

# รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

# การพัฒนาแร่ดินเหนียวเหล็กออกไซด์พิลลาร์ที่มีรูพรุนขนาดนาโนสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม

# Development of nanoporous iron oxide-pillared clay for dye-containing wastewater treatment

ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การพัฒนาแร่ดินเหนียวเหล็กออกไซด์พิลลาร์ที่มีรูพรุนขนาดนาโนสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 600,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2556 ถึง กันยายน 2557

นางสาว ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาแร่ดินเหนียวเหล็กออกไซด์พิลลาร์ที่มีรูพรุนขนาดนาโนสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม โดยใช้สารดัดแปรโครงสร้างที่แตกต่างกัน 4 ระบบ ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกอะซิเตต ($Fe^{3+}$-CPX-MMT) สารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์รัสอะซิเตต ($Fe^{2+}$-CPX-MMT) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ตามด้วยโซเดียมอะซิเตต ($Fe^{3+}$-MMT-CPX) และ สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ตามด้วยโซเดียมอะซิเตต ($Fe^{2+}$-MMT-CPX) จากนั้น นำ MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างแล้วทั้ง 4 ตัวไปเผาแคลไซน์ที่ 500 $^{O}$C จะได้เป็นตัวดูดซับ $Fe^{3+}$-CPX-pill $Fe^{2+}$-CPX-pill $Fe^{3+}$-pill-CPX และ $Fe^{2+}$-pill-CPX ตามลำดับ จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีสารประกอบเหล็กออกไซด์ที่เป็นสารดัดแปรโครงสร้างแทรกตัวอยู่ในระนาบ *001* เป็นผลให้ระยะห่างระหว่างระนาบมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้ง MMT บางส่วนมีสารประกอบเหล็กออกไซด์แทรกตัวอยู่เป็นจำนวนมากจึงก่อให้เกิดการเสียสภาพความเป็นระเบียบของระนาบ *001* สารประกอบเหล็กออกไซด์ที่แทรกอยู่ภายในโครงสร้าง MMT ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น การศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดโดยใช้สารละลายสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีเบสิคบลู 66 (BB 66) และ สีแอซิดเรด 91 (AR 91) ซึ่งในระบบการดูดซับแบบกะ พบว่าตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด BB 66 สูงกว่า 95% ซึ่งคิดเป็นค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมมากกว่า 950 mg/g แม้จะใช้ตัวดูดซับเพียง 0.05 g และระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที ในทางตรงกันข้ามในระบบ AR 91 ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมในระบบการดูดซับแบบกะค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงพัฒนาระบบการกำจัด AR 91 เป็นระบบเฟนทอนและเฟนทอนเชิงแสง ในระบบเฟนทอลค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด AR 91 ของตัวดูดซับที่เตรียมจาก $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ มีค่าประมาณ 75% และ 66% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบการดูดซับแบบกะอย่างมีนัยสำคัญ และค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมในระบบเฟนทอนเชิงแสงจะมีค่าสูงกว่าระบบเฟนทอนเล็กน้อย

**คำสำคัญ :** มอนต์มอริลโลไนต์, โครงสร้างพิลลาร์, วัสดุรูพรุนระดับนาโน, ตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Development of nanoporous iron oxide-pillared clay for dye-containing wastewater treatment

**Researcher:** Assist.Prof. Punnama Siriphannon

**Faculty:** Science **Department:** Chemistry

## ABSTRACT

This research work studied on development of nanoporous iron oxide-pillared clay for dye-containing wastewater treatment. The montmorillonite was modified with 4 types of modifying agents, i.e ferric acetate complex ($Fe^{3+}$-CPX-MMT), ferrous acetate complex ($Fe^{2+}$-CPX -MMT), ferric chloride followed with sodium acetate solution ($Fe^{3+}$-MMT -CPX), ferrous chloride followed with sodium acetate solution ($Fe^{2+}$-MMT -CPX). All 4 modified Fe-MMT were calcined at 500°C in order to obtain the $Fe^{3+}$-CPX –pill, $Fe^{2+}$-CPX –pill, $Fe^{3+}$ –pill-CPX, $Fe^{2+}$–pill –CPX adsorbents, respectively. From XRD characterization, it was found that the iron oxide compound modifying agent intercalated into *001*–plane, resulting in an increase of d-spacing cause MMT was disordered $d_{001}$. A large amount of intercalated iron oxide introduced the disordered structure of *001*–plane. The iron oxide intercalated MMT caused the increases of specific surface area and average pore diameter of the modified MMT. Adsorption capacities of all 4 adsorbents were studied using two dye samples, i.e. basic blue 66 (BB 66) and acid red 91 (AR 91). In the batch adsorption system, the percentages of BB66 removal for all 4 adsorbents were higher than 95%, equaling to adsorption capacity of 950 mg/g even the adsorbent loading was 0.05 g and only 30 min of contact time. On the other hand, the percentages of AR91 removal for all 4 adsorbents in the batch adsorption system were quite low. It was; therefore, the AR91 removal system was developed to be fenton and photo-fenton systems. In the fenton system, the percentages of AR91 removal for the adsorbents prepared from $Fe^{2+}$ and $Fe^{3+}$ were 75% and 66%, respectively, in which they were significantly increased from the batch adsorption system. The percentages of AR91 removal in the photo-fenton system were slighty higher than those in the fenton system.

**Keywords** : Montmorillonite, Pillared structure, Nanoporous materials, Adsorbent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 อีกทั้งได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานต่างๆ ดังรายนามต่อไปนี้

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการสนับสนุนงบประมาณในการไปนำเสนอผลงานวิจัย ณ ประเทศเช็ก

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการให้ความอนุเคราะห์ตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่าง

ทางคณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ปุณณมา ศิริพันธ์โนน
หัวหน้าโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| **บทคัดย่อภาษาไทย** | ก |
| **บทคัดย่อภาษาอังกฤษ** | ค |
| **กิตติกรรมประกาศ** | ง |
| **สารบัญ** | จ |
| **สารบัญภาพ** | ช |
| **สารบัญตาราง** | ซ |
| **บทที่ 1 บทนำ** | |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 4 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |
| **บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม** | |
| 2.1 แนวคิดและทฤษฎี | 5 |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 8 |
| **บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย** | |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 15 |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 15 |
| 3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกอะซิเตต | 16 |
| 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์รัสอะซิเตต | 16 |
| 3.5 การเตรียมสารตัวอย่าง | 16 |
| 3.6 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT และ Fe-pill | 18 |
| 3.7 การศึกษาการกำจัดสีย้อมของวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill | 19 |
| **บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล** | |
| 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร | 21 |
| 4.2 การศึกษาการดูดซับสีย้อมของวัตถุดิบ Fe-pill | 28 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| **บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ** | |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 35 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 36 |
| **บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ** | 37 |
| **เอกสารอ้างอิง** | 38 |
| **ภาคผนวก** | |
| ภาคผนวก ก พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill | 41 |
| ภาคผนวก ข เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม | 49 |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลแสดงค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมหลังการดูดซับ | 51 |
| **สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย** | 55 |
| **ประวัติผู้วิจัย** | 56 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ


| ภาพที่ | หน้า |
|---|---|
| 4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัตถุดิบ MMT | 22 |
| 4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัตถุดิบ Fe-MMT และ Fe-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ | 23 |
| 4.3 ลักษณะโครงสร้างของ Fe-CPX-pill | 26 |
| 4.4 ลักษณะโครงสร้างของ Fe-pill-CPX | 27 |
| ก.1 พื้นที่ผิวของ $Fe^{3+}$-CPX-pill | 40 |
| ก.2 พื้นที่ผิวของ $Fe^{2+}$-CPX-pill | 41 |
| ก.3 พื้นที่ผิวของ $Fe^{3+}$-pill-CPX | 42 |
| ก.4 พื้นที่ผิวของ $Fe^{2+}$-CPX-pill | 43 |
| ก.5 ขนาดรูพรุนของ $Fe^{3+}$-CPX-pill | 44 |
| ก.6 ขนาดรูพรุนของ $Fe^{2+}$-CPX-pill | 45 |
| ก.7 ขนาดรูพรุนของ $Fe^{3+}$-pill-CPX | 46 |
| ก.8 ขนาดรูพรุนของ Fe2+-pill-CPX | 47 |
| ข.1 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BB 66 | 48 |
| ข.2 แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม AR 91 | 49 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | หน้า |
|---|---|
| 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ MMT และ Fe-MMT ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ | 21 |
| 4.2 ค่า 2θ และ d001 ของ MMT Fe-MMT และ Fe-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ | 24 |
| 4.3 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ | 28 |
| 4.4 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายสีย้อม | 28 |
| 4.5 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของ BB 66 | 29 |
| 4.6 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของสี BB 66 ที่ทำการปรับลดปริมาณตัวดูดซับ | 31 |
| 4.7 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของสี AR 91 | 32 |
| ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ความเข้มข้นต่างๆ | 48 |
| ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม AR 91 ที่ความเข้มข้นต่างๆ | 49 |
| ค.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Fe-pill | 50 |
| ค.2 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับของ MMT และ Fe-pill | 50 |
| ค.3 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ถูกดูดซับของ MMT และ Fe-pill | 51 |
| ค.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Fe-pill | 51 |
| ค.5 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับของ MMT และ Fe-pill | 51 |
| ค.6 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ถูกดูดซับของ MMT และ Fe-pill | 52 |
| ค.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม AR 91 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Fe-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ | 52 |
| ค.8 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม AR 91 หลังการดูดซับของ MMT และ Fe-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ | 53 |
| ค.9 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม AR 91 ที่ถูกดูดซับของ MMT และ Fe-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ | 53 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตที่ถูกนำมาใช้ในการอุปโภคบริโภคทั้งในระดับครัวเรือน ภาคการเกษตร และภาคอุตสาหกรรมในอัตราเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณประชากร การเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของอุตสาหกรรม น้ำเมื่อใช้แล้วก็จะถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติในลักษณะของน้ำเสียซึ่งมีปริมาณมากเกินขีดความสามารถที่แหล่งน้ำธรรมชาติจะปรับตัวได้ทัน ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมักจะมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ ในปริมาณที่มากและมีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศวิทยา จากปัญหาดังกล่าวทำให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมออก พรบ. เพื่อควบคุมปริมาณสารเจือปนที่ถูกปลดปล่อยออกมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นส่วนสำคัญหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ของประเทศซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีการขยายตัวกว้างขึ้น ปริมาณการใช้น้ำสำหรับกระบวนการผลิตก็จะมากขึ้นตามไปด้วย มีผลก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากที่มีสารเคมีและสารพิษต่างๆ ซึ่งบางชนิดเป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง นอกจากนี้เทคโนโลยีปัจจุบันไม่สามารถใช้สีย้อมในการย้อมหรือพิมพ์ผ้าได้หมดร้อยเปอร์เซ็นต์จึงทำให้มีสีย้อมบางส่วนเจือปนอยู่ในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มแม้จะปนเปื้อนอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำทิ้งมีสีเข้ม อีกทั้งสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งก่อน เพื่อให้น้ำทิ้งได้มาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แล้วจึงระบายลงสู่แม่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งการบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมมีอยู่หลากหลายวิธีที่ให้ประสิทธิภาพดี เช่น การกรองด้วยแผ่นเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Filtration) การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone Treatment) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นต้น แต่วิธีเหล่านี้มีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง (Banat I.M. et al., 1996; Delee W. et al., 1998; Slokar Y.M. and Majcen Le Marechal A., 1998; Robinson T. et al., 2001; Pearce C.I. et al., 2003)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยม ได้แก่ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีทางกายภาพเชิงเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง ในกระบวนการนี้สารปนเปื้อนในน้ำเสียจะถูกดูดซับไปเกาะอยู่บนผิวของวัสดุของแข็งที่เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) สารดูดซับที่มีการใช้งานในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมมีหลายชนิดทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น ซีโอไลต์ เถ้าลอย ไคโตซาน คาร์บอนกัมมันต์ เป็นต้น ในบรรดาสารดูดซับชนิดต่างๆ คาร์บอนกัมมันต์ถือเป็นสารดูดซับที่ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความนิยมสูงสุด เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์สูง แต่ข้อด้อยที่สำคัญของคาร์บอนกัมมันต์ คือมีราคาแพงและกระบวนรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่มีความยุ่งยาก (Meshko V. et al., 2001; Martin M.J. et al., 2003)

จากข้อมูลข้างต้นกลุ่มวิจัยจึงทำการศึกษาพัฒนาสารดูดซับจากวัตถุดิบธรรมชาติที่มีราคาถูกให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น โดยวัตถุดิบธรรมชาติที่เลือกใช้ ได้แก่ แร่ดินเหนียวกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite clay minerals) ซึ่งมีแหล่งวัตถุดิบในประเทศไทยจึงเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก อีกทั้งแร่ดินเหนียวมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ ซึ่งโครงสร้างลักษณะดังกล่าวสามารถทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามขนาดของช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวนั้นมีขนาดเล็กมากประมาณ 1.3 นาโนเมตร จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของแร่ดินเหนียวไม่ค่อยสูง เนื่องจากสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่จึงแพร่เข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวได้ไม่มากนัก

วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของแร่ดินเหนียวที่บางกลุ่มวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาขึ้น คือ การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวด้วยสารประกอบอินทรีย์จำพวกเอมีน และสารลดแรงตึงผิวบางประเภท ซึ่งสารเหล่านี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวที่มีหมู่ปลายสายโซ่ที่มีประจุเป็นบวก จึงสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange) กับประจุบวกขนาดเล็กในชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียว เข้าไปแทรกตัวระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียว (Intercation) ทำให้ขนาดของช่องว่างของแร่ดินเหนียวกว้างขึ้น จึงมีความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลใหญ่ได้มากขึ้น (Ozcan A.S. et al., 2004; Bouberka Z. et al., 2005; Baskaralingam P. et al., 2006; Wang L. and Wang A., 2008) อย่างไรก็ตามสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำจึงอาจเกิดการเสียสภาพภาพของโครงสร้างรูพรุนขณะใช้งานในกระบวนการกำจัดสีย้อม อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่าสารดูดซับจากแร่ดินเหนียวดัดแปรโครงสร้างด้วยสารประกอบอินทรีย์บางชนิดอาจไม่สามารถทำรีเจนเนอเรชันได้ หรือหากทำได้ก็ต้องใช้กระบวนการรีเจนเนอเรชันที่มีความยุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายสูง และประสิทธิภาพของสารดูดซับที่นำกลับมานั้นมีค่าลดลง

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาและพัฒนากระบวนการเตรียมสารดูดซับที่มีรูพรุนระดับนาโนเมตรจากแร่ดินเหนียวด้วยการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นพิลลาร์ (Pillared structure) โดยใช้สารประกอบอนินทรีย์จำพวกเหล็กออกไซด์ (Iron oxides) แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียว (Intercation) ซึ่งสารประกอบเหล็กออกไซด์จะก่อให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กขึ้นอย่างถาวร ซึ่งจะเรียกลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นว่าโครงสร้างพิลลาร์ (Pillared structure) ซึ่งโครงสร้างพิลลาร์จะช่วยเพิ่มขนาดของช่องว่าง ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวในการดูดซับของแร่ดินเหนียว ทำให้แร่ดินเหนียวพิลลาร์ (Pillared clay) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดียิ่งขึ้น โดยปกติกระบวนการดูดซับของสารดูดซับจะเกิดผ่านสองกระบวนการหลัก โดยกระบวนการแรกเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งสารดูดซับจะเกิดอันตรกิริยาทางเคมีกับสารที่ถูกดูดซับ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับประเภทนี้จะเกิดเฉพาะบนพื้นผิวรูพรุนและพื้นผิวภายนอกของสารดูดซับ ซึ่งสารประกอบเหล็กออกไซด์ที่แทรกตัวอยู่ในแร่ดินเหนียวจะช่วยเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลสีย้อม ทำให้กระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่าสูงขึ้นได้ สำหรับกระบวนการดูดซับแบบที่สองคือการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นกระบวนการดูดซับที่มีอันตรกิริยาอย่างอ่อนๆระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับและระหว่างสารที่ถูกดูดซับด้วยกันเอง การดูดซับแบบนี้หากเกิดขึ้นในรูพรุนจะเกิดการดูดซับได้หลายชั้น ไม่เฉพาะบนพื้นผิวของสารดูดซับ ในกระบวนการดูดซับแบบนี้หากโครงสร้างของสารที่ถูกดูดซับมีความเกะกะและ/หรือขนาดช่องว่างรูพรุนของสารดูดซับมีความเหมาะสม จะเป็นผลให้สารที่ถูกดูดซับถูกกักไว้ในโครงสร้างรูพรุนได้ดี ซึ่งการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวด้วยสารประกอบเหล็กออกไซด์นั้นถึงแม้จะช่วยเพิ่มขนาดช่องว่างทำให้โมเลกุลของสีย้อมแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้มากขึ้น แต่ขนาดรูพรุนของแร่ดินเหนียวเหล็กออกไซด์พิลลาร์ยังคงอยู่ในระดับนาโนเมตร จึงช่วยให้สารดูดซับมีประสิทธิภาพในการกักโมเลกุลสีย้อมไว้ได้ นอกจากนี้สารประกอบเหล็กออกไซด์พิลลาร์ยังช่วยทำให้โครงสร้างรูพรุนของแร่ดินเหนียวมีความคงตัว มีเสถียรภาพทางความร้อนทนต่อความดันและสารเคมี และน่าจะสามารถทำรีเจนเนอเรชันได้ด้วยกระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก

นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมามีรายงานว่าไอออนของเหล็กสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เช่น ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืช และสีย้อม (Kang S. et al., 2002; Kavitha V. and Palanivelu K., 2004; Schwingel de Oliveira I. et al., 2007; Nikolaki M.D. et al., 2008; Huang Y.H. et al., 2010) ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้เหล็กไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดในระบบสารละลายเนื้อเดียว (Homogenous Solution) เป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอยู่ในรูปเหล็กไอออนสูญหายไปในกระบวนการกำจัดสารมลพิษ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาการประยุกต์ใช้สารดูดซับแร่ดินเหนียวเหล็กออกไซด์พิลลาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในการสลายตัวของโมเลกุลสีย้อม ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดสีย้อมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อีกทั้งแร่ดินเหนียวเหล็กออกไซด์พิลลาร์จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะของแข็งจึงสามารถนำแยกออกจากสารละลายสีย้อมหลังการบำบัดได้ง่ายและน่าจะสามารถทำรีเจนเนอเรชันกลับมาใช้ใหม่ได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นสารดูดซับจากแร่ดินเหนียวที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงน่าจะเป็นสารดูดซับระดับนาโนเมตรที่ราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

**1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

1. ศึกษาและพัฒนาการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวด้วยเหล็กออกไซด์พิลลาร์ด้วยกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

2. ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพของแร่ดินเหนียวเหล็กออกไซด์พิลลาร์ในการกำจัดสีย้อมประเภทต่างๆ ในระบบน้ำเสียจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**1.3 ขอบเขตของการวิจัย**

1. ศึกษากระบวนการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวด้วยเหล็กออกไซด์พิลลาร์ โดยใช้สภาวะต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารตั้งต้นเหล็กไอออน และขั้นตอนการดัดแปรโครงสร้าง

2. ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์แร่ดินเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์พิลลาร์ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคต่างๆ

3. ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆต่อความสามารถและประสิทธิภาพของแร่ดินเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยเหล็กออกไซด์พิลลาร์ในการกำจัดสีย้อมประเภทต่างๆ ในระบบน้ำเสียจำลอง ได้แก่ สีย้อมชนิดเบสิก และสีย้อมชนิดแอซิด โดยศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ ได้แก่ ระบบการกำจัดสีย้อม-ระบบดูดซับแบบกะ ระบบดูดซับร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน และระบบดูดซับร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง อัตราส่วนระหว่างแร่ดินเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้างต่อปริมาณสารละลายสีย้อม และระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดสีย้อม

**1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ด้านวิชาการ สามารถนำผลงานวิจัยไปเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ และ/หรือ ส่งผลงานวิจัยไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติได้อย่างน้อย 1 เรื่อง

2. ด้านนโยบาย สามารถจัดการและควบคุมมลพิษทางน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก่อให้เกิดการพัฒนาคุณภาพสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

3. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ สามารถผลิตสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงจากวัตถุดิบที่มีราคาถูก หาได้ในประเทศ จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแก่ผู้ประกอบการ

4. ด้านสังคมและชุมชน ช่วยปัญหามลพิษทางน้ำ ก่อให้เกิดคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของประชากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

## 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

วิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอสามารถทำได้หลายวิธี การบำบัดโดยใช้สารดูดซับ (Adsorbent) เป็นหนึ่งในวิธีการบำบัดทางกายภาพเชิงเคมี (Physicochemical method) ที่มีกระบวนการไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการควบคุม และมีประสิทธิภาพดี (Robinson T. et al., 2001; Slokar Y.M. et al., 1998) การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากความสามารถของสารดูดซับในการดึงอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะติดบนพื้นผิว กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Elaine M.M., 2001) ได้แก่

- การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption or Physisorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไม่สูง ส่วนมากเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) ในการดูดซับทางกายภาพนี้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จะถูกยึดจับทางกายภาพกับสารดูดซับที่บริเวณใดก็ได้ทั้งบริเวณผิวหน้า ภายในรูพรุน หรือระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเกิดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับมากกว่า โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดได้หลายชั้น (Multilayer adsorption)

- การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูงมาก ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับลักษณะนี้ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) หรือ พันธะไอออนิก (Ionic bond) การดูดซับทางเคมีนี้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเท่านั้น โดยการดูดซับจะเกิดเพียงชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

Kenneth E. และคณะได้รวบรวมสารดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลประเภทต่างๆไว้หลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก (Kenneth E. et al., 1992) ได้แก่

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น แร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone char) และซิลิกากัมมันต์ (Activated silica) สารธรรมชาติเหล่านี้มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามสารประเภทนี้มีข้อเสียคือ มีความสามารถในการดูดจับอะตอมหรือโมเลกุลได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัด

2. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารดูดซับที่ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1000 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ใช้และเสื่อมสภาพแล้วสามารถนำไปรีเจนเนอเรชันและนำกลับมาใช้ได้ใหม่ แต่มีข้อเสียคือ การทำรีเจนเนอเรชัน ต้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- สารดูดซับจากแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ทุติยภูมิเกิดจากการผุพังของหิน โดยทั่วไปอนุภาคมีขนาดเล็กมากระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร มีธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมี แร่ดินเหนียวเป็นสารประกอบจำพวกแอนไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกตส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่น แร่ดินเหนียวสามารถจำแนกประเภทได้หลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ลักษณะโครงสร้างผลึก หนึ่งในกลุ่มแร่ดินเหนียวที่ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดในด้านนาโนเทคโนโลยี ได้แก่ แร่ดินเหนียวในกลุ่มสเมค-ไทต์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอะลูมินาออกตระฮีดรอลที่ถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของซิลิเกตเตตระฮีดรอล จากโครงสร้างลักษณะดังกล่าวทำให้ประจุสุทธิของผลึกเป็นลบ ดังนั้นในระหว่างชั้นผลึกจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียมและเหล็กแทรกอยู่ เพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ ซึ่งไอออนบวกที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกสามารถเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นที่อยู่นอกโครงสร้างได้ ดังนั้นแร่ดินเหนียวในกลุ่มสเมคไทต์จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีประจุบวกจากน้ำทิ้งได้ (Harris R.G. et al., 2001; Ho Y.S. et al., 2001; Gurses A. et al., 2004) มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) เป็นหนึ่งในแร่ดินเหนียวในกลุ่ม สเมคไทต์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาดัดแปรโครงสร้างและสามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซับได้ แหล่งวัตถุดิบหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นมอนต์-มอริลโลไนต์ คือ ดินเบนโทไนท์ (Bentonite) ซึ่งแหล่งดินเบนโทไนท์ที่สำคัญในประเทศไทยคือจังหวัดลพบุรีและกาญจนบุรี

- แร่ดินเหนียวพิลลาร์

แร่ดินเหนียวสามารถดัดแปรโครงสร้างได้ด้วยการสอดแทรกด้วยสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์เข้าไปในระหว่างโครงสร้างของชั้นซิลิเกตเคลย์ โดยเกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับแคตไอออนที่อยู่ภายในระหว่างชั้นเคลย์ เช่น โซเดียม และ แคลเซียม เป็นต้น เมื่อให้ความร้อนแก่ไอออนที่อยู่ภายในโครงสร้าง จะทำให้ไอออนนั้นเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบที่มีความคงตัวถาวรที่แทรกตัวค้ำจุนโครงสร้างของชั้นแร่ดินเหนียว เกิดเป็นช่องว่างรูพรุนขนาดเล็กใน 2 มิติ เรียกว่า โครงสร้างพิลลาร์ (Pillared structure) ทำให้แร่ดินเหนียวมีช่องว่างระหว่างชั้น ปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการคะตะไลซีส การดูดซับ และกระบวนการแยก ตัวอย่างของสารที่สามารถเกิดเป็นพิลลาร์ภายในโครงสร้าง เช่น อะลูมิเนียม คลอโรไฮเดรต (Aluminium chlorohydrate) อะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน (Aluminium polyhydroxycation) เป็นต้น (Cool P. and Vansant E.F., 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง

ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสง (Photo-oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ได้ โดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Petersen D. et al., 1988) อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังมีข้อจำกัด คือ

1. สารมลพิษอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดต้องดูดกลืนแสง อีกทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงนั้นมีความจำเพาะเจาะจงในการเกิดปฏิกิริยาต่ำ หากในระบบที่ต้องการกำจัดมีสารอินทรีย์หลายชนิดจะเกิดการแข่งขันกัน โดยสารอินทรีย์ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาทางแสงจะเกิดการสลายตัวก่อน

2. สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงนั้นมีความหลากหลาย ซับซ้อนแตกต่างกันไปในแต่ละระบบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความยุ่งยากในการบำบัดมากขึ้น

3. แสงอัลตราไวโอเลตที่ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแสง จะถูกดูดซับและก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เพียงบางส่วน เป็นผลให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแสงเป็นไปอย่างช้าๆ

ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแสง (Photochemical reaction) ของระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของน้ำจะเกิดแตกพันธะเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแสงกับโมเลกุลของน้ำ (Photolysis) ก่อให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$H_2O \longrightarrow HO^{\bullet} + H^{\bullet} \qquad \text{สมการที่ 1}$$

ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันทางแสงที่ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้จะเกิดอนุมูลอิสระจำนวนน้อย แต่เกิดสารมัธยันตร์เป็นจำนวนมาก การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาข้างต้นสามารถทำได้โดยการเติมสารออกซิแดนซ์ (Oxidants) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซน เกลือของโลหะ เป็นต้น ซึ่งจะเรียกระบบนี้ว่า กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process, AOP)

- ปฏิกิริยาเฟนทอนและปฏิกิริยาเฟนทอนเชิงแสง

ปฏิกิริยาเฟนทอน (Fenton reaction) ถูกค้นพบโดย Fenton H. ในปี 1894 และใน 40 ปีต่อมา Haber F. และ Weiss J. ได้มีการเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาเฟนทอน ซึ่งจากกลไกแสดงให้เห็นว่าในปฏิกิริยาเฟนทอนมีการสร้างสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $HO^{\bullet}$ ) ซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพในปฏิกิริยาการสลายตัวของสารอินทรีย์ ซึ่งการเกิด $HO^{\bullet}$ ดังแสดงในสมการที่ 2

$$M^{n+} + H_2O_2 \longrightarrow M^{(n+1)} + HO^{-} + HO^{\bullet} \qquad \text{สมการที่ 2}$$

(ซึ่ง M เป็นโลหะทรานซิชัน เช่น Fe หรือ Cu)

ปฏิกิริยาเฟนทอนส่วนใหญ่นิยมใช้ $Fe^{2+}/ H_2O_2$ (เฟนทอนรีเอเจนต์) เนื่องจาก $H_2O_2$ มีราคาถูก ส่วนเหล็กเป็นธาตุที่พบมากและหาง่าย ซึ่งการละลายของ $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ เพื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ $H_2O$ และ $HO^{\bullet}$ ขึ้นกับค่า pH ในกรณีที่ไม่มีแสงและลิแกนด์ชนิดอื่นที่ไม่ใช่น้ำ การสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ $H_2O_2$ ในสารละลายกรดจะก่อให้เกิดไฮดรอกซีเปอร์ออกซิล (Hydroxyperoxyl ; $HO_2^{\bullet}$ / $O_2^{-}$) และ $HO^{\bullet}$

ตัวอย่างปฏิกิริยาเฟนทอนในสารละลายกรดจะมีกลไกดังแสดงในสมการที่ 3 - 5

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{3+} + OH^{-} + HO^{\bullet} \qquad \text{สมการที่ 3}$$

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \overset{-H^{+}}{\rightleftharpoons} Fe\text{-}O_2H^{+} \rightleftharpoons Fe^{2+} + HO_2^{\bullet} \qquad \text{สมการที่ 4}$$

$$Fe^{3+} + HO_2^{\bullet} \longrightarrow Fe^{2+} + H^{+} + O_2 \qquad \text{สมการที่ 5}$$

การทำปฏิกิริยาเฟนทอนในสภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเลต จะสามารถเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า ปฏิกิริยาเฟนทอนเชิงแสง (Photo-Fenton reaction) โดยปกติปฏิกิริยาเฟนทอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ $Fe^{2+}$ เปลี่ยนเป็น $Fe^{3+}$ จนหมดดังแสดงในสมการที่ 3 อย่างไรก็ตาม เราสามารถเพิ่มความสามารถในการออกซิไดซ์ของปฏิกิริยาเฟนทอนได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต และ/หรือแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งจะเป็นผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่นำมาบำบัดลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากแสงจะช่วยในการสลายตัวของสารอินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยเปลี่ยน $Fe^{3+}$ กลับไปเป็น $Fe^{2+}$ นอกจากนี้ยังทำให้เกิด $HO^{\bullet}$ ใหม่จาก $H_2O_2$ ดังแสดงในสมการที่ 6

$$Fe^{3+} + H_2O \longrightarrow Fe^{2+} + HO^{-} + H^{+} \qquad \text{สมการที่ 6}$$

สมการอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดของ $HO^{\bullet}$ ในการดูดกลืนแสงของเฟนทอน จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เช่น $[Fe^{3+}(OH)^{\bullet}]^{2+}$ และ $[Fe^{3+}(RCO_2)^{\bullet}]^{2+}$ ดังแสดงในสมการที่ 7 – 8

$$[Fe^{3+}(OH)^{\bullet}]^{2+} \longrightarrow Fe^{2+} + HO^{\bullet} \qquad \text{สมการที่ 7}$$

$$[Fe^{3+}(RCO_2)^{\bullet}]^{2+} \longrightarrow Fe^{2+} + CO_2 + R^{\bullet} \qquad \text{สมการที่ 8}$$

สมการแรกแสดงถึงการเกิด $HO^{\bullet}$ ที่มากขึ้นและสมการที่สองแสดงถึงการลดลงของสารอินทรีย์ โดยส่งผลให้ค่า Total Organic Carbon (TOC) ในระบบลดลงเนื่องจากเกิด decarboxylation ของสารมัธยันตร์ของกรดอินทรีย์โดยกระบวนการเฟนทอนเชิงแสง จะเห็นว่ากระบวนการเฟนทอนเชิงแสงทำให้อัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

**2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

1. การกำจัดสีย้อมด้วยแร่ดินเหนียว

Ozcan A.S. และคณะ (Ozcan A.S. et al., 2004) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีแอซิดบลู 193 (AB 193) ด้วยโซเดียมเบนโทไนต์ (Na-bentonite) และเบนโทไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยโดเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม โบรไมด์ (DTMA-bentonite) โดยทำการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าความสามารถในการดูดซับของ DTMA-bentonite มีค่าสูงกว่าของ Na-bentonite โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อใช้สารละลายสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีค่า pH เท่ากับ 1.5 และอุณหภูมิในการดูดซับที่ 20 °C อย่างไรก็ตาม Na-bentonite และ DTMA-bentonite ที่เตรียมได้มีราคาต่ำจึงมีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวเลือกในการกำจัดสีย้อมบำบัดจากน้ำเสีย Bouberka Z. และคณะ (Bouberka Z. et al., 2005) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายสี Supranol Yellow 4GL ด้วยเบนโทไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง 3 ชนิดคือ เบนโทไนต์ที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับโซเดียม ($BNa^+$) เบนโทไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยไฮดรอกซีอลูมินิกพอลิแคตไอออน (Hydroxyaluminic polycation, BP) และ เบนโทไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารลดแรงตึงผิวอัลคิลเลตพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Alkylated polyethylene oxide surfactant, BPS) จากการศึกษาการดูดซับสีย้อม ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และตัวดูดซับที่ใช้คือ 1 กรัม/ลิตร พบว่า $BNa^+$ สามารถกำจัดสีย้อมได้ 37% ภายในเวลา 45 นาที BP กำจัดสีย้อมได้ 60 % ภายใน 30 นาที ในขณะที่ BPS สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุดคือ 99 % ภายในเวลา 15 นาที เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของตัวดูดซับพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ $BNa^+$ มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีลดลง ส่วน BP และ BPS เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH ลดลงเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ BP และBPS จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของ $BNa^+$ จะลดลง และผลการทดสอบสมดุลการดูดซับสี Supranol Yellow 4GL พบว่า BP และ BPS สอดคล้องกับสมการของ Langmuir ส่วน $BNa^+$ สอดคล้องกับสมการของ Fruendlich

Baskaralingam P. และคณะ (Baskaralingam P. et al., 2006) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยออร์แกโนเบนโทไนต์ ซึ่งสีย้อมที่ใช้ในการดูดซับคือสีแอซิดเรด 151 (AR151) สภาวะที่ใช้ในการศึกษาคือ สารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ปริมาณตัวดูดซับ และพีเอชของสารละลายสีย้อม โดยทำการดัดแปรโครงสร้างเบนโทไนต์ด้วยสารลดแรงตึงผิว 2 ชนิดคือ ซิติลไดเมทิลเบนซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (CDBA) และ ซิติลไพริดิเนียมคลอไรด์ (CP) ทำการวิเคราะห์เคลย์ที่ดัดแปรโครงสร้างโดยใช้ XRD และ FTIR ผลของการทดลองพบว่าจะดูดซับได้ดีที่พีเอชเป็นกรด ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเบนโทไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย CDBA และ CP คือ 357.14 และ 416.66 มิลลิลิตร/กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเบนโทไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างสามารถใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีจากสีย้อมสิ่งทอได้ดี

Wang L. และ Wang A. (Wang L. and Wang A., 2008) ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดซับสีย้อมคองโกเรด (CR) ด้วย มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยออกทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (OTAB) โดเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (DTAB) เซตทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) และสเตียริลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (STAB) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาในการดูดซับสีย้อมคือ ค่า pH ของสารละลายสีย้อมในช่วง 4 – 9 อุณหภูมิในการดูดซับที่ 30 40 และ 50 °C ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมของ CTAB-MMT สูงที่สุดคือ 229 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ OTAB-MMT DTAB-MMT และ STAB-MMT คือ 31.1 83.6 และ 127 มิลลิกรัม/กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะลดลงเมื่อค่า pH และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับของ CTAB-MMT พบว่า เป็นแบบ Langmuir isotherm

Monvisade P. และ Siriphannon P. (Monvisade P. and Siriphannon P., 2009) ได้ทำการศึกษาการเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์อินเตอร์คาเลตด้วยไคโตซาน (Chi-MMT) โดยนำโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ ($Na^+$-MMT) มาผสมกับสารละลายไคโตซานที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง การอินเตอร์คาเลตเกิดขึ้นโดยการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมไอออนกับหมู่เอมีนที่ถูกโปรโตเนตของไคโตซาน เป็นผลให้ระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ($d_{001}$) ขยายจาก 1.42 นาโนเมตร ของ $Na^+$-MMT เป็น 2.21 นาโนเมตร ของ Chi-MMT ปริมาณไคโต-ซานใน Chi-MMT วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA มีค่าประมาณ 17 %โดยน้ำหนัก ในการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมระหว่าง Chi-MMT สารตั้งต้น $Na^+$-MMT และไคโตซานใช้สีย้อมแคตไอออนิก 3 ชนิด คือเบสิกบลู9 (BB9) เบสิกบลู 66 (BB66) และเบสิกเยลโล1 (BY1) Chi-MMT แสดงค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 46 – 49 มิลลิลิตร/กรัม ซึ่งเทียบเท่าเป็นค่าการกำจัดสีย้อมในช่วง 92 – 99 %โดยน้ำหนัก ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกของ Chi-MMT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่เพิ่มขึ้นของ Chi-MMT เป็นผลเนื่องมาจากไคโตซานที่อินเตอร์คาเลตในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ขนาดช่องว่างในโครงสร้างมีขนาดกว้างขึ้น โมเลกุลของสีย้อมจึงแพร่เข้าไปในโครงสร้างได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังเกิดอันตรกิริยายึดจับสีย้อมไว้ในโครงสร้าง จากผลดังกล่าวแสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้ Chi-MMT เป็นตัวดูดซับสีย้อมเบสิก

2. การเตรียมแร่ดินเหนียวพิลลาร์และการกำจัดสีย้อมด้วยแร่ดินเหนียวพิลลาร์

Maes N. และ Vansant E.F. (Maes N. and Vansant E.F. 1995) ได้ศึกษาเหล็กออกไซด์พิลลาร์มอนต์-มอริลโลไนต์ ($Fe_2O_3$-pillared montmorillonite) ที่เตรียมจากสารประกอบเชิงซ้อน Fe(III)-acetato กับโซเดียม มอนต์โมริลโลไนต์ โดยทำการวิเคราะห์เหล็กออกไซด์พิลลาร์มอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งจะทำให้ทราบลักษณะของพิลลาร์ก่อน ระหว่างและหลังกระบวนการพิลลาร์ โดยข้อมูลที่ได้จากเทคนิค FTIR ในช่วง mid-IR ทำให้ทราบองค์ประกอบของ acetato และในช่วง far-IR ทำให้ทราบองค์ประกอบ triangular $M_3O$ จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วย Thermogravimetric analysis (TGA) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของ Acetyl และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค electron probe micro analysis (EPMA) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของเหล็ก พื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุน (Porosity) ของเหล็กออกไซด์พิลลาร์มอนต์มอริลโลไนต์วิเคราะห์โดยนำไปดูดซับแก๊สไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเหล็ก ทำให้เกิดโคร้างสร้างคล้ายพอลิเมอร์ของ Poly Fe-oxyhydroxide โดยสารละลายที่ได้เป็นสารละลายใสเข้ากันได้ดี โดย Fe-oxyhydroxide จะทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เกิดการหลุดออกของโครงสร้าง (Delaminated) และเมื่อทำการแคลไซน์แล้วโครงสร้างจะเกิดรูพรุนระดับเมโซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Salerno P. และ Mendioroz S. (Salerno P. and Mendioroz S., 2002) ได้ทำการเตรียมอะลูมิเนียมพิลลาร์มอนต์มอริลโลไนต์จากสารแขวนลอยเคลย์ที่มีความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยการนำไฮดรอกซีแคตไอออนแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นเคลย์ โดยใช้อัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อเคลย์เท่ากับ 5,10 และ 30 มิลลิอิ-ควิวาเลนต์/100 กรัมของเคลย์ จากผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าพิลลาร์เคลย์ที่เตรียมได้จะมีช่องว่างระหว่างชั้นเท่ากับ 18.1 Å และพิลลาร์เคลย์ที่ใช้อัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อเคลย์เท่ากับ 10 มิลลิอิควิวา-เลนต์/100 กรัมของเคลย์ จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดคือ 322 ตารางเมตร/กรัม เมื่อนำอะลูมิเนียมพิลลาร์มอนต์-มอริลโลไนต์ที่เตรียมได้ไปศึกษาการดูดซับแอมโมเนียพบว่าพิลลาร์เคลย์ที่ใช้อัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อเคลย์เท่ากับ 30 มิลลิอิควิวาเลนต์/100 กรัมของเคลย์ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด

Jiang J.Q. และ Zeng Z. (Jiang J.Q. and Zeng Z., 2003) ได้ทำการศึกษาผลของชนิดเคลย์ (มอนต์-มอริลโลไนต์ K10 และ KSF) และสภาวะที่ใช้ในการดัดแปรที่มีผลต่อโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับของเคลย์ทั้งที่ยังไม่ได้ดัดแปรและเคลย์ที่ดัดแปรด้วยสารละลายอะลูมิเนียม/เหล็ก (Al/Fe) สารลดแรงตึงผิวเฮกซะเดค-ซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม (HDTMA) และสารผสมของ Al/Fe กับ HDTMA โดยใช้ XRD วิเคราะห์โครงสร้างของเคลย์และเคลย์ที่ดัดแปรพบว่า หลังจากการดัดแปรช่องว่างระหว่างชั้นของเคลย์ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับชนิดของเคลย์และสภาวะที่ใช้ในการดัดแปร โดยเคลย์ชนิด KSF ที่ดัดแปรมีช่องว่างระหว่างชั้นใหญ่กว่า K10 เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของเคลย์แต่ละชนิดจากการดูดซับสิ่งเจือปนพวกสารอินทรีย์ เช่น ฟีนอล และพวกสารอนินทรีย์ เช่น ทองแดง พบว่าเคลย์ที่ดัดแปรด้วย Al/Fe สามารถดูดซับสิ่งเจือปนพวกสารอนินทรีย์ได้ดี ในขณะที่เคลย์ที่ดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิว HDTMA ดูดซับสิ่งเจือปนพวกสารอินทรีย์ได้ดี ส่วนเคลย์ที่ดัดแปรด้วยสารผสมของ Al/Fe กับ HDTMA ดูดซับได้ดีทั้งสิ่งเจือปนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เมื่อพิจารณาผลของชนิดของเคลย์พบว่าความสามารถในการดูดซับของเคลย์ KSF ที่ดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า K10 ที่ดัดแปร โดยอัตราส่วนระหว่างโลหะ:สารลดแรงตึงผิว:เคลย์ (มิลลิโมล:มิลลิโมล:กรัม) มีผลต่อความสามารถในการดูดซับซึ่งพบว่าอัตราส่วน 2 : 0.5-1 : 1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

Kloprogge J.T. และคณะ (Kloprogge J.T. et al., 2005) ได้สรุปการศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวด้วยสารเชิงซ้อนอนินทรีย์ ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้โครงสร้างรูพรุน 2 มิติที่กว้างขึ้นอย่างถาวร เรียกว่า แร่ดินเหนียวพิลลาร์ (PILC) สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างพิลลาร์มีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ Al, Zr, Ti, Fe, Cr, Ga, V, Si และสารผสมของ Fe/Al, Ga/Al, Si/Al, Zr/Al และจากข้อมูลงานวิจัยต่างๆ พบว่าแร่ดินเหนียวพิลลาร์มีสมบัติความเป็นกรดใกล้เคียงกับซีโอไลต์ ดังนั้นแร่ดินเหนียวพิลลาร์จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชจำพวกน้ำมันคาโนลา น้ำมันปาล์ม และน้ำมันดอกทานตะวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yuan P. และคณะ (Yuan P. et al., 2006) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์และลักษณะของเหล็กพิล-ลาร์เคลย์ที่มีโครงสร้างรูพรุนระดับเมโซและไมโคร (Meso-microporous) โดยปกติโครงสร้างของเคลย์จะมีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์น้อยจึงมีรูพรุนระดับไมโคร แต่เมื่อนำมาปรับปรุงด้วยเหล็กพิลลาร์จะทำให้โครงสร้างรูพรุนระดับเมโซและไมโคร เป็นผลให้ช่องว่างระหว่างชั้นของเคลย์กว้างขึ้น การดัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ทำโดยผสมมอนต์มอริลโลไนต์กับสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทในสภาวะเบส โดยกำหนดให้อัตราส่วนโมลของ Fe:Clay เท่ากับ 10 มิลลิโมล/กรัม เมื่อนำมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 215.7 ตารางเมตร/กรัม และปริมาตรรูพรุนใหญ่สุดเท่ากับ 0.29 มิลลิลิตร/กรัม เมื่อนำมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างมาทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 773 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมงได้เป็นเหล็กพิลลาร์เคลย์ ซึ่งพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุนระดับไมโครลดลง แต่จะมีรูพรุนระดับเมโซเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเหล็กพิลลาร์เคลย์ จะมีค่า d-spacing เพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของเหล็กพิลลาร์เคลย์ที่ได้เป็นรูพรุนระดับเมโซและไมโคร

