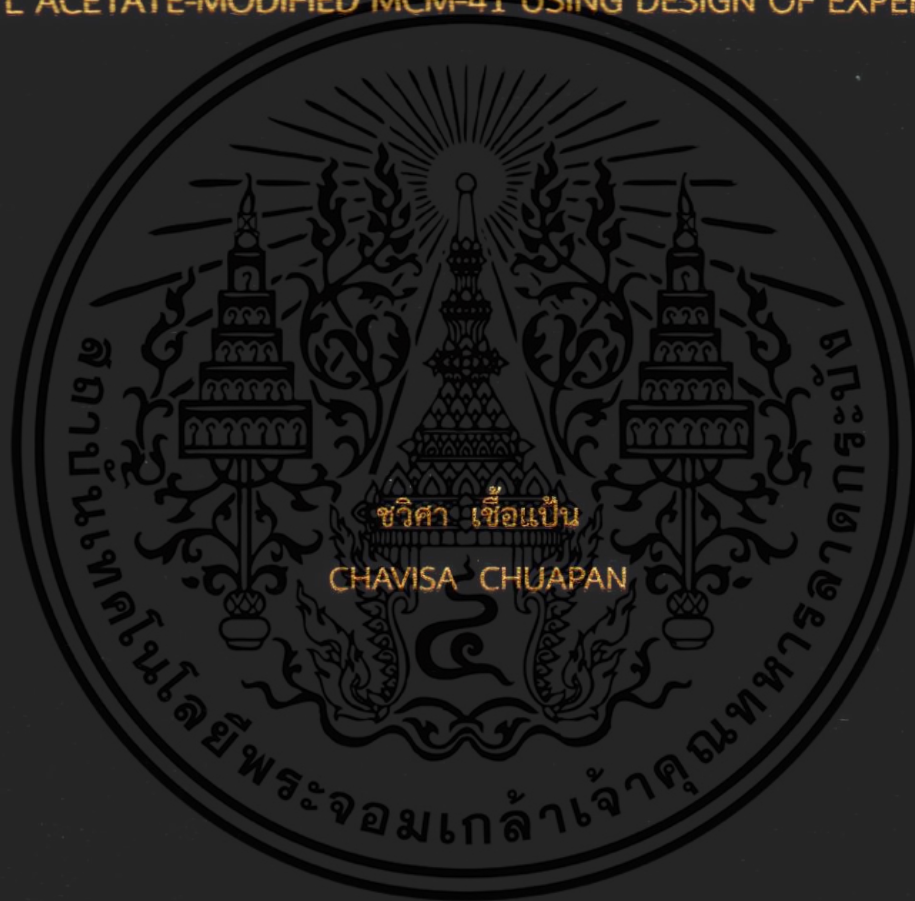


การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลูด้วย MCM-41
ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

STUDY OF FACTORS AFFECTING METHYLENE BLUE ADSORPTION BY
ETHYL ACETATE-MODIFIED MCM-41 USING DESIGN OF EXPERIMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-115

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมททิลีนบลูด้วย MCM-41
ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

STUDY OF FACTORS AFFECTING METHYLENE BLUE ADSORPTION BY
ETHYL ACETATE-MODIFIED MCM-41 USING DESIGN OF EXPERIMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-220-115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF FACTORS AFFECTING METHYLENE BLUE ADSORPTION BY
ETHYL ACETATE-MODIFIED MCM-41 USING DESIGN OF EXPERIMENT



CHAVISA CHUAPAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-220-115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลูด้วย MCM-41
ที่ผ่านกระบวนการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

Thesis Title Study of Factors Affecting Methylene Blue Adsorption by
Ethyl Acetate-Modified MCM-41 Using Design of Experiment

นักศึกษา นางสาวชวีศา เชื้อแป้น

รหัสประจำตัว 57601352

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-115

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|--------------|------------------------|
| ผศ.ดร.วัลย์รัตน์ | จันทร์อัมพร | วัลย์รัตน์ จันทร์อัมพร |
| ผศ.ดร.ญาณิพร | พัชรารชิต | ญาณิพร พุทธิ |
| ผศ.ดร.สุธาสิณี | เนรมิตตกพงศ์ | สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์ |
| ผศ.ดร.สันติ | วัฒนานุสรณ์ | สันติ วัฒนานุสรณ์ |
| ผศ.ดร.พรสวรรค์ | อัครแสงรัตน์ | พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลูด้วย MCM-41 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง |
| นักศึกษา | นางสาวชวิศา เชื้อแป้น |
| รหัสประจำตัว | 57601352 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| พ.ศ. | 2559 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยเติมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 1.88 2.50 3.77 5.63 และ 7.54 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ได้สูงสุดถึง 19.12 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่นๆ จากนั้นปรับเปลี่ยนปริมาณสารก่อโครงสร้าง CTAB : SiO₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 1.24 เป็น 0.33 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่างกันอย่างไรไม่มีนัยสำคัญ จึงใช้ตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q) ได้แก่ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ([MB]) ค่า pH (pH) เวลา (time) และอุณหภูมิ (Temp) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและใช้โปรแกรม Minitab พบว่าผลกระทบหลัก คือ [MB] pH และ Temp ผลกระทบร่วม คือ [MB]·pH และ pH·Temp ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า q เรียงตามลำดับความสำคัญ คือ [MB] pH [MB]·pH Temp และ pH·Temp ตามลำดับ จากนั้นศึกษาสถานะที่เหมาะสม (Optimization) ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite สามารถสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสองใน coded units ได้ดังนี้ $q = 33.003 + 6.971[MB] + 4.550pH - 3.183[MB] \cdot [MB] - 2.398pH \cdot pH + 1.367[MB] \cdot pH$ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดที่หาได้จากโปรแกรม Minitab คือ ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 48.6908 มิลลิกรัมต่อลิตรและที่ค่า pH เท่ากับ 11.0083 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุดเท่ากับ 40.8814 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับทำการทดลองเพื่อยืนยันผลที่ได้จากโปรแกรม Minitab ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 48.70 มิลลิกรัมต่อลิตรและที่ค่า pH เท่ากับ 11 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุดเท่ากับ 42.77 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองและจากโปรแกรม Minitab เท่ากับ 4.62 เปอร์เซ็นต์ และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้สมการของแลงเมียร์และ

ฟรุนดลิช พบว่าการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis | Study of Factors Affecting Methylene Blue Adsorption by Ethyl Acetate-Modified MCM-41 Using Design of Experiment |
| Student | Ms.Chavisa Chuapan |
| Student ID. | 57601352 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Chemical Engineering |
| Year | 2016 |
| Thesis Advisor | Asst.Prof.Dr.Pornsawan Assawasaengrat |

ABSTRACT

This research aims to modify MCM-41 using ethyl acetate to increase methylene blue adsorption efficiency by varying molar ratios of EtAc : SiO₂ were 1.88, 2.50, 3.77, 5.63, and 7.54, respectively. Among molar ratios were studied, EtAc : SiO₂ = 2.50 adsorbed the highest amount of methylene blue (25 mg/l initial concentration, 1 hour at room temperature) i.e. 19.12 mg/g adsorbent. Molar ratios of CTAB : SiO₂ were varied from 1.24 to 0.33. However, it was found molar ratios of CTAB : SiO₂ did not insignificantly affect methylene blue adsorption capacities. Then MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.5) was studied factors affecting methylene blue adsorption capacities (q), such as concentration of methylene blue ([MB]), pH, time, and temperature (Temp), were also investigated using full factorial design with Minitab. The results showed that main effect of factors were [MB], pH and Temp, and interaction were [MB]•pH and pH•Temp. The importance of factors affected to q in the following order, i.e. [MB], pH, [MB]•pH, Temp, and pH•Temp, respectively. Next, optimization of factors was investigated using Central Composite design. The results showed that regression models for q (coded units) was $q = 33.003 + 6.971[MB] + 4.550pH - 3.183[MB] \cdot [MB] - 2.398pH \cdot pH + 1.367[MB] \cdot pH$. The maximum of q from Minitab sets as follows : 48.6908 mg/l of methylene blue concentration and pH 11.0083 adsorbed the highest amount of methylene blue i.e. 40.8814 mg/g adsorbent. The maximum of q from experiment sets as follows : 48.70 mg/l of methylene blue concentration and pH 11 adsorbed the highest amount of methylene blue i.e. 42.77 mg/g adsorbent. Error from Minitab and the experiment was 4.62%. Finally, adsorption isotherm of methylene blue was studied, found that fitted by Freundlich adsorption isotherm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์จากคณาจารย์และบุคคลหลายท่าน ซึ่งข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย ดังนี้

ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

เหล่าคณาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำแก่ข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

น้อง พี่ และเพื่อนทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือ คอยเป็นกำลังใจในระหว่างการทำดำเนินงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และบุคคลในครอบครัวทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจ จนประสบความสำเร็จทางการศึกษา และสามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ชวิศา เชื้อแป้น

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | IX |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 สารประกอบซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (Silica : SiO ₂)..... | 3 |
| 2.1.1 สมบัติทั่วไป ประเภท และโครงสร้างของซิลิกา..... | 3 |
| 2.1.2 หมู่ซิลานอล (Silanol Group)..... | 4 |
| 2.2 วัสดุพรุน (Porous Material)..... | 5 |
| 2.2.1 ลักษณะทั่วไปของวัสดุพรุน..... | 5 |
| 2.2.2 วัสดุพรุนประเภท Mesoporous Molecular Sieve | 6 |
| 2.2.2.1 ลักษณะและสมบัติทั่วไปของวัสดุ MCM-41..... | 6 |
| 2.2.2.2 การสังเคราะห์และการสร้าง (Formation) วัสดุ MCM-41 | 7 |
| 2.2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์วัสดุ MCM-41 | 8 |
| 2.3 สีย้อม | 9 |
| 2.3.1 ประเภทของสีย้อม | 10 |
| 2.3.2 เมททิลีนบลู (Methylene Blue)..... | 11 |
| 2.4 การดูดซับ (Adsorption)..... | 12 |
| 2.4.1 นิยามการดูดซับ | 12 |
| 2.4.2 กลไกการดูดซับ | 13 |
| 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ..... | 13 |
| 2.4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)..... | 14 |
| 2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)..... | 16 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.5.1 การออกแบบการทดลองทางสถิติ..... | 16 |
| 2.5.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง | 17 |
| 2.5.3 แนวทางในการออกแบบการทดลอง..... | 18 |
| 2.5.4 ขั้นตอนดำเนินการออกแบบการทดลอง | 18 |
| 2.5.4.1 การวางแผน..... | 18 |
| 2.5.4.2 การคัดกรอง..... | 19 |
| 2.5.4.3 การหาค่าที่เหมาะสม | 19 |
| 2.5.4.4 การทวนสอบ | 20 |
| 2.5.5 ประเภทของแบบการทดลอง..... | 20 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 23 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 25 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์..... | 25 |
| 3.2 สารเคมี | 26 |
| 3.3 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ..... | 26 |
| 3.3.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41..... | 26 |
| 3.3.2 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตต..... | 26 |
| 3.4 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับ..... | 27 |
| 3.4.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)..... | 27 |
| 3.4.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller : BET) | 27 |
| 3.5 การดูดซับเมทิลีนบลู..... | 27 |
| 3.5.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู..... | 27 |
| 3.5.2 การหาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู..... | 28 |
| 3.5.3 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู..... | 28 |
| 3.6 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง | 29 |
| 3.6.1 การคัดกรองปัจจัย (Screening factors)..... | 29 |
| 3.6.1.1 การออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ..... | 29 |
| 3.6.1.2 การวิเคราะห์การถดถอย..... | 29 |
| 3.6.1.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง..... | 30 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

