

การดูดซับสีข้อมโรห์ตามีนปีโดยใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ถูกเผา

มินตรา เจริญพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปีโดยใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ถูกเผา

มินตรา เจริญพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

ADSORPTION OF RHODAMINE B DYE
USING CALCINED METAL ORGANIC FRAMEWORKS

MINTRA JAREARNPORN

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การดูดซับสีย้อมโร้ดามีนบีโดยใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ถูกเผา
โดย นางสาวมินตรา เจริญพร รหัสนักศึกษา 57011018
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

เกรียงศักดิ์ ประธานกรรมการ
(รศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ กรรมการ
(ผศ. ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

วลัยรัตน์ จันทระอัมพร กรรมการ
(ผศ. ดร. วลัยรัตน์ จันทระอัมพร)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีโดยใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ถูกเผา
โดย	นางสาวมินตรา เจริญพร
รหัสประจำตัว	57011018
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

บทคัดย่อ

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal Organic Frameworks: MOFs) เป็นวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของกลุ่มโลหะและลิแกนด์อินทรีย์ มีคุณสมบัติความเป็นผลึก ความพรุนสูง มีคาร์บอนปริมาณมาก ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์เป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมคาร์บอนที่มีรูพรุนได้ โดยงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี (Rhodamine B: RhB) โดยใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดไอรอน-แนฟทาซีนไดคาร์บอกซิลิกเอซิด (Fe-MOF) และคอปเปอร์-แนฟทาซีนไดคาร์บอกซิลิกเอซิด (Cu-MOF) ที่ถูกเผาเป็นตัวดูดซับ ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของตัวดูดซับ อุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชัน ผลของความเข้มข้นและพีเอชของสีย้อมเริ่มต้น ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี จากการศึกษาพบว่าตัวดูดซับ Fe-MOF เผา มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ตัวดูดซับ Fe-MOF เผา มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดถึงร้อยละ 95.75 ที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชันคือ 800 องศาเซลเซียส และตัวดูดซับ Fe-MOF เผามีความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี 103.88 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ และที่พีเอช 2 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุด

Report Title Adsorption of Rhodamine B Dye Using Calcined Metal Organic Frameworks
By Miss Mintra Jarearnporn
Student ID. 57011018
Degree Bachelor of Engineering
Program Chemical Engineering
Academic Year 2017
Advisor Assoc. Prof. Dr. Kriangsak Kraiwattanawong

ABSTRACT

Metal Organic Frameworks (MOFs) are formed by metal ions or metal clusters and organic ligands. MOFs are crystalline materials, large surface area, high porosity and large carbon content. All these features make MOFs as a good precursors to porous carbon. Thus, this research is interested in studying the adsorption of Rhodamine B (RhB) dye using calcined Fe-MOF (iron-naphthalene dicarboxylic acid) and Cu-MOF (Copper-naphthalene dicarboxylic acid) as an adsorbent. To study on effect of the adsorbent types, carbonization temperature, initial concentration and initial pH of dye solution on adsorption capacity RhB. The results showed that calcined Fe-MOF adsorbent significantly increased the surface area and pore volume. The RhB dye was removed from aqueous solution for 95.75 percent. (Condition: adsorbent dosage 0.1 g/L, initial dye concentration 5 mg/L) The optimum temperature for carbonization was 800 ° C and the Fe-MOF adsorbent has the adsorption capacity of RhB dye 103.88 mg/g and pH 2 showed the best absorption of dye.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ความเอาใจใส่ ให้คำชี้แนะ คำปรึกษาในงานวิจัยและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์ อีกทั้งยังจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ข้าพเจ้า ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์และ ผศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร กรรมการสอบหัวข้อ และโครงร่างปริญญาานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษา เพื่อเป็นพื้นฐานและคำแนะนำต่างๆอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ ดร.พงษ์เสริฐ ศรีพรหม คอยให้คำแนะนำคำปรึกษาและช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ได้ทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรัก กำลังใจที่ดีและคอยสนับสนุนมาโดยตลอดจนทำให้มีวันนี้ได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

มินตรา เจริญพร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2	4
2.1 สีย้อม	4
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม	4
2.2.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม.....	4
2.2.2 หมู่ออกซิโครมของสีย้อม.....	4
2.3 สีย้อมเบสิก.....	5
2.3.1 สีย้อมโรห์ตามีนปี	5
2.4 วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์.....	6
2.5 กระบวนการดูดซับสาร.....	8
2.6 ชนิดของสารดูดซับ และการประยุกต์ใช้งาน	9
2.7 รูปพรุน	10
2.8 สมดุลการดูดซับ	10

2.9	สมการไอโซเทิร์ม.....	12
2.9.1	สมการการดูดซับแบบ Langmuir.....	12
2.9.2	สมการการดูดซับแบบ Freundlich.....	13
2.10	ขั้นตอนการคาร์บอนเซชัน.....	13
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3	15
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.3	การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ.....	16
3.4	ขั้นตอนการทดลอง.....	16
3.4.1	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมโรห์ตามีนปีของตัวดูดซับแต่ละชนิด...	16
3.4.2	ศึกษาผลของอุณหภูมิการคาร์บอนเซชันตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมโรห์ตามีนปี.....	16
3.4.3	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและหาความสามารถในการดูดซับสี้อมโรห์ตามีนปี.....	17
3.4.4	ศึกษาผลของพีเอชความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสี้อมโรห์ตามีนปี.....	17
บทที่ 4	19
4.1	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับ.....	19
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ.....	19
4.1.2	ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ.....	20
4.1.3	การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนบนตัวดูดซับด้วยวิธี BET....	21
4.2	ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมโรห์ตามีนปีของสารดูดซับแต่ละชนิด.....	21
4.3	ศึกษาผลของอุณหภูมิของการคาร์บอนเซชันตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมโรห์ตามีนปี.....	22
4.4	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและหาความสามารถในการดูดซับสี้อมโรห์ตามีนปี.....	23
4.5	ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับสี้อมโรห์ตามีนปี.....	25

บทที่ 5	27
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	27
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	27
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก ก.....	32
ภาคผนวก ข.....	34
ข. 1 การคำนวณความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เตรียมเป็นมาตรฐาน	34
ข.2 การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เหลือจากการเทียบกับกราฟ มาตรฐาน.....	34
ข. 3 การคำนวณความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เตรียมเป็นมาตรฐาน	35
ภาคผนวก ค.....	36
ค.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด....	36
ค.2 ศึกษาผลของความอุณหภูมิของการคาร์บอนเซชันตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ สีย้อมโรห์ตามีนบี.....	39
ค.3 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของสารดูดซับทั้ง 6 ชนิด.....	40

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	8
ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยของตัวดูดซับแต่อุณหภูมิต่างกัน.....	21
ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างที่คำนวณได้จากไอโซเทิร์มการดูดซับของตัวดูดซับ Fe/C800....	24

สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมโรห์ดามีนบี	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์	6
รูปที่ 2.3 โครงข่ายสามมิติของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์โครงข่ายสามมิติ	6
รูปที่ 2.4 หน่วยสร้างทุติยภูมิของวัสดุโลหะโครงข่ายอินทรีย์ประกอบด้วย ไอออนโลหะ	7
รูปที่ 2.5 ลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สตามการจำแนกของ IUPAC.....	10
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ	19
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานและพื้นผิวด้วย SEM.....	20
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารดูดซับกับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม	22
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันกับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม... ..	23
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับความเข้มข้นสีย้อมโรห์ดามีนบี. ..	24
รูปที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับสีย้อมโรห์ดามีนบีด้วยตัวดูดซับ	25
รูปที่ ก.1 การทดลองการดูดซับสีย้อมโรห์ดามีนบีโดยตัวดูดซับ.....	32
รูปที่ ก.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ	32
รูปที่ ก.3 แสดงความเป็นแม่เหล็กของ Fe/C800	33
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ดามีนบี	34
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู	35
รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารดูดซับกับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในแหล่งน้ำมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จัดเป็นมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและแหล่งน้ำเป็นอย่างยิ่ง สีย้อมโรดามีนบี (Rhodamine B: RhB) เป็นหนึ่งในสารปนเปื้อนเหล่านี้ที่เป็นสาเหตุของน้ำเสีย เนื่องจากเป็นสีสังเคราะห์ที่สามารถละลายน้ำได้ง่ายและมักถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในด้านอุตสาหกรรมอาหาร กระจกและสิ่งทอต่างๆ ซึ่งสีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทั้งยังเป็นสารที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบการหายใจ ดวงตา และผิวหนังอีกด้วย ดังนั้น การกำจัดมลพิษที่ปนเปื้อนทางน้ำจากสีย้อมเหล่านี้จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ต้องมีการควบคุมดูแล [1]

สำหรับกระบวนการที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากสีย้อมในแหล่งน้ำเหล่านี้ มีหลากหลายกระบวนการด้วยกันทั้งกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ เช่น การใช้การเกิดตะกอน และการรวมตัวของตะกอน (Coagulation–Flocculation) การใช้โอโซน (Ozonation) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การกรองชีวภาพ (Biofiltration) แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป [2] และอีกหนึ่งกระบวนการที่ถูกพิจารณาให้นำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมเหล่านี้ คือ กระบวนการดูดซับสาร (Adsorption process) เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง การลงทุนไม่สูง อีกทั้งยังสามารถนำตัวดูดซับ (Adsorbent) กลับมาใช้ใหม่ได้ หลักการทั่วไปของการดูดซับจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ผิวของสารดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ โดยสารที่มีพลังงานอิสระ (Surface free energy) ที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้ กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับสารดูดซับ และเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (Interface) ที่มีวิภาคเป็นของแข็งเสมอ [3] ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารดูดซับชนิดหนึ่งที่นิยมใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ปกติจะถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมที่ความเข้มข้นต่ำ หากต้องการนำไปใช้งานกับสีย้อมที่มีความเข้มข้นสูง ต้องมีการพัฒนาสารดูดซับใหม่ขึ้น [4]

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal Organic Frameworks: MOFs) เกิดจากการรวมตัวกันของกลุ่มโลหะและลิแกนด์อินทรีย์เป็นวัสดุที่เป็นผลึกที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนมาก สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างตามความต้องการได้ง่าย ทำให้นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ในการกักเก็บแก๊ส ใช้จับสัญญาณ เป็นต้น ในขณะที่เดียวกัน วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนคาร์บอน (Porous carbon) ก็เป็นวัสดุที่สามารถสังเคราะห์ได้ง่ายโดยการ

สลายตัวทางความร้อนของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ น่าสนใจในการนำมาใช้งานเป็นตัวดูดซับ สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยเช่นกัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง ปริมาตรรูพรุนสูง การกระจายของขนาดรูพรุนแคบและเสถียรต่อความร้อนและสารเคมี [5]

งานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญที่จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบี ด้วยกระบวนการดูดซับสารโดยใช้ไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิลิกแอซิด (Iron naphthalene-1,4-dicarboxylic acid Metal-Organic Framework: Fe-MOF) และคอปเปอร์-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิลิกแอซิด (Copper naphthalene-1,4-dicarboxylic acid Metal-Organic Framework: Cu-MOF) เป็นตัวดูดซับซึ่งที่ถูกเผา โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับ คือ ชนิดของตัวดูดซับ อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชันตัวดูดซับ ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบี เพื่อหาค่าเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับในการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบี
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีของตัวดูดซับและหาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้งานตัวดูดซับ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการทดลองด้วยตัวดูดซับวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด Fe-MOF และ Cu-MOF ที่ถูกคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งประกอบด้วยไอรอนและคอปเปอร์เป็นโลหะ แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิลิกแอซิดเป็นลิแกนด์
2. ปริมาณสารดูดซับที่ใช้ 0.1 กรัมต่อลิตร
3. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีในช่วง 5-200 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชัน 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส
5. ทำการทดลองที่สารละลายพีเอช 2 5 8 และ 11

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการทดลองและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
3. ออกแบบการทดลอง
4. ทำการทดลอง
5. วิเคราะห์ผลที่ได้
6. สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับได้ด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชัน
2. ได้รับสภาวะที่เหมาะสมซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ถูกเผาและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอนาคตได้
3. ได้รับความรู้และทักษะในการใช้เครื่องมือทดสอบ วิเคราะห์สมบัติต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม (Dye) [6]

สีเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม กล่าวคือในปัจจุบันสีย้อมส่วนใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความคงทนสูง ไม่สามารถกำจัดด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพได้ อีกทั้งน้ำที่ผ่านออกจากกระบวนการบำบัดดังกล่าวยังคงมีความเข้มข้นที่สูงอยู่ จึงต้องมีการพัฒนากระบวนการบำบัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

สีย้อม คือ สารอินทรีย์ที่สร้างมาเพื่อดูดกลืนซับแสงโดยการทำให้อยู่บนหรือในผิวหน้าของวัตถุเพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา ซึ่งความทนทานจะมีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสีย้อม การทำให้สีย้อมมีความคงทนและสดใสจะมีการใช้โลหะหนักเข้ามาช่วย เช่น แมงกานีส ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว เป็นต้น ทำให้น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีสารปนเปื้อนก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม [7]

ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

2.2.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Chromophore group)

องค์ประกอบของโมเลกุลส่วนนี้จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ เป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีของสีย้อม โดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงกระทบโครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมจะเกิดการสั่นเนื่องจากการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไป เป็นผลทำให้เกิดการเห็นสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์ของสีย้อมมีอยู่ประมาณ 20 กลุ่มด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น $N \equiv N$ กลุ่มเอโซ (Azo group) $C \equiv O$ หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) และ NO_2 หมู่ไนโตร (Nitro group)

2.2.2 หมู่อโซโครมของสีย้อม (Auxochrom group)

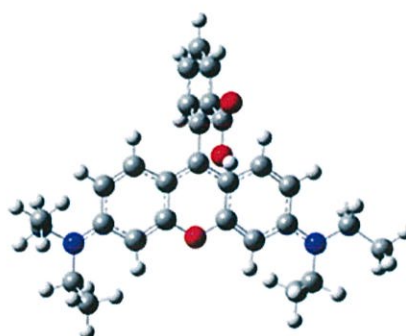
อโซโครม คือ หมู่ปฏิกิริยาอิมตัวที่มีอิเล็กตรอนซึ่งยังไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่ โครงสร้างส่วนนี้มักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene aromatic) ที่มีหมู่อะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน อโซโครมยังมีคุณสมบัติการละลายน้ำและเป็นส่วนที่ก่อบันดาระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย ซึ่งจะทำให้เกิดการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใย โดยการยึดติดโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใยอาจเป็นพันธะโควาเลนต์ พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือโดยการแทรกซึมของอนุภาคเข้าไปในเส้นใย ตัวอย่างของอโซโครม ได้แก่ - COOH กลุ่มหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) - OH กลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และกลุ่มเอมีน (Amino group)

2.3 สีย้อมเบสิก (Basic or Cationic dyes)

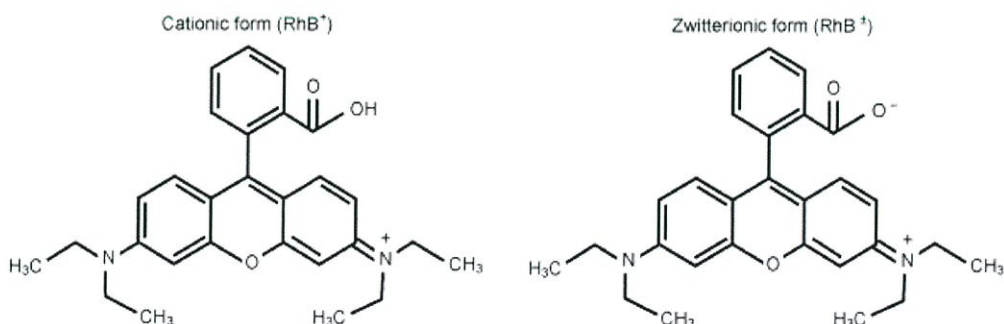
สีเบสิกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Cationic dyes เป็นสีย้อมที่เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวกเมื่อละลายน้ำ มีลักษณะเด่นคือ เป็นสีย้อมที่สีสว่างสดใสและมีความเข้มข้นสูงละลายได้ง่ายในแอลกอฮอล์ ได้นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี เป็นสีที่ติดทนไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

2.3.1 สีย้อมโรห์ตามีนบี (Rhodamine B dye) [8]

สีย้อมโรห์ตามีนบีเป็นสีย้อมประเภทสีเบสิก (Basic or Cationic dye) จัดอยู่ในประเภทแซนทีน [9] ละลายน้ำได้ดี ให้ประจุบวกและสารละลายสีชมพูเมื่อละลายน้ำ เป็นสีย้อมเรืองแสง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหนังย้อมเส้นใยโปรตีน กระดาษทิชชู ไม้ ไนลอนและใยอะคริลิก ขณะย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ น้ำหนักโมเลกุล 479.01 กรัมต่อโมล มีโครงสร้างโมเลกุล ดังรูปที่ 2.1

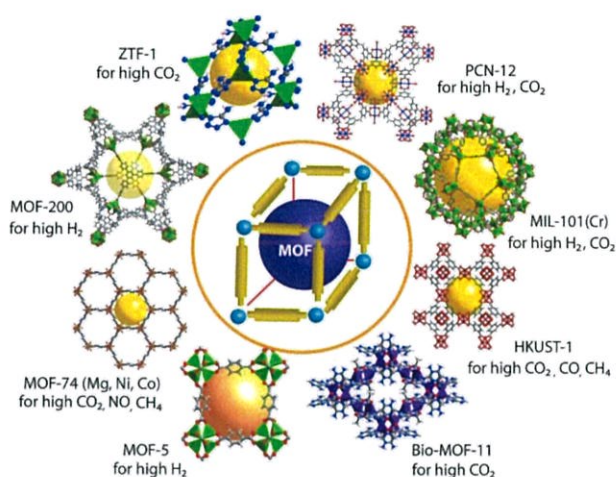


18.54Å × 14.35Å × 9.14Å

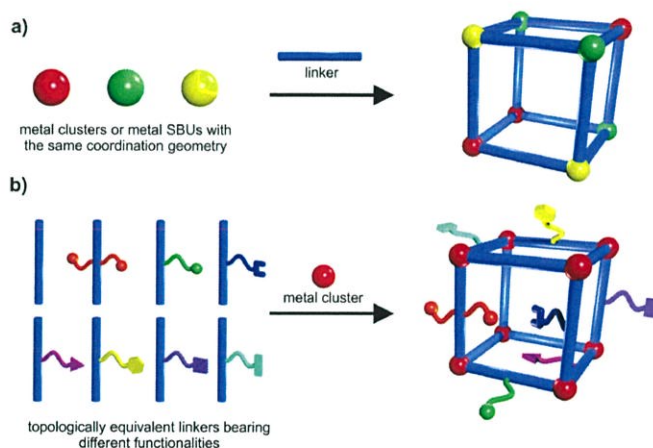


รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมโรห์ตามีนบี [8]

2.4 วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ [10]



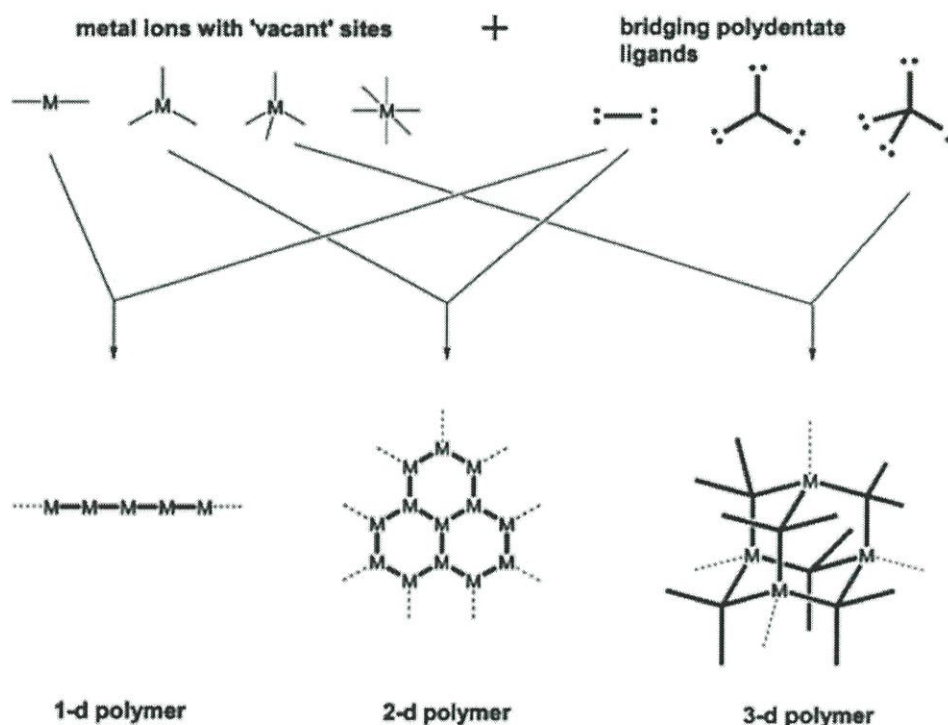
รูปที่ 2.2 โครงสร้างวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ [11]



รูปที่ 2.3 โครงข่ายสามมิติของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ [11]