Caudo S. และคณะ (Caudo S. et al., 2007; Caudo S. et al., 2008) ได้เตรียมแร่ดินเหนียวคอปเปอร์พิลลาร์ (Cu-PILC) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยศึกษาพฤติกรรมของตัวเร่ง Cu-PILC เปรียบเทียบระหว่างระบบจำลองการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลกรดพาราคูมาริกและกรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิก และระบบน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตอาหารและเกษตรกรรม จากผลการวิจัยพบว่า Cu-PILC สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้จริง

Yuan P. และคณะ (Yuan P. et al., 2008) ได้ศึกษาโครงสร้างของเหล็กพิลลาร์มอนต์มอริลโลไนต์ (Fe-PILC) ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทกับโซเดียมมอนต์โมริลโลไนต์ ($Na^{+}$-MMT) หรือแคลเซียมมอนต์โมริลโลไนต์ ($Ca^{2+}$-MMT) ในสภาวะเบส จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าค่า d-spacing ของ Fe-PILC ที่เตรียมจาก $Na^{+}$-MMT มีค่ามากกว่า $Ca^{2+}$-MMT ซึ่งโครงสร้าง Fe-PILC ที่ได้จะมีรูพรุนระดับเมโซและไมโคร เนื่องจากการจับกลุ่มก้อนของเหล็ก และการสลายตัวของ $NO_3^-$ ซึ่งเป็น Counterions หลังผ่านการเผาแคลไซน์ทำให้เกิดช่องว่างรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่ง Fe-PILC ที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับมอนต์โมริลโลไนต์ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้าง

Olaya A. และคณะ (Olaya A. et al., 2009) ได้พัฒนาการเตรียมแร่ดินเหนียวอะลูมิเนียมพิลลาร์จากดินแห้งและสารแขวนลอยดินที่มีความเข้มข้น 2 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยนำสารตั้งต้นดินผสมกับสารละลายของอะลูมิเนียมพอลิไฮดรอกซีแคตไอออน และในระหว่างการทำปฏิกิริยาแทรกสอดด้วยอะลูมิเนียม พอลิไฮดรอกซีแคตไอออน จะอาศัยการแผ่รังสีไมโครเวฟเพื่อลดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาและลดปริมาณที่ใช้เมื่อเทียบกับวิธีการเตรียมแบบดั้งเดิม เมื่อนำไปวิเคราะห์ XRD หาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cationic exchange capacity) และทดสอบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงเฮปเทน พบว่าแร่ดินเหนียวอะลูมิเนียมพิลลาร์ที่เตรียมด้วยวิธีนี้ให้ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าแร่ดินเหนียวอะลูมิเนียมพิลลาร์ที่เตรียมด้วยวิธีดั้งเดิม

3. การเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนเหล็กในการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์

Kang S. และคณะ (Kang S. et al., 2002) ได้ทำการศึกษาการใช้กระบวนการเฟนทอนในการกำจัดสีย้อมและลดค่า COD ที่อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งในน้ำเสียจะมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสีย้อม R94H ปนเปื้อนอยู่ ในการทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ ได้แก่ ปริมาณของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของด้วยกระบวนการเฟนทอน ความเร็วที่ใช้ในการผสม ปริมาณของสารอินทรีย์ จากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการเฟนทอนมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมสูงถึง 90% โดยใช้เวลาเพียง 5 นาที ถึงแม้ว่าจะใช้เหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณน้อย แต่ในทางกลับกันการลดลงของค่า COD เป็นผลมาจากการตกตะกอนมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการเฟนทอน โดยอัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการเฟนทอนต่อการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 5.6 ในขณะที่อัตราส่วนของการลดลงของค่า COD ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการเฟนทอนต่อการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 1.2 จึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการเฟนทอนมีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียมากกว่าเพื่อใช้ในการลดค่าของ COD

Kavitha V. และ Palanivelu, K. (Kavitha V. and Palanivelu K., 2004) ได้ทำการศึกษาสมบัติของเฟอรัสไอออน ($Fe^{2+}$) ในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการปฏิกิริยาเฟนทอนและเฟนทอนเชิงแสงสำหรับการสลายตัวของฟีนอล โดยใช้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน ได้แก่ กระบวนการเฟนทอน กระบวนการเฟนทอนเชิงแสงโดยใช้แสงอาทิตย์ และกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงโดยใช้แสงยูวี โดยทำการทดสอบในระบบจำลองน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจัยศึกษาที่ใช้ได้แก่ ค่า pH ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ที่ใช้ในกระบวนการเฟนทอน เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจะนำไปทดสอบเปรียบเทียบการสลายของสารประกอบฟีนอลด้วยกระบวนการเฟนทอนกับเฟนทอนเชิงแสง จากการทดลองพบว่ากระบวนการเฟนทอน กระบวนการเฟนทอนเชิงแสงโดยใช้แสงอาทิตย์ และกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงโดยใช้แสงยูวีให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการสลายตัวสารประกอบฟีนอลมีค่าเป็น 41 % 96% และ 97% ตามลำดับ ซึ่งในกระบวนการเฟนทอนจะมีกรดคาร์บอกซิลิกเป็นผลิตภัณฑ์ในช่วงท้ายของการสลายฟีนอล เช่น กรดอะซีติก และ กรดออกซาลิก โดยกรดทั้งสองชนิดจะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการสลายฟีนอลและถูกออกซิไดซ์ได้เกือบสมบูรณ์ที่เวลา 120 นาที ปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงจะเกิดการสลายได้อย่างสมบูรณ์เมื่อมีการใช้ตัวเร่ง $Fe^{2+}$ เพียง 0.4 มิลลิโมลาร์ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเรซินเพื่อกำจัดสารประกอบฟีนอลได้

Schwingel de Oliveira I. และคณะ (Schwingel de Oliveira I. et al., 2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเรซินอัลคิด (Alkyd resin) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Advanced oxidation process, AOP) โดยใช้กระบวนการเฟนทอนและเฟนทอนเชิงแสง ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสี ซึ่งในการศึกษาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการเฟนทอนและเฟนทอนเชิงแสงจากข้อมูลของค่า COD TOC และการกำจัดสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเรซินอัลคิด จากการทดลองพบว่าสภาวะที่ใช้ในการบำบัดที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง pH 3.0 ความเข้มข้นของ $FeSO_4$ 15.15x10-3 โมล/ลิตร และความเข้มข้นของ $H_2O_2$ 0.30 โมล/ลิตร เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง กระบวนการเฟนทอนเชิงแสงจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดีที่สุดเพราะสามารถลดค่าของ COD และ TOC ลงได้ 99.5 และ 99.1% ตามลำดับ และสามารถที่จะกำจัดฟีนอลได้ถึง 95% จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการเฟนทอนเชิงแสงในระบบบำบัดน้ำเสียจะให้ประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการเฟนทอนที่ไม่ใช้แสง

Nikolaki M.D. และคณะ (Nikolaki M.D. et al., 2008) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาร 1,3-ไดคลอโร-2-โพรพานอล (1,3-DCP) โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง (Photochemical reaction, $UV/H_2O_2$) และกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงภายในถังปฏิกรณ์แบบกะ โดยมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ระบบ UV/ $H_2O_2$ และมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้น $H_2O_2$ และเหล็ก(II) ซึ่งเป็นเฟนทอนรีเอเจนต์ที่ใช้กระบวนการเฟนทอนเชิงแสง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายใต้แสงยูวีที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองพบว่าในระบบ UV/ $H_2O_2$ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที มีการลดลงของ 1,3-DCP 20 % เมื่อใช้ $H_2O_2$ 0.081 โมลาร์ และลดลง 36% เมื่อใช้ $H_2O_2$ 0.163 โมลาร์ ส่วนในกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงพบว่าการเพิ่มขึ้นของเหล็ก(II) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระบวนการสลายตัวของ 1,3-DCP โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็ก(II) ในกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงมากขึ้น การสลายตัวของ1,3-DCP จะมากขึ้นด้วย โดยสังเกตได้จากค่า TOC ที่ลดลง ซึ่งระบบที่ใช้เหล็ก(II) 80 มิลลิกรัม/ลิตร และ H2O2 0.081 โมลาร์จะให้ค่า TOC ต่ำที่สุด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเหล็ก(II) ที่ใช้ในกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ 1,3-DCP ให้เกิดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาเคมีในระบบ $UV/H_2O_2$

Huang Y.H. และคณะ (Huang Y.H. et al., 2010) ได้ทำการศึกษากระบวนสลายตัวของฟีนอลด้วยกระบวนการ UV/ $H_2O_2$ กระบวนการเฟนทอนและกระบวนการเฟนทอนเชิงแสง โดยใช้เฟอริกไอออน ($Fe^{3+}$) เป็น เฟนทอนรีเอเจนต์ การทดลองควบคุมสภาวะที่ pH=3 [$Fe^{3+}$]=5 มิลลิกรัม/ลิตร และ [$H_2O_2$]=1080 มิลลิกรัม/ลิตร จากการทดลองพบว่าความสามารถในการสลายตัวของฟีนอลโดยกระบวนการ $UV/H_2O_2$ ที่ 60 นาทีมีการสลายตัวเพียง 25% ในขณะกระบวนการเฟนทอนและกระบวนการเฟนทอนเชิงแสงที่ 10 นาที ฟีนอลจะสลายตัวไป 30% และ 90% ตามลำดับ นอกจากนี้กระบวนการเฟนทอนเชิงแสงมีความสามารถในการลดค่า COD สูงสุดถึง 98% แต่กระบวนการเฟนทอนค่า COD ลดลงเพียง 63%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite,MMT)Mac gel บริษัท Thai Nippon Chemical Industry

2.โซเดียมอะซิเตต (CH3COONa) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Majestic Good Product

3. เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl3.6H2O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lobal Chemie

4. เฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl2.4H2O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Majestic Good Product

5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H2O2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Majestic Good Product

6. สีเบสิค บลู 66 (Basic Blue 66) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma Aldrich

7. สีเอซิด เรด 91 (Acid Red 91) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Acros Organics

## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer,XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance

2. เครื่องวัดการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectroscopy,XRFs) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS3400

3. เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analyser, TGA) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA

4. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectroscometer) บริษัท Thermo electron Corporation รุ่น Helios

5. เครื่อง Gas Adsorption Analyzer รุ่น Autosorb-1 บริษัท Quantachrome

6. เครื่องอินฟาเรดสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (Fourier Transform infrared spectrophotometer, FTIR) บริษัท Perkin Elmer จำกัด รุ่น FTIR Spectrum GX

7. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000

8. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isotemp

9. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 225

10. เครื่องควบคุมอัตราการหยดสาร บริษัท Barnant รุ่น 77120-52

11. เครื่องหมุนเหวี่ยง บริษัท Thai Polymerdic ยี่ห้อ Sanyo รุ่น Centaur 2

12. เครื่องอัลตราโซนิค บริษัท Fisher Scientific Worldwide รุ่น ULTRAsonic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท Buchi รุ่น B-169

14. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254

15. โถดูดความชื้น

16. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific

17. บีกเกอร์ขนาด 50 , 100 , 150 , 250 , 500 , 600 , 1,000 และ 2,000 มิลลิลิตร

18. กระบอกตวงขนาด 10 , 100 มิลลิลิตร

19. ขวดวัดปริมาตร

20. ครูซิเบิลชนิดพอสแลน

21. แท่งแม่เหล็กปั่นกวน

22. โกร่งและที่บด

23. แท่งแก้วคน

**3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกอะซิเตต (Ferric acetate, iron(III) acetate)**

1. เตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตตความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร และเฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร

2. ผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $Fe^{3+}$ : $CH_3COO^-$ เท่ากับ 1:2 โดยหยดสารละลายโซเดียมอะซิเตตลงในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์อย่างช้าๆ โดยใช้เครื่องปั๊มที่มีอัตราการไหล 2 มิลลิลิตร/นาที พร้อมทำการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

**3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์รัสอะซิเตต (Ferrous acetate, iron(II) acetate)**

1. เตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตตความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร และเฟอร์รัสคลอไรด์ความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร

2. ผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $Fe^{2+}$ : $CH_3COO^-$ เท่ากับ 1:2 โดยหยดสารละลายโซเดียมอะซิเตตลงในสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์อย่างช้าๆ โดยใช้เครื่องปั๊มที่มีอัตราการไหล 2 มิลลิลิตร/นาที พร้อมทำการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

**3.5 การเตรียมสารตัวอย่าง**

วิธีที่ 1 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกอะซิเตต

1. ผสม MMT และสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกอะซิเตต ที่มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร โดยกำหนดให้ปริมาณไอออนของ $Fe^{3+}$ ในระบบเป็น 2.5 mmol ต่อ MMT 1 g. พร้อมทำการ โซนิคฮอร์น 15 นาที

2. กรองของผสมเพื่อแยกตะกอนโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน และล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง ตะกอนที่ได้จะเรียกว่า $Fe^{3+}$-CPX-MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าตะกอนจะแห้งหลังจากนั้นนำไปบดให้ละเอียด

4. นำ $Fe^{3+}$-CPX-MMT ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงจะได้ $Fe^{3+}$-CPX-pill

5. นำ $Fe^{3+}$-CPX-MMT และ $Fe^{3+}$-CPX-pill ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD XRF และ $N_2$ adsorption

วิธีที่ 2 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์รัสอะซิเตต

1. ผสม MMT และสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์รัสอะซิเตต ที่มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร โดยกำหนดให้ปริมาณไอออนของ $Fe^{2+}$ ในระบบเป็น 2.5 mmol ต่อ MMT 1 g. พร้อมทำการ โซนิคฮอร์น 15 นาที

2. กรองของผสมเพื่อแยกตะกอนโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน และล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง ตะกอนที่ได้จะเรียกว่า $Fe^{2+}$-CPX-MMT

3. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าตะกอนจะแห้งหลังจากนั้นนำไปบดให้ละเอียด

4. นำ $Fe^{2+}$-CPX-MMT ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงจะได้ $Fe^{2+}$-CPX-pill

5. นำ $Fe^{2+}$-CPX-MMT และ $Fe^{2+}$-CPX-pill ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD XRF และ $N_2$ adsorption

วิธีที่ 3 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ตามด้วยโซเดียมอะซีเตต

1. ผสม MMT และน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:120 โดยน้ำหนัก

2. เตรียมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ให้มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร ลงในของผสมในข้อ 1 พร้อมทำการ โซนิคฮอร์นครั้งละ 15 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณไอออนของ $Fe^{3+}$ ในระบบเป็น 2.5 mmol ต่อ MMT 1 g.

3. เตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตต ให้มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร

4. ผสมสารละลายโซเดียมอะซิเตต ที่มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร ลงไปในของผสมในข้อ 2 ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $Fe^{3+}$ : $CH_3COO^-$ เท่ากับ 1:2 พร้อมทำการโซนิคฮอร์น 15 นาที

5. กรองของผสมเพื่อแยกตะกอนโดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน และล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง ตะกอนที่ได้จะเรียกว่า $Fe^{3+}$-MMT-CPX

6. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วันหรือจนกว่าตะกอนจะแห้ง หลังจากนั้นนำไปบดให้ละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำ $Fe^{3+}$-MMT-CPX ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะได้ $Fe^{3+}$-pill-CPX

8. นำ $Fe^{3+}$-MMT-CPX และ $Fe^{3+}$-pill-CPX ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD XRF และ $N_2$ adsorption

วิธีที่ 4 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ ตามด้วยโซเดียมอะซีเตต

1. ผสม MMT และน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:120 โดยน้ำหนัก

2. เตรียมสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ ให้มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร ลงในของผสมในข้อ 1 พร้อมทำการ โซนิคฮอร์นครั้งละ 15 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณไอออนของ $Fe^{2+}$ ในระบบเป็น 2.5 mmol ต่อ MMT 1 g.

3. เตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตต ให้มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร

4. ผสมสารละลายโซเดียมอะซิเตต ที่มีความเข้มข้น 0.4 โมล/ลิตร ลงไปในของผสมในข้อ 2 ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $Fe^{2+}$ : $CH_3COO^-$ เท่ากับ 1:2 โดย พร้อมทำการ โซนิคฮอร์น 15 นาที

5. กรองของผสมเพื่อแยกตะกอนโดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน และล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง ตะกอนที่ได้จะเรียกว่า $Fe^{2+}$-MMT-CPX

6. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วันหรือจนกว่าตะกอนจะแห้ง หลังจากนั้นนำไปบดให้ละเอียด

7. นำ $Fe^{2+}$-MMT-CPX ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะได้ $Fe^{2+}$-pill-CPX

8. นำ $Fe^{2+}$-MMT-CPX และ $Fe^{2+}$-pill-CPX ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD XRF และ $N_2$ adsorption

### 3.6 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT และ Fe-pill

1. ศึกษาวัฏภาคที่เป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

| | |
|---|---|
| $2\theta$ เริ่มต้น-สิ้นสุด | 1°-40° |
| Step size | 0.040° |
| Time/step | 0.5 sec |

2. ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

| | |
|---|---|
| อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ | 350°C |
| ปริมาณสารตัวอย่าง | 0.02-0.04 g |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| บรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ | ไนโตรเจน |

3. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

| | |
|---|---|
| ปริมาณสารตัวอย่างประมาณ | 0.5000 g |
| ปริมาณกรดบอริกประมาณ | 4.5000 g |

**3.7 การศึกษาการกำจัดสีย้อมของวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill**

ชนิดของสีย้อม ซึ่งสีย้อมที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับมี 2 ชนิดคือ

- สีเบสิคบลู 66 (Basic Blue 66, BB 66) เป็นสีย้อมที่มีสีน้ำเงิน
- สีเอซิดเรด 91 (Acid Red 91, AR 91) เป็นสีย้อมที่มีสีแดง

1. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อมให้มีความเข้มข้น 25, 50, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัม/ลิตร นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้มาตรวจวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนสูงที่สุด ($\lambda_{max}$) ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV–VIS spectrophotometer) ซึ่งได้ค่าจากการตรวจวิเคราะห์จะนำไปสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้น โดยค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนสูงที่สุด ($\lambda_{max}$) ของสีย้อมที่ใช้ มีค่าดังนี้

| | |
|---|---|
| สีย้อม Basic blue 66 (BB 66) | $\lambda_{max}$ = 615 nm |
| สีย้อม Acid Red 91 (AR 91) | $\lambda_{max}$ = 519 nm |

2. ระบบการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายสีย้อม ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิลิกรัม/ลิตร
2. ผสมวัตถุดิบ MMT หรือ Fe-pill 0.5 กรัม ในสารละลายสีย้อมปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. ทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที
4. นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที เพื่อแยกตะกอน
5. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100°C จนแห้ง แล้วนำไปตรวจวัดด้วย FTIR
6. นำสารละลายสีย้อมที่แยกได้ ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

| | |
|---|---|
| สีย้อม Basic blue 66 (BB 66) | $\lambda_{max}$ = 615 nm |
| สีย้อม Acid Red 91 (AR 91) | $\lambda_{max}$ = 519 nm |

7. วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TOC

3. ระบบการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการเฟนทอน

1. เตรียมสารละลายสีย้อม ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผสมวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill 0.5 กรัม ในสารละลายสีย้อมปริมาตร 50 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร

3. ทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที

4. นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที เพื่อแยกตะกอน

5. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100°C จนแห้ง แล้วนำไปตรวจวัดด้วย FTIR

6. นำสารละลายสีย้อมที่แยกได้ ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

สีย้อม Basic blue 66 (BB 66) $\lambda_{max}$ = 615 nm

สีย้อม Acid Red 91 (AR 91) $\lambda_{max}$ = 519 nm

7. วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TOC

4. ระบบการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการเฟนทอนเชิงแสง

1. เตรียมสารละลายสีย้อม ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิลิกรัม/ลิตร

2. ผสมวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill 0.5 กรัม ในสารละลายสีย้อมปริมาตร 50 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร พร้อมกับฉายแสง UV เป็นเวลา 30นาที

3. นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที เพื่อแยกตะกอน

4. นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100°C จนแห้ง แล้วนำไปตรวจวัดด้วย FTIR

5. นำสารละลายสีย้อมที่แยกได้ ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

สีย้อม Basic blue 66 (BB 66) $\lambda_{max}$ = 615 nm

สีย้อม Acid Red 91 (AR 91) $\lambda_{max}$ = 519 nm

6. วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TOC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# ผลการทดลองและการอภิปรายผล

## 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร

4.1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

เมื่อนำวัตถุดิบตั้งต้น MMT และ MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกอะซิเตต ($Fe^{3+}$-CPX-MMT) สารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์รัสอะซิเตต ($Fe^{2+}$-CPX-MMT) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ตามด้วยโซเดียมอะซิเตต ($Fe^{3+}$-MMT -CPX) และ สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ตามด้วยโซเดียมอะซิเตต ($Fe^{2+}$-MMT –CPX) ไปศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค XRF ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ MMT และ Fe-MMT ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ

| สารตัวอย่าง | ธาตุองค์ประกอบ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Al (wt%) | Si (wt%) | Na (wt%) | Fe (wt%) | อื่นๆ (wt%) | อัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si | อัตราส่วนโดยโมลของ Fe/Al |
| MMT | 14.4 | 67.8 | 3.9 | 3.1 | 10.8 | 0.25 | 0.14 |
| $Fe^{3+}$-CPX-MMT | 10.9 | 49.6 | 3.8 | 26.4 | 9.3 | 0.26 | 1.55 |
| $Fe^{2+}$-CPX-MMT | 11.8 | 51.6 | 7.8 | 18.6 | 10.2 | 0.27 | 1.00 |
| $Fe^{3+}$-MMT –CPX | 10.2 | 49.1 | 4.4 | 26.6 | 9.7 | 0.25 | 1.67 |
| $Fe^{2+}$-MMT –CPX | 11.9 | 55.0 | 6.2 | 17.8 | 9.1 | 0.26 | 0.96 |