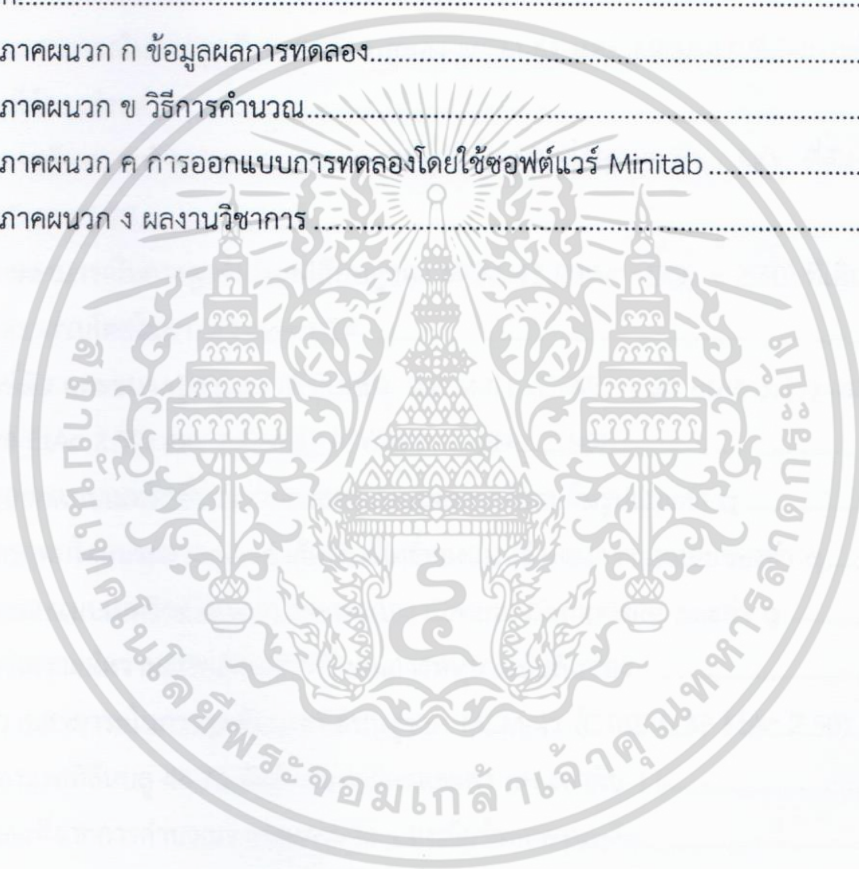
| | |
|--|----|
| 3.6.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ..... | 30 |
| 3.6.2.1 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite..... | 30 |
| 3.6.2.2 การวิเคราะห์การถดถอย..... | 31 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง..... | 32 |
| 4.1 ผลการสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ | 32 |
| 4.2 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 และ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ | 34 |
| 4.3 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO ₂ เท่ากับ 2.50 (MCM-41 (EtAc : SiO ₂ = 2.50)) ที่เติม CTAB ที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 34 |
| 4.4 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (EtAc : SiO ₂ = 2.50) ที่เติม CTAB ที่อัตราส่วนต่างๆ | 35 |
| 4.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยเทคนิคบีอีที..... | 36 |
| 4.6 การคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q)..... | 37 |
| 4.6.1 Normal plot of the standardized effects..... | 39 |
| 4.6.2 แผนภูมิ Pareto | 40 |
| 4.6.3 Main effects and interactions plots..... | 40 |
| 4.6.4 แบบจำลองการถดถอยของค่า q..... | 41 |
| 4.6.5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง | 42 |
| 4.6.6 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง | 43 |
| 4.7 การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู..... | 43 |
| 4.7.1 แบบจำลองพหุนามอันดับสอง..... | 44 |
| 4.7.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง | 45 |
| 4.7.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง | 46 |
| 4.7.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู..... | 46 |
| 4.7.5 การทวนสอบเพื่อยืนยันผลการวิจัย | 48 |
| 4.8 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู..... | 49 |
| 4.8.1 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) | 49 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| 4.8.2 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)..... | 49 |
| 4.8.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้ทฤษฎีของแลงเมียร์และฟรุนดลิช..... | 50 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 53 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 53 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 54 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 55 |
| ภาคผนวก..... | 59 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง..... | 60 |
| ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ..... | 69 |
| ภาคผนวก ค การออกแบบการทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab..... | 71 |
| ภาคผนวก ง ผลงานวิชาการ..... | 82 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุรูพรุน..... | 5 |
| 2.2 สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างโมเลกุลของเมททีลีนบลู..... | 12 |
| 2.3 ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล..... | 20 |
| 2.4 การกำหนดค่า Resolution ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน..... | 21 |
| 2.5 สรุพวัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ..... | 22 |
| 3.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป..... | 29 |
| 3.2 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite..... | 30 |
| 4.1 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 32 |
| 4.2 ความสามารถในการดูดซับเมททีลีนบลูของ MCM-41 และ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ..... | 34 |
| 4.3 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 (EtAc : SiO ₂ = 2.50) ที่เติม CTAB : SiO ₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24..... | 35 |
| 4.4 ความสามารถในการดูดซับเมททีลีนบลูของ MCM-41 (EtAc : SiO ₂ = 2.50) ที่เติม CTAB : SiO ₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24..... | 36 |
| 4.5 พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)..... | 37 |
| 4.6 การออกแบบเมทริกซ์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปและค่า q..... | 38 |
| 4.7 ผลกระทบโดยประมาณและค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยของค่า q..... | 42 |
| 4.8 การออกแบบเมทริกซ์ของการทดลองแบบ Central Composite และค่า q..... | 44 |
| 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการพหุนามอันดับสอง..... | 45 |
| 4.10 ความสามารถในการดูดซับเมททีลีนบลูของ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ที่ความเข้มข้นของเมททีลีนบลู 48.70 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่า pH เท่ากับ 11..... | 48 |
| 4.11 ค่าคงที่จากการคำนวณจากสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช..... | 51 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของซิลิกาที่อุณหภูมิต่างๆ | 3 |
| 2.2 ชนิดของหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา | 4 |
| 2.3 การเกิดพันธะไฮดรอกเซน | 5 |
| 2.4 ลักษณะโครงสร้างของวัสดุตระกูล M41S ที่สังเคราะห์จาก $C_{16}TMA/SiO_2/H_2O$ | 6 |
| 2.5 กลไกการเกิด MCM-41 (1) liquid-crystal-phase และ (2) silicate-anion..... | 7 |
| 2.6 แผนภาพภูมิภาคของสารลดแรงตึงผิวในน้ำ..... | 9 |
| 2.7 การแบ่งประเภทวัสดุตามไอโซเทอร์มการดูดซับ แสดงทั้งการดูดซับและการคายซับ..... | 15 |
| 2.8 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต..... | 17 |
| 4.1 กราฟ XRD ของตัวดูดซับ (a) MCM-41 และ (b) MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ | 33 |
| 4.2 กราฟ XRD ของ MCM-41 (EtAc : $SiO_2 = 2.50$) ที่เติม CTAB : SiO_2 ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24 | 35 |
| 4.3 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)..... | 37 |
| 4.4 กราฟ Normal plot of the standardized effects | 39 |
| 4.5 แผนภูมิ Pareto ของค่า q..... | 40 |
| 4.6 กราฟ Main effects plot..... | 41 |
| 4.7 กราฟ Interaction plot | 41 |
| 4.8 กราฟ Residual plot..... | 43 |
| 4.9 กราฟ Residual plot ของแบบจำลองพหุนามอันดับสอง | 46 |
| 4.10 กราฟ Surface plot..... | 47 |
| 4.11 กราฟ Contour plot..... | 47 |
| 4.12 Optimization plot..... | 48 |
| 4.13 ความสามารถในการดูดซับเมททีลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 40 60 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาในการดูดซับต่างๆ | 49 |
| 4.14 ไอโซเทอร์มการดูดซับเมททีลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)..... | 50 |
| 4.15 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับของสารละลายเมททีลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) โดยใช้สมการของแลงเมียร์..... | 50 |
| 4.16 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับของสารละลายเมททีลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) โดยใช้สมการของฟรุนดลิช..... | 51 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้สร้างปัญหาหลากหลายอย่างมากมาย เช่น ปัญหาในเรื่องน้ำเสีย อากาศเสียหรือกากของเสียอุตสาหกรรม และนับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะปัญหาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสี เป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างยิ่ง เนื่องจากใช้น้ำในกระบวนการผลิตเกือบทุกขั้นตอน และมักจะมีสีย้อมตกค้างอยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำมีสีที่ไม่พึงประสงค์และอาจส่งกลิ่นเหม็น หากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่มีการบำบัด จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายในน้ำได้ดีทำให้กำจัดออกจากน้ำเสียได้ยาก หากเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากจะก่อให้เกิดอันตราย เช่น เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง หัวใจเต้นเร็ว ผิดปกติ หายใจลำบาก เป็นต้น ดังนั้นจึงควรกำจัดสีย้อมในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ กระบวนการในการกำจัดสีย้อมที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง คือ การดูดซับ (Adsorption) ซึ่งมีข้อดี คือ ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ [1 - 4]

MCM-41 เป็นวัสดุ mesoporous molecular sieve ชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) เนื่องจากมีการกระจายขนาดรูพรุนแคบ สามารถปรับขนาดของรูพรุนได้ในช่วง 1.5 - 10 นาโนเมตร ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่า 0.6 ลูกบาศก์-เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวสูงถึง 700 - 1500 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้สูง สามารถดัดแปรสมบัติบนพื้นผิวได้ [5] การดัดแปร MCM-41 มีหลากหลายวิธี อาทิเช่น การเติมสารอินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มขนาดรูพรุน แต่วิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มขนาดรูพรุนได้เพียงเล็กน้อย [6]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการดัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลู โดยเอทิลอะซิเตตทำหน้าที่เป็นสารก่ออิมัลชันที่ดัดแปรให้ตัวดูดซับมีรูพรุน 2 ขนาดในโครงสร้างเดียวกัน [6] และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์วัสดุ MCM-41 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลู

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

1.2.3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสม (Optimization) ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์วัสดุ MCM-41 และวัสดุ MCM-41 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 1.88 2.50 3.77 5.63 และ 7.54

1.3.2 ศึกษาการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคบีอีที

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ค่า pH เวลา และ อุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

1.3.4 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

1.3.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 สามารถเตรียมและดัดแปรวัสดุ MCM-41 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูได้

1.4.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

1.4.3 ทราบสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

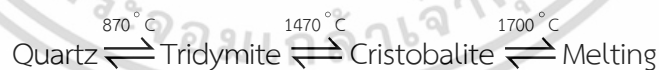
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (Silica : SiO₂)

2.1.1 สมบัติทั่วไป ประเภท และโครงสร้างของซิลิกา [7, 8]

ซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของธาตุซิลิคอน มีสูตรโมเลกุลคือ SiO₂ มีลักษณะเป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น พบโดยทั่วไปบนผิวโลกในรูปของทรายควอตซ์ และหินบางชนิด ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว ผงขัด วัสดุทนไฟ และผลิตภัณฑ์เซรามิก เป็นต้น สมบัติของซิลิกา คือ เป็นของแข็ง มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดประมาณ 1700 และ 2230 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติและไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด แต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ โดยรูปแบบของซิลิกาที่เกิดขึ้นในธรรมชาติแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ซิลิกาในรูปผลึก (Crystalline Silica) และซิลิกาในรูปอสัณฐาน (Amorphous Silica)

1. ซิลิกาในรูปผลึก พบในรูปสินแร่ มีการจัดเรียงอะตอมของโครงสร้างอย่างมีระเบียบและต่อเนื่อง มีรูปร่างเป็นระบบผลึกที่แน่นอนภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยโครงสร้างผลึกที่พบมากจะมีโครงสร้างเป็นแบบทรงสี่หน้า (Tetrahedral) โครงสร้างผลึกของซิลิกามีหลายรูปแบบ อาทิเช่น ควอตซ์ (Quartz) ไตรไดไมท์ (Tridymite) และคริสโตบาไลท์ (Cristobalite) ซึ่งรูปแบบของผลึกทั้งสามจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการจัดเรียงตัวของผลึก โดยควอตซ์จะเป็นรูปแบบที่พบมากที่สุดและมีความเสถียรมากที่สุด อุณหภูมิที่เสถียรน้อยกว่า 870 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างของซิลิกาจะค่อยๆ เปลี่ยนจากควอตซ์เป็นไตรไดไมท์ซึ่งมีอุณหภูมิที่เสถียร 870 - 1470 องศาเซลเซียส และคริสโตบาไลท์ซึ่งมีอุณหภูมิที่เสถียร 1470 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของซิลิกาที่อุณหภูมิต่างๆ [8]

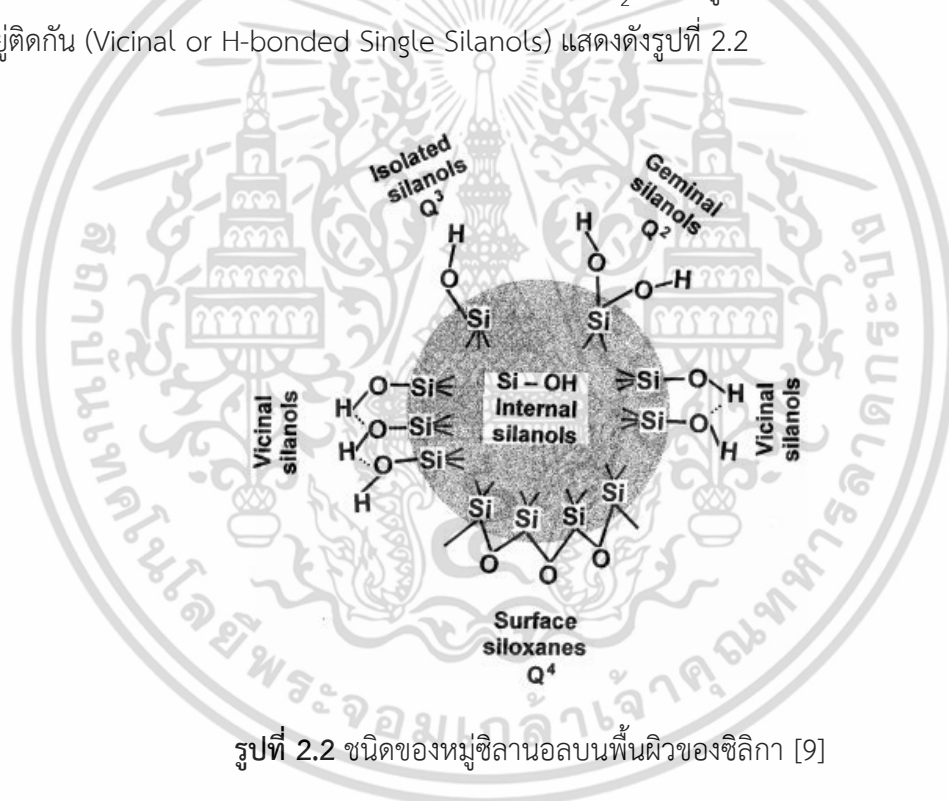
2. ซิลิกาในรูปอสัณฐาน เกิดขึ้นในธรรมชาติและสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปร่างไม่แน่นอน ไม่เป็นผลึก มีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ เช่น แก้วซิลิกาเจล (Silica Gel) เป็นต้น ซิลิกาในรูปอสัณฐานจะเกิดปฏิกิริยาได้ไวกว่าซิลิกาในรูปผลึก เพราะซิลิกาในรูปอสัณฐานมีพื้นผิวมากกว่า เมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) จะไม่ปรากฏพีคให้เห็น ซิลิกาในรูปอสัณฐานมี 2 รูปแบบ คือ ซิลิกาที่มีน้ำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบ (Hydrate) และซิลิกาที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Dehydrate) โดยซิลิกาที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจะพบจากตะกอนที่เกิดหลังจากฝนตกในรูป $\text{Si}(\text{OH})_4$ ส่วนซิลิกาที่ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจะอยู่ในรูปของซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการเผาซิลิกาที่อุณหภูมิสูง แม้ว่าซิลิกาในรูปผลึกและซิลิกาในรูปอสัณฐานจะมีสูตรเคมีเหมือนกัน แต่มีสมบัติต่างๆ ต่างกัน เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

2.1.2 หมู่ซิลานอล (Silanol Group) [7 - 10]

หมู่ซิลานอล คือ หมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดพันธะกับอะตอมของซิลิคอนบนพื้นผิวของซิลิกา ($\equiv \text{Si} - \text{OH}$) หมู่ซิลานอลแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ 1) หมู่ซิลานอลอิสระหรือหมู่ซิลานอลเดี่ยว (Isolated free or Single Silanol : $\equiv \text{SiOH}$) 2) หมู่ซิลานอลสองหมู่ที่อยู่บนอะตอมของซิลิคอนตัวเดียวกัน (Geminal Silanols or Silanediols : $= \text{Si}(\text{OH})_2$) 3) หมู่ซิลานอลบนอะตอมของซิลิคอนที่อยู่ติดกัน (Vicinal or H-bonded Single Silanols) แสดงดังรูปที่ 2.2

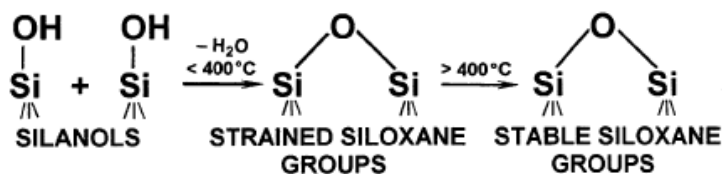


รูปที่ 2.2 ชนิดของหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา [9]

แต่ละอนุภาคของซิลิกาแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ดังนี้ ชั้นแรกเป็น Inner Core ชั้นที่ 2 เป็นหมู่ซิลานอลอิสระ ชั้นที่ 3 จะเกิดการรวมตัวระหว่างหมู่ซิลานอลกับโมเลกุลของน้ำ เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน และชั้นที่ 4 เป็นโมเลกุลของน้ำ (Free Water) หมู่ซิลานอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี จึงเป็นสมบัติที่ใช้เป็นตัวดูดซับได้

เมื่อให้ความร้อนแก่ซิลิกาจนถึงประมาณ 400 องศาเซลเซียส หมู่ซิลานอลจะเปลี่ยนเป็นพันธะซิลอกเซน (Siloxane : $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$) แสดงดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเกิดพันธะซิลอกเซน [10]

หมู่ซิลานอลจะเป็นบริเวณเร่ง (Active Site) ของซิลิกา ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยา Silanization กับสารประกอบพวก Organochloro หรือ Organoaloxo Silane ได้ เกิดเป็นพันธะซิลอกเซนที่เสถียร หมู่ซิลานอลสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ได้ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของพันธะซิลอกเซน และหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกดึงเข้ามาใกล้กันจนเกิดพันธะไฮโดรเจน ทำให้พื้นผิวของซิลิกามีความเป็นขี้ (Hydrophilic)

2.2 วัสดุรูพรุน (Porous Material)

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของวัสดุรูพรุน

วัสดุรูพรุนตามคำนิยามของ IUPAC สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามขนาดของรูพรุน ได้แก่ วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) วัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2 - 50 นาโนเมตร ได้แก่ Mesoporous Molecular Sieve เช่น MCM-41 และ SBA-15 และวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร สามารถพบได้ตามธรรมชาติ เช่น ดินเบา (Diatoms) ฟองน้ำ (Sponges) ไม้คอร์ก (Cork) และเนื้อไม้ (Wood) วัสดุรูพรุนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchanger) และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [11] ซึ่งวัสดุดังกล่าวนี้สามารถแบ่งประเภทตามขนาดรูพรุนได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุรูพรุน [12]

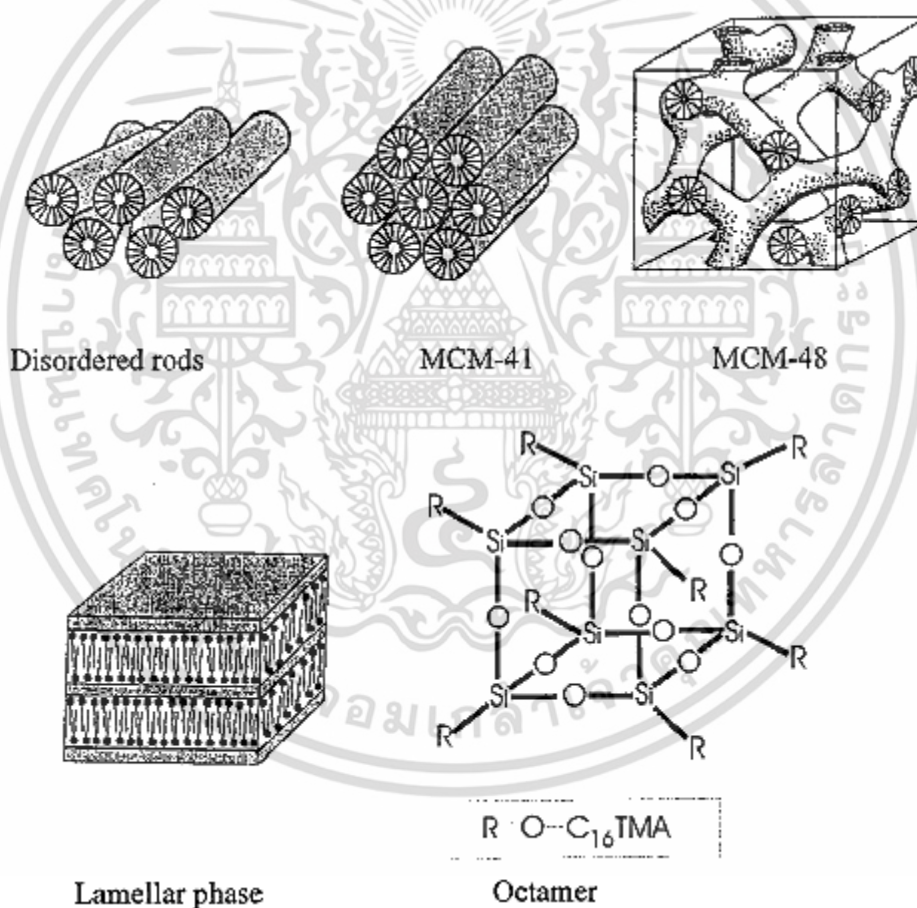
| Types of porous material | Diameter of pores (nm) | Examples |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Microporous | Diameter < 2 | Zeolites, AlPO_4 |
| Mesoporous | $2 < \text{Diameter} < 50$ | HMS, MCM-41, SBA-15 |
| Macroporous | Diameter > 50 | Porous gel, Porous glasses |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 วัสดุพรุนประเภท Mesoporous Molecular Sieve