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal Organic Frameworks: MOFs) จัดเป็นวัสดุผสม (Composite material) คือ สารประกอบที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการสร้างพันธะระหว่างไอออนของโลหะ (Metal) หรือกลุ่มโลหะ (Metal Clusters) และลิแกนด์อินทรีย์ (Organic ligand) ต่อกันจนเกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ต่อเนื่องกันไปคล้ายตาข่าย ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งลิแกนด์อินทรีย์ที่มีออกซิเจนหรือไนโตรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนมักถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ จะเป็นสารที่เป็นโมเลกุลแข็งเกร็ง (Rigid molecule) เช่น 1,4-เบนซีน ไดคาร์บอกซิลิกเอซิด (1,4-benzenedicarboxylic acid) 1,3,5-เบนซีนไตรคาร์บอกซิลิกเอซิด (1,3,5-benzene-tricarboxylic acid) 1,4-แนพทาลีน ไดคาร์บอกซิลิกเอซิด (1,4-naphthalene dicarboxylic acid) และ 4,4-ไบไพรีดีน (4,4-bipyridine) เป็นต้น

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์มีโครงข่ายทั้งในลักษณะ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยทั่วไปจะมีโครงข่ายที่แข็งแรงสามารถคงสภาพโครงข่ายได้ พบโพรงหรือรูพรุนขึ้นในโครงสร้าง (Void or Cavity) และเนื่องจากลิแกนด์ ที่กล่าวมาสามารถก่อกำพันระได้หลายพันธะ (Multidentate) จึงมีโอกาสสร้างโครงข่ายโพลิเมอร์ขึ้นเป็น 3 มิติ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หน่วยสร้างทุติยภูมิของวัสดุโลหะโครงข่ายอินทรีย์ประกอบด้วย ไอออนโลหะ (M) และโมเลกุลของสารอินทรีย์ (เส้นสีดำเข้ม) ต่อเชื่อมสร้างโครงข่ายด้วยพันธะโคเวเลนต์ [8]

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่น่าสนใจหลายประการ เช่น สามารถออกแบบและสังเคราะห์โครงสร้างขนาดรูพรุนให้เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้ และเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง โครงสร้างของรูพรุนหรือโพรงมีความยืดหยุ่น (Flexible structure) สามารถหดหรือขยายตัวตามสภาวะแวดล้อม บางชนิดมีพื้นที่ผิวมาก มีความหนาแน่นต่ำ มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ ทั้งเป็นตัวคัดเลือกโมเลกุลที่ต้องการ แยกออกจากโมเลกุลอื่นในกระบวนการแยกแก๊ส มีการนำไปใช้กับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่มีความจำเพาะกับรูปร่างและโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ ยังนำไปใช้เป็นตัวกักเก็บโมเลกุลสารอย่างจำเพาะเจาะจงได้อีกด้วย เช่น จับและปล่อยแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น [12]

2.5 กระบวนการดูดซับสาร [6]

กระบวนการดูดซับสาร (Adsorption process) เป็นหนึ่งในกระบวนการแยกสาร (Separation processes) ทางวิศวกรรมเคมีที่สำคัญในอุตสาหกรรม กระบวนการดูดซับสารเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (แก๊ส ไอ ของเหลว) โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก ซึ่งจะเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยกลไกของการแพร่ไปสะสมอยู่บนพื้นผิวภายในของของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับหรือสารดูดซับ (Adsorbent) ทำให้ความหนาแน่นหรือความเข้มข้นบนผิวของแข็งของตัวถูกดูดซับมีค่าสูงกว่าบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล การดูดซับนี้เกิดจากแรงกระทำ (Interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ คุณสมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับที่ดีคือ มีความสามารถในการดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนัก หรือต่อปริมาตรได้มากจึงจำเป็นต้องมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงหรือต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุน และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากเพื่อให้มีพื้นที่ผิวภายในสูง กระบวนการดูดซับสารประกอบที่เกิดขึ้นในรูพรุนของสารดูดซับ

1. การแพร่ของโมเลกุลภายในอนุภาคของสารดูดซับ
2. การแพร่ภายในช่องว่างของรูพรุน (Pore diffusion)
3. การแพร่ไปบนพื้นผิวภายในรูพรุน (Surface diffusion)
4. การดูดซับบนตำแหน่งที่เหมาะสมบนพื้นผิว (Adsorption sites)

ระบบการดูดซับสารยังแบ่งได้ตามลักษณะของแรงกระทำ หรือแรงดึงดูด ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยแบ่งได้สองประเภท คือ ระบบการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แรงดึงดูดจะค่อนข้างอ่อน และเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) เป็นส่วนใหญ่ และระบบการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) แรงยึดเหนี่ยวจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมี ระหว่างสารถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังนั้น แรงดึงดูดจึงมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในระบบดูดซับทางกายภาพ

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารถูกดูดซับที่แก๊ส	สูง มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี

2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง สารดูดซับหนึ่งๆสามารถดูดซับ สารได้หลายชนิด	มีความเจาะจงสูง เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิด ขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิว ของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้น และไม่มีการแตกตัวของสารถูก ดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของ สารถูกดูดซับได้
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิ ที่กว้างกว่า
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ถึงแม้อาจเกิดสภาพมีขั้วของสาร ถูกดูดซับจากการกระจายความ หนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมี ระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และตัวดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูด ซับต่ำ	การดูดซับแบบไม่สามารถผัน กลับได้และมีพลังงานกระตุ้น ของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความ ต้านทานการถ่ายโอนมวลภายใน รูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอน ของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว ภายในของสารดูดซับ

ที่มา: ศาสตราจารย์ ดร.ชัยศ ตั้งสถิตกุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

2.6 ชนิดของตัวดูดซับ และการประยุกต์ใช้งาน [6]

เพื่อให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมาก ตัวดูดซับที่นำมาใช้งานจำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง กล่าวคือต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับนอกจากจะขึ้นกับโครงสร้างของรูพรุนแล้ว ยังขึ้นกับขนาดและการกระจายขนาดของรูพรุน อีกทั้งขึ้นกับเคมีพื้นผิวของตัวดูดซับอีกด้วย ซึ่งรวมถึงสมบัติความเป็นขั้วและหมู่ฟังก์ชันต่างๆ (Surface functionality) ที่ปรากฏบนพื้นผิว สารดูดซับที่ใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ สามารถแบ่งตามคุณลักษณะได้ดังนี้

1. แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะโครงสร้าง (Structural nature)
 - ตัวดูดซับอสัณฐาน (Amorphous adsorbents)
 - ตัวดูดซับโครงสร้างผลึก (Crystalline adsorbents)

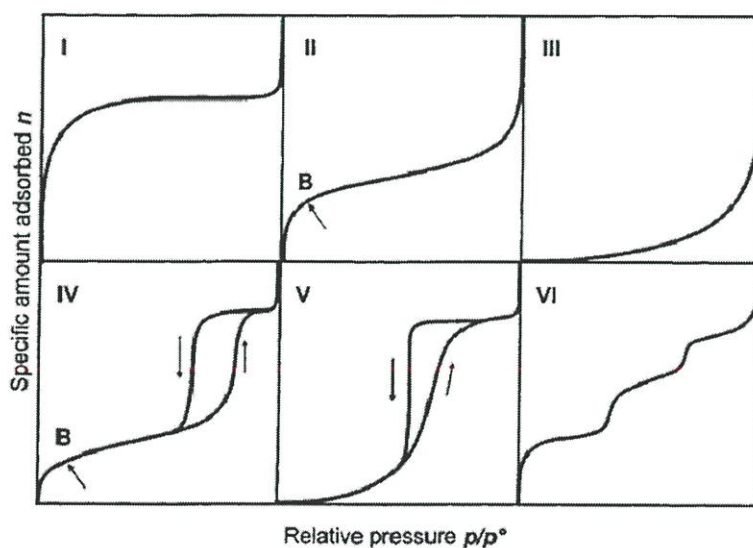
2. แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (Pore size distribution)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (Micropores)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางในช่วง 2-50 นาโนเมตร (Mesopores)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร (Macropores)
3. แบ่งตามความเป็นขั้วของพื้นที่ผิว (Surface polarity)
 - สารดูดซับที่แสดงความเป็นขั้ว
 - สารดูดซับที่ไม่มีขั้ว

2.7 รูพรุน (Pore) [6]

บทบาทของรูพรุนในการทำหน้าที่เป็นเส้นทางสำหรับการเดินทางเข้า และออกของโมเลกุลระหว่างบริเวณภายนอกและพื้นที่ภายในของอนุภาค ดูดซับสารดูดซับทุกชนิดที่ถูกใช้ในกระบวนการแยกสารหรือกระบวนการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวภายในและความจุของการดูดซับ

2.8 สมดุลการดูดซับ [6]

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงและมีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และตัวดูดซับ ดังนั้น โดยทั่วไปมักจะควบคุมอุณหภูมิของการดูดซับ และทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ ซึ่งเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว เรียกว่า ไอโซเทิร์ม (Isotherm) ซึ่งสามารถจำแนกไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC ได้ 6 แบบ ตามแบบของ BDDT โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.5 ลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สตามการจำแนกของ IUPAC

แบบที่ 1 (Type I) ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อความดันของการดูดซับมีค่าสูงขึ้น เส้นไอโซเทิร์มนี้นี้พบได้ในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน ลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดเดียวและรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า การเติมรูพรุน (Pore filling) เนื่องจากโมเลกุลของสารถูกดูดซับมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของรูพรุน ดังนั้นเมื่อการดูดซับเกิดขึ้นจนเต็มปริมาตรของรูพรุนแล้วปริมาณการดูดซับจึงเข้าสู่ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความดันสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น และหากกราฟมีความชันมากแสดงว่ามีช่วงการกระจายขนาดรูพรุนที่แคบ

แบบที่ 2 (Type II) ลักษณะไอโซเทิร์มแบบนี้ได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกจะมีการเพิ่มของปริมาณการดูดซับในลักษณะโค้งคว่ำเข้าหาแกนความดันสัมพัทธ์ ต่อด้วยช่วงที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง จุดเปลี่ยนจากช่วงที่ 1 สู่อะช่วงที่ 2 เกิดที่จุด B (Inflection point or knee of isotherm) และช่วงสุดท้าย ปริมาณการดูดซับจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ไอโซเทิร์มแบบนี้เป็นลักษณะการดูดซับที่แสดงการดูดซับแบบหลายชั้น โดยจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวก่อนและสิ้นสุดที่จุด B เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (Mesoporous and Macropores)

แบบที่ 3 (Type III) เป็นไอโซเทิร์มมีลักษณะหงายแบบนี้เข้าหาแกนความดันสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับ และของตัวดูดซับซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ทำให้ที่ความดันต่ำๆ ปริมาณการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับเกิดได้น้อย แต่เมื่อความดันสูงถึงค่าหนึ่ง แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับด้วยกันเองจะช่วยให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นได้ ไอโซเทิร์มแบบนี้พบในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน หรือที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

แบบที่ 4 (Type IV) เป็นไอโซเทิร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ลักษณะเฉพาะของไอโซเทิร์มแบบนี้ คือ การเกิดวงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis loop) นั่นคือ เส้นไอโซเทิร์มของช่วงลดความดัน จะอยู่สูงกว่าเส้นไอโซเทิร์มของช่วงที่เพิ่มความดัน ขนาด รูปร่างของวงฮีสเทอรีซิส จะขึ้นกับระบบของตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับเป็นส่วนใหญ่