จากตารางที่ 4.1 พบว่า Fe-MMT หลังการดัดแปรโครงสร้างทุกสูตร มีค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si ใกล้เคียงกับ MMT เริ่มต้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของธาตุเหล็กพบว่า Fe-MMT มีปริมาณของธาตุเหล็กและอัตราส่วนโดยโมลของ Fe/Al สูงกว่าสารตั้งต้น MMT ในขณะเดียวกันปริมาณโซเดียมใน Fe-MMT ที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าในวัตถุดิบ MMT จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการดัดแปรโครงสร้างทุกวิธีไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ MMT เริ่มต้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของไอออนที่อยู่ระหว่างระนาบ *001* เนื่องจากมีโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กแทรกเข้าไปในชั้นโครงสร้าง ชั้นของวัตถุดิบ MMT โดยการแลกเปลี่ยนกับไอออน $Na^+$ อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของโซเดียมใน Fe-MMT ที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่า MMT เริ่มต้น ทั้งนี้สันนิษฐานว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

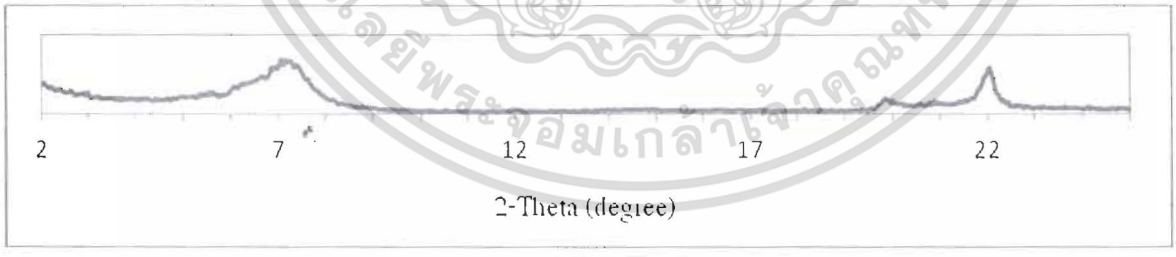
เนื่องมาจากสารตั้งต้น $CH_3COONa$ ที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างนั้นมีโซเดียมเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้มี $Na^+$ ตกค้างอยู่ในโครงสร้าง Fe-MMT

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง $Fe^{3+}$-CPX-MMT ซึ่งเตรียมจากสารประกอบเชิงซ้อนของ $Fe^{3+}$ กับ $CH_3COO^-$ ก่อนการดัดแปรโครงสร้าง MMT และ $Fe^{3+}$-MMT –CPX ซึ่งเตรียมจากสารประกอบเชิงซ้อนของ $Fe^{3+}$ กับ $CH_3COO^-$ ภายในโครงสร้างของ MMT พบว่า อัตราส่วนโดยโมลของ Fe/Al ของ Fe-MMT ที่เตรียมจากทั้ง 2 วิธีข้างต้น มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $Fe^{2+}$-CPX-MMT กับ $Fe^{2+}$-MMT – CPX ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ลำดับการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนก่อนหรือหลังการดัดแปรโครงสร้างไม่มีผลต่อปริมาณของเหล็กที่ดัดแปรโครงสร้าง MMT

เมื่อเปรียบเทียบ $Fe^{3+}$-CPX-MMT กับ $Fe^{2+}$-CPX-MMT พบว่า อัตราส่วนโดยโมลของ Fe/Al มีค่าแตกต่างกัน โดยที่ $Fe^{3+}$-CPX-MMT ให้ค่า Fe/Al ที่มากกว่า $Fe^{2+}$-CPX-MMT ผลดังกล่าวสันนิษฐานว่าน่าจะเนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์ริกอะซิเตตมีอัตราส่วน $Fe^{3+}$: $CH_3COO^-$ เท่ากับ 3:1 แต่ สารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์รัสอะซิเตตมีอัตราส่วน$Fe^{2+}$: $CH_3COO^-$ เท่ากับ 1:1 จึงทำให้อัตราส่วนโดยโมลของ $Fe^{3+}$-CPX-MMT มีค่ามากกว่า $Fe^{2+}$-CPX-MMT

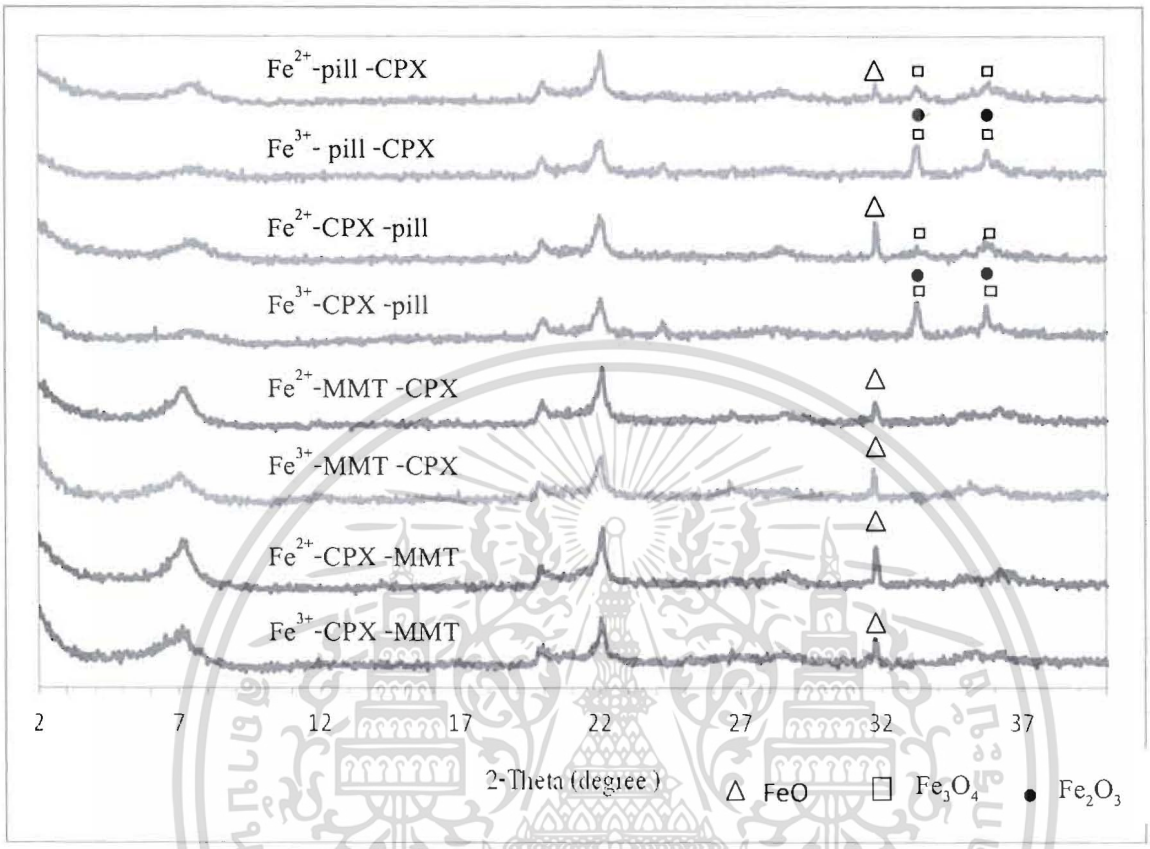
4.1.2 เทคนิค XRD

เมื่อนำวัตถุดิบ MMT และ Fe-MMT ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ โดยการใช้เทคนิค โซนิคฮอร์นทั้งก่อนและหลังการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)โดยทำการวัดที่มุม $2\theta$ ตั้งแต่ 1° ถึง 40° ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4.1




**ภาพที่ 4.1** แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัตถุดิบ MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**ภาพที่ 4.2** แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัตถุดิบ Fe-MMT และ Fe-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

จากภาพที่ 4.1 สามารถสรุปค่า $2\theta$ และ $d_{001}$ ของ MMT Fe-MMT และ Fe-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** ค่า $2\theta$ และ $d_{001}$ ของ MMT Fe-MMT และ Fe-pill ซึ่งเตรียมที่สภาวะต่างๆ

| สารตัวอย่าง | $2\theta_{d001}$ | $d_{001}$(A) |
|---|---|---|
| MMT | 7.32° | 12.07 |
| $Fe^{3+}$-CPX-MMT | 7.12° | 12.40 |
| $Fe^{2+}$- CPX-MMT | 7.12° | 12.40 |
| $Fe^{3+}$ -MMT- CPX | 7.00° | 12.61 |
| $Fe^{2+}$-MMT- CPX | 7.24° | 12.19 |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | 7.48° | 11.80 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | 7.28° | 12.13 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | 7.32° | 12.06 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | 7.48° | 11.80 |

จากภาพที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 พบว่าวัตถุดิบ MMT มีพีกของระนาบ *001* ที่ค่า $2\theta$ เท่ากับ 7.32° ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ *001* ($d_{001}$) ได้จากสมการ $n\lambda = 2d \sin\theta$ (เมื่อ $\lambda$ = 1.54 Å) พบว่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ *001* เท่ากับ 12.07 Å และเมื่อทำการดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบ MMT ด้วยสภาวะต่างๆ พบว่าพีก $d_{001}$ ของ Fe-MMT เลื่อนไปที่ค่า $2\theta$ ต่ำลงและความเข้มของพีกมีค่าลดลง ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างระนาบ *001* มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างระนาบ *001* ของ MMT ทำให้ระนาบ *001* มีระยะห่างเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในแบบจำลองโครงสร้างของ Fe-CPX-MMT และ Fe-MMT-CPX ในภาพที่ 4.3 และ 4.4

จากแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงการแทรกตัวของ Fe-CPX เป็นจำนวนมากในระหว่างชั้นของ MMT ซึ่งทำให้บางบริเวณมี Fe-CPX แทรกตัวอยู่ในระหว่างชั้นของ MMT มาก บางบริเวณมี Fe-CPX แทรกตัวอยู่ในระหว่างชั้นของ MMT น้อย ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้ค่า d-spacing มีหลายค่า ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นบางบริเวณแคบลง บางบริเวณกว้างขึ้นอย่างมากซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ทำให้ค่าความเข้มของพีก $2\theta$ ที่ตำแหน่งระนาบ *001* ลดลง

เมื่อนำ Fe-MMT ไปเผาแคลไซน์พบว่าที่พีกของระนาบ *001* เลื่อนมาที่ค่า $2\theta$ สูงขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กถูกแคลไซน์ได้เป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์ โดยจะสังเกตได้จากการเกิดพีกของ $Fe_3O_4$ และ $Fe_2O_3$ ที่ตำแหน่ง $2\theta$ เท่ากับ 33.28 และ 35.72 ซึ่งโครงสร้างของ MMT ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปได้มี 3 แบบดังนี้

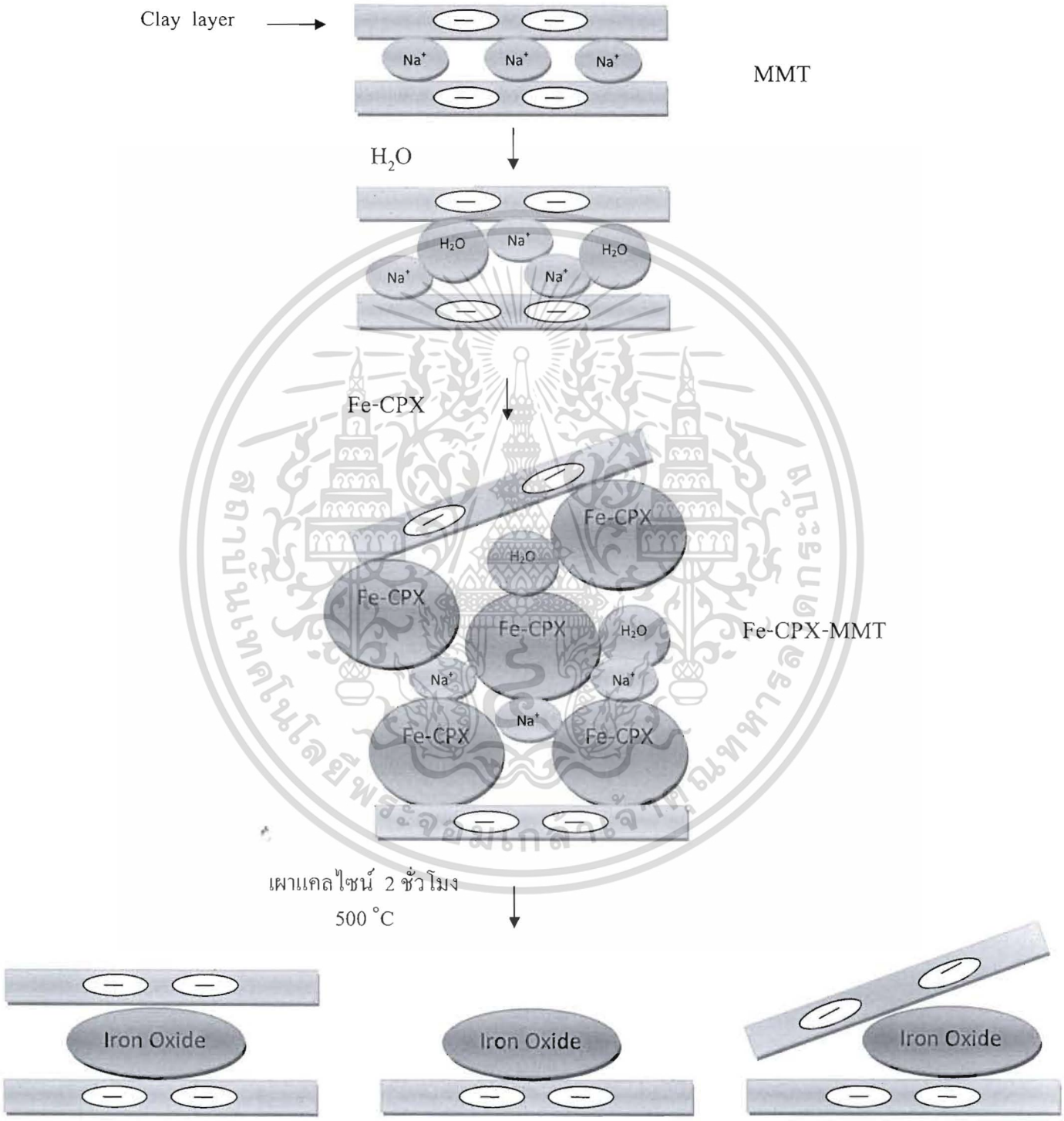
แบบที่ 1 Fe-MMT ยังคงมีชั้นของระนาบ *001* คล้ายคลึงกับวัตถุดิบ MMT เริ่มต้นแต่มีระยะห่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีโมเลกุลของเหล็กออกไซด์แทรกอยู่ภายในจึงทำให้พีก $2\theta$ ของระนาบ *001* มีค่า d-spacing เพิ่มขึ้น

แบบที่ 2 ระนาบ *001* มีความกว้างไม่สม่ำเสมอเนื่องจากบางบริเวณมีปริมาณเหล็กออกไซด์แทรกระหว่างชั้นของ MMT น้อย บางบริเวณมีปริมาณเหล็กออกไซด์แทรกอยู่ระหว่างชั้นของ MMT ทำให้แรงดึงดูดระหว่างชั้นของ MMT น้อยลงแต่ชั้นของ MMT ไม่หลุดออกจากกันและบางส่วนเกิดการเลื่อนตัวของแผ่นเคลย์ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้ค่า d-spacing มีหลายค่าโดยระยะห่างระหว่างชั้นบางบริเวณแคบลง บางบริเวณกว้างขึ้นอย่างมากซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ทำให้ค่าความเข้มของพีก $2\theta$ ที่ตำแหน่งระนาบ *001* ลดลง

แบบที่ 3 เกิดจากโครงสร้างของ Fe-CPX เข้าไปแทรกระหว่างชั้นของ MMT จำนวนมากทำให้แรงดึงดูดระหว่างชั้นของ MMT น้อยลงทำให้แผ่นเคลย์หลุดออกจากกัน เป็นโครงสร้างแบบ delaminate เมื่อนำไปเผาแคลไซน์จะได้โครงสร้าง Fe-MMT ที่มีเหล็กออกไซด์เกาะที่พื้นผิวของแผ่นเคลย์ที่หลุดออกจากกัน จากโครงสร้างดังกล่าวจึงทำให้ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ทำให้ความเข้มของพีก $2\theta$ ที่ระนาบ *001* ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

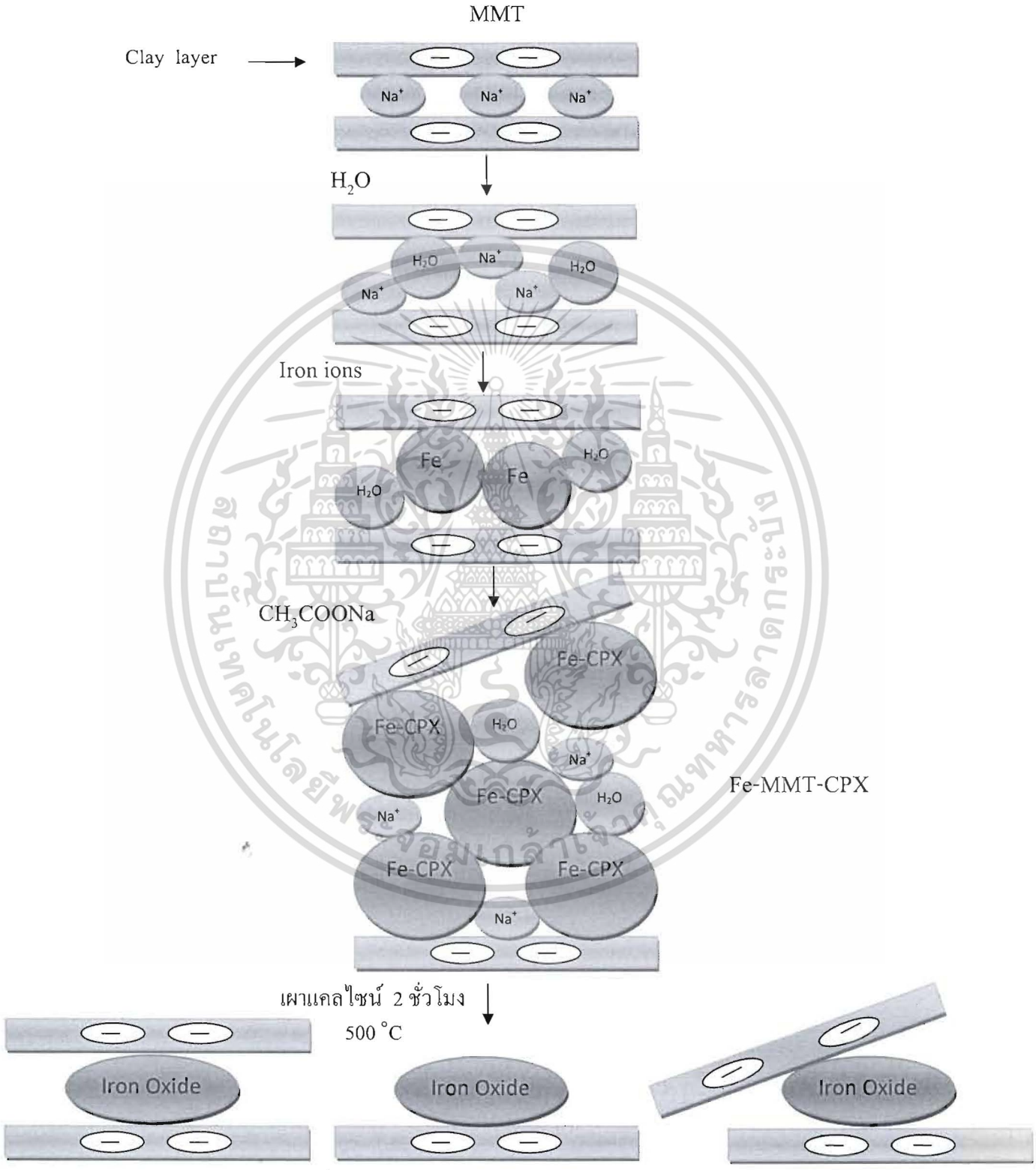
<u>แบบจำลองที่ 1</u> โครงสร้างของ Fe-CPX-MMT




**ภาพที่ 4.3** ลักษณะโครงสร้างของ Fe-CPX-pill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองที่ 2 โครงสร้างของ Fe-MMT-CPX




**ภาพที่ 4.4** ลักษณะโครงสร้างของ Fe-pill-CPX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิค $N_2$ adsorption

เมื่อนำวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill ที่เตรียมได้ ไปทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยเทคนิค $N_2$ adsorption ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill ที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

| สารตัวอย่าง (Sample) | พื้นที่ผิวจำเพาะ ($m^2/g$) | ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Å) |
|---|---|---|
| MMT | 41.49 | 37.3 |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | 96.2 | 131.4 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | 80.47 | 189.7 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | 104.6 | 152.8 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | 105.3 | 164.8 |

จากการวิเคราะห์พบว่า Fe-pill ที่เตรียมได้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากขณะดัดแปรโครงสร้างของ MMT จะมีเหล็กไฮดรอกไซด์แทรกเข้าไปในชั้นของ MMT และเมื่อทำการเผาแคลไซน์ เหล็กไฮดรอกไซด์เปลี่ยนไปเป็นพิลลาร์ร์ออกไซด์แทรกอยู่ในระหว่างระนาบ *001* ของ MMT จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น

**4.2 การศึกษาการดูดซับสีย้อมของวัตถุดิบ Fe-pill**

เมื่อนำสารละลายสีเบสิกบูล 66 (BB 66) และสีแอซิดเรด 91 (AR 91) ไปหาค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด ในช่วงอัลตราไวโอเลตจนถึงช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายสีย้อม

| ชนิดสีย้อม | ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (nm.) |
|---|---|
| สีเบสิคบูล 66 (BB 66) | 612 |
| สีแอซิดเรด 91 (AR 91) | 519 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อม BB 66 และ AR 91 โดยการเตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 25, 50, 100, 200 และ 400 จากนั้นนำไปวัดหาค่าดูดกลืนแสงแต่ละความเข้มข้นที่ความยาวคลื่นสูงสุดดังตารางที่ 4.4 แล้วนำมาสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมจะได้ดังภาพที่ ข.1 และ ข.2 ในภาคผนวก ข จากกราฟมาตรฐานจะได้สมการเส้นตรงของสารละลายสีย้อม BB 66 และ AR 91 คือ $y = 0.009x$ และ $y = 0.0281x$ ตามลำดับ เมื่อทำการวัดค่าดูดกลืนแสงสารละลายสีย้อมหลังจากการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ จึงนำค่าดูดกลืนแสงมาหาค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อมที่ถูกกำจัดด้วย Fe-pill จากสมการข้างต้น