วัสดุตระกูล M41S จัดเป็นวัสดุประเภท Mesoporous Molecular Sieve ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกค้นพบโดยทีมิววิจัยของบริษัทโมบิล (Mobil Corporation) ในปี ค.ศ. 1992 เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นซิลิกาที่มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนแคบและรูพรุนมีความเป็นระเบียบสูง มีพื้นที่ผิวสูง สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. วัสดุตระกูล M41S ที่มีเสถียรภาพทางความร้อน ได้แก่ MCM-41 มีโครงสร้างเป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) 1 มิติ และ MCM-48 มีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) 3 มิติ
2. วัสดุตระกูล M41S ที่ไม่เสถียรทางความร้อน ได้แก่ MCM-50 มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบชั้น (Lamellar) และ Molecular Organic Octamer ซึ่งลักษณะโครงสร้างของวัสดุตระกูล M41S [5, 11] แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของวัสดุตระกูล M41S ที่สังเคราะห์จาก C₁₆TMA/SiO₂/H₂O [5]

2.2.2.1 ลักษณะและสมบัติทั่วไปของวัสดุ MCM-41

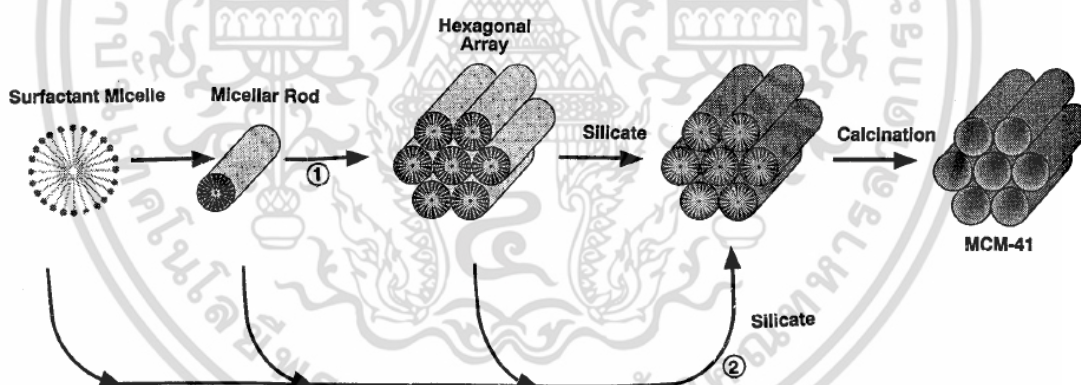
MCM-41 (Mobil Crystalline of Matter Number 41 or Mobil Composite of Matter Number 41) จัดเป็นวัสดุตระกูล M41S ชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมาก เนื่องจากการกระจายขนาดรูพรุนแคบ ผลของการเชื่อมโยงรูพรุน (Pore Network) หรือ การปิดกั้นรูพรุนน้อย สามารถปรับขนาดของรูพรุนได้ในช่วง 1.5 - 10 นาโนเมตร ปริมาตรรูพรุน ขนาดใหญ่ (มากกว่า 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) พื้นที่ผิวสูงถึง 700 - 1500 ตารางเมตรต่อกรัม หมู่ซิลานอล (Silanol Group) จำนวนมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้สูง สามารถดัดแปรสมบัติ บนพื้นผิวได้ เสถียรภาพทางความร้อน ทางเคมีและเชิงกลดี [5]

2.2.2.2 การสังเคราะห์และการสร้าง (Formation) วัสดุ MCM-41

1. กลไกการเกิดวัสดุ MCM-41

กลไกการเกิดโครงสร้าง MCM-41 เกิดจากการรวมตัวของตัวเอง (Self-assembly) ของสารลดแรงตึงผิวที่มีโครงสร้างเป็นประจุบวกเป็นไมเซลล์ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Micelle Rod) จากนั้นไมเซลล์ทรงกระบอกนี้จะจัดเรียงตัวเป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal Array) ที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honey Comb) เมื่อเติมซิลิกาที่เป็นประจุลบจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุที่ เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulombic Force) ที่ผิวของไมเซลล์ แล้วนำสารไปเผาแคลไซน์ (Calcination) หรือสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) เพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิว จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น วัสดุ MCM-41 ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งการเกิดโครงสร้าง MCM-41 มี 2 แนวทาง คือ Liquid-crystal-phase และ Silicate-anion [7] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิด MCM-41 (1) Liquid-crystal-phase และ (2) Silicate-anion [5]

แนวทางที่ 1 คือ Liquid-crystal-phase เกิดขึ้นก่อนที่จะเติมซิลิเกต ไอออน โดยสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นไมเซลล์ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Micelle Rod) หลังจากนั้นเมื่อเติมซิลิเกตไอออนจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) เกิดเป็น โครงสร้าง MCM-41

แนวทางที่ 2 คือ Silicate-anion จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิเกตไอออน กับสารลดแรงตึงผิว นั่นคือชนิดของซิลิเกตมีอิทธิพลต่อความเป็นระเบียบของสารลดแรงตึงผิวที่ รวมตัวกันเป็นไมเซลล์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสังเคราะห์วัสดุ MCM-41

การสังเคราะห์วัสดุ MCM-41 มีองค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ 3 ส่วน คือ 1) แหล่งกำเนิดซิลิกา ซึ่งเป็นโครงสร้างหลัก เช่น เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl-orthosilicate : TEOS) โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) หรือซิลิกาฟุ้งซึ่งเป็นซิลิกาที่อยู่ในรูปออสซิลานและไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ 2) สารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นสารกำหนดโครงสร้าง (Structure Directing Agents) เช่น เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammonium bromide : CTAB) โดยสารลดแรงตึงผิวจัดเป็นสารพวก Amphiphilic Molecules ซึ่งเป็นสารหรือโมเลกุลที่มีทั้งส่วนที่มีขั้ว (Hydrophilic) คือ ส่วนหัว (Head Group) ที่ชอบน้ำ และส่วนที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic) คือ ส่วนหาง (Tail Group) ที่ไม่ชอบน้ำ 3) ตัวทำละลาย (Solvent) เช่น น้ำ

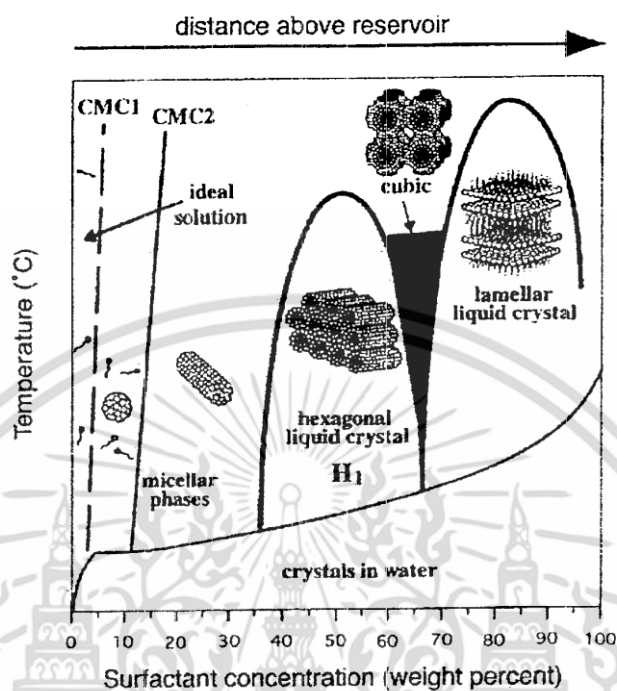
ขั้นตอนในการสังเคราะห์ประกอบด้วย 1) เคมีไมเซลล์ (Micelle Chemistry) 2) กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel Process) และ 3) การอบแห้งและการเผาแคลไซน์ (Drying and Calcination) โดยเริ่มจากการนำสารกำหนดโครงสร้างมาละลายในตัวทำละลาย จากนั้นโมเลกุลของสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายซึ่งมีขั้วจะเกาะกันเป็นกลุ่มในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยโมเลกุลที่มีขั้วจะเกาะกันล้อมรอบโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งสามารถเกาะกลุ่มกันเป็นรูปทรงกลมหรือแท่ง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายนั้นๆ ขั้นตอนนี้เรียกว่า เคมีไมเซลล์ ขั้นตอนต่อไปเป็นการเติมแหล่งกำเนิดซิลิกาซึ่งเป็นโครงสร้างหลัก เพื่อให้ไปเกาะกับสารกำหนดโครงสร้าง ขั้นตอนนี้เรียกว่า กระบวนการโซล-เจล ในกระบวนการโซล-เจลจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้อนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่เรียกว่า โซล (Sol) อนุภาคเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นโครงข่าย ผ่านกลไกแบบพอลิเมอไรเซชันคอนเดนเซชัน (Condensation Polymerization) เกิดเป็นเจล (Gel) ซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีสมบัติระหว่างของแข็งกับของเหลว จากนั้นนำเจลที่ได้ไปอบแห้งและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนหรืออากาศ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน เช่น สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ใช้เป็นสารกำหนดโครงสร้าง รวมทั้งไอออนบวกและไอออนลบที่ไม่เสถียร เมื่อสารกำหนดโครงสร้างสลายตัวไปจะทิ้งโครงสร้างรูพรุนไว้ [5, 11]

2.2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์วัสดุ MCM-41

1. ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมตัวของตัวเอง (Self-assembly) โดยที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแทนด้วย C ถ้าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวน้อยกว่า Critical Micelle Concentration (CMC) 1 ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่สมบัติต่างๆ ของสารลดแรงตึงผิวจะมีการเปลี่ยนแปลง โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่อย่างอิสระ เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น คือ $CMC_1 < C < CMC_2$ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่รวมตัวกันเป็นไมเซลล์ทรงกลม (Spherical Micelle) เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น คือ $CMC < C < LC$ (Liquid Crystalline) หรือ ผลึกเหลว ไมเซลล์ทรงกลมจะมีการรวมกันเป็นรูปทรงกระบอก (Micelle Rod) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอีกไมเซลล์ที่เป็นรูปทรงกระบอกจะมีการรวมตัวเป็นแบบหกเหลี่ยม แบบลูกบาศก์และแบบชั้นตามลำดับ [13] แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพวิวัฒนาการของสารลดแรงตึงผิวในน้ำ [13]

2. ค่าความเป็นกรด-เบส

ค่าความเป็นกรด-เบส หรือ pH เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกและสมบัติของผลึก เมื่อเริ่มปรับค่า pH พบว่าผลึกเริ่มเกิดขึ้น แต่มีปริมาณน้อย เมื่อปรับจนได้ค่า pH ที่เหมาะสมจะทำให้ผลึกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และมีปริมาณมาก [7]

