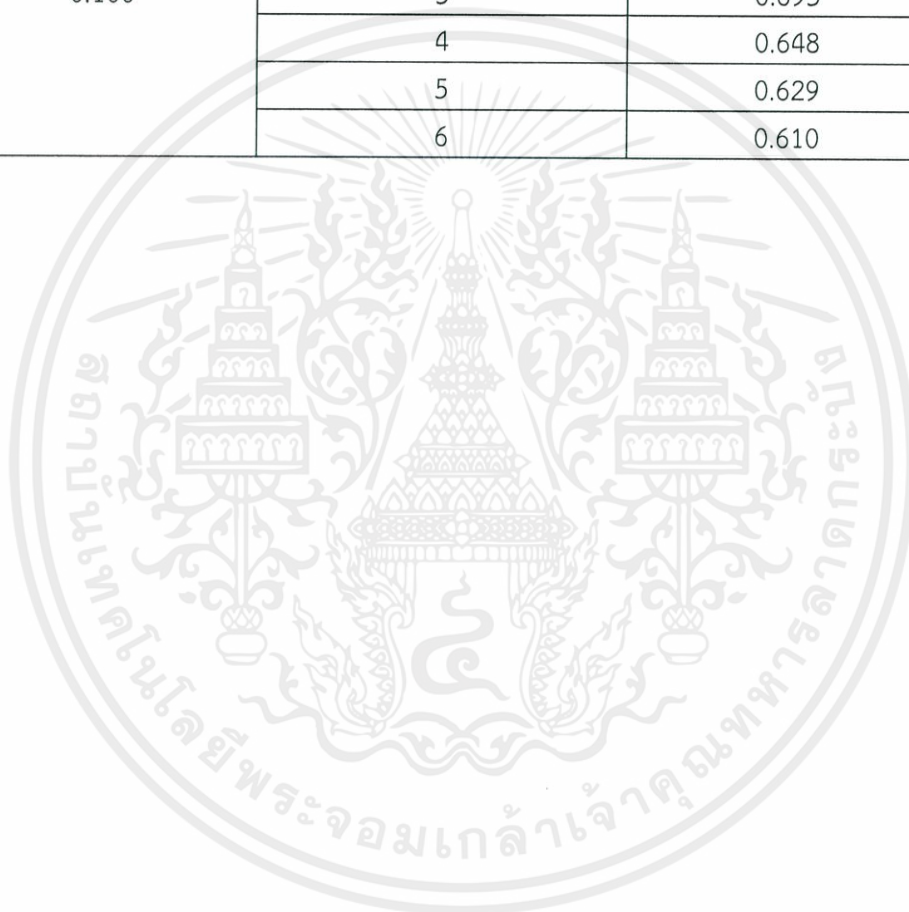
ตารางที่ ค-3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม RO16 ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยกระบวนการดูดซับ

เวลาในการดูดซับ (hr.)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.845
2	0.815
3	0.782
4	0.771
5	0.779

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสียอม RO16 ของ 1.5:3.0M Fe-MMT100 ที่ปริมาณสารตัวอย่างและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน

ปริมาณสารตัวอย่าง	เวลาในการทำปฏิกิริยา (hr.)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.025	2	0.787
0.050		0.777
0.075		0.764
0.100		0.717
	1	0.821
	2	0.717
	3	0.693
	4	0.648
	5	0.629
	6	0.610



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้