4.2.1 ผลการดูดซับสารละลายสี BB 66

เมื่อนำ MMT และ Fe-pill ที่เตรียมได้ไปทำการดูดซับสารละลายสีย้อม BB 66 ด้วยระยะการดูดซับแบบกะที่สภาวะต่างๆ ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม ($q_e$) และค่า TOC ดังแสดงในตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของ BB 66

| ชนิดตัวดูดซับ | ปริมาตร (ml) | เวลา (min) | %การกำจัด | $q_e$ (mg/g) | TOC (mg/l) |
|---|---|---|---|---|---|
| MMT | 50 | 30 | 93.00 | 46.50 | 66.63 |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | | | 99.69 | 49.84 | 40.39 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | | | 99.82 | 49.91 | 47.80 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | | | 99.78 | 49.89 | 42.50 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | | | 99.67 | 49.83 | 45.68 |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | 100 | 15 | 98.78 | 98.78 | 49.49 |
| | | 30 | 98.96 | 98.96 | 40.39 |
| | | 45 | 99.31 | 99.31 | 47.57 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | | 15 | 99.27 | 99.27 | 49.29 |
| | | 30 | 99.49 | 99.49 | 47.80 |
| | | 45 | 99.73 | 99.73 | 49.06 |
| | | 30 | 99.20 | 99.20 | 45.68 |

TOC สีย้อม BB 66 เริ่มต้น = 95.46 mg/l

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5 (ต่อ)** เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของ BB 66

| ชนิดตัวดูดซับ | ปริมาตร (ml) | เวลา (min) | %การกำจัด | $q_e$ (mg/g) | TOC (mg/l) |
|---|---|---|---|---|---|
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | 100 | 15 | 98.87 | 98.87 | 44.84 |
| | | 30 | 98.98 | 98.98 | 42.50 |
| | | 45 | 99.24 | 99.24 | 42.35 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | | 15 | 99.04 | 99.04 | 44.72 |
| | | 30 | 99.20 | 99.20 | 45.68 |
| | | 45 | 99.44 | 99.44 | 43.90 |

TOC สีย้อม BB 66 เริ่มต้น = 95.46 mg/l

จากตารางที่ 4.5 เมื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของชนิดตัวดูดซับต่อความสามารถในการกำจัดสีย้อมโดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม เท่ากับ 500 mg/l ปริมาตรของสีย้อม 50 ml และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 30 นาที และ พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดมีค่าประมาณ 99 %ขึ้นไปทุกตัว ซึ่งคิดเป็นค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมประมาณ 49 mg/g และเมื่อนำสารละลายสีย้อมที่เหลือไปวิเคราะห์หาค่า TOC พบว่าค่า TOC มีค่าลดลงจากสารละลายสีย้อมเริ่มต้นโดย มีค่าประมาณ 40-47 mg/l จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงว่าตัวดูดซับทั้ง 4 มีความสามารถในการกำจัดสีย้อม BB 66 ได้ใกล้เคียงกัน

จากการทดลองข้างต้น ที่ได้ค่าความสามารถในการดูดซับถึง 99% นั้นปริมาณอาจเป็นผลเนื่องมาจากสีย้อมในระบบอาจจะน้อยเกินไป ดังนั้นจึงเพิ่มปริมาตรสีย้อมที่ใช้ในระบบดูดซับแบบกะให้สูงขึ้นเป็น 100 ml โดยกำหนดให้เวลาระยะเวลาในการดูดซับคงที่ที่ 30 นาที พบว่าตัวดูดซับทุกตัวให้ ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดเป็น 99%ใกล้เคียงกับทุกตัว แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับยังคงมีความสามารถในการดูดซับในระดับที่สูงอยู่ถึงแม้ว่าปริมาตรสีย้อมจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ โดยปรับเปลี่ยนเป็น 15 30 และ 45 นาที โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายสีย้อม เท่ากับ 500 mg/l ปริมาตรสีย้อม 100 ml พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 95 เป็น 99% เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มจาก 15 เป็น 45 นาที อย่างไรก็ตามแม้เพียงใช้ระยะเวลาในการดูดซับเพียง 15 นาที ก็ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดถึง 95% จากผลการทดลองอาจสันนิษฐานได้ว่า ตัวดูดซับ Fe-pill มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB 66 มาก เนื่องจากสีย้อม BB 66 ประจุเป็นบวก และพื้นผิวของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่เป็นประจุลบ นอกจากนี้สารประกอบเหล็กออกไซด์ในโครงสร้างFe-pill มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซึ่งมีประจุเป็นลบสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสีย้อม BB 66ได้ดี อย่างไรก็ตามปริมาณสีย้อมที่มีในระบบต่อปริมาณตัวดูดซับยังมีสัดส่วนน้อยเกินไป ดังนั้นจึงมีการปรับเปลี่ยนโดยลดปริมาณตัวดูดซับลงโดยใช้สารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 500 mg/l ปริมาตรสีย้อม 100 ml และระยะเวลาในการดูดซับคงที่ที่ 30 นาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของสี BB 66 ที่ทำการปรับลดปริมาณตัวดูดซับ

| ชนิดตัวดูดซับ | ปริมาณตัวดูดซับ (mg) | %การกำจัด | $q_e$ (mg/g) | TOC (mg/l) |
|---|---|---|---|---|
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | 0.05 | 95.58 | 955.78 | 52.12 |
| | 0.10 | 97.00 | 485.00 | 51.50 |
| | 0.30 | 98.09 | 163.48 | 47.43 |
| | 0.50 | 99.18 | 99.18 | 43.39 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | 0.05 | 96.27 | 962.66 | 53.29 |
| | 0.10 | 97.73 | 488.67 | 50.08 |
| | 0.30 | 98.56 | 164.26 | 45.48 |
| | 0.50 | 99.62 | 99.62 | 42.81 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | 0.05 | 94.84 | 948.44 | 51.78 |
| | 0.10 | 95.80 | 479.00 | 49.47 |
| | 0.30 | 97.84 | 163.07 | 46.01 |
| | 0.50 | 99.00 | 99.00 | 44.50 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | 0.05 | 95.93 | 959.34 | 52.19 |
| | 0.10 | 96.89 | 484.44 | 50.49 |
| | 0.30 | 98.42 | 164.04 | 47.45 |
| | 0.50 | 99.36 | 99.36 | 45.68 |

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อลดปริมาณตัวดูดซับลงในทุกสูตร เปอร์เซ็นต์การกำจัดลดลงเล็กน้อย และค่า TOC เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่พบว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับน้อยที่สุดในทุกๆสูตรได้ค่า TOC สูงแต่เปอร์เซ็นต์การกำจัดยังมีค่าสูงถึง 95% แสดงว่าตัวดูดซับทำงานได้ดี และ ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีค่าสูงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการดูดซับสารละลายสี AR 91

เมื่อนำ MMT และ Fe-pill ไปทำการดูดซับสารละลายสีย้อม AR 91 โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 500 mg/l ปริมาตรสีย้อม 50 ml และระยะเวลาในการดูดซับเท่ากับ 30 45 และ 60 นาทีได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม ($q_e$) และค่า TOC ดังแสดงผลในตารางที่ 4.7 พบว่าที่ระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที ตัวดูดซับทุกชนิดมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดอยู่ในช่วง 10-18 % และเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับมากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่การดูดซับแบบกะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากว่าสีย้อม AR 91 มีประจุเป็นลบและตัวดูดซับมีพื้นผิวส่วนใหญ่เป็นประจุลบเช่นเดียวกัน นอกจากนี้สารประกอบเหล็กออกไซด์ในโครงสร้าง Fe-pill ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสีย้อม AR 91 ได้เพียงบางส่วน

จากผลการทดลองข้างต้น จึงปรับวิธีการกำจัดสีย้อมจากการดูดซับแบบกะ เป็นวิธีเฟนทอน และเฟนทอนเชิงแสง โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 500 mg/l ปริมาตรสีย้อม 50 ml และระยะเวลาในการดูดซับเท่ากับ 30 และ60 นาที ซึ่งวิธีเฟนทอนมีการเติม $H_2O_2$ ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเฟนทอนเชิงแสง โดยมีการเติม $H_2O_2$ พร้อมมีการฉายแสงยูวี ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม ($q_e$) และค่า TOC ดังแสดงผลในตารางที่ 4.7

**ตารางที่ 4.7** เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของสี AR 91

| ชนิดตัวดูดซับ | วิธีการกำจัดสีย้อม | เวลา (min) | %การกำจัด | $q_e$ (mg/g) | TOC (mg/l) |
|---|---|---|---|---|---|
| MMT | ดูดซับแบบกะ | 30 | 4.37 | 1.79 | 175.60 |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | | | 12.86 | 6.43 | 158.80 |
| | | 45 | 18.57 | 9.29 | 167.00 |
| | | 60 | 25.71 | 12.86 | 164.80 |
| | เฟนทอน | 30 | 67.86 | 33.93 | 85.35 |
| | | 60 | 72.86 | 36.43 | 70.39 |
| | เฟนทอนเชิงแสง | 30 | 80.00 | 40.00 | 70.06 |
| | | 60 | 82.14 | 41.07 | 56.97 |

TOC สีย้อม AR 91 เริ่มต้น = 189.80 mg/l

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.7 (ต่อ)** เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม และค่า TOC ของ MMT และ Fe-pill ของสี AR 91

| ชนิดตัวดูดซับ | วิธีการกำจัดสีย้อม | เวลา (min) | %การกำจัด | $q_e$ (mg/g) | TOC (mg/l) |
|---|---|---|---|---|---|
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | ดูดซับแบบกะ | 30 | 18.57 | 7.86 | 164.50 |
| | | 45 | 23.57 | 11.79 | 170.70 |
| | | 60 | 29.29 | 14.64 | 171.00 |
| | เฟนทอน | 30 | 76.43 | 38.22 | 83.47 |
| | | 60 | 82.14 | 41.07 | 67.80 |
| | เฟนทอนเชิงแสง | 30 | 83.57 | 41.79 | 68.70 |
| | | 60 | 86.43 | 43.21 | 50.67 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | ดูดซับแบบกะ | 30 | 10.00 | 5.00 | 163.60 |
| | | 45 | 20.71 | 10.36 | 161.00 |
| | | 60 | 26.43 | 12.50 | 165.10 |
| | เฟนทอน | 30 | 65.71 | 32.86 | 79.99 |
| | | 60 | 71.43 | 35.71 | 72.50 |
| | เฟนทอนเชิงแสง | 30 | 57.86 | 28.93 | 89.65 |
| | | 60 | 72.86 | 36.43 | 60.85 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | ดูดซับ | 30 | 10.71 | 5.36 | 162.30 |
| | | 45 | 15.71 | 7.86 | 163.30 |
| | | 60 | 24.29 | 12.14 | 163.60 |
| | เฟนทอน | 30 | 74.29 | 37.14 | 80.72 |
| | | 60 | 80.00 | 40.00 | 70.68 |
| | เฟนทอนเชิงแสง | 30 | 71.43 | 35.71 | 69.82 |
| | | 60 | 81.43 | 40.71 | 59.43 |

TOC สีย้อม AR 91 เริ่มต้น = 189.80 mg/l

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับด้วยวิธีเฟนทอนและเฟนทอนเชิงแสงกับวิธีการดูดซับแบบกะ พบว่าตัวดูดซับทุกชนิดมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงขึ้นและค่า TOC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากเหล็กออกไซด์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของตัวดูดซับทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของ $H_2O_2$ เป็น HO• และ HOO• (ดังแสดงในสมการที่ 2.3 – 2.5) ซึ่ง HO• และ HOO• จะเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีย้อมซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์และออกโซโครมของสีย้อมเป็นผลให้สีของสีย้อมจางหรือหายไป นอกจากนี้อาจทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างสีย้อมเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเกิดการดูดซับในช่องว่างรูพรุนของตัวดูดซับได้ดีขึ้นและค่า TOC จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงเป็นผลให้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงยูวีของสารละลายสีย้อมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเพิ่มเวลาในการกำจัดสีย้อมในระบบเฟนทอนและเฟนทอนเชิงแสงจาก 30 นาทีเป็น 60 นาที สำหรับตัวดูดซับทุกชนิด พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเนื่องจากปฏิกิริยาสิ้นสุดเพราะ $H_2O_2$ ถูกใช้จนหมดในปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากการศึกษาผลของวิธีการกำจัดสีย้อมที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและ ค่า TOC เปรียบเทียบวิธีการเฟนทอนและเฟนทอนเชิงแสงที่ระยะเวลา 30 นาทีของตัวดูดซับทุกชนิด พบว่าเมื่อใช้วิธีเฟนทอนเชิงแสงค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและ ค่า TOC มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีเฟนทอน สันนิษฐานว่า วิธีการเฟนทอนเชิงแสงมีการฉายแสงยูวีเพื่อช่วยให้ $Fe^{3+}$ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็น $Fe^{2+}$ ได้มากขึ้น(ดังแสดงในสมการที่ 2.6) ซึ่ง $Fe^{2+}$ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของ $H_2O_2$ เป็น HO• และ HOO• (ดังแสดงในสมการที่ 2.3 – 2.5) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของ $Fe^{2+}$ จะทำให้เกิด HO• ในระบบเพิ่มขึ้นและอาจกล่าวได้ว่าการใช้วิธีเฟนทอนเชิงแสงสามารถทำให้เกิดการสลายตัวของสีย้อมได้ดีกว่าวิธีเฟนทอน

เมื่อพิจารณาชนิดของตัวดูดซับโดยเปรียบเทียบตัวดูดซับที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย $Fe^{3+}$ กับตัวดูดซับที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย $Fe^{2+}$ที่นำมาใช้ดูดซับด้วยวิธีเฟนทอน พบว่าชนิดของตัวดูดซับที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย $Fe^{2+}$ ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและ ค่า TOC มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวดูดซับที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย $Fe^{3+}$ สันนิษฐานว่า ตัวดูดซับที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย $Fe^{3+}$ จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเฟนทอน (สมการ 2.4) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับสามารถเปลี่ยน $Fe^{3+}$ เป็น $Fe^{2+}$ ทำให้ปริมาณ HO• ในระบบลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย $Fe^{2+}$ แต่สำหรับวิธีเฟนทอนเชิงแสงค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด และ ค่า TOC ใกล้เคียงกันเนื่องจากการฉายแสงยูวีช่วยให้ $Fe^{3+}$ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็น $Fe^{2+}$ (สมการ 2.6)ทำให้ปริมาณ HO• เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่โครงสร้างของสีย้อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือเกิดการสลายตัวของโครงสร้างสีย้อมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ผลของการดัดแปรโครงสร้างของ MMT

เมื่อนำ MMT มาดัดแปรโครงสร้างด้วยสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์ริกอะซิเตต ($Fe^{3+}$-CPX-MMT) สารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์รัสอะซิเตต ($Fe^{2+}$-CPX-MMT) สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ตามด้วยโซเดียมอะซิเตต ($Fe^{3+}$-MMT-CPX) และ สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์ตามด้วยโซเดียมอะซิเตต ($Fe^{2+}$-MMT-CPX) แล้วนำทั้ง 4 ชนิดไปเผาแคลไซน์ที่ 500 $^{O}$C จะได้เป็นตัวดูดซับ $Fe^{3+}$-CPX-pill $Fe^{2+}$-CPX-pill $Fe^{3+}$-pill-CPX และ $Fe^{2+}$-pill-CPX แล้วตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีพีกของระนาบ *001* เลื่อนไปที่ค่า $2\theta$ ต่ำลง พีกมีลักษณะฐานกว้างและความเข้มของพีกต่ำลง เนื่องมาจากสารประกอบเหล็กออกไซด์ที่เป็นสารดัดแปรโครงสร้างแทรกตัวอยู่ในระนาบ *001* เป็นผลให้ระยะห่างระหว่างระนาบ *001* มีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้ง MMT บางส่วนมีสารประกอบเหล็กออกไซด์แทรกตัวอยู่เป็นจำนวนน้อย ทำให้แรงดึงดูดระหว่างชั้นของ MMT น้อยลง จึงเกิดการเลื่อนตัวของแผ่นเคลย์ และบางส่วนมีสารประกอบเหล็กออกไซด์แทรกตัวอยู่เป็นจำนวนมากทำให้แรงดึงดูดระหว่างชั้นของ MMT น้อยลงส่งผลให้แผ่นเคลย์หลุดออกจากกัน จึงก่อให้เกิดการเสียสภาพความเป็นระเบียบของระนาบ *001*

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ พบว่า ตัวดูดซับทุกชนิดมีค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Al/Si ใกล้เคียงกับ MMT เริ่มต้น แสดงว่าการดัดแปรโครงสร้างทุกวิธีไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ MMT เริ่มต้น และพบว่ามีปริมาณของโซเดียมไอออน($Na^{+}$) เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากสารตั้งต้น $CH_3COONa$ ที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างนั้นมีโซเดียมเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้มี $Na^{+}$ ตกค้างอยู่ในโครงสร้าง Fe-MMT เมื่อพิจารณาผลของสารที่ใช้ดัดแปรโครงสร้าง พบว่าตัวดูดซับที่ใช้สารดัดแปรโครงสร้างเป็นเฟอร์ริกไอออน ($Fe^{3+}$) จะมีอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กใน MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างเพิ่มสูงกว่าในกรณีที่ใช้สารดัดแปรโครงสร้างเป็นเฟอร์รัสไอออน ($Fe^{2+}$)

2. ผลการดูดซับสารละลายสีย้อม

เมื่อนำตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดไปศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีเบสิคบลู 66 (BB 66) และ สีแอซิดเรด 91 (AR 91) ซึ่งในระบบของ BB 66 จะใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 500 mg/l ในระบบการดูดซับแบบกะ โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับและปริมาณของตัวดูดซับ พบว่า เมื่อใช้ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมสูงกว่า 95% ซึ่งคิดเป็นค่าความสามารถในการดูดซับสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อมมากกว่า 950 mg/g แม้จะใช้ตัวดูดซับเพียง 0.05 g และระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที และค่า TOC ของสารละลายสีย้อม BB 66 ลดลงจากค่าเริ่มต้นที่ 95.46 เป็น 40 mg/l เนื่องจากสีย้อม BB 66 ประจุเป็นบวก และพื้นผิวของตัวดูดซับส่วนใหญ่เป็นประจุลบ นอกจากนี้สารประกอบเหล็กออกไซด์ในโครงสร้างFe-pill มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซึ่งมีประจุเป็นลบสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสีย้อม BB 66ได้ดี ในทางกลับกันระบบ AR 91 ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมในระบบการดูดซับแบบกะค่อนข้างต่ำในช่วงประมาณ 20% เนื่องจากว่าสีย้อม AR 91 มีประจุเป็นลบทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวโครงสร้างFe-pillได้เพียงบางส่วน ดังนั้นจึงพัฒนาระบบการกำจัดสีย้อมเป็นระบบเฟนทอนโดยมีการเติม $H_2O_2$ ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเฟนทอนเชิงแสงโดยมีการเติม $H_2O_2$ พร้อมมีการฉายแสงยูวี พบว่า ในระบบเฟนทอน ตัวดูดซับที่เตรียมจาก $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมมีค่าประมาณ 75% และ 66% ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากระบบการดูดซับแบบกะอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเหล็กออกไซด์ในโครงสร้างของตัวดูดซับทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของ $H_2O_2$ เป็น $HO^{\bullet}$ และ $HOO^{\bullet}$ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่โครงสร้างของสีย้อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อมหรือเกิดการสลายตัวของโครงสร้างสีย้อม และค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมจะเพิ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้ระบบ เฟนทอนเชิงแสงว่า วิธีการเฟนทอนเชิงแสงมีการฉายแสงยูวีเพื่อช่วยให้ $Fe^{3+}$ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็น $Fe^{2+}$ ได้มากขึ้นซึ่ง $Fe^{2+}$ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของ $H_2O_2$ เป็น $HO^{\bullet}$ และ $HOO^{\bullet}$ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของ $Fe^{2+}$ จะทำให้เกิด $HO^{\bullet}$ ในระบบเพิ่มขึ้น

**5.2 ข้อเสนอแนะ**

1. ศึกษาการดูดซับโดยใช้สีย้อมชนิดอื่น
2. ศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวชนิดอื่น
3. ควรศึกษาถึง pH และ อุณหภูมิของสารละลายสีย้อมที่ใช้ในการดูดซับ เพื่อที่จะให้เห็นถึงความแตกต่างของการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6
## สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

**การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ**

1. Siriphannon, P., Ruengchainikom, T., Tharakarn, J., Lertkanchanaporn, K., Development of nanoporous iron oxide-pillared clay for dye containing wastewater treatment. *The 5th International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications (ICNFA'14)*, (Prague, Czech Republic), August 11-13, 2014.
2. Siriphannon, P., Ruengchainikom, T., Tharakarn, J., Lertkanchanaporn, K., Nanoporous iron oxide-pillared clay for dye containing wastewater treatment, in preparing manuscript.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง

Banat, I.M., Nigam, P., Singh, D., Marchant, R., 1996. Microbial decolorization of textile-dye containing effluents: a review. Bioresour. Technol. 58, 217–227.

Baskaralingam, P., Pulikesi, M., Elango, D., Ramamurthi, V., Sivanesan, S. 2006. Adsorption of acid dye onto organobentonite. J. Hazard. Mater. 128, 138–144.

Bouberka, Z., Kacha, S., Kameche, M., Elmaleh, S., Derriche, Z., 2005. Sorption study of an acid dye from an aqueous solution using modified clays. J. Hazard. Mater. 119, 117–124.

Caudo, S., Centi, G., Genovese, C., Perathoner, S. 2007. Copper- and iron-pillared clay catalysts for the WHPCO of model and real wastewater streams from olive oil milling. Appl. Catal. B-Environ. 70, 437–446.

Caudo, S., Genovese, C., Perathoner, S., Centi, G. 2008. Copper-pillared clays (Cu-PILC) for agro-food wastewater purification with H2O2. Micropor. Mesopor. Mat. 107, 46–57.