2.3 สีย้อม

สีย้อม (Dye) คือ สียชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดสามารถละลายน้ำได้ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic Bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดุดกสีนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน ซึ่งสายตาสสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกัน ซึ่งแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาท่างกันไป [14]

2.3.1 ประเภทของสีย้อม

ปัจจุบันสามารถแบ่งสีย้อมออกได้หลายประเภท เพื่อให้เหมาะกับเส้นใยแต่ละชนิดและกระบวนการย้อมซึ่งมีลักษณะต่างกัน โดยวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน เพราะสีย้อมผ้าที่มีคุณภาพต้องมีความคงทนต่อการซัก แสง และความร้อน ซึ่งกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งสีย้อมตามวิธีใช้เป็น 12 ประเภท ได้แก่ [15]

1. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีที่ผลิตขึ้นโดยมีวัสดุประสงค์เพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate) และนำมาย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ได้ดี เนื่องจากเส้นใยทั้งสองประเภทสามารถดูดน้ำได้น้อย สีดีสเพอร์สมีสมบัติทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีซีดง่ายหากถูกคว้นหรือกำซาบางชนิด สีประเภทนี้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะแขวนตัวเป็นละอองขนาดเล็กมากลอยตัวในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing Agent) ที่เหมาะสมสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดา ไม่ต้องใช้สารเคมีชนิดอื่นช่วย นอกจากสารพา (Carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น

2. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำมีฤทธิ์เป็นเบส สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นเบส กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70 - 75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสีทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดเส้นใย

3. สีเบสิก (Basic Dyes) เป็นเกลือของด่างอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ให้ประจุบวก (Cation) บางครั้งเรียกสีแคทไอออน ถ้าย้อมเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนสะพานเชื่อมโยงระหว่างตัวสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่า สารช่วยติด (Mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใส แต่ไม่ทนแสง

4. สีแอซิด (Acid Dyes) คือ ตัวสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์กรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และเส้นใยพอลิเอไมด์ (Polyamide) เป็นต้น

5. สีเมอร์แดนท์และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and Premetallized Dyes) เป็นสีแอซิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex) กับโลหะบางชนิดได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปใหม่นี้ไม่ละลายน้ำ ตามทฤษฎีเชื่อกันว่าโครงสร้างของเส้นใยจะสามารถรวมตัวกับไอออนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะ ก่อรูปเป็นสารประกอบภายในทำให้สีมีความคงทนดีขึ้น ตัวสีเหล่านี้ยังคงเรียกว่า สีไดเรกต์ ส่วนที่เรียกว่า สีมอร์แดนท์ต้องเป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะเส้นใยโปรตีน

6. สีไดเรกต์ (Direct Dyes) เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่ติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด บางครั้งเรียกสีย้อมฝ้าย ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (Azo) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิก ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

7. สีเอโซอิก (Azoic Dyes) เป็นสีในกลุ่มสารประกอบเอโซเหมือนกัน แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล (Phenol) ซึ่งละลายน้ำได้ก่อน สีในกลุ่มนี้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น เพราะสารประกอบฟีนอลเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน

8. สีวัต (Vat Dyes) เป็นสีที่มีความคงทนที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยอาศัยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมจึงจะติดเส้นใยเซลลูโลสได้ อย่างไรก็ตามไม่ใช่สีวัตทุกตัวจะมีความคงทนเหมือนกัน นอกจากนี้สีวัตสามารถย้อมเส้นใยโปรตีน เส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้ด้วย

9. สีกำมะถัน (Sulphur or Sulphide Dyes) สีประเภทนี้ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายในน้ำที่มีสภาพเป็นเบส สีชนิดนี้ไม่สดใส

10. สีออกซิไดซ์ (Oxidation Colorants) เป็นสีที่มีความคงทน แต่ไม่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรม

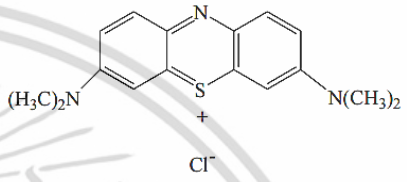
11. สีโอเนียม (Onium Dyes) เป็นสีพิกเมนต์ที่ละลายน้ำได้ โดยเลือกพิกเมนต์ที่มีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและแสงนำมาปรับปรุงให้มีกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้ นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อม

12. สีมิเนอรัล (Mineral Colorants) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไม่ละลายน้ำ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

2.3.2 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)

เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมประเภทสีเบสสิค มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในสภาวะที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) เมทิลีนบลูมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีเขียวเข้ม ละลายได้ดีในน้ำ และละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ [1, 16] หากเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากจะก่อให้เกิดอันตราย เช่น เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง หัวใจเต้นเร็วผิดปกติ หายใจลำบาก เป็นต้น [4] สมบัติต่างๆ ของเมทิลีนบลูแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลู [17]

| | |
|---------------------------------------|--|
| Color index number | 52015 |
| CAS number | 61-73-4 |
| Chemical formula | C ₁₆ H ₁₈ N ₈ S ⁺ Cl ⁻ |
| Molecular weight (g L ⁻¹) | 319.85 g mol ⁻¹ |
| Molecular volume | 390.2 (cm ³ /g mol) |
| λ _{max} | 664 nm |
| Solubility in water | 1 g/25 mL |
| Molecular structure |  |
| IUPAC name | 3,7-bis(Dimethylamino)-phenothiazin-5-ium chloride |
| Type of dye | Cationic |

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

2.4.1 นิยามการดูดซับ [18, 19]

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์การสะสมสารไว้บนพื้นผิวของของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของของแข็งนั้น ของแข็งที่เก็บสะสมสารบนพื้นผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารที่สะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในกระบวนการดูดซับ โมเลกุลอะตอมหรือไอออนในวัฏภาคก๊าซหรือของเหลวจะแพร่กระจายบนพื้นผิวของของแข็งและสร้างพันธะบนพื้นผิวของของแข็งหรือเกิดแรงระหว่างโมเลกุล เพื่อให้ประสิทธิภาพการดูดซับบนพื้นผิวเกิดได้ดี (พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรมาก) ตัวดูดซับควรมีรูพรุนขนาดเล็ก รูพรุนมีการเชื่อมต่อกัน (Interconnected Pores) ซึ่งการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) จะเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) คือ เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารละลาย โดยการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและอาจเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบชั้นเดียว (Monomolecular Layer) สองชั้น หรือหลายชั้น (Multimolecular Layer) ความหนาแน่นของตัวถูกดูดซับจะมีผลกับวัฏภาคของเหลวมากกว่าก๊าซ เมื่อเกิดการดูดซับทางกายภาพขึ้น จะเริ่มเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวแล้วค่อยๆ กลายเป็นแบบหลายชั้น จนกระทั่งรูพรุนเต็มไปด้วยตัวถูกดูดซับ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะสัมพันธ์

กับปริมาตรรูพรุนมากกว่าพื้นที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption or Chemisorption) จะเกิดการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยเกิดการดูดซับแบบขั้นเดียว และมักจะมีการปลดปล่อยความร้อนออกมา

2.4.2 กลไกการดูดซับ

การเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ [7]

1. Bulk Transport เป็นขั้นตอนแรกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่จาก Bulk Solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ
2. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) หรือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ข้ามผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวหน้าของตัวดูดซับ
3. การแพร่ภายใน (Intraparticle Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore Diffusion) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ
4. การดูดซับ เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับบนผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [7]

1. ธรรมชาติของโมเลกุลตัวดูดซับ ถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวของโมเลกุลตัวดูดซับเป็นสมบัติที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวของโมเลกุลตัวดูดซับยังไม่เพียงพอที่จะใช้อธิบายความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับแพร่เข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้มาก การดูดซับก็จะเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง

2) ขนาดของตัวดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ กล่าวคือ ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่

2. ธรรมชาติของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ

1) ความสามารถในการละลาย เป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย กล่าวคือ ถ้าสารมีความสามารถในการละลายได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับตัวทำละลายมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายได้น้อย ทำให้การดูดซับลดลง

2) ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ค่า pH มีความสัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) โดยที่ค่า pH ต่ำจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่า pH สูง ซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับ

หรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับที่มีตำแหน่งดูดซับเป็นประจุลบ ถ้าสารละลายมีค่า pH ต่ำ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากแย่งกันถูกดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับที่มีประจุเป็นบวกกับไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย ในทางกลับกันถ้าสารละลายมีค่า pH สูงจะมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) มาก จึงลดผลการเข้าแย่งจับกับตัวถูกดูดซับ ส่วนในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบจะให้ผลตรงกันข้าม

3) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง จึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดรูพรุนจะถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เนื่องจากสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีน้อยเนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

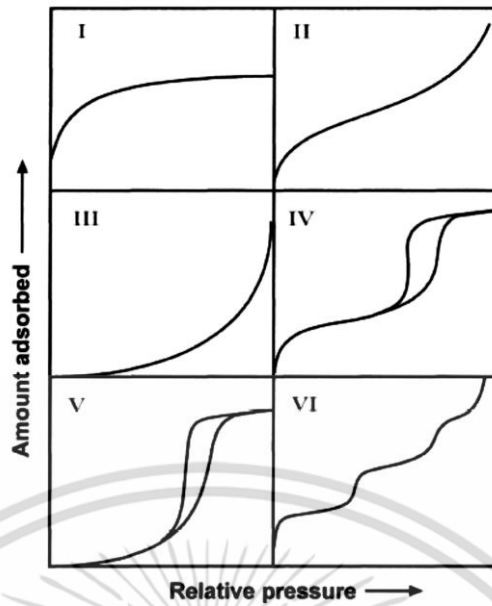
4) อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับประเภทของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีและเพิ่มโอกาสให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่ดูดซับได้มากขึ้น

3. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ผ่านรูพรุน ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (ไม่ถูกรบกวน) ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่ก่อตัวเป็นฟิล์มหนา ส่งผลให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

นอกจากทาง IUPAC จะแบ่งประเภทวัสดุรูพรุนตามขนาดของรูพรุนแล้ว IUPAC ยังแบ่งประเภทวัสดุรูพรุนตามการดูดซับก๊าซ ซึ่งอธิบายด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับ ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ชนิด ดังนี้ ชนิดที่ 1 เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ชนิดที่ 2 3 และ 6 เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ชนิดที่ 4 และ 5 เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง [20] แสดงดังรูปที่ 2.7 สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุ MCM-41 จัดเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับชนิดที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การแบ่งประเภทวัสดุตามไอโซเทอร์มการดูดซับ แสดงทั้งการดูดซับและการคายซับ [20]

ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวของของแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่อธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ทฤษฎีที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ทฤษฎีของแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดลิช (Freundlich) [1, 7]

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) 2) โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ที่จำกัดบนผิวของตัวดูดซับ 3) พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ 4) พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ 5) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ จากสมมติฐานต่างๆ สามารถเขียนสมการของแลงเมียร์ได้ ดังสมการที่ (2.1)

$$q_e = \frac{q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.1)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม-ตัวดูดซับ)

q_0 คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือในสภาวะสมดุล
สมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ (2.2)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0} + \frac{1}{K_L q_0} \cdot \frac{1}{C_e} \quad (2.2)$$