แบบที่ 5 (Type V) ไอโซเทิร์มแบบนี้จะคล้ายกับไอโซเทิร์มแบบที่ III และมีวงฮีสเทอรีซิสเกิดขึ้นด้วย โดยเส้นไอโซเทิร์มที่ความดันสูงอาจมีลักษณะคงที่ หรือเพิ่มขึ้นก็ได้ ไอโซเทิร์มแบบนี้พบได้ในตัวดูดซับที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดกลาง หรือรูพรุนขนาดเล็ก และเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับมีค่าน้อย

แบบที่ 6 (Type VI) เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้น (Stepped isotherm) เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับของแข็งที่มีความสม่ำเสมอของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับ บันไดแต่ละขั้นแสดงลักษณะการดูดซับของแต่ละขั้น ซึ่งประกอบด้วย การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณการดูดซับจนเต็มขั้นนั้นต่อด้วย ช่วงเปลี่ยนผ่านซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

2.9 สมการไอโซเทิร์ม (Isotherm equations) [6]

ในการวิเคราะห์กระบวนการดูดซับของเหลว ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อระบบการดูดซับในวัฏภาคของเหลว สำหรับสารถูกดูดซับจะเกี่ยวข้องกับ ระดับความเข้มข้นในสารละลาย ขนาดของโมเลกุล โครงสร้างโมเลกุล เป็นต้น และปัจจัยที่มีผลต่อระบบการดูดซับสำหรับตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นผิว ขนาด ปริมาตรของรูพรุน สภาพเคมีฟิสิกส์ของพื้นผิว อีกทั้งยังรวมถึงอุณหภูมิและค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายอีกด้วย สมการไอโซเทิร์มที่นิยมนำมาใช้อธิบายสมดุลการดูดซับในระบบของเหลว มีดังนี้

2.9.1 สมการการดูดซับแบบ Langmuir

มีสมมุติฐานที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. โมเลกุลของสารถูกดูดซับที่เป็นแก๊สจะมีพฤติกรรมเป็นแก๊สในอุดมคติ
2. โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้ในตำแหน่งที่แน่นอน
3. ในแต่ละตำแหน่งของผิวตัวดูดซับ สามารถรองรับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งอะตอมเท่านั้น การดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นโมเลกุลเท่านั้น
4. พลังงานของการดูดซับมีค่าคงที่ตลอดทั้งพื้นที่ผิว (Homogeneous surface) ไม่ขึ้นกับตำแหน่งและปริมาณของการดูดซับ

สมการการดูดซับแบบ Langmuir สามารถเขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.1)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.2)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ

(มิลลิกรัมของสารถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับ)

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมของสารถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับ)

b คือ ค่าคงที่พลังงานการดูดซับของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.9.2 สมการการดูดซับแบบ Freundlich

มีสมมติฐาน ดังนี้

1. เกิดทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี
2. เป็นการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)
3. พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Heterogeneous surface)

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.3)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_f \quad (2.4)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(มิลลิกรัมของสารถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับ)

K_f คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

2.10 ขั้นตอนการคาร์บอนในเซชัน (Carbonization process) [13]

การคาร์บอนในเซชันเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นถ่านชาร์หรือการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงในสภาพ ไร้ออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนจำกัด เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิเกิดการลุกไหม้และกลายเป็นเถ้า โดยในระหว่างการคาร์บอนในเซชันนั้นธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกขจัดออกไปอยู่ในสถานะแก๊สจึงทำให้การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่ได้เพิ่มขึ้น

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hu และคณะ (2012) [14] การเตรียมวัสดุนาโนคาร์บอนจากการคาร์บอนในเซชันอลูมิเนียมบนโคออร์ดิเนชันพอลิเมอร์ (Al-based porous coordination polymers: Al-PCP) โดยทำการทดลองการคาร์บอนในเซชัน Al-PCP ด้วยแก๊สไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอุณหภูมิตั้งใช้ในการคาร์บอนในเซชันในช่วง 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า วัสดุนาโนคาร์บอนที่ผ่านการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนในเซชันขึ้นไปถึง 900 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวลดลงอย่างมากเนื่องจากโครงสร้างรูพรุนขนาดนาโนถูกทำลายจากการเปลี่ยนรูปร่างคาร์บอนด้วยความร้อน (Graphitization)

Chen และคณะ (2015) [15] ได้ทำการศึกษาการเตรียมอนุภาคโลหะออกไซด์ (Metal/metal oxide nanoparticles) ที่กระจายตัวบนคาร์บอนเมทริกซ์ด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

(Carbonization process) ของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ ซึ่งวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ใช้จะประกอบด้วยโลหะที่ต่างชนิดกัน คือ Fe-MOF, Al-MOF และ In-MOF ร่วมกับ 1,4-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลต (1,4-naphthalene dicarboxylate) เป็นลิแกนด์ ซึ่งทำการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิการเผาด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 200 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าสามารถเตรียมวัสดุผสมคาร์บอนเมทริกซ์ที่มีอนุภาคโลหะออกไซด์กระจายอยู่บนคาร์บอนจากวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ได้สำเร็จ โครงสร้างที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิการเผา โดยที่วัสดุนาโนคาร์บอนที่ได้จากการคาร์บอนเนชัน Fe-MOF จะมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและยังมีคุณสมบัติความพรุนสูงกว่าวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นอีกด้วย

Wei และคณะ (2018) [16] ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีคองโกเรต และออเรนจ์ (II) ของ Fe-MOFs ซึ่งถูกใช้เป็นสารดูดซับ โดย Fe-MOFs จะถูกเตรียมด้วยวิธี microwave-assisted ball-milling จากโลหะ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ และกรดไตรเมสิกเป็นลิแกนด์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 15 และ 35 องศาเซลเซียส ในสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีเข้มข้น 18 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 300 นาที ตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เหลือด้วย UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร จากผลการทดลองพบว่า ณ สภาวะการทดลองดังกล่าว Fe-MOFs ที่เตรียมจากวิธี microwave-assisted ball-milling มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีที่ดี สามารถดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี ณ สภาวะดังกล่าว ได้ถึง 70.9 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับจะดียิ่งขึ้น ดังนั้นสารดูดซับชนิดนี้จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานในการกระบวนการบำบัดน้ำเสียหรือกระบวนการอื่นๆ ต่อไป

Zhang และคณะ (2018) [5] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดูดซับ Zn/Co Zeolitic imidazole frameworks (ZIFs) ด้วยการคาร์บอนเนชันต่อการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี ทำการเตรียมวัสดุนาโนคาร์บอนโดยใช้ Zn/Co ZIFs เป็นสารตั้งต้น ผ่านกระบวนการคาร์บอนเนชันด้วยแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากคาร์บอนเนชันแล้วพบว่า วัสดุนาโนคาร์บอนที่ได้รับจะมีอนุภาคโคบอลต์ (Co) กระจายอยู่สูง หลังจากเตรียมวัสดุนาโนคาร์บอนได้เรียบร้อยแล้ว ทำการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีโดยใช้วัสดุนาโนคาร์บอนดังกล่าวนี้เป็นสารดูดซับ ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณสารดูดซับ 0.2-0.8 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชของสารละลายสีย้อม ในช่วง 2-12 พบว่า Zn/Co ZIFs ที่ผ่านการคาร์บอนเนชันแล้ว มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีดีขึ้น เนื่องจาก มีความพรุนเพิ่มมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นยังมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ทำให้การดูดซับได้ดีมากขึ้นด้วยสภาวะการใช้งานที่เหมาะสม คือ ปริมาณสารดูดซับ 0.2 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนบีเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 10 ความสามารถการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีสูงถึง 116.2 มิลลิกรัมต่อกรัม

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด
 - ไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิลิกเอซิด (Iron 1,4-Naphthalenedicarboxylic acid Metal-Organic Framework: Fe-MOF)
 - Fe-MOF ที่ถูกเผา ณ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส: Fe/C400
 - Fe-MOF ที่ถูกเผา ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส: Fe/C600
 - Fe-MOF ที่ถูกเผา ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส: Fe/C800
 - คอปเปอร์-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิลิกเอซิด (Copper 1,4-Naphthalenedicarboxylic acid Metal-Organic Framework: Cu-MOF)
 - Cu-MOF ที่ถูกเผา ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส: Cu/C600
 - Activated Carbon1: AC1 (AC-1150)
 - Activated Carbon2: AC2 (ถ่าน)
- สีย้อมโรห์ตามีนบี (Rhodamine B)
- สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue)
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 โมลาร์
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 โมลาร์
- น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- กล่องทึบแสง
- ขวดแก้วใส่เก็บตัวอย่าง ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 และ 200 มิลลิลิตร
- ปิเปตต์ (Pipette) ขนาด 10 และ 25 มิลลิลิตร
- ไมโครปิเปตต์ (Micropipette) ขนาด 100 ไมโครลิตร
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร
- ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร
- หลอดฉีดยา (Syringe) และหัวกรอง (Syringe filter) ขนาด 0.22 ไมครอน
- เครื่องกวนผสม (Stirrer) และแท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic stirrer)
- คิวเวทท์ (Cuvette)

11. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
12. แท่งแก้วคนสาร
13. ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator)
14. เครื่องตรวจวัดพีเอช (pH Meter)
15. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
16. พลาสติกแรป

3.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

1. BET ใช้วิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของตัวดูดซับ
2. Scanning electron microscope (SEM) ใช้วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของตัวดูดซับ

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนปีของตัวดูดซับแต่ละชนิด

1. เตรียมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนปี ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำกลั่น เติมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนปีปริมาตร 5 มิลลิตร ลงในขวดแก้ว ทั้งหมด 6 ขวด และใส่ตัวดูดซับที่ถูกเผาลงในแต่ละขวด 0.5 มิลลิกรัม ที่สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 5

2. เริ่มการทดลองการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปี โดยใช้เครื่องปั่นกวนสารและแท่งแม่เหล็กสำหรับทุกตัวอย่างทุกขวดที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เท่ากัน จับเวลาพร้อมเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที จนครบ 6 ขวด แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายสีย้อมโดยใช้หัวกรองขนาด 0.22 ไมครอน

3. นำตัวอย่างทั้ง 6 ขวด ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้งหมด ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาว 554 นาโนเมตร บันทึกผลการทดลอง

4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนแปลงชนิดของตัวดูดซับจนครบทั้งหมด 6 ชนิด (Fe-MOF, Fe/C600, Cu-MOF, Cu/C600, AC1, AC2) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด และนำตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดไปใช้ในการศึกษาปัจจัยถัดไป

3.4.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิการคาร์บอนเซชันตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปี

1. เตรียมตัวดูดซับด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชันด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

2. เตรียมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนปี ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำกลั่น เติมสารละลายสีย้อมปริมาตร 5 มิลลิตร ลงในขวดแก้ว ทั้งหมด 6 ขวด และใส่ตัวดูดซับที่เตรียมได้จากข้อ 1 ที่ทำการคาร์บอนเซชันด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ลงในแต่ละขวดเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัม ที่สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 5

3. เริ่มการทดลองการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีโดยใช้เครื่องปั่นกวนสารและแท่งแม่เหล็กสำหรับทุกตัวอย่างทุกขวดที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เท่ากัน จับเวลาพร้อมเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที จนครบ 6 ขวด แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายสีย้อมโดยใช้หัวกรองขนาด 0.22 ไมครอน

4. นำตัวอย่างทั้ง 6 ขวด ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้งหมด ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาว 554 นาโนเมตร บันทึกผลการทดลอง

5. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนแปลงชนิดของตัวดูดซับที่ถูกเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ (600 และ 800 องศาเซลเซียส) จนครบทั้งหมด 3 ชนิด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละอุณหภูมิ และนำตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดไปใช้ในการศึกษาปัจจัยถัดไป

3.4.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและหาความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี

1. เตรียมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบี ความเข้มข้น 5 10 20 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำกลั่น เติมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้ว และเติมตัวดูดซับที่ได้จากการทดลอง 3.4.2 ในแต่ละขวดเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัม ที่สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 5

2. เริ่มการทดลองการดูดซับสาร โดยใช้เครื่องปั่นกวนสารและแท่งแม่เหล็กสำหรับทุกตัวอย่างทุกขวดที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เท่ากัน จับเวลาพร้อมเก็บตัวอย่างของแต่ละความเข้มข้นที่เวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมงจนครบ แยกสารละลายสีย้อมออกจากตัวดูดซับโดยใช้หัวกรองขนาด 0.22 ไมครอน

3. นำตัวอย่างทั้งหมดไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้งหมด ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาว 554 นาโนเมตร บันทึกผลการทดลอง

3.4.4 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี

1. เตรียมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบี ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำกลั่น เติมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้ว และใส่ตัวดูดซับที่ได้จากการทดลอง 3.4.2 ในแต่ละขวดเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัม ปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 ด้วยเครื่องตรวจวัดพีเอช

2. เริ่มการทดลองการดูดซับสาร โดยใช้เครื่องปั่นกวนสารและแท่งแม่เหล็กสำหรับทุกตัวอย่างทุกขวดที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เท่ากัน จับเวลาพร้อมเก็บตัวอย่างทุก 10 20 30 นาที 1 2 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ แยกสารละลายสีย้อมออกจากสารดูดซับโดยใช้หัวกรองขนาด 0.22 ไมครอน

3. นำตัวอย่างทั้งหมด ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้งหมด ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาว 554 นาโนเมตร บันทึกผลการทดลอง นำมาคำนวณประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับ ณ จุดสมดุลและความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ และเขียนได้ตั้งสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

$$\% \text{ RhB removal efficiency} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมโรห์ตามีนบีและ C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (3.2)$$

$$q_t = \frac{V(C_0 - C_t)}{m} \quad (3.3)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_e คือ ความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ตามีนบีที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ m คือ น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัม)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

ในบทนี้จะอธิบายถึงงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งแสดงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 6 ชนิด คือ Fe-MOF Fe/C400 Fe/C600 Fe/C800 Cu-MOF Cu/C600 AC1 และ AC2 ซึ่งในส่วนการวิเคราะห์ตัวดูดซับนี้จะแสดงผลของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพที่สุด และในส่วนการวิเคราะห์ตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

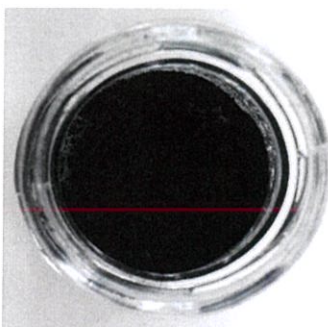
Fe-MOF ที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมตัวดูดซับ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีส้ม มีน้ำหนักเบาจึงง่ายต่อการฟุ้งกระจาย (รูป ก) เมื่อ Fe-MOF ผ่านการคาร์บอนเซชันด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า Fe/C400 ที่ได้รับจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดดำส้ม มีน้ำหนักเบา (รูป ข) ขณะที่ Fe/600 และ Fe/C800 มีลักษณะเป็นผงสีดำเข้ม น้ำหนักเบาเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



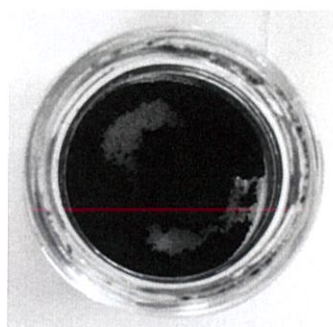
(ก) Fe-MOF



(ข) Fe/C400



(ค) Fe/C600

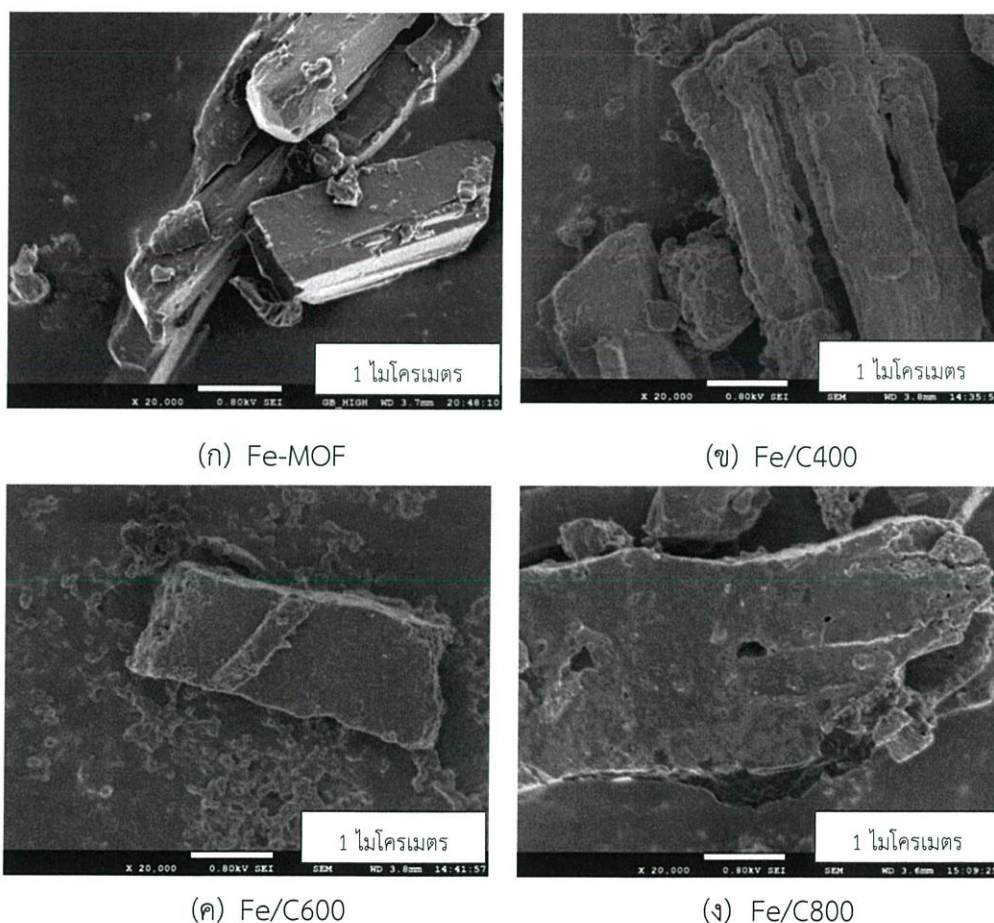


(ง) Fe/C800

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

4.1.2 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ

ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวดูดซับ Fe-MOF, Fe/C400, Fe/C600 และ Fe/C800 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ Fe-MOF พบว่า Fe-MOF มีลักษณะเป็นบล็อกและพื้นผิวภายนอกค่อนข้างเรียบ และเมื่อนำตัวดูดซับ Fe-MOF มาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ได้รับมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กอีกด้วย (รูป ก.3 แสดงในภาคผนวก ก) ทั้งนี้อาจเนื่องจาก เมื่อ Fe-MOF ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแล้วลิแกนด์อินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนเมทริกซ์ และเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปอนุภาคไอรอน (Fe) และไอรอนคาร์ไบด์ (Fe_3C) กระจายอยู่ในคาร์บอนเมทริกซ์นั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen et al. 2015)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานและพื้นผิวด้วย SEM

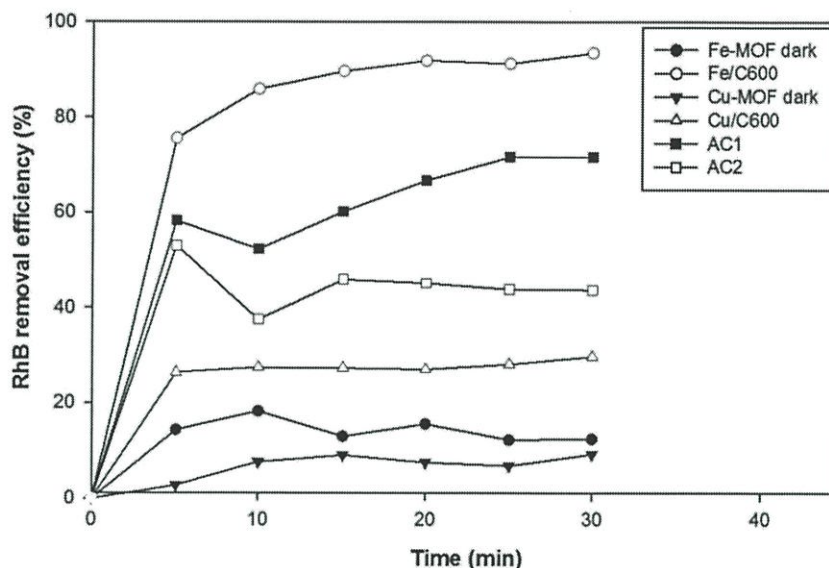
4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนบนตัวดูดซับด้วยวิธี BET ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนบนตัวดูดซับด้วยวิธี BET แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนเซชันตัวดูดซับ Fe-MOF เพิ่มขึ้นจนถึง 600 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก 1.98 เป็น 261.80 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนลดลงจาก 284.76 เป็น 44.57 อังสตรอม และปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.014 เป็น 0.291 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จากผล BET ประกอบกับผลการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีของ Fe-MOF ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (Fe/C800) มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวดูดซับที่ผ่านการคาร์บอนเซชัน ณ อุณหภูมิอื่น ดังแสดงในหัว 4.3 อาจทำให้สันนิษฐานได้ว่าตัวดูดซับ Fe/C800 มีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนที่มากที่สุด และขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยของตัวดูดซับแต่ละอุณหภูมิ

ชนิดตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (Å)	ปริมาตรของรูพรุน (cm ³ /g)
Fe-MOF	1.98	284.76	0.014
Fe/C400	40.35	63.91	0.064
Fe/C600	261.80	44.57	0.291
Fe/C800	-	-	-