Cool, P., Vansant, E.F., 2004. Pillared clays and porous clay heterostructures. In Handbook of layered materials. Marcel Dekker, Inc. New York. 261-312.

Delee, W., O_Neill, C., Hawkes, F.R., Pinheiro, H.M., 1998. Anaerobic treatment of textile effluents: a review. J. Chem. Technol. Biotechnol. 73, 323–335.

Elaine, M.M., 2001. Surface Chemistry. Oxford University. New York. 54-55.

Gurses, A., Karaca, S., Dogar, C., Bayrak, R., Acikyildiz, M., Yalcin, M., 2004. Determination of adsorptive properties of clay/water system: methylene blue sorption. J. Colloid Int. Sci. 269, 310–314.

Harris, R.G., Wells, J.D., Johnson, B.B., 2001. Selective adsorption of dyes and other organic molecules to kaolinite and oxide surfaces. Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects 180, 131–140.

Ho, Y.S., Chiang, C.C., Hsu, Y.C., 2001. Sorption kinetics for dye removal from aqueous solution using activated clay. Sep. Sci. Technol. 36, 2473–2488.

Huang, Y.H., Huang, Y.J., Tsai, H.C., Chen, H.T., 2010. Degradation of phenol using low concentration of ferric ions by the photo-Fenton process. J. Taiwan Inst. Chem. E. 41, 699-704.

Jiang, J.Q., and Zeng, Z. 2003. Comparison of modified montmorillonite adsorbents Part II: The effects of the type of raw clays and modification conditions on the adsorption performance. Chemosphere. 53, 53–62.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kang, S., Liao, C., Chen, M., 2002. Pre-oxidation and coagulation of textile wastewater by the Fenton process. Chemosphere. 46, 923–928.

Kavitha, V., Palanivelu, K., 2004. The role of ferrous iron in Fenton and photo- Fenton processes for the degradation of phenol. Chemosphere. 55, 1235-1243.

Kenneth, E., Gounaris, V., Wain-Sue, H., 1992. Adsorption technology for air and water pollution control. Michigan. 1-45.

Kloprogge, J.T., Duong, L.V., Frost, R.L. 2005. A review of the synthesis and characterization of pillared clays and related porous materials for cracking of vegetable oil to produce biofuels. Environ. Geol. DOI 10.1007/s00254-005-1226-1.

Maes, N., Vansant, E.F., 1995. Study of Fe203-pillared clays synthesized using the trinuclear Fe(III)-acetato complex as pillaring precursor. Microporous Mater. 4, 43-51.

Martin, M.J., Artola, A., Dolors Balaguer, M., Rigola, M., 2003. Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions. Chem. Eng. J. 94, 231–239.

Meshko, V., Markovska, L., Mincheva, M., Rodrigues, A.E., 2001. Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite. Water Res. 35, 3357–3366.

Monvisade, P., Siriphannon, P. 2009. Chitosan Intercalated Montmorillonite: Preparation, Characterization and Basic Dye Adsorption. Appl. Clay Sci. 42, 427-431.

Nikolaki, M.D., Zerva, K.N., Philippopoulos, C.J., 2008. Photo-Fenton treatment of 1,3-dichloro-2-propanol aqueous solutions using UV radiation and H2O2 – A kinetic study. World Academy of Science, Engineering and Technology. 47, 70-74.

Olaya, A., Moreno, S., Molina R. 2009. Synthesis of pillared clays with aluminum by means of concentrated suspensions and microwave radiation. Catal. Commun. 10, 697–701.

Ozcan, A.S., Erdem, B., Ozcan, A., 2004. Adsorption of acid blue 193 from aqueous solutions onto na-bentonite and dtma-bentonite. J. Colloid Interf. Sci. 280, 44–54.

Pearce, C.I., Lloyd, J.R., Guthrie, J.T., 2003. The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review. Dyes Pigments 58, 179–196.

Petersen, D., Watson, D., Winterlin, W., 1988. The destruction of ground water threatening pesticides using high intensity UV light. J. Environ. Sci. Health, Part B, 23, 587-603.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., Nigam, P., 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresour. Technol. 77, 247–255.

Salerno, P., Mendioroz, S. 2002. Preparation of Al-pillared clay montmorillonite from concentrated dispersion. Appl. Clay Sci. 22, 115–123.

Schwingel de Oliveira, I., Viana, L., Verona, C., Vargas, F.V.L., Nunes, A.C.M., Pires, M., 2007. Alkydic resin wastewaters treatment by fenton and photo-Fenton processes. J. Hazard. Mater. 146, 564-568.

Slokar, Y.M., Majcen Le Marechal, A., 1998. Methods of decoloration of textile wastewaters. Dyes Pigments 37, 335–356.

Wang, L., Wang, A., 2008. Adsorption properties of congo red from aqueous solution onto surfactant-modified montmorillonite. J. Hazard. Mater. 122, 1-8.

Yuan, P., He, H., Bergaya, F., Wu, D., Zhou, Q., Zhu, J., 2006. Synthesis and characterization of delaminated iron-pillared clay with meso–microporous structure. Micropor. Mesopor. Mat. 88, 8–15.

Yuan, P., Annabi-Bergaya, F., Taoa, Qi., Fan, M., Liu, Z., Zhu, J., He, H., Chen, T., 2008. A combined study by XRD, FTIR, TG and HRTEM on the structure of delaminated Fe-intercalated/pillared clay. J. Colloid Int. Sci. 324, 142–149.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

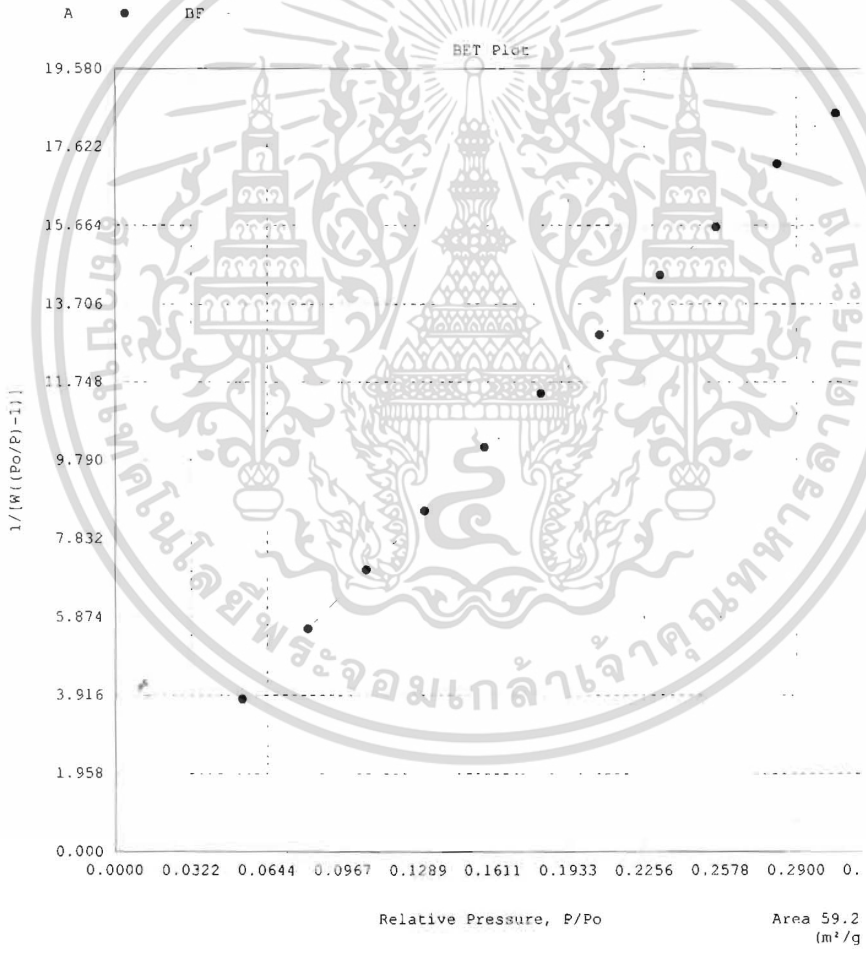
# ภาคผนวก ก

## พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัตถุดิบ MMT และ Fe-pill

Date: 02/21/2012

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sample ID | Sample 1 | | | | |
| Description | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| Comments | | | | | |
| Sample Weight | 0.0854 g | | | | |
| Adsorbate | NITROGEN | Outgas Temp | 300.0 °C | Operator | Bomb |
| Cross-Sec Area | 16.2 Å²/molecule | Outgas Time | 6.0 hrs | Analysis Time | 434.1 min |
| NonIdeality | 6.580E-05 | P/Po Toler | 2 | End of Run | 02/11/201 |
| Molecular Wt | 28.0134 g/mol | Equil Time | 3 | File Name | 550210_1.1 |
| Station # | 1 | Bath Temp. | 77.35 | | |



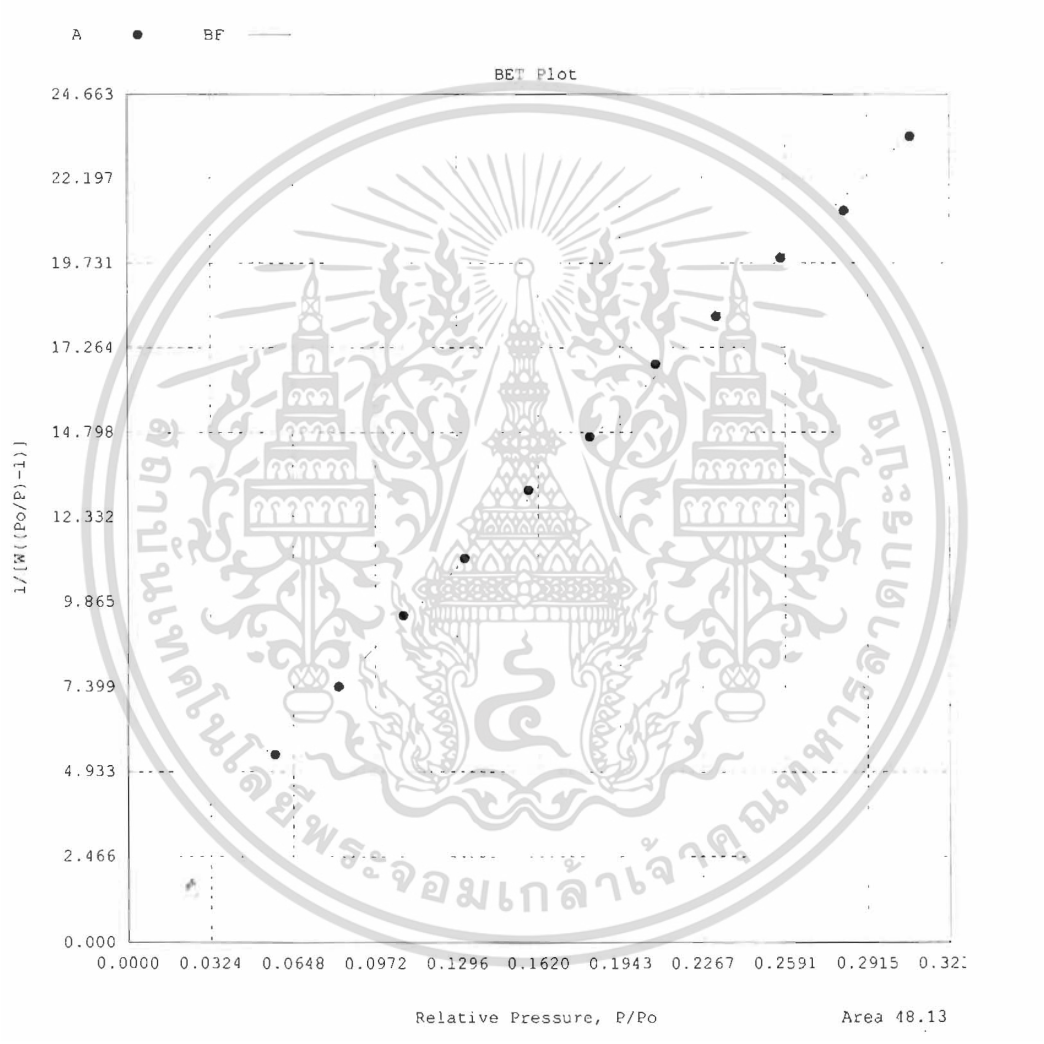

**ภาพที่ ก.1** พื้นที่ผิวของ $Fe^{3+}$-CPX-pill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date: 02/21/2012

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Sample ID** | Sample 2 | | | | |
| **Description** | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| **Comments** | | | | | |
| **Sample Weight** | 0.0591 g | | | | |
| **Adsorbate** | NITROGEN | **Outgas Temp** | 300.0 °C | **Operator** | Bomb |
| **Cross-Sec Area** | 16.2 Å²/molecule | **Outgas Time** | 48.0 hrs | **Analysis Time** | 398.3 min |
| **NonIdeality** | 6.580E-05 | **P/Po Toler** | 2 | **End of Run** | 02/13/2012 0 |
| **Molecular Wt** | 28.0134 g/mol | **Equil Time** | 3 | **File Name** | 550212_1.RAW |
| **Station #** | 1 | **Bath Temp.** | 77.35 | | |

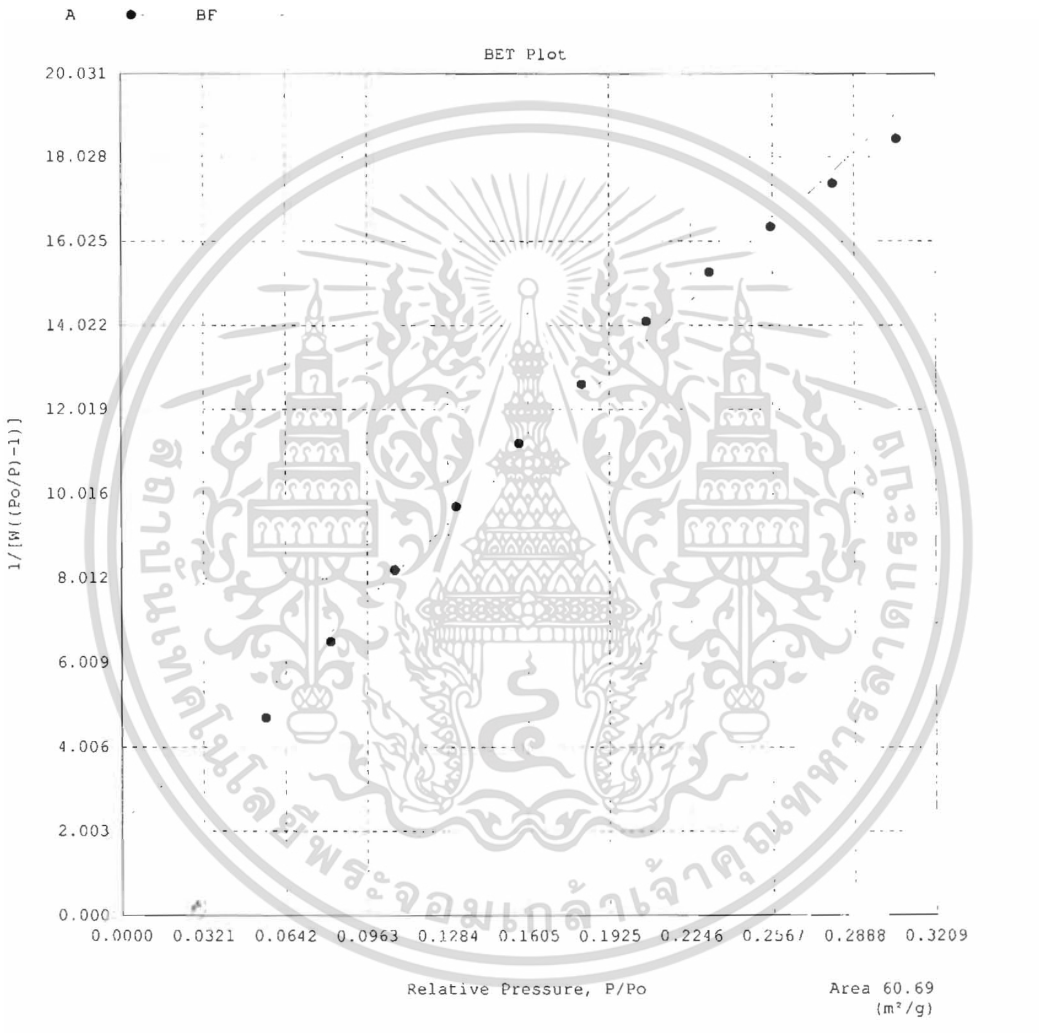



**ภาพที่ ก.2** พื้นที่ผิวของ $Fe^{2+}$-CPX-pill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sample ID | Sample 3 | | | | |
| Description | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| Comments | | | | | |
| Sample Weight | 0.0653 g | | | | |
| Adsorbate | NITROGEN | Outgas Temp | 300.0 °C | Operator | Bomb |
| Cross-Sec Area | 16.2 Å²/molecule | Outgas Time | 9.5 hrs | Analysis Time | 435.5 min |
| NonIdeality | 6.580E-05 | P/Po Toler | 2 | End of Run | 02/15/2012 04: |
| Molecular Wt | 28.0134 g/mol | Equil Time | 3 | File Name | 550214_2.RAW |
| Station # | 1 | Bath Temp. | 77.35 | | |

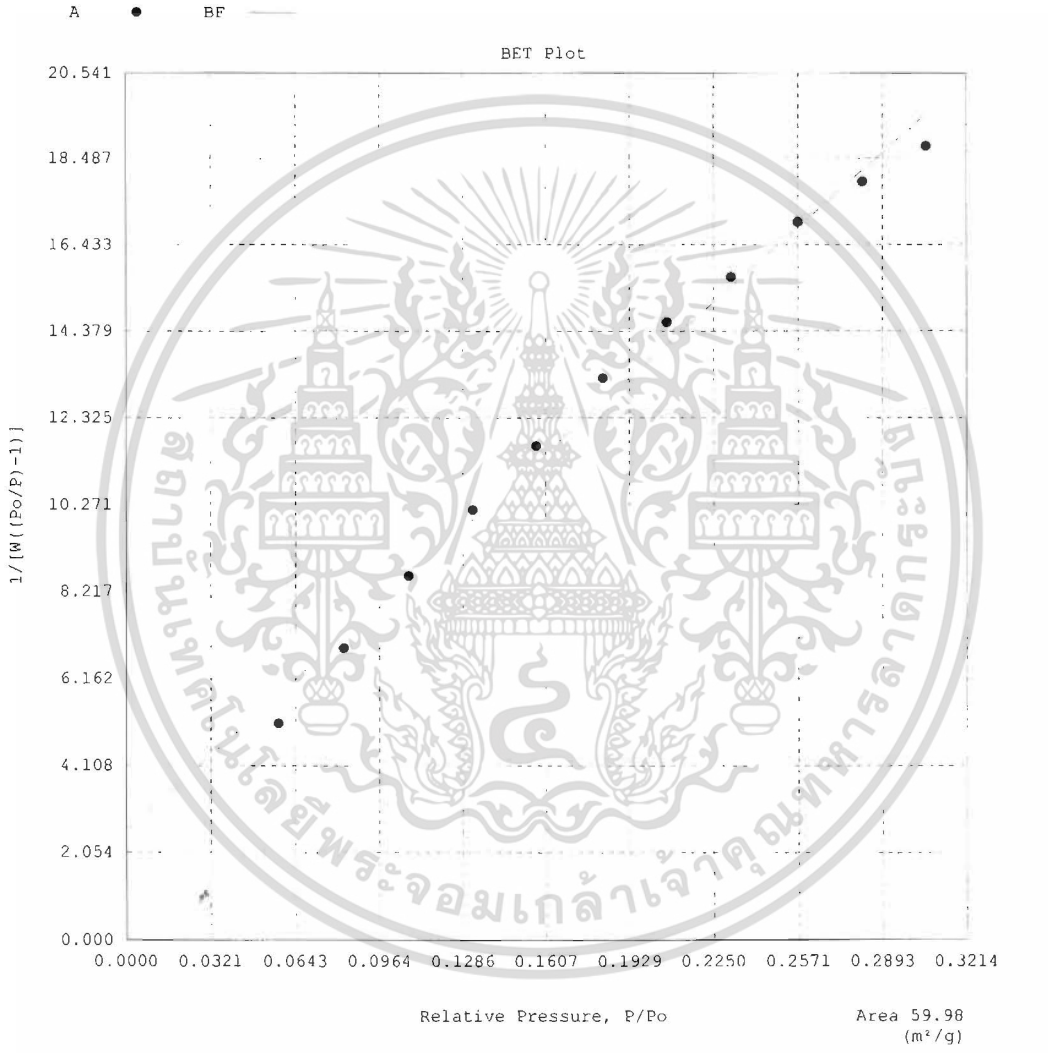



**ภาพที่ ก.3** พื้นที่ผิวของ $Fe^{3+}$-pill-CPX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Sample ID** | Sample 4 | | | | |
| **Description** | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| **Comments** | | | | | |
| **Sample Weight** | 0.0551 g | | | | |
| **Adsorbate** | NITROGEN | **Outgas Temp** | 300.0 °C | **Operator** | Bomb |
| **Cross-Sec Area** | 16.2 Å²/molecule | **Outgas Time** | 11.3 hrs | **Analysis Time** | 426.8 min |
| **NonIdeality** | 6.580E-05 | **P/Po Toler** | 2 | **End of Run** | 03/01/2012 18: |
| **Molecular Wt** | 28.0134 g/mol | **Equil Time** | 3 | **File Name** | 550301_1.RAW |
| **Station #** | 1 | **Bath Temp.** | 77.35 | | |