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_0$ และความชันเท่ากับ $1/K_L q_0$

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิชใช้ได้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ สามารถอธิบายการดูดซับของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับได้หลายประเภท ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิชพัฒนามาจากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) สมการของฟรอนด์ลิช แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.3)$$

สมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช แสดงดังสมการที่ (2.4)

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

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ฟรอนด์ลิช

n คือ ค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่างกัน

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K_F$ และความชันเท่ากับ $1/n$

2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

2.5.1 การออกแบบการทดลองทางสถิติ [21, 22]

การออกแบบการทดลองทางสถิติ หมายถึง กระบวนการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ เพื่อให้ได้ผลที่ต้องการและข้อสรุปที่สมเหตุสมผล โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output หรือ Response) โดยตัวแปรนำเข้าจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable or Factor) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Variable) และตัวแปรหรือปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable or Factor Variable) แสดงดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองจึงมีดังนี้

1. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองมากที่สุด
2. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ
3. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ตัวแปรตอบสนองมีความแปรปรวนน้อยที่สุด
4. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ผลกระทบต่อตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.8 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต [21]

2.5.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง [21]

1. การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การจัดสรรวัสดุในการทดลองและลำดับของการทดสอบแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะมีการกระจายได้อย่างอิสระ การทำการทดลองแบบสุ่มจะช่วยลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้
2. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีจุดประสงค์เพื่อช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดจากการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าเฉลี่ยที่แท้จริงที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง การทำการทดลองซ้ำจะทำให้ประมาณค่าได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น
3. การทำการทดลองแบบบล็อก เป็นเทคนิคที่ใช้เพิ่มความแม่นยำ (Precision) ในการทดลอง หรือลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 แนวทางในการออกแบบการทดลอง [21, 22]

1. กำหนดปัญหาที่ต้องการแก้ไข เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะได้กำหนดปัญหาในการทดลองได้อย่างชัดเจนและเพื่อระบุวัตถุประสงค์ของการทดลองให้มีความสมเหตุสมผล
2. การเลือกตัวแปรตอบสนอง โดยเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับกระบวนการที่ศึกษา
3. การเลือกปัจจัยและการกำหนดระดับของปัจจัย ต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง
4. การเลือกการออกแบบการทดลอง ในการเลือกการออกแบบการทดลองต้องพิจารณาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (จำนวนการทดลองซ้ำ) การเลือกลำดับการทดลอง และต้องคำนึงถึงการบล็อก การทำการทดลองซ้ำ หรือข้อจำกัดอื่นๆ ด้วย
5. การดำเนินการทดลอง ต้องคำนึงถึงหลักการดังนี้ คือ ทดลองแบบสุ่ม แต่ละการทดลองต้องทำการทดลองซ้ำ พยายามลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง การทำการทดลองต้องไม่มีอคติ วิเคราะห์ตรงประเด็น และต้องมีการวัดผลที่ชัดเจนและแม่นยำ
6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะเน้นหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์ด้วยกราฟค่าเฉลี่ย (Mean Plot) และกราฟผลกระทบรวมของปัจจัย (Interaction Plot) ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติมากมาย เช่น SPSS Minitab Statistica SAS Statgraphics และอื่นๆ ให้เลือกใช้
7. การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

2.5.4 ขั้นตอนดำเนินการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการออกแบบการทดลองส่วนมากจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน (Planning) การคัดกรอง (Screening) การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) [23]

2.5.4.1 การวางแผน

การวางแผนที่ดีจะช่วยลดปัญหาระหว่างทำการทดลอง เช่น คน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เงินทุน และวิธีการทดลอง ควรมีการวางแผนและจัดสรรทรัพยากรให้ดี ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดปัญหา (Define the problem) การกำหนดปัญหาที่มีขอบเขตที่ชัดเจนจะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรถูกต้อง และสามารถตอบคำถามได้ตามที่ต้องการ
2. กำหนดวัตถุประสงค์ (Define the objective) การกำหนดวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะทำให้มั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะดำเนินการนั้นสามารถตอบคำถามได้ตรง และข้อมูลที่ได้นั้นใช้ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง ในขั้นตอนนี้ควรมีการ ทบทวนถึงสิ่งต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น หลักการทางทฤษฎี หรือข้อมูลในอดีต

4. กระบวนการและระบบการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุมโดยหลักทาง ทฤษฎี ทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยหลักการทางการ ควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control : SPC) ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรที่จะสามารถทำซ้ำและให้ค่า กระบวนการแบบเดิม รวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของ กระบวนการที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้ อาจจะไม่ค่อยมีประโยชน์มากนัก

2.5.4.2 การคัดกรอง

ในการทดลองหนึ่งๆ ส่วนมากจะมีตัวแปรจำนวนมากที่อาจส่งผลต่อตัวแปร- ตอบสนองที่เราสนใจศึกษา ดังนั้นการคัดกรองจึงเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มี จำนวนน้อยลง โดยคัดกรองตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองที่เราสนใจศึกษา การลดจำนวน ตัวแปรนี้ทำให้สามารถพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้น การคัดกรองอาจจะ ทำให้สามารถหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ ได้ รวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ซึ่งวิธีที่ใช้ในการคัดกรอง ตัวแปรมีดังต่อไปนี้

1. Two-Level Full Factorial และ Fractional Factorial ซึ่งในวงการ อุตสาหกรรมใช้กันอย่างแพร่หลาย
2. Plackett-Burman แม้ว่าจะมี Resolution น้อย แต่ว่ามีประโยชน์อย่าง มากต่อการทำการทดลองเพื่อคัดกรองตัวแปร
3. General Full Factorial (ปัจจัยที่มีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) มี ประโยชน์ในการทำการทดลองเพื่อคัดกรองตัวแปรที่มีจำนวนตัวแปรไม่มากนัก

2.5.4.3 การหาค่าที่เหมาะสม

หลังจากที่มีการคัดกรองตัวแปร ขั้นตอนถัดมาจะทำการหาค่าที่เหมาะสมของ ตัวแปรเหล่านี้โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนองของตัวแปร (Response Surface Methodology) โดย ใช้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์แบบ Central Composite Design และ Box- Behnken Design ในกรณีที่ค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (Multiple Responses) สามารถใช้ โปรแกรม Minitab ซึ่งมีทั้งวิธี Numerical Optimization Interactive Graph และ Overlaid Contour Plot ในการหาค่าที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4.4 การทวนสอบ

การทวนสอบเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบว่าค่าที่วิเคราะห์มาได้จากโปรแกรม Minitab นั้นเป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถให้ผลลัพธ์ได้จริง โดยทำการทดลองที่สภาวะตามค่าที่หามาจากค่าที่เหมาะสม

2.5.5 ประเภทของแบบการทดลอง [22]

1. การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ทั้งผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา หรือ Interaction Factor) ผลกระทบของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล

| ผลกระทบหลัก (Main Effect) | ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Way Interactions) | ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (3-Way Interactions) |
|------------------------------|--|--|
| A | AB | ABC |
| B | AC | |
| C | BC | |

จำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (ไม่รวมการทดลองซ้ำ) เท่ากับ a^k โดยที่ a คือ จำนวนระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย k คือ จำนวนปัจจัยที่ศึกษา ข้อดีของการทำการทดลองแบบนี้ คือ ไม่มีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน (No Aliased Structure) และศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ส่วนข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองแปรผันตามจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนปัจจัย

2. การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) นิยมใช้กับการทดลองที่มีเวลา งบประมาณ และทรัพยากรที่จำกัด โดยทั่วไปนิยมศึกษาที่ 2 ระดับ จำนวนการทดลองเท่ากับ 2^{k-p} หรือ 3^{k-p} ข้อดีของการทำการทดลองแบบนี้ คือ ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองน้อย ส่วนข้อเสีย คือ การตีความผลจะซับซ้อน เนื่องจากในการทดลองมีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อนของผลกระทบ จึงต้องกำหนดค่า Resolution ที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา แสดงดังตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การกำหนดค่า Resolution ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน

| Resolution | สรุปรายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบ |
|------------|---|
| III | ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลัก แต่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย จึงเหมาะสำหรับคัดกรองปัจจัย |
| IV | ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย แต่ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยซ้ำซ้อนกัน จึงเหมาะสำหรับศึกษาผลกระทบหลัก |
| V | ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยไม่ซ้ำซ้อนกัน จึงเหมาะสำหรับศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ในกรณีที่สนใจผลกระทบตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป |

3. การทดลองแบบ Plackett-Burman (Plackett-Burman Design) ใช้ในการคัดกรองปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ เพื่อให้สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน จำนวนการทดลอง (n) โดยที่ไม่ทำการทดลองซ้ำเท่ากับ 2^p หรือ 3^p เมื่อ p เท่ากับ 0, 1, 2, ..., 6 ข้อดี คือ การกำหนดจำนวนการทดลองที่จำกัดในการศึกษาปัจจัยได้จำนวนมากพร้อมๆ กัน ข้อเสีย คือ จำนวนปัจจัยหลักที่ศึกษาได้สูงสุดไม่เกิน $n-1$ เสมอ และเนื่องจากแบบการทดลองนี้มี Resolution III จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญสูง

4. การทดลองแบบ Box-Behnken (Box-Behnken Design) เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพ และนิยมใช้ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ใช้หลักการของ 2^2 การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบที่ผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Point) จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า 3^k การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ การทดลองแบบ Box-Behnken สามารถประมาณผลกระทบในรูปของพหุนามอันดับสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ แต่ใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย ข้อดี คือ สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effect) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Interaction) แต่มีข้อเสีย คือ จำนวนครั้งที่ทดลองมากและไม่สามารถลดจำนวนได้ และยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการทดลองแบบ Central Composite เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป

5. การทดลองแบบ Central Composite (Central Composite Design : CCD)

เหมาะสำหรับในการศึกษาหรือสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสอง (Second-order or Quadratic) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model) การทดลองแบบ CCD มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับ การทดลองอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองพหุนามอันดับสอง ข้อดีของการทดลองแบบ CCD คือ 1) เหมาะสำหรับการศึกษาสมการพหุนามอันดับสองมากที่สุด ในกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factor) 2) ความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า รวมทั้งเลือกใช้ได้ทั้งการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับและการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน 3) โครงสร้างซ้ำซ้อนสำหรับ Resolution III หรือ IV สามารถคำนวณได้ เช่นเดียวกับ 2^{k-p} การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน 4) สามารถแยกการทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของแฟคทอเรียล (Factorial Portion) เพื่อสร้างสมการเชิงเส้นในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับและคาดการณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Point) ถ้าสมการเชิงเส้นไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial Point) จะได้สมการพหุนามอันดับสอง ข้อเสียของการทดลองแบบ CCD คือ ไม่เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factor) สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย โดยทำการเปรียบเทียบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน การทดลองแบบ Box-Behnken และการทดลองแบบ CCD แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปวัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ

| แบบการทดลอง | วัตถุประสงค์ในการทดลอง |
|----------------------|---|
| 3^k Full Factorial | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองและผลกระทบร่วมได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ แต่ใช้งบประมาณมาก |
| 3^{k-p} | <ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีน้อย และไม่เหมาะในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณทั้งหมด - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นและผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองได้ทั้งหมด ในกรณีที่ Resolution ที่ใช้มีค่ามาก สามารถประมาณผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ |
| Box-Behnken | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณเท่านั้น - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ทุกค่า |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

| แบบการทดลอง | วัตถุประสงค์ในการทดลอง |
|-------------|--|
| CCD | <ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่ถ้ามีปัจจัยเชิงคุณภาพเพียง 1 ปัจจัย ยังคงใช้ CCD ได้ - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นได้ทุกค่า และสามารถเลือกศึกษาผลกระทบกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ตามระบุ - เป็นแผนการทดลองที่ดีที่สุดในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณที่ 3 ระดับ |