4.2 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีของสารดูดซับแต่ละชนิด

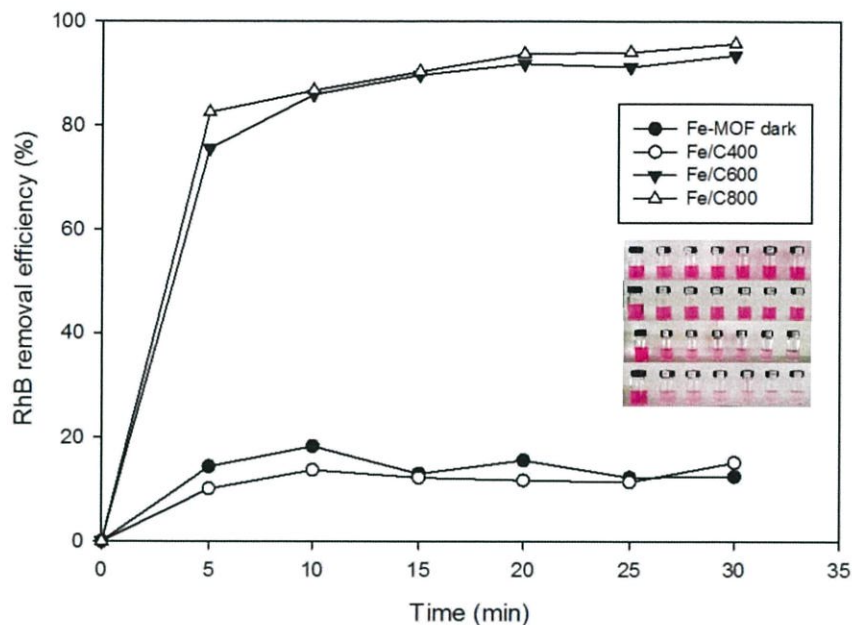
การศึกษาความสามารถการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีบนตัวดูดซับวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ชนิดตัวดูดซับที่แตกต่างกันประกอบด้วย Fe-MOF Fe/C600 Cu-MOF Cu/C600 AC1 และ AC2 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าตัวดูดซับ Fe/C600 มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น โดยสามารถกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีได้ถึงร้อยละ 93.52 ซึ่งแตกต่างจากตัวดูดซับชนิดอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากคุณสมบัติความพรุนที่มากขึ้นของ Fe/C600 เมื่อเปรียบกับ Fe-MOF ที่เป็นสารตั้งต้น อีกทั้งยังได้ทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งผลแสดงในภาคผนวก ในรูปที่ ค.1 พบว่า Fe/C600 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงถึงประมาณร้อยละ 90 เช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวดูดซับที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่สามารถเตรียมได้การ Fe-MOF เป็นสารตั้งต้น เพื่อใช้ในการศึกษาในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารดูดซับกับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม
ที่ปริมาณสารดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสีย้อมโรห์ดามีนบีเริ่มต้น
5 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาการดูดซับ 30 นาที พีเอช 5

4.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิของการคาร์บอนเซชันตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโรห์ดามีนบี

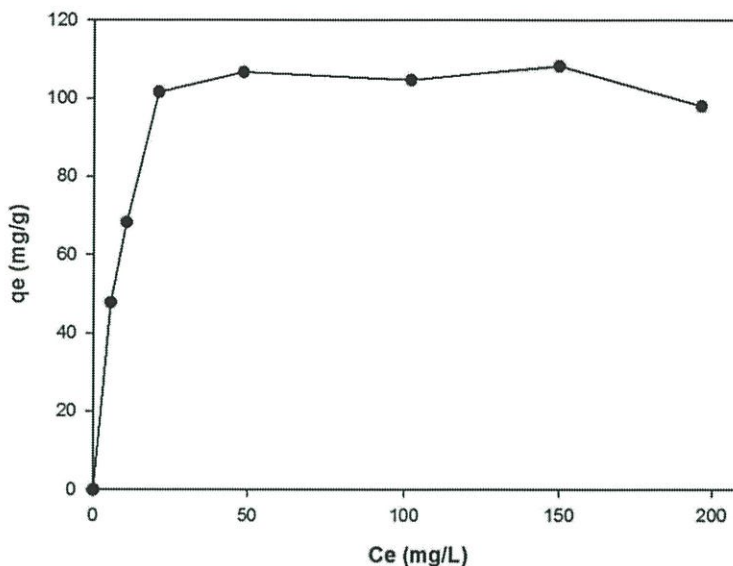
การศึกษาอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชัน Fe-MOF โดยอุณหภูมิที่ใช้ 3 ค่า ได้แก่ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองรูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโรห์ดามีนบีเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนเซชัน และ Fe-MOF ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันเรียบร้อยแล้ว (Fe/C) นั้น จะมีคุณสมบัติความพรุนที่สูงและปริมาตรรูพรุนมากกว่า Fe-MOF ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ดังข้อมูล BET ที่แสดงในตาราง 4.1 ประกอบกับอาจเนื่องจากการสูญเสียลิแกนด์ที่เป็นสารอินทรีย์บางส่วนถูกเปลี่ยนไปในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างกระบวนการคาร์บอนเซชัน จึงทำให้ตัวดูดซับ Fe/C ทั้ง 3 อุณหภูมิ มีความพรุนสูงมากกว่า Fe-MOF เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ (Chen et al. 2015) และจากรูปที่ 4.4 พบว่า ตัวดูดซับ Fe/C600 และ Fe/C800 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโรห์ดามีนบีสูงที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ Fe/C400 และ Fe-MOF มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโรห์ดามีนบีต่ำอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น Fe/C800 จึงเป็นตัวดูดซับที่มีความเหมาะสมที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงสุดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการคาร์บอนไอเซนกับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม
ที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนปี
เริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 30 นาทีพีเอช 5

4.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและหาความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปี

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปีบนตัวดูดซับ Fe/C800 ที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนปีที่แตกต่างกัน คือ 5, 10, 20, 50, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนปีสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ Fe/C800 จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับ จนกระทั่งถึงจุดสมดุล แม้ความเข้มข้นจะเพิ่มสูงขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปีสูงสุดยังคงที่ ที่ปริมาณการดูดซับ 103.88 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

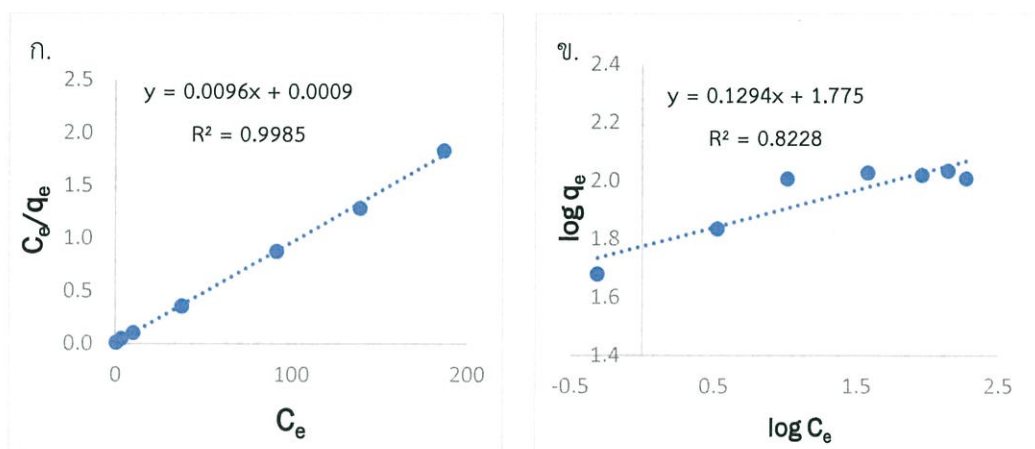


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสี่อ้อมกับความเข้มข้นสี่อ้อมโรห์ตามีนบี ที่ปริมาณตัวดูดซับ Fe/C800 0.1 กรัมต่อลิตร เวลาการดูดซับ 24 ชั่วโมง พีเอช 5

ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากไอโซเทิร์มการดูดซับของตัวดูดซับ Fe/C800

ตัวดูดซับ	สมการ Langmuir			สมการ Freundlich		
	q_m (mg/g)	b (L/mg)	R^2	K_F (mg/g)	n	R^2
Fe/C800	104.17	10.67	0.998	7.73	59.57	0.823

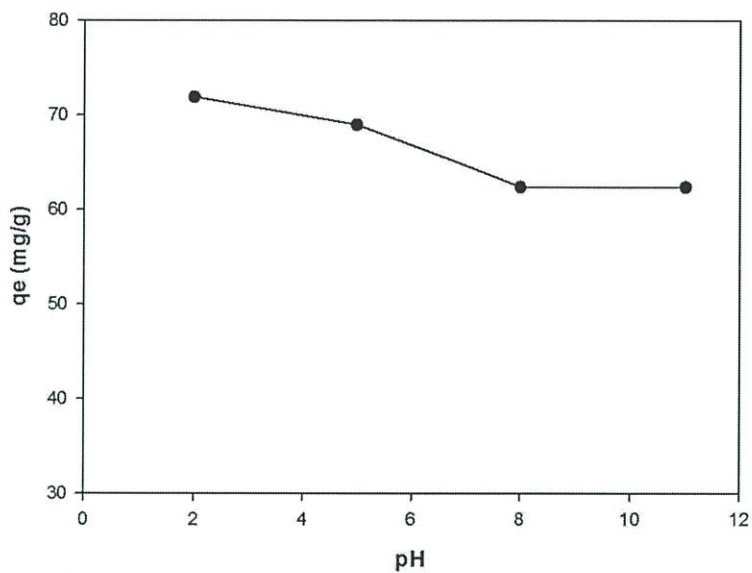
จากการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับสี่อ้อมโรห์ตามีนบีด้วยตัวดูดซับ Fe/C800 ที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich พบว่า สมการการดูดซับแบบ Langmuir มีค่า R^2 เท่ากับ 0.998 ซึ่งมีค่ามากกว่า R^2 ของสมการการดูดซับ Freundlich จึงแสดงให้เห็นว่า การดูดซับสารละลายสี่อ้อมโรห์ตามีนบีของตัวดูดซับ Fe/C800 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Langmuir ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โมเลกุลหรืออะตอมของตัวดูดซับจะถูกดูดซับไว้ ณ ตำแหน่งที่แน่นอนและพลังงานของการดูดซับมีค่าคงที่ตลอดทั้งพื้นผิว (Homogeneous surface)



รูปที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปีด้วยตัวดูดซับ Fe/C800 ก.สมการ Langmuir
ข. สมการ Freundlich ปริมาณสารดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร เวลาการดูดซับ 24 ชั่วโมง พีเอช 5