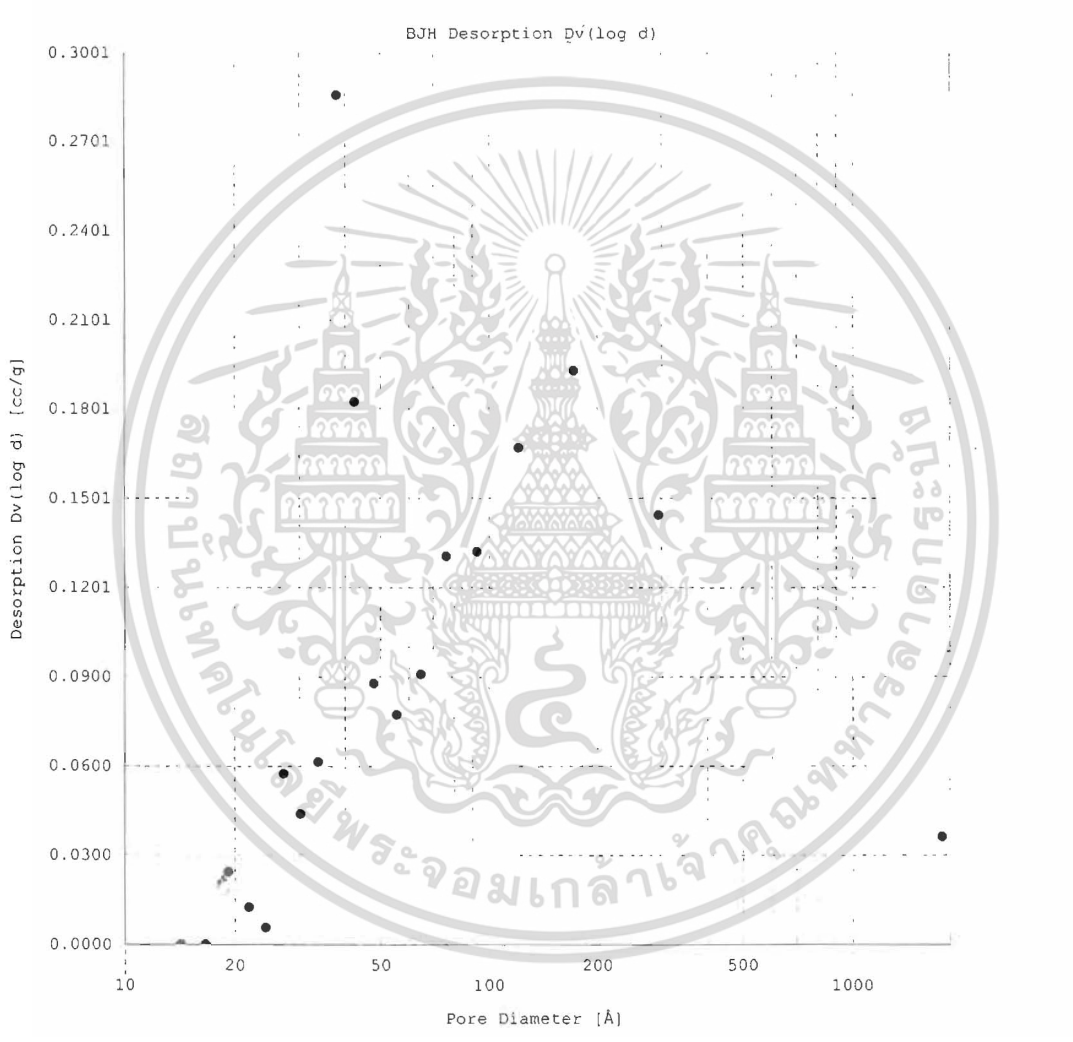

**ภาพที่ ก.4** พื้นที่ผิวของ $Fe^{2+}$-pill-CPX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date: 02/21/2012

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Sample ID** | Sample 1 | | | | |
| **Description** | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| **Comments** | | | | | |
| **Sample Weight** | 0.0854 g | | | | |
| **Adsorbate** | NITROGEN | **Outgas Temp** | 300.0 °C | **Operator** | Bomb |
| **Cross-Sec Area** | 16.2 Å²/molecule | **Outgas Time** | 6.0 hrs | **Analysis Time** | 434.1 min |
| **NonIdeality** | 6.580E-05 | **P/Po Toler** | 2 | **End of Run** | 02/11/2012 02:49 |
| **Molecular Wt** | 28.0134 g/mol | **Equil Time** | 3 | **File Name** | 550210_1.RAW |
| **Station #** | 1 | **Bath Temp.** | 77.35 | | |

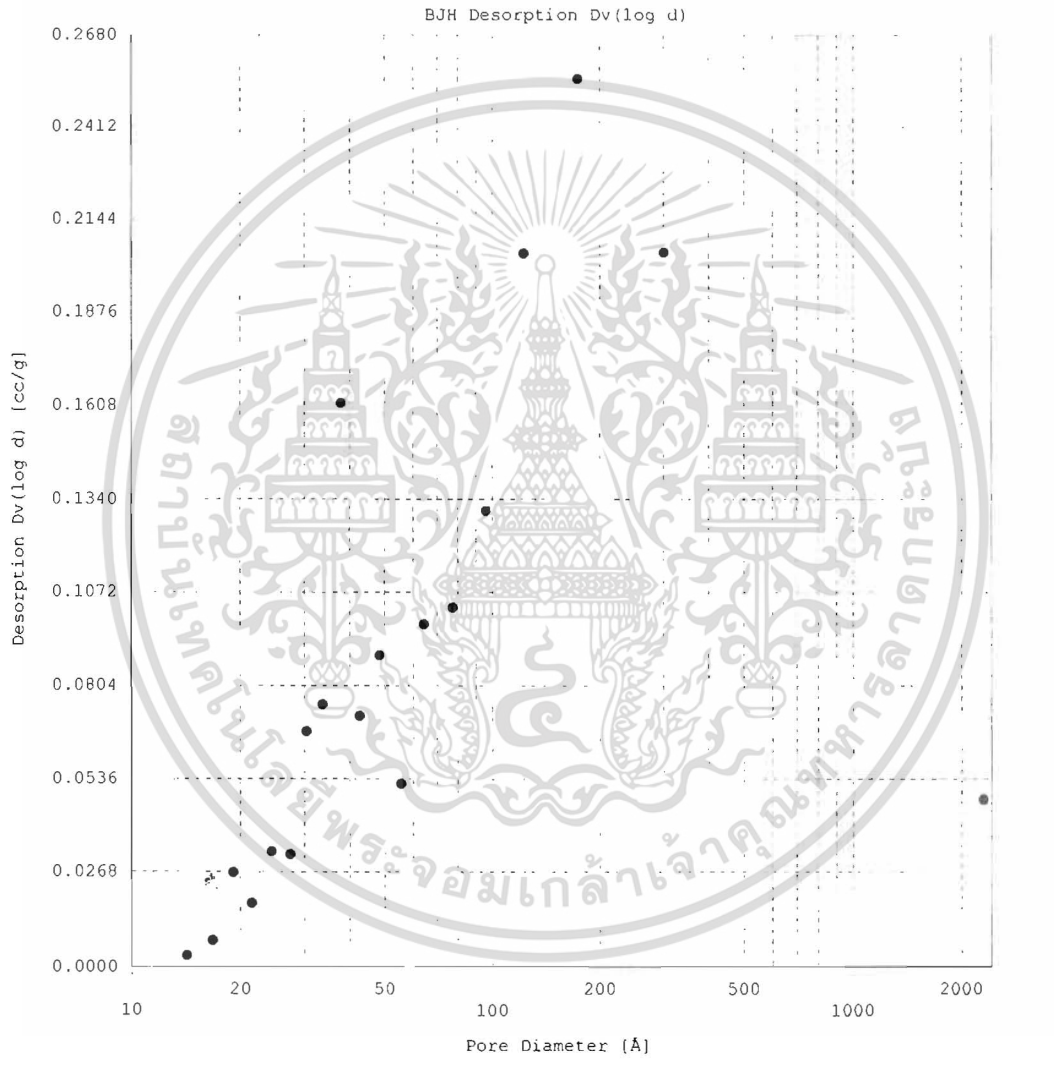



**ภาพที่ ก.5** ขนาดรูพรุนของ $Fe^{3+}$-CPX-pill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Sample ID** | Sample 2 | | | | |
| **Description** | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| **Comments** | | | | | |
| **Sample Weight** | 0.0591 g | | | | |
| **Adsorbate** | NITROGEN | **Outgas Temp** | 300.0 °C | **Operator** | Bomb |
| **Cross-Sec Area** | 16.2 Å²/molecule | **Outgas Time** | 48.0 hrs | **Analysis Time** | 398.3 min |
| **NonIdeality** | 6.580E-05 | **P/Po Toler** | 2 | **End of Run** | 02/13/2012 ( |
| **Molecular Wt** | 28.0134 g/mol | **Equil Time** | 3 | **File Name** | 550212_1.RAW |
| **Station #** | 1 | **Bath Temp.** | 77.35 | | |

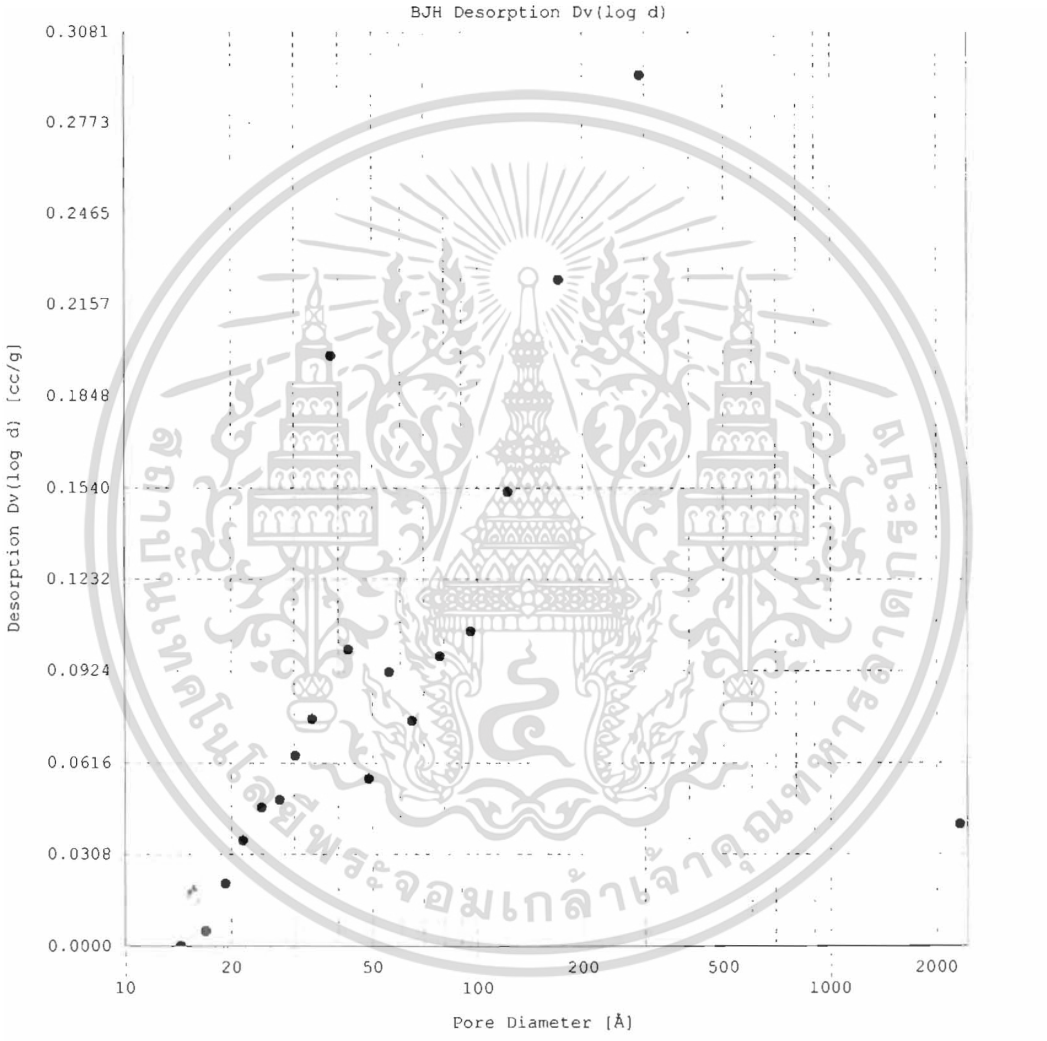



**ภาพที่ ก.6** ขนาดรูพรุนของ $Fe^{2+}$-CPX-pill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Sample ID** | Sample 3 | | | | |
| **Description** | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| **Comments** | | | | | |
| **Sample Weight** | 0.0653 g | | | | |
| **Adsorbate** | NITROGEN | **Outgas Temp** | 300.0 °C | **Operator** | Bomb |
| **Cross-Sec Area** | 16.2 Å²/molecule | **Outgas Time** | 9.5 hrs | **Analysis Time** | 435.5 min |
| **NonIdeality** | 6.580E-05 | **P/Po Toler** | 2 | **End of Run** | 02/15/2012 ( |
| **Molecular Wt** | 28.0134 g/mol | **Equil Time** | 3 | **File Name** | 550214_2.RAI |
| **Station #** | 1 | **Bath Temp.** | 77.35 | | |



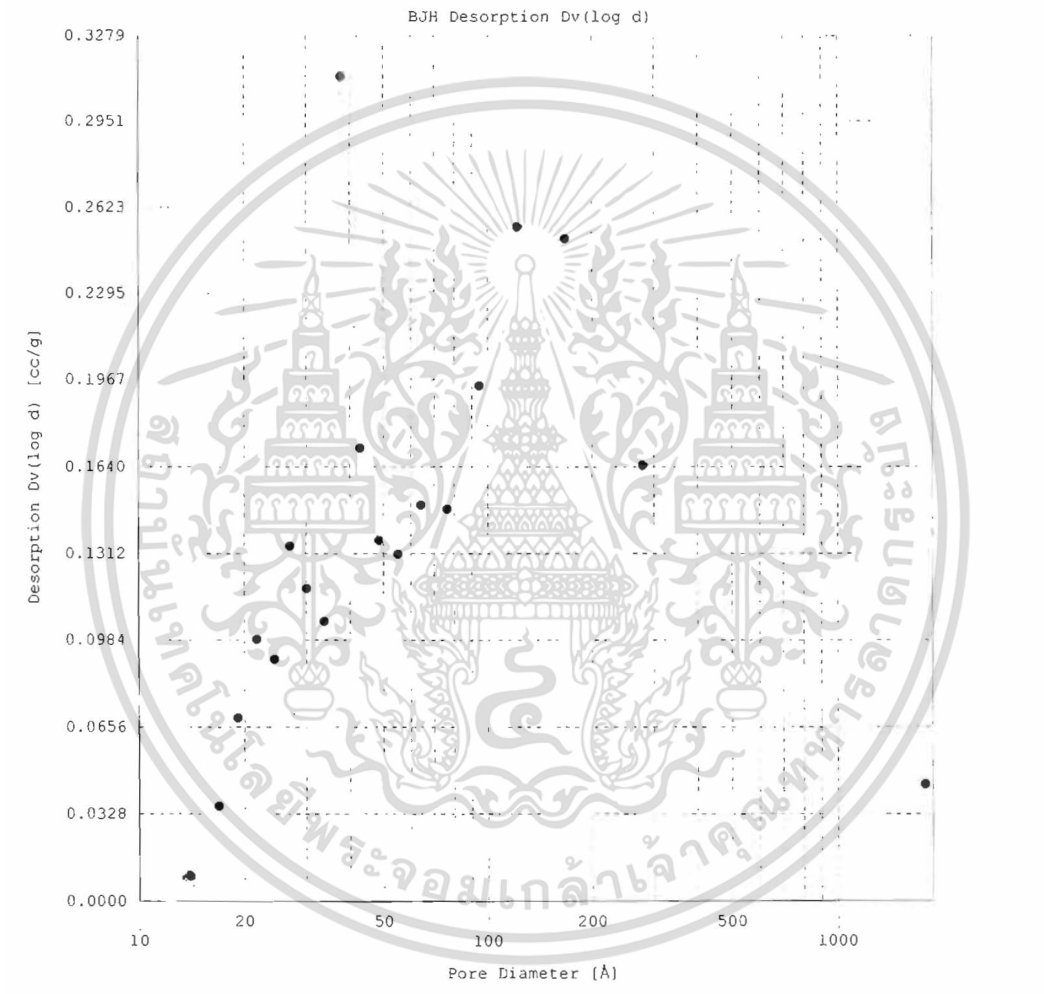

**ภาพที่ ก.7** ขนาดรูพรุนของ $Fe^{3+}$-pill-CPX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date: 03/06/2012

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sample ID | Sample 4 | | | | |
| Description | Ads 20 pts Des 20 Pts BET 11 pts | | | | |
| Comments | | | | | |
| Sample Weight | 0.0551 g | | | | |
| Adsorbate | NITROGEN | Outgas Temp | 300.0 °C | Operator | Bomb |
| Cross-Sec Area | 16.2 Å²/molecule | Outgas Time | 11.3 hrs | Analysis Time | 426.8 min |
| NonIdeality | 6.580E-05 | P/Po Toler | 2 | End of Run | 03/01/2012 18 |
| Molecular Wt | 28.0134 g/mol | Equil Time | 3 | File Name | 550301_1.RAW |
| Station # | 1 | Bath Temp. | 77.35 | | |




**ภาพที่ ก.8** ขนาดรูพรุนของ $Fe^{2+}$-pill-CPX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

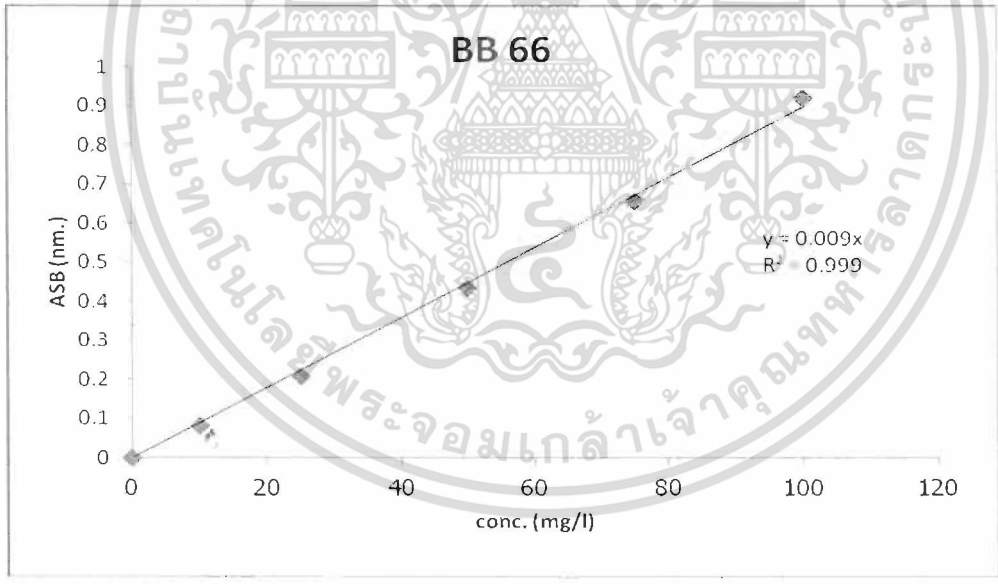
# ภาคผนวก ข

## เส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม

**ตารางที่ ข.1** แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

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

หมายเหตุ * เจือจางความเข้มข้น 10 เท่า



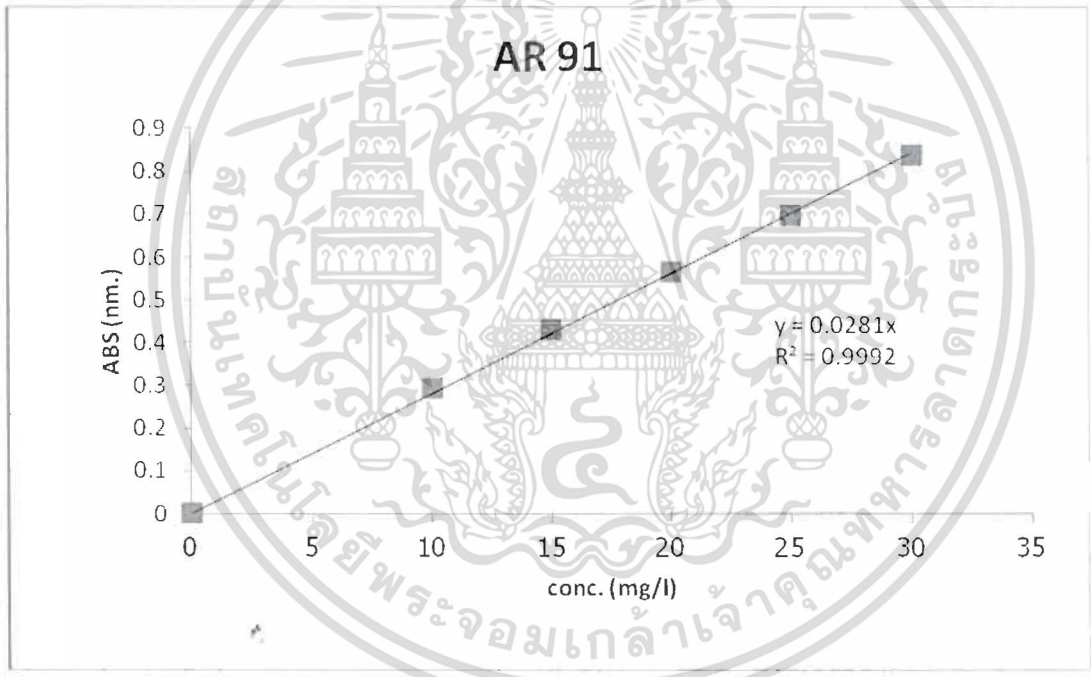

**ภาพที่ ข.1** แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BB 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.2** แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม AR 91 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

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

หมายเหตุ * เจือจางความเข้มข้น 10 เท่า




**ภาพที่ ข.2** แสดงเส้นกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม AR 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ค

## ข้อมูลแสดงค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมหลังการดูดซับ

**ตารางที่ ค.1** แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Fe-pill

| สารตัวอย่าง | ค่าการดูดกลืนแสง (nm.) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 50 ml | 100 ml | | |
| | 30 นาที | 15 นาที | 30 นาที | 45 นาที |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill-0.5g | 0.014 | 0.055 | 0.047 | 0.031 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill-0.5g | 0.008 | 0.033 | 0.023 | 0.012 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX-0.5g | 0.010 | 0.051 | 0.046 | 0.034 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX-0.5g | 0.015 | 0.043 | 0.036 | 0.025 |

**ตารางที่ ค.2** ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับของ MMT และ Fe-pill

| สารตัวอย่าง | ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (mg/l) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 50 ml | 100 ml | | |
| | 30 นาที | 15 นาที | 30 นาที | 45 นาที |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill-0.5g | 1.56 | 6.11 | 5.22 | 3.44 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill-0.5g | 0.89 | 3.67 | 2.56 | 1.33 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX-0.5g | 1.11 | 5.67 | 5.11 | 3.78 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX-0.5g | 1.67 | 4.78 | 4.00 | 2.78 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค.3** ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ถูกดูดซับของ MMT และ Fe-pill

| สารตัวอย่าง | ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (mg/l) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 50 ml | 100 ml | | |
| | 30 นาที | 15 นาที | 30 นาที | 45 นาที |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill-0.5g | 498.44 | 493.89 | 494.78 | 496.56 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill-0.5g | 499.11 | 496.33 | 497.44 | 498.67 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX-0.5g | 498.89 | 494.33 | 494.89 | 496.22 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX-0.5g | 498.33 | 495.22 | 496.00 | 497.22 |