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Schulz-Ekloff et al. (1999) [24] ศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลางโดยการควบคุมโครงสร้างรูพรุนและสัณฐานวิทยาด้วยวิธีการตกตะกอน โดยใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นสารกำหนดโครงสร้าง เมื่อค่า pH ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของเอทิลอะซิเตต จะเกิดอนุภาคของแข็งขึ้น ซึ่งวิธีการนี้ไม่เพียงแต่จะสังเคราะห์ได้ MCM-41 ที่รูพรุนมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบสูง แต่ยังสามารถสังเคราะห์ได้ MCM-41 ที่มีรูพรุน 2 ขนาดในโครงสร้างเดียวกัน คือ ขนาดเล็กเท่ากับ 3 นาโนเมตรและขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 10 - 30 นาโนเมตร

Bernal et al. (2012) [6] ศึกษากลไกการเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ (11 - 23 นาโนเมตร) ของ MCM-41 โดยการผสมโซเดียมซิลิเกต เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ และเอทิลอะซิเตตด้วยอัตราส่วนโดยโมล คือ $1\text{SiO}_2 : 1\text{Na}_2\text{O} : x\text{CTAB} : y\text{EtAc} : 237\text{H}_2\text{O}$ (x เท่ากับ 0.33 หรือ 0.65 และ y เท่ากับ 3 6 9 หรือ 15) ที่อุณหภูมิ 25 และ 80 องศาเซลเซียส โดยมีเอทิลอะซิเตตทำหน้าที่เป็นสารก่ออิมัลชัน เมื่อค่า pH ลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเอทิลอะซิเตต จะเกิดการควบแน่นได้ตะกอนซิลิกาเกิดขึ้น โดยอัตราส่วนโดยโมลของ CTA/SiO₂ (ซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นซิลิกาปกคลุมไมเซลล์ในโครงสร้าง MCM-41) หาได้จากพื้นที่ที่ถูกปกคลุมด้วย CTA แคทไอออนบริเวณส่วนหัวของไมเซลล์และพื้นที่ tetrahedral ในชั้นซิลิกา จำนวนซิลิเกตแอนไอออนจะไปชดเชย CTA แคทไอออนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียโครงสร้าง tetrahedral ในชั้นซิลิกาขึ้นอยู่กับค่า pH และอัตราส่วนโดยโมลของ CTA/SiO₂ และการเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ขึ้นอยู่กับค่า pH ซึ่งมาจากการปรับปริมาตรเอทิลอะซิเตต เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาว ขดตัวเป็นก้อนกลม เนื่องมาจากความอ่อนตัวของอนุภาค จึงทำให้เกิดช่องว่างจำนวนมาก

รวินทร์ สุทธะนันท์และโกวิท ยิมะมังคลา (2011) [1] ศึกษาการใช้แคลบดัดแปรทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก มาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสีย้อมเมทิลีนบลูมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับจากแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าสมการแลงเมียร์ ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับจากแบบจำลอง Pseudo-first Order และ Pseudo-second Order พบว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second Order อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.308 ถึง 0.965 มิลลิกรัมต่อกรัม-นาทึ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูจาก 20 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ข้อมูลทางเทอร์โมเคมี พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนมีค่าเท่ากับ -23.322 กิโลจูลต่อโมล การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 67.585 จูลต่อโมลเคลวิน และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ -44.856 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้

Xiao et al. (2015) [4] ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุ MCM-41 ที่มีการเติม NiO (NiO/MCM-41) โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี เพื่อให้ได้วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบสูง จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ NiO/MCM-41 พบว่าโครงสร้างของวัสดุ NiO/MCM-41 มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบสูง โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 435.9 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับของวัสดุ NiO/MCM-41 ในการกำจัดสีย้อมเอโซ (Azo) เช่น เมทิลออเรนจ์ คองโกเรด เมทิลีนบลู และโรห์ดามีน บี พบว่ามีความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูออกจากน้ำเสียภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องได้สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์

Cao et al. (2014) [25] ศึกษาการออกแบบทดลองแบบ Central Composite โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) สำหรับการกำจัดโครเมียม (VI) ออกจากสารละลาย โดยใช้ MCM-41 ที่เติมหมู่ฟังก์ชันเอมีน (NH_2 -MCM-41) ศึกษาตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร คือ ค่า pH เริ่มต้น ความเข้มข้นของไอออนโลหะ อุณหภูมิ และปริมาณตัวดูดซับ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองพหุนามอันดับสอง พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองและจากการคาดการณ์มีค่าใกล้เคียงกัน สามารถกำจัดโครเมียม (VI) ได้สูงสุด 98.70 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 3.5 ความเข้มข้นของไอออนโลหะโครเมียม (VI) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัมต่อลิตร

Ghaedi et al. (2014) [17] ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ที่เตรียมได้จากขยะชะเอม (Dross Licorice) โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปร ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปร คือ ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH เท่ากับ 7 และใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม ที่ผ่านการโซนิเคชัน (Sonication) 16 นาที สำหรับกระบวนการถ่ายโอนมวล สามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และมีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงถึง 82.9 มิลลิกรัมต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 50 100 250 และ 500 มิลลิลิตร
2. ปีเปต ขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
3. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. กระจกตวง
5. ขวดวัดปริมาตร
6. หลอดหยด
7. ซ้อนตักสารพลาสติก
8. ซ้อนตักสารเหล็ก
9. กระจกนาฬิกา
10. กระจกกรอง
11. กระจกน้ำกลั่น
12. แท่งกวนแม่เหล็ก
13. เครื่องให้ความร้อนพร้อมปั่นกวน
14. อลูมิเนียมฟอยด์
15. Teflon-lined autoclave
16. บีมสุญญากาศ
17. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
18. เครื่องชั่งสาร
19. เครื่องเขย่าชนิดควบคุมอุณหภูมิ
20. เครื่องปั่นเหวี่ยง
21. เครื่อง Visible Spectrophotometer
22. ตู้อบ
23. เตาเผา
24. เครื่องวัดค่า pH
25. เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)
26. เครื่อง Surface Area and Porosity Meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมซิลิเกต เกรด extra pure บริษัท Merck
2. เฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB : $C_{19}H_{42}NBr$) ความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
4. เอทิลอะซิเตต ($CH_3COOC_2H_5$) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
5. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
6. เมทิลีนบลู บริษัท Ajax
7. น้ำกลั่น

3.3 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ

3.3.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41

1. ชั่ง CTAB 4.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 90 กรัม พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
3. เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต 17.5 มิลลิลิตร และปรับค่า pH ของสารละลายให้เท่ากับ 10 ด้วยกรดซัลฟิวริก นำสารละลายที่ได้ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ได้เทใส่ลงใน Teflon-lined Autoclave และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
5. กรองและล้างสารด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เท่ากับ 7 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
6. นำสารที่ได้ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.3.2 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตต

องค์ประกอบในการสังเคราะห์ MCM-41 คือ $1SiO_2 : 1Na_2O : 1.24CTAB : xEtAc$

1. ชั่งสารละลายโซเดียมซิลิเกต 100 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25.62 กรัม ปั่นกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ชั่งสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1. ปริมาณ 4.6 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 35 กรัม ปั่นกวนจนสารละลาย (สารละลาย A)
3. ชั่ง CTAB 4.66 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 34 กรัม พร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนสารละลาย (สารละลาย B)
4. นำสารละลาย A ค่อยๆ เติมลงในสารละลาย B พร้อมปั่นกวนจนสารละลาย
5. เติมเอทิลอะซิเตต x มิลลิลิตร อย่างรวดเร็วพร้อมปั่นกวน 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำสารละลายที่ได้เทใส่ลงใน Teflon-lined Autoclave ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำสารไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

7. กรองและล้างสารด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เท่ากับ 7 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

8. นำสารที่ได้ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

9. ทำการสังเคราะห์สารใหม่ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของ CTAB จาก 1.24 เป็น 0.33

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับ

3.4.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ใช้รังสีเอกซ์ $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.154$ นาโนเมตร) ในช่วง 1 - 10 องศา

3.4.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller : BET)

การวิเคราะห์บีอีที จะศึกษาสมบัติความเป็นรูพรุน (Porosity) พื้นที่ผิวจำเพาะ (S_{BET}) ขนาดรูพรุน (Pore size) และปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ของตัวดูดซับโดยอาศัยหลักการดูดซับและการคายซับก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับ

3.5 การดูดซับเมทิลีนบลู

3.5.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสารละลายเมทิลีนบลู 0.01 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 5 10 15 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

4. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การหาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

1. ชั่งตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ปริมาณ 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูป-ชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู
3. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
4. นำสารละลายตัวอย่างมาแยกตัวดูดซับโดยการเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
5. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวดูดซับด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer และคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เหลือ โดยใช้กราฟ-มาตรฐาน
6. คำนวณหาปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ (3.1)

$$q_t = \left[\frac{c_0 - c_t}{m} \right] \times \frac{V}{1000} \quad (3.1)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

c_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

c_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

V คือ ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ (มิลลิลิตร)

หมายเหตุ : ปรับ pH ของสารละลายเมทิลีนบลูด้วย 0.1M NaOH และ 0.1M HCl

3.5.3 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู

1. เลือกใช้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด โดยชั่งตัวดูดซับ 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู
3. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ดังนี้ 5 10 15 20 25 30 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำสารละลายตัวอย่างมาแยกตัวดูดซับโดยการเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
5. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวดูดซับด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer และคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เหลือ โดยใช้กราฟ-มาตรฐาน
6. คำนวณหาปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ (3.1)
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 - 6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูจาก 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 40 60 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.6 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

3.6.1 การคัดกรองปัจจัย (Screening factors)

3.6.1.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ค่า pH เวลา และอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ เนื่องจากมีจำนวนปัจจัยในการศึกษาค่อนข้างมาก ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรม Minitab การทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง ในหนึ่งบล็อกของการวัด และลำดับการทดลองแบบสุ่ม ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

| ปัจจัย | หน่วย | ระดับ | |
|---------------------------------|-------|----------|----------|
| | | สูง (+1) | ต่ำ (-1) |
| ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ([MB]) | mg/l | 45 | 25 |
| ค่า pH (pH) | - | 10 | 4 |
| เวลา (time) | min | 90 | 60 |
| อุณหภูมิ (Temp) | °C | 55 | 35 |