4.5 ศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปี

การศึกษาพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปีที่พีเอช 2.5, 8 และ 11 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ความสามารถในการดูดซับจะลดลงตามพีเอชของสารละลายสีย้อมที่เพิ่มขึ้น ค่าความสามารถดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปีสูงสุดอยู่ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 อาจเนื่องจาก เมื่อสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนปีมีพีเอชต่ำกว่า 4 ไอออนของสีย้อมโรห์ตามีนปีจะอยู่รูปแคทไอออนิก (Cationic form) และโมเลกุลมอนอเมอร์ (Monomeric molecular form) ดังนั้น ไอออนของสีย้อมโรห์ตามีนปีจึงสามารถเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับได้ และที่พีเอชของสารละลายสูงกว่า 4 ไอออนของสีย้อมโรห์ตามีนปีจะอยู่ในรูปสวิตเตอร์ไอออนิก (Zwitterionic form) ซึ่งเป็นสถานะที่อาจทำให้เกิดการรวมตัวกันของโมเลกุลของสีย้อมโรห์ตามีนปี ทำให้โมเลกุลสีย้อมมีขนาดใหญ่ขึ้น ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนปีจึงลดลง [17]



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย
ที่ปริมาณตัวดูดซับ Fe/C800 0.1 กรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนปีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับในการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีของสารดูดซับและหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ถูกเผา ซึ่งปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของตัวดูดซับ อุณหภูมิ การคาร์บอนไนเซชัน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมโรห์ตามีนบี และพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

จากผลการทดลองพบว่า ตัวดูดซับวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ผ่านการคาร์บอนไนเซชันแล้วจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีเพิ่มสูงขึ้น และตัวดูดซับที่เกิดจาก Fe-MOF เป็นสารตั้งต้น มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น ทำให้ Fe/C ถูกนำมาศึกษาผลของอุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์พบว่า Fe-MOF ก่อนการคาร์บอนไนเซชันมีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวต่ำ ซึ่งเมื่อ Fe-MOF ผ่านการคาร์บอนไนเซชันแล้ว พบว่า การคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส Fe/C800 จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีสูงขึ้นและสูงสุดถึงร้อยละ 95.75 จึงสามารถสันนิษฐานได้ว่า Fe/C800 มีประสิทธิภาพสูงสุดอาจเนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น Fe/C มีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับสูง จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีดีขึ้นตามลำดับ และจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบี พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีต่อผลความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี โดยเมื่อความเข้มข้นสารละลายสีย้อมสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่สมดุลของ Fe/C อยู่ที่ประมาณ 103.88 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีสูงขึ้นตามการลดลงของพีเอช มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่อยู่พีเอช 2

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อสมบัติความพรุนและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีให้ครอบคลุมมากขึ้น เช่น ผลของอุณหภูมิในการทดลอง ผลของเวลาในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน ผลของอัตราการให้ความร้อนในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน เป็นต้น

2. ควรศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบีของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเพิ่มเติม

3. ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เช่น การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRF หรือการวิเคราะห์ EDS และการวิเคราะห์ค่าประจุบนพื้นผิว (Point of zero charge: pzc) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. A. Al-Kahtani, “Photocatalytic Degradation of Rhodamine B Dye in Wastewater Using Gelatin/CuS/PVA Nanocomposites under Solar Light Irradiation,” *J. Biomater. Nanobiotechnol.*, vol. 8, no. 1, pp. 66–82, 2017.
- [2] Z. Hasan, J. Jeon, and S. H. Jung, “Adsorptive removal of naproxen and clofibric acid from water using metal-organic frameworks,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 209–210, pp. 151–157, 2012.
- [3] จันทรสุวรรณวรวิทย์, “ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย โดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ Adsorption Efficiency of Lead (II) Ion from Aqueous Solution by using an Aerated Concrete as Adsorbent วรวิทย์จันทรสุวรรณงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบ,” 2558.
- [4] L. Li, X. L. Liu, H. Y. Geng, B. Hu, G. W. Song, and Z. S. Xu, “A MOF/graphite oxide hybrid (MOF: HKUST-1) material for the adsorption of methylene blue from aqueous solution,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 1, no. 35, p. 10292, 2013.
- [5] J. Zhang, X. Yan, X. Hu, R. Feng, and M. Zhou, “Direct carbonization of Zn/Co zeolitic imidazolate frameworks for efficient adsorption of Rhodamine B,” *Chem. Eng. J.*, vol. 347, no. February, pp. 640–647, 2018.
- [6] ตั้งสถิตย์กุลชัยชัยยศ, *กระบวนการดูดซับสาร Adsorption process*. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.
- [7] นพคุณทนางสาวสายรุ้ง, “การกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟจากน้ำหาเสียด้วยหินดินดาน,” 2554. [Online]. Available: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4252/2/Fulltext.pdf>.
- [8] SIGMA-ALDRICH, “Safety Data Sheet - Rhodamine B,” 2013. [Online]. Available: http://www.fda.gov.ph/attachments/article/114164/MSDS_Rhodamine.pdf.
- [9] S. Merouani, O. Hamdaoui, F. Saoudi, and M. Chiha, “Sonochemical degradation of Rhodamine B in aqueous phase : Effects of additives,” *Chem. Eng. J.*, vol. 158, no. 3, pp. 550–557, 2010.
- [10] A. Putkham, “Application of Metal-Organic Frameworks for Carbon Dioxide capture,” vol. 18, no. 1, pp. 161–177, 2013.

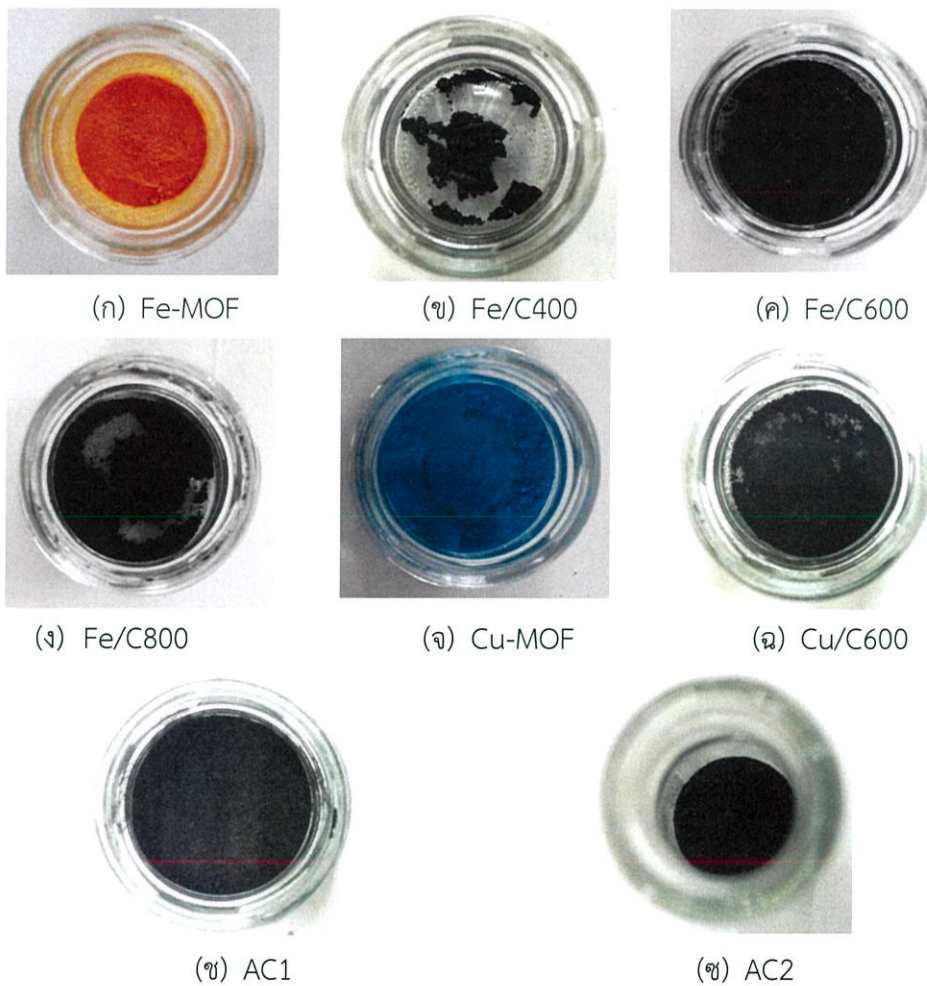
- [11] A. Schneemann, V. Bon, I. Schwedler, I. Senkovska, S. Kaskel, and R. A. Fischer, "Flexible metal–organic frameworks," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 16, pp. 6062–6096, 2014.
- [12] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), "10 เทคโนโลยีที่น่าจับตามองสำหรับธุรกิจ," 2556. [Online]. Available: <http://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/2010/20100916-Thaweesak-Special-Lecture.pdf>.
- [13] เกตขานางสาวเจือจันทร์, "ผลของอุณหภูมิคาร์บอนเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว," 2556. [Online]. Available: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4517/2/Fulltext.pdf>.
- [14] M. Hu, J. Reboul, S. Furukawa, N. L. Torad, and Q. Ji, "Direct Carbonization of Al-Based Porous Coordination Polymer for Synthesis.pdf," pp. 1–12, 2012.
- [15] J.-J. Chen, Y.-T. Chen, D. Raja, Y.-H. Kang, P.-C. Tseng, and C.-H. Lin, "Metal-Organic Frameworks to Metal/Metal Oxide Embedded Carbon Matrix: Synthesis, Characterization and Gas Sorption Properties," *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 8, pp. 5336–5347, 2015.
- [16] F. Wei and D. Chen, "Comparison Study on the Adsorption Capacity of Rhodamine B , Congo Red , and Orange II on Fe-MOFs," pp. 1–11, 2018.
- [17] Y. Guo *et al.*, "Use of rice husk-based porous carbon for adsorption of Rhodamine B from aqueous solutions," vol. 66, 2005.