**ตารางที่ ค.4** แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Fe-pill

| สารตัวอย่าง | ค่าการดูดกลืนแสง (nm.) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 100 ml | | | |
| | 0.05 g | 0.1 g | 0.3 g | 0.5 g |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | 0.199 | 0.135 | 0.086 | 0.037 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | 0.168 | 0.102 | 0.065 | 0.017 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | 0.232 | 0.189 | 0.097 | 0.045 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | 0.183 | 0.14 | 0.071 | 0.029 |

**ตารางที่ ค.5** ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 หลังการดูดซับของ MMT และ Fe-pill

| สารตัวอย่าง | ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (mg/l) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 100 ml | | | |
| | 0.05 g | 0.1 g | 0.3 g | 0.5 g |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | 22.11 | 15.00 | 9.56 | 4.11 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | 18.67 | 11.33 | 7.22 | 1.89 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | 25.78 | 21.00 | 10.78 | 5.00 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | 20.33 | 15.56 | 7.89 | 3.22 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค.6** ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม BB 66 ที่ถูกดูดซับของ MMT และ Fe-pill

| สารตัวอย่าง | ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (mg/l) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 100 ml | | | |
| | 0.05 g | 0.1 g | 0.3 g | 0.5 g |
| $Fe^{3+}$-CPX-pill | 477.89 | 485.00 | 490.44 | 495.89 |
| $Fe^{2+}$-CPX-pill | 481.33 | 488.67 | 492.78 | 498.11 |
| $Fe^{3+}$-pill-CPX | 474.22 | 479.00 | 489.22 | 495.00 |
| $Fe^{2+}$-pill-CPX | 479.67 | 484.44 | 492.11 | 496.78 |

**ตารางที่ ค.7** แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม AR 91 หลังการดูดซับด้วย MMT และ Fe-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

| สารตัวอย่าง | ค่าการดูดกลืนแสง (nm.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ดูดซับ | | | เฟนทอน | | เฟนทอนเชิงแสง | |
| | 30 นาที | 45 นาที | 60 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 30 นาที | 60 นาที |
| $Fe^{3+}$-pill-b-0.5g | 0.122 | 0.114 | 0.104 | 0.045 | 0.038 | 0.028 | 0.025 |
| $Fe^{2+}$-pill-b-0.5g | 0.118 | 0.107 | 0.099 | 0.033 | 0.025 | 0.023 | 0.019 |
| $Fe^{3+}$-pill-a-0.5g | 0.126 | 0.111 | 0.103 | 0.048 | 0.040 | 0.059 | 0.038 |
| $Fe^{2+}$-pill-a-0.5g | 0.125 | 0.118 | 0.106 | 0.036 | 0.028 | 0.040 | 0.026 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค.8** ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม AR 91 หลังการดูดซับของ MMT และ Fe-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

| สารตัวอย่าง | ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (mg/l) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ดูดซับ | | | เฟนทอน | | เฟนทอนเชิงแสง | |
| | 30 นาที | 45 นาที | 60 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 30 นาที | 60 นาที |
| $Fe^{3+}$-pill-b-0.5g | 435.71 | 407.14 | 371.43 | 160.71 | 135.71 | 100.00 | 89.28 |
| $Fe^{2+}$-pill-b-0.5g | 421.43 | 382.14 | 353.57 | 117.85 | 89.28 | 82.14 | 67.86 |
| $Fe^{3+}$-pill-a-0.5g | 450.00 | 396.43 | 375.00 | 171.43 | 142.86 | 210.71 | 135.71 |
| $Fe^{2+}$-pill-a-0.5g | 446.43 | 421.43 | 378.57 | 128.57 | 100.00 | 142.86 | 92.86 |

**ตารางที่ ค.9** ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสีย้อม AR 91 ที่ถูกดูดซับของ MMT และ Fe-pill ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ

| สารตัวอย่าง | ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (mg/l) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ดูดซับ | | | เฟนทอน | | เฟนทอนเชิงแสง | |
| | 30 นาที | 45 นาที | 60 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 30 นาที | 60 นาที |
| $Fe^{3+}$-pill-b-0.5g | 64.29 | 92.86 | 128.57 | 339.29 | 364.29 | 400.00 | 410.71 |
| $Fe^{2+}$-pill-b-0.5g | 78.57 | 117.86 | 146.43 | 382.14 | 410.71 | 417.86 | 432.14 |
| $Fe^{3+}$-pill-a-0.5g | 50.00 | 103.57 | 125.00 | 328.57 | 357.14 | 289.29 | 364.29 |
| $Fe^{2+}$-pill-a-0.5g | 53.57 | 78.57 | 121.43 | 371.43 | 400.00 | 357.14 | 407.14 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

**1. งบบุคลากร :**

| | | |
|---|---|---|
| ค่าจ้างชั่วคราว | 81,760.00 | บาท |

**2. งบดำเนินงาน :**

| | | |
|---|---|---|
| ค่าใช้สอย | 121,014.04 | บาท |
| ค่าวัสดุ | 27,225.96 | บาท |

**3. งบลงทุน :**

| | | |
|---|---|---|
| ค่าครุภัณฑ์ | 369,925.50 | บาท |
| รวม | 599,952.50 | บาท |

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้วิจัย


ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวปุณณมา ศิริพันธ์โนน

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Punnama Siriphannon

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8

หน่วยงาน สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ถนนฉลองกรุง กรุงเทพฯ 10520

โทร 02-329-8400 ต่อ 344 โทรสาร 02-329-8428

e-mail: kspunnam@kmitl.ac.th


ประวัติการศึกษา

| ปีการศึกษา | วุฒิ | สาขาวิชา | สถาบัน | ประเทศ |
|---|---|---|---|---|
| 2533-2537 | วท.บ. | เคมีอุตสาหกรรม (เกียรตินิยม) | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง | ไทย |
| 2537-2539 | M.Eng. | Inorganic Materials | Tokyo Institute of Technology | ญี่ปุ่น |
| 2540-2543 | D.Eng. | Inorganic Materials | Tokyo Institute of Technology | ญี่ปุ่น |

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษและหัวข้อวิจัย

- Biomedical materials :- Synthesis, characterization, modification and testing of ceramic-polymer hybrid composites for medical applications
- Nanomaterials :- Synthesis, characterization, modification and testing of nanoporous materials and self-assembly nanocoating for special applications
- Environmental friendly natural adhesives and coatings

ทุนการศึกษาที่เคยได้รับ

2533-2535 ทุนการศึกษาจากบริษัท ICI ประเทศไทย จำกัด

2537-2539 ทุนการศึกษาระดับปริญญาโทจากรัฐบาลญี่ปุ่น (Monbusho)

2540-2541 ทุนการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Association of International Education Japan (AIEJ)

2541-2543 ทุนการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Tokio Marine Kagami Memorial Foundation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รางวัลที่เคยได้รับ

2543 รางวัล Young research award ที่ได้รับจากการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมระดับนานาชาติ "The 4th International Workshop on Design and Soft Solution-Processing for Advanced Inorganic Materials " จัดขึ้นที่เมืองโยโกฮามา ประเทศญี่ปุ่น ระหว่าง 28 กุมภาพันธ์ – 1 มีนาคม 2543

ประวัติการทำงาน

2537-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2547-ปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2544-ปัจจุบัน หัวหน้าห้องปฏิบัติการ X-ray diffractometer และ X-ray fluorescence spectroscope ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2548-2552 รองหัวหน้าศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. **Siriphannon, P.**, Hayashi, S., Yasumori, A., and Okada, K., Preparation and sintering of $CaSiO_3$ from coprecipitated powder using NaOH as precipitant and its apatite formation in simulated body fluid solution, *J. Mater. Res.* 1999; 14: 529-536.
2. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Influence of preparation conditions on the microstructure and bioactivity of $\alpha$-$CaSiO_3$ ceramics: Formation of hydroxyapatite in simulated body fluid, *J.Biomed.Mater.Res.* 2000; 52: 30-39.
3. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Comparative study on formation of hydroxyapatite in simulated body fluid under static and flowing systems, *J.Biomed.Mater.Res.* 2002; 60: 175-185.
4. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Formation of hydroxyapatite on $CaSiO_3$ powders in simulated body fluid, *J.Euro.Ceram.Soc.* 2002; 22: 511-520.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Okada, K., **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., Hayashi, S., Hydroxyapatite Formation on $CaSiO_3$ Ceramics in Protein Containing System, *Key Eng. Mat.(Proceeding of 7th European Ceramic Society)* 2002; 206-213: 1551-1554.

6. Okada, K., **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Hayashi, S., Hydroxyapatite Formation on $CaSiO_3$ Ceramics in Simulated Body Fluid, *Trans. Mater. Res. Soc. Japan*, 2004, 29, 891–2896.

7. **Siriphannon, P.**, Monvisade, P., Jinawath, S., Hemachandra, K., Preparation and Characterization of Hydroxyapatite/Poly(ethylene glutarate) Biomaterials, *J. Biomed. Mater.Res. A*, 2007;81A:381-391.

8. Monvisade, P., **Siriphannon, P.**, Jermsungnern R., Rattanabodee S. Preparation of hydroxyapatite/poly(methyl methacrylate) and calcium silicate/poly(methyl methacrylate) interpenetrating hybrid composites. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 2007; 18: 1955-1959.

9. **Siriphannon P.**, Monvisade P., Poly(ethylene terephthalate)/hydroxyapatite biomaterials: Preparation, characterization and *in vitro* bioactivity. *J.Mater.Sci.Mater.Med.*; 2007; 18: 1955–1959.

10. **Siriphannon P.**, Monvisade P., Preparation and Characterization of Hydroxyapatite/Poly(ethylene adipate) Hybrid Composites. *J. Biomat. Sci-Polym. E.*; 2008; 19(7) :925-936.

11. Monvisade P., **Siriphannon P.**, Chitosan Intercalated Montmorillonite: Preparation, Characterization and Basic Dye Adsorption. *Appl.Clay.Sci.*; 2009; 42(3-4): 427-431.

12. Monvisade P., **Siriphannon P.**, Tapcharoen, W., Effect of Ring-opening Polymerization Condition on Characteristic and Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Poly(ethylene glutarate) Biomaterials. *J.Biomed.Mater.Res.*Part A; 2009; 90A(3): 656-663.

13. Sirapanichart S., Khouchaf L., **Siriphannon P.**, Monvisade P., Louarn G., Elouadi B., Chemical and Dielectric Study of PMMA/Montmorionite Nano-Composite Films, *Ferroelectrics*; 2010; 402(1): 47-54.

14. Pannasri, P., **Siriphannon, P.**, Monvisade, P., Nookaew, J., Hydrothermal growth of ZnO nanostructures from nano-ZnO seeded in P(MMA-co-BA) matrix. *J.Polym.Res.*; 2011; 18(6): 2245-2254.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. Sirapanichart, S., Monvisade, P., **Siriphannon, P.**, Nookaew, J., Poly(methyl methacrylate-*co*-butyl acrylate)/organophosphate-modified montmorillonite composites. *Iran.Polym.J.*; 2011; 20(10), 803 – 811.

16. Iamphaojeen, Y., **Siriphannon, P.**, Immobilization of zinc oxide nanoparticles on cotton fabrics using poly 4-styrenesulfonic acid polyelectrolyte. *Inter.J.Mater.Res.*; 2012; 103(5), 643 – 647.

17. Suebwongnat, S., Jianprasert, A., **Siriphannon, P.**, Monvisade, P., Calcium silicate/poly(ethylene terephthalate) biomaterials via ring-opening polymerization, *J.Polym.Res.*; 2012; 19(10): 1-7.

18. **Siriphannon, P.**, Monvisade, P., *In situ* ring-opening polymerization of hydroxyapatite/poly(ethylene adipate)-*co*-(ethylene terephthalate) biomimetic composites. *Bull.Mater.Sci.;* 2013; 36(1): 121–128.

19. Kaemkit, C., Monvisade, P., **Siriphannon, P.**, Nukeaw, J., Water-soluble chitosan intercalated montmorillonite nanocomposites for removal of basic blue 66 and basic yellow 1 from aqueous solution. *J.Appl.Polym.Sci.*; 2013; 128(1): 879–887.

20. Tepmatee, P., **Siriphannon, P.**, Effect of Preparation Method on Structure and Adsorption Capacity of Aluminium Pillared Montmorillonite. *Mater.Res.Bull.*; 2013; 48(11): 4856–4866.

21. Iamphaojeen, Y., **Siriphannon, P.**, Nanoencapsulation of *n*-Octadecane Phase Change Material in Self-Assembled Polyelectrolyte by Soft Solution Technique. *Inter.J.Polym.Mater.*; 2014; 63(17): 918–922.

<u>ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ</u>

1. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, เชาวเรศ มะลิมาศ และ ปิยวิทย์ รัตนาฤทธิ์นนท์, ผลของค่า pH และเวลาในการเลี้ยงตะกอนต่อการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีตกตะกอนร่วม, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 2546; 12,1: 17-26.

2. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ภูมรีย์ ไชยเสน และ ศิรินภา อมรชัยเลิศรัตน์, การสังเคราะห์แคลเซียมติตาเนตด้วยวิธีทางเคมี, วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 2546; 31: 38-45.

3. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ และ สุภาณี ชนะวงศ์, การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 2546; 12, 2: 36-45.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ยุพเรศ แก้วพินึก และ ศิริพร บำรุงพันธ์, การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตด้วยโซล-เจลสำหรับงานทางการแพทย์, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2546; 11, 2: 1-10.
5. ยุวันดา เอี่ยมเผ่าจีน และ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, การปลูกผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์บนผ้าฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยพอลิสไตรีนซัลโฟนิกแอซิดและสมบัติการป้องกันรังสียูวี, วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 2554; 39(3): 459-465.

ผลงานในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Formation of bonelike apatite on $CaSiO_3$ ceramics, *Proceeding of 1st JSPS International Workshop on Design and Soft Solution-Processing for Advanced Inorganic Materials* (Yokohama, Japan), August 20-21,1998, pp.46-49.
2. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Apatite formation on $CaSiO_3$ ceramics in simulated body fluid, *Proceeding of 11th fall meeting of the ceramic society of Japan* (Nagoya, Japan), October 1-3, 1998, pp.456.
3. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Dependence of apatite formation on microstructure of $CaSiO_3$, *Proceeding of annual meeting of the ceramic society of Japan* (Tokyo, Japan), March 25-27, 1999, pp.157.
4. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Influence of grain size of calcium silicate ceramics on hydroxyapatite precipitation in SBF solution, in *Bioceramics12*, edited by H. Ohgushi, G.W. Hastings, and T. Yoshikawa (Nara, Japan), October 8-11, 1999, pp.145-148.
5. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Apatite formation on $CaSiO_3$ Ceramics in simulated body fluid under flowing condition, *Proceeding of 4th JSPS International Workshop on Design and Soft Solution-Processing for Advanced Inorganic Materials* (Yokohama, Japan), February 28 – March 1, 2000, pp.50.
6. **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Apatite formation on $CaSiO_3$ powders in SBF solution, *Proceeding of annual meeting of the ceramic society of Japan* (Sendai, Japan), March 21-23, 2000, pp.156.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Okada, K., **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., and Hayashi, S., Hydroxyapatite Formation on $CaSiO_3$ Ceramics in Protein Containing System, *Key Eng. Mat. (Proceeding of 7th European Ceramic Society)* 2002, 206-213: 1551-1554.

8. Iimori, Y., **Siriphannon, P.**, Kameshima, Y., Yasumori, A., and Hayashi, S., Effect of Preparation Conditions of CaO-$SiO_2$ Ceramics on its Bioactivity, *International Symposium of Bio-Integrated Materials and Tissue Engineering* (Tokyo, Japan), March 7-8, 2002, 82-83.

9. Monvisade, P., **Siriphannon, P.**, and Chanawong, S., Synthesis of hydroxyapatite/ poly(ethylene adipate) composites by *in situ* ring-opening polymerization, *The 8th Pacific Polymer Proceedings* (Bangkok, Thailand), November 24-27, 2003, 115-116.

10. Monvisade P., and **Siriphannon, P.**, Chitosan intercalated montmorillonite adsorbent for dye containing wastewater treatment. The Sixth Princess Chulabhorn International Science Congress, *The interface of chemistry and biology in the "Omics" era:Environment & Health, and Drug Discovery* (Bangkok, Thailand), November 25-29 2007.

11. **Siriphannon P.**, Monvisade P., Hybrid ceramic-polymer biomaterials. *The French-Thai Workshop on "Advanced Materials and Technology"*, (Krabi, Thailand), March 23-27, 2008.

12. **Siriphannon P.**, Monvisade P., Biomimetic ceramic-polymer composites for medical applications. *AUN/SEED Net 1st Regional Workshop on Natural Resources and Materials for Sustainable Development of ASEAN*, (Phnom Penh, Kingdom of Cambodia), August 18-19, 2008.

13. Monvisade P., **Siriphannon P.**, Adsorption of dye onto chitosan intercalated montmorillonite. *The IUMRS International Conference in Asia 2008*, (Nagoya, Japan), December 9-13, 2008.

14. **Siriphannon P.**, Trisak S., Limraungthum P., Aluminium-Pillared Montmorillonite Adsorbent for Dye Containing Wastewater Treatment. *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific 2010*, (Kanazawa, Japan), September 30 – October 1, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. **Siriphannon P.**, Monvisade P., Nanoporous adsorbent from chitosan interacted montmorillonite for dye-containing wasewater treatment. *The International Conference for Nanomaterials Synthesis and Characterization 2011*, (Selangor, Malaysia), July 4 – 5, 2011.

16. Suebwongnat, S., **Siriphannon, P.**, and Monvisade, P., Preparation of calcium silicate/poly(ethylene terephthalate-*co*-caprolactone) composites for medical applications. *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012)*, (Chiang Mai, Thailand), January 11-13, 2012.

17. Tepmatee P., and **Siriphannon P.**, Development of nanoporous aluminium-pillared montmorillonit adsorbents for dye containing wastewater treatment. *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012)*, (Chiang Mai, Thailand), January 11-13, 2012.

18. Suebwongnat, S., **Siriphannon, P.**, and Monvisade, P., Mechanical properties and bioactivity of calcium silicate/poly(ethylene terephthalate-co-caprolactone) composites. *15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies*, (Wollongong, Australia), September 23-26, 2012.

19. **Siriphannon, P.**, and Iamphaojeen, Y., Growth of nano-zno seeds immobilized on cotton fabrics using poly 4-styrenesulfonic acid. *The 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies*, (Wollongong, Australia), September 23-26, 2012.

20. **Siriphannon, P.**, Iamphaojeen, Y., and Tepmatee P., Nanotechnology for eco-friendly development in textile finishing. *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2013)*, (Chonburi, Thailand), January 23-25, 2013.

21. Treephet, A., **Siriphannon, P.**, Controlled release of $KNO_3$ fertilizer from chitosan/montmorillonite nanocomposites, *The 2014 IUPAC World Polymer Congress (MACRO2014)*, (Chiang Mai, Thailand), July 6-11, 2014.

22. **Siriphannon, P.**, Ruengchainikom, T., Tharakarn, J., Lertkanchanaporn, K., Development of nanoporous iron oxide-pillared clay for dye containing wastewater treatment. *The 5th International*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications (ICNFA'14)*, (Prague, Czech Republic), August 11-13, 2014.

ผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1. อมรรัตน์ สวัสดิมงคล, ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ชลลดา ฤตวิรุฬห์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิอะคริลิกแอซิดกับไคโตซาน-มอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยวิธีพอลิเมอไรซ์ขณะขึ้นรูป, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่17 (โรงแรมดิเอ็มเพรส อ.เมือง จังหวัดเชียงใหม่), 29 – 30 ตุลาคม 2550.
2. อภิชญา เจียนประเสริฐ, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, สุภารัตน์ รักชลธี และชลลดา ฤตวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่17 (โรงแรมดิเอ็มเพรส อ.เมือง จังหวัดเชียงใหม่), 29 – 30 ตุลาคม 2550.
3. ระพี เจิมสูงเนิน, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ (สไตรีน – บิวทาไดอีน - สไตรีน) กับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่17 (โรงแรมดิเอ็มเพรส อ.เมือง จังหวัดเชียงใหม่), 29 – 30 ตุลาคม 2550.
4. ณัชชา ปานกุล, ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ, และปุณณมา ศิริพันธ์โนน, การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำของกาวอะคริเลตพอลิยูรีเทนด้วยน้ำมันลินสีด, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551.
5. สานิตย์ สิระปาณิชาติ, สุรลักษณ์ มรรคศิธร, สุวิชชา บัวเขียว, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, และภัทธาวุธ มนต์วิเศษ, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนพอลิเมทิลเมทาคริเลต/มอนต์มอริลโลไนต์, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31 ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551.
6. ยุวันดา เอี่ยมเผ่าจีน และ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, Growth of nano-ZnO seeds immobilized on cotton fabrics using poly 4-styrenesulfonic acid, การประชุมเชิงวิชาการ"ศรีนครินทรวิโรฒวิชาการ" ครั้งที่ 5 (มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ), 17 – 18 มีนาคม 2554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิชาการ

1. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2546 เซรามิกส์ขั้นสูงสำหรับงานอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 12(1) : 58-67.
2. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2546. วัสดุชีวภาพสำหรับงานทางการแพทย์. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 13(1) : 51-59.
3. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2545. ฟลูออไรด์ป้องกันฟันผุได้อย่างไร?. วารสารเคมีน่ารู้. 1(1) : 72-74.
4. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2546. เสื้อผ้าจากนาโนเทคโนโลยี. วารสารเคมีน่ารู้. 2(3) : 73-74.
5. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2547. คาร์บอนนาโนโฟม อันยรูปใหม่ของคาร์บอน. วารสารเคมีน่ารู้. 3(2) : 34-36.
6. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2548. หลอดทดลองเล็กที่สุดในโลก. วารสารเคมีน่ารู้. 3(4) : 43-45.
7. สาระอะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ. บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด. 2549.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้