3.6.1.2 การวิเคราะห์การถดถอย

สำหรับการคัดกรองปัจจัยจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบฟังก์ชัน First-order Response [26] ดังสมการที่ 3.2

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ β_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่จุดตัด
 β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น
 β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ร่วม
 x_i และ x_j คือ ตัวแปรอิสระใน Coded Units
 ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

3.6.1.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ANOVA ที่มีนัยสำคัญของการถดถอยหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและตัวแปรถดถอยผ่านการทดสอบทางสถิติฟิชเชอร์ (F-test) R^2 มีค่า 0 - 1 [26] ดังสมการที่ 3.3

$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \left(\frac{SSE}{SST} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ SST และ SSE เป็นผลรวมกำลังสองและผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน ตามลำดับ

3.6.2 การหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

3.6.2.1 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite

ในงานวิจัยนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite ในการหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู เนื่องจากการทดลองแบบ Central Composite มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองอื่นๆ โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนองของปัจจัย (Response Surface Methodology) การทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite

| ปัจจัย | หน่วย | ระดับ | | |
|---------------------------------|-------|----------|----------|----------|
| | | สูง (+1) | กลาง (0) | ต่ำ (-1) |
| ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ([MB]) | mg/l | 45 | 35 | 25 |
| ค่า pH (pH) | - | 10 | 7 | 4 |
| อุณหภูมิ (Temp) | °C | 55 | 45 | 35 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.2 การวิเคราะห์การถดถอย

สำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยไม่เชิงเส้น (Non-linear Regression Method) ซึ่งสอดคล้องกับสมการพหุนามอันดับสอง (Second-order Polynomial) [27] แสดงดังสมการที่ 3.4

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.4)$$

เมื่อ β_0 เป็นเทอมขดเซย β_i เป็นความชันหรือผลเชิงเส้นของ x_i ที่ป้อน β_{ii} เป็นผลเชิงเส้นโค้งของ x_i ที่ป้อน β_{ij} เป็นผลความสัมพันธ์ร่วมเชิงเส้นระหว่าง x_i และ x_j



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการดัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตต โดยเติมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 1.88 2.50 3.77 5.63 และ 7.54 และศึกษาปริมาณสารก่อโครงสร้างโดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารก่อโครงสร้าง CTAB : SiO₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลู จากนั้นศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite และศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

4.1 ผลการสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ

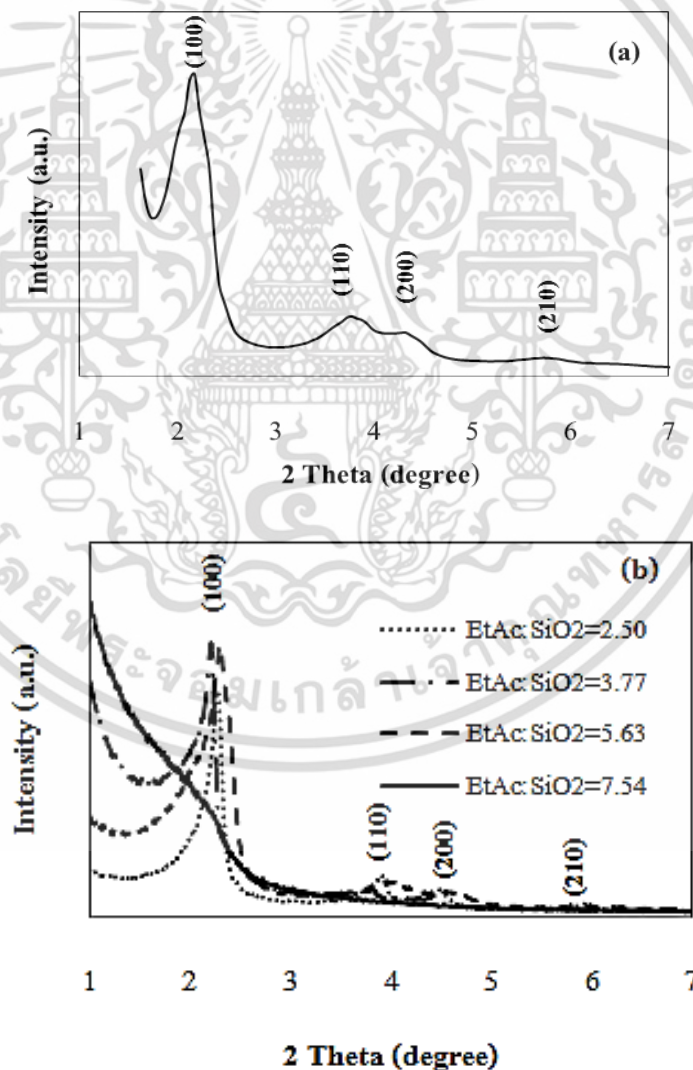
ผลการสังเคราะห์ตัวดูดซับที่เติมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 1.88 2.50 3.77 5.63 และ 7.54 แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 1.88 สารไม่เกิดการตกตะกอน เนื่องจากปริมาณเอทิลอะซิเตตน้อยเกินไป เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิห้องเป็นกรดอะซิติกและเอทานอลส่งผลให้ค่า pH ลดลงเล็กน้อย ค่า pH เท่ากับ 12.78 ซึ่งสูงเกินไป ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ MCM-41 โดยค่า pH ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ MCM-41 อยู่ในช่วง 8 - 11 [5, 6] ส่วนที่อัตราส่วนอื่นๆ สารที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว เป็นผงละเอียด

ตารางที่ 4.1 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ

| EtAc : SiO ₂ | ค่า pH ที่ 5 ชั่วโมง | ค่า pH หลังจาก 2 วัน | ลักษณะสารที่สังเคราะห์ได้ |
|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 1.88 | 12.78 | 12.05 | สารไม่เกิดการตกตะกอน |
| 2.50 | 10.67 | 10.11 | ของแข็งสีขาว |
| 3.77 | 9.20 | 6.07 | ของแข็งสีขาว |
| 5.63 | 8.74 | 5.78 | ของแข็งสีขาว |
| 7.54 | 7.44 | 5.44 | ของแข็งสีขาว |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า MCM-41 (รูปที่ 4.1 (a)) ปรากฏพีคหลักที่มุม 2θ เท่ากับ 2.18 องศา ตรงกับระนาบ (100) ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างเป็นระเบียบภายในตัวดูดซับ และปรากฏพีคขนาดเล็กที่มุม 2θ เท่ากับ 3.78 4.33 และ 5.73 องศา ซึ่งตรงกับระนาบ (110) (200) และ (210) ตามลำดับ [28] สำหรับ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 3.77 และ 5.63 (รูปที่ 4.1 (b)) ปรากฏพีคที่ระนาบเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้น คือ MCM-41 ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกจัดเรียงตัวเป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ส่วนที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 7.54 ไม่ปรากฏพีคใดๆ แสดงว่าที่อัตราส่วนนี้สารที่สังเคราะห์ได้ไม่ได้สร้างตัวเป็น MCM-41 เนื่องจากค่า pH ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไม่เหมาะสม มีค่า pH เท่ากับ 7.44 ซึ่งต่ำเกินไป [5] ดังนั้นที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 จึงเป็นอัตราส่วนที่ใช้ปริมาณเอทิลอะซิเตดน้อยที่สุด และยังคงเป็น MCM-41 อยู่



รูปที่ 4.1 กราฟ XRD ของตัวดูดซับ (a) MCM-41 และ (b) MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 และ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ

ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสของ MCM-41 และ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุดถึง 19.12 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ เนื่องจากการดัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตต จะดัดแปรให้ตัวดูดซับมีรูพรุน 2 ขนาดในโครงสร้างเดียวกัน จึงสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงกว่า MCM-41 ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร และที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะทำให้ค่า pH ค่อยๆ ลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซนชัน (Polycondensation) ในการเกิดโครงสร้าง MCM-41 เกิดขึ้นได้ดี จึงส่งผลให้ตัวดูดซับมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างเป็นระเบียบและมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น [6, 29]

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของ MCM-41 และ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ

| ตัวดูดซับ | q (mg/g) | | |
|---|------------|------------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | เฉลี่ย |
| MCM-41 | 17.97 | 18.14 | 18.06 |
| MCM-41 (EtAc : SiO ₂ = 2.50) | 18.94 | 19.30 | 19.12 |
| MCM-41 (EtAc : SiO ₂ = 3.77) | 17.87 | 17.79 | 17.83 |
| MCM-41 (EtAc : SiO ₂ = 5.63) | 17.36 | 17.42 | 17.39 |

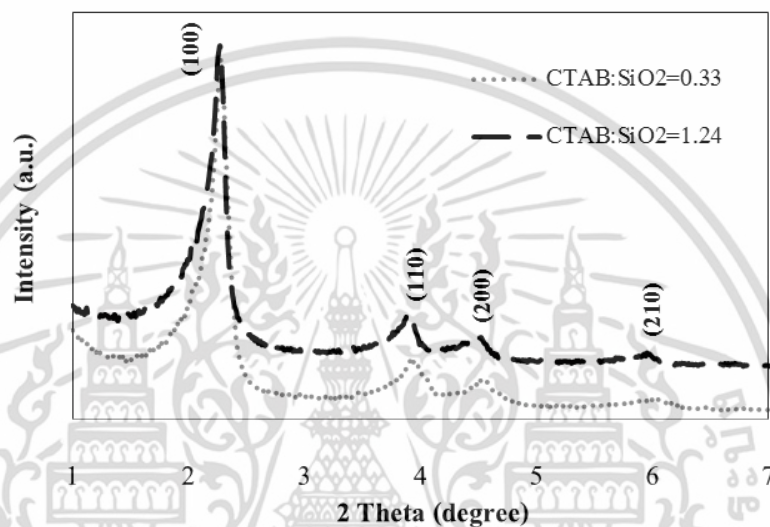
4.3 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 (MCM-41 (EtAc : SiO₂ = 2.50)) ที่เติม CTAB ที่อัตราส่วนต่างๆ

ผลการสังเคราะห์ MCM-41 ที่เติมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 เติม CTAB : SiO₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24 แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่า pH ในการสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน และสารที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าปรากฏพีคที่ระนาบเดียวกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างของ MCM-41 แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ CTAB ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 (EtAc : SiO₂ = 2.50) ที่เติม CTAB : SiO₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24

| CTAB : SiO ₂ | ค่า pH ที่ 5 ชั่วโมง | ค่า pH หลังจาก 2 วัน | ลักษณะสารที่สังเคราะห์ได้ |
|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 0.33 | 10.67 | 10.11 | ของแข็งสีขาว |
| 1.24 | 10.65 | 10.17 | ของแข็งสีขาว |



รูปที่ 4.2 กราฟ XRD ของ MCM-41 (EtAc : SiO₂ = 2.50) ที่เติม CTAB : SiO₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24

4.4 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (EtAc : SiO₂ = 2.50) ที่เติม CTAB ที่อัตราส่วนต่างๆ

ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของ MCM-41 (EtAc : SiO₂ = 2.50) ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของ CTAB : SiO₂ จาก 1.24 เป็น 0.33 แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นที่อัตราส่วนโดยโมลของ CTAB : SiO₂ เท่ากับ 0.33 จึงเป็นอัตราส่วนที่ใช้ปริมาณสารก่อโครงสร้างน้อยที่สุดและดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงที่สุด