ภาคผนวก

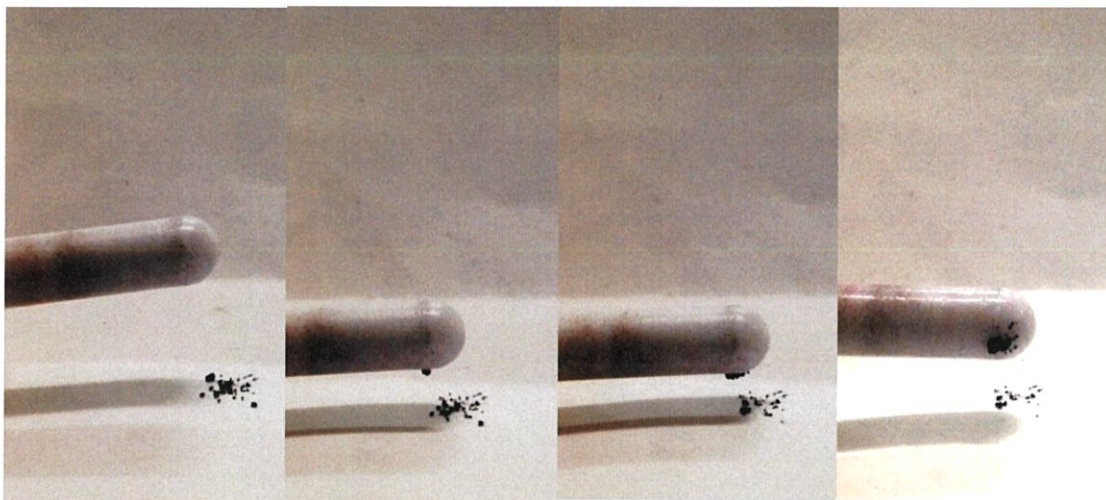
ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.1 การทดลองการดูดซับสีย้อมโรห์ดำมินปีบนตัวดูดซับ



รูปที่ ก.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ



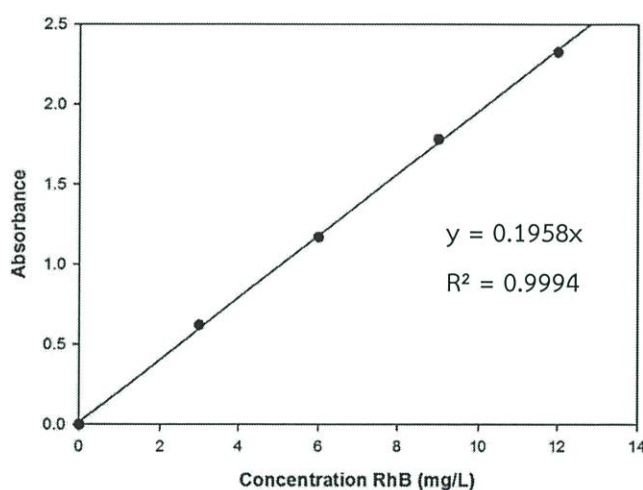
รูปที่ ก.3 แสดงความเป็นแม่เหล็กของ Fe/C800

ภาคผนวก ข

การคำนวณความเข้มข้นของสีย้อม

ข. 1 การคำนวณความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เตรียมเป็นมาตรฐาน

การคำนวณความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เตรียมเป็นมาตรฐาน หลังจากเตรียมสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีที่ความเข้มข้น 3 6 9 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ตามีนบี แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ตามีนบี

สมการมาตรฐานความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนบี คือ $y = 0.1958x$

โดย **X** คือ ความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนบี (มิลลิกรัมต่อลิตร)

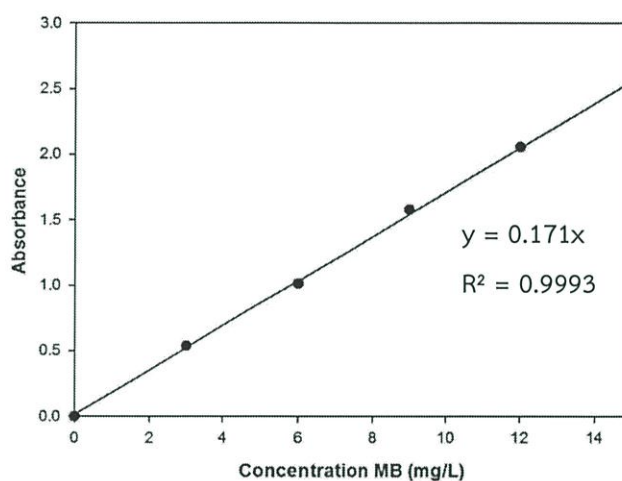
y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

ข.2 การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เหลือจากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน

การคำนวณความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เหลือในการทดลองการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเทียบกับความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนบี จากกราฟมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ ข.1 ทำให้ทราบถึงความเข้มข้นของสีย้อมโรห์ตามีนบีที่เหลืออยู่ในสารละลาย

ข. 3 การคำนวณความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เตรียมเป็นมาตรฐาน

การคำนวณความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เตรียมเป็นมาตรฐาน หลังจากเตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 3 6 9 12 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู แสดงดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลอง

ค.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนปีของสารดูดซับ
ทั้ง 6 ชนิด

ทดลองที่สภาวะการทดลอง: ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นสีย้อมโรห์ตามีนปี 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

พีเอชสารละลายเริ่มต้น 5

ตารางที่ ค.1.1 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนปี และประสิทธิภาพ
การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe-MOF

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.984	4.99	0.00
5	5	0.845	4.27	14.38
10	5	0.807	4.07	18.31
15	5	0.858	4.34	13.03
20	5	0.833	4.21	15.62
25	5	0.865	4.37	12.31
30	5	0.863	4.36	12.52

ตารางที่ ค.1.2 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนปี และประสิทธิภาพ
การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe/C600

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.987	5.00	0.00
5	5	0.254	1.22	75.58
10	5	0.154	0.71	85.89
15	5	0.117	0.51	89.71
20	5	0.096	0.40	91.87
25	5	0.102	0.43	91.26
30	5	0.080	0.32	93.52

ตารางที่ ค.1.3 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ดามีนบี และประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Cu-MOF

เวลา (นาท)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.984	4.99	0.00
5	5	0.957	4.85	2.79
10	5	0.910	4.60	7.65
15	5	0.896	4.53	9.10
20	5	0.911	4.61	7.55
25	5	0.918	4.65	6.83
30	5	0.894	4.52	9.31

ตารางที่ ค.1.4 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ดามีนบี และประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Cu/C600

เวลา (นาท)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	1.005	5.09	0.00
5	5	0.744	3.75	26.42
10	5	0.734	3.70	27.43
15	5	0.735	3.70	27.33
20	5	0.738	3.72	27.03
25	5	0.727	3.66	28.14
30	5	0.711	3.58	29.76

ตารางที่ ค.1.5 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายอีเอ็มโรห์ตามีนบี และประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ AC1

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.987	5.00	0.00
5	5	0.422	2.09	58.26
10	5	0.480	2.39	52.28
15	5	0.403	1.99	60.22
20	5	0.340	1.66	66.71
25	5	0.292	1.42	71.66
30	5	0.292	1.42	71.66

ตารางที่ ค.1.6 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายอีเอ็มโรห์ตามีนบี และประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ AC2

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.980	4.97	0.00
5	5	0.469	2.33	53.07
10	5	0.619	3.10	37.49
15	5	0.538	2.69	45.91
20	5	0.545	2.72	45.18
25	5	0.558	2.79	43.83
30	5	0.559	2.79	43.73

ค.2 ศึกษาผลของความอุณหภูมิของการคาร์บอนเซชันตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโรห์ตามีนบี

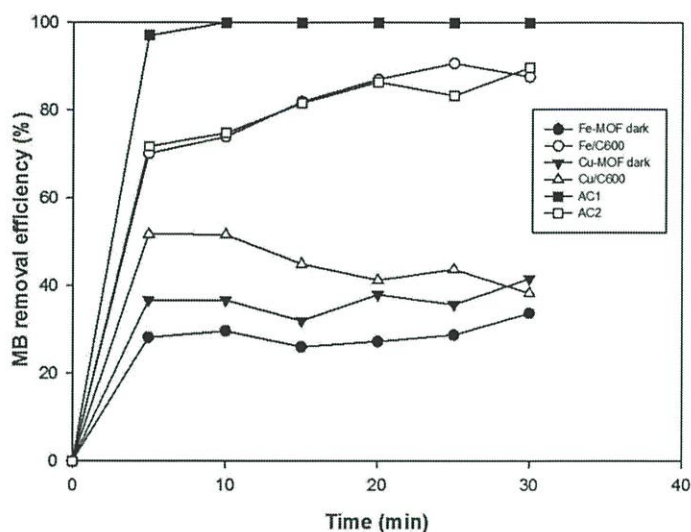
ตารางที่ ค.2.1 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบี และประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe/C400

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.987	5.00	0.00
5	5	0.889	4.50	10.11
10	5	0.854	4.32	13.71
15	5	0.868	4.39	12.27
20	5	0.873	4.41	11.76
25	5	0.876	4.43	11.45
30	5	0.840	4.24	15.16

ตารางที่ ค.2.2 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรห์ตามีนบี และประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe/C800

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น RhB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.979	4.96	0.00
5	5	0.185	0.87	82.55
10	5	0.145	0.66	86.71
15	5	0.110	0.48	90.35
20	5	0.077	0.31	93.78
25	5	0.074	0.29	94.09
30	5	0.058	0.21	95.76

ค.3 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของสารดูดซับ ทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารดูดซับกับประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเมทิลีนบลู
ที่ปริมาณสารดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสีของเมทิลีนบลู
เริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาการดูดซับ 30 นาที พีเอช 5

ทดลองที่สภาวะการทดลอง: ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นสีของเมทิลีนบลู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

พีเอชสารละลายเริ่มต้น 5

ตารางที่ ค.3.1 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีของเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ
การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe-MOF

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.597	3.49	27.64
10	5	0.585	3.42	29.09
15	5	0.614	3.59	25.58
20	5	0.604	3.53	26.79
25	5	0.592	3.46	28.24
30	5	0.552	3.23	33.09

ตารางที่ ค.3.2 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสี้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ
การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe/C400

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.486	2.84	41.09
10	5	0.480	2.81	41.82
15	5	0.577	3.37	30.06
20	5	0.563	3.29	31.76
25	5	0.567	3.32	31.27
30	5	0.516	3.02	37.45

ตารางที่ ค.3.3 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสี้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ
การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe/C600

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.257	1.50	68.85
10	5	0.226	1.32	72.61
15	5	0.161	0.94	80.48
20	5	0.120	0.70	85.45
25	5	0.090	0.53	89.09
30	5	0.115	0.67	86.06

ตารางที่ ค.3.4 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสี้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ

การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Fe/C800

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.084	0.49	89.82
10	5	0.075	0.44	90.91
15	5	0.049	0.29	94.06
20	5	0.032	0.19	96.12
25	5	0.017	0.10	97.94
30	5	0.008	0.05	99.03

ตารางที่ ค.3.5 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสี้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ

การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Cu-MOF

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.528	3.09	36.00
10	5	0.528	3.09	36.00
15	5	0.566	3.31	31.39
20	5	0.518	3.03	37.21
25	5	0.536	3.13	35.03
30	5	0.488	2.85	40.85

ตารางที่ ค.3.6 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ

การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ Cu/C600

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.406	2.37	50.79
10	5	0.407	2.38	50.67
15	5	0.461	2.70	44.12
20	5	0.491	2.87	40.48
25	5	0.471	2.75	42.91
30	5	0.515	3.01	37.58

ตารางที่ ค.3.7 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ

การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ AC1

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.039	0.23	95.27
10	5	0.009	0.05	98.91
15	5	0.003	0.02	99.64
20	5	0.003	0.02	99.64
25	5	0.004	0.02	99.52
30	5	0.002	0.01	99.76

ตารางที่ ค.3.8 ค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพ
การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ AC2

เวลา (นาที)	พีเอช	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น MB (mg/L)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	5	0.825	4.82	0.00
5	5	0.244	1.43	70.42
10	5	0.219	1.28	73.45
15	5	0.164	0.96	80.12
20	5	0.125	0.73	84.85
25	5	0.150	0.88	81.82
30	5	0.098	0.57	88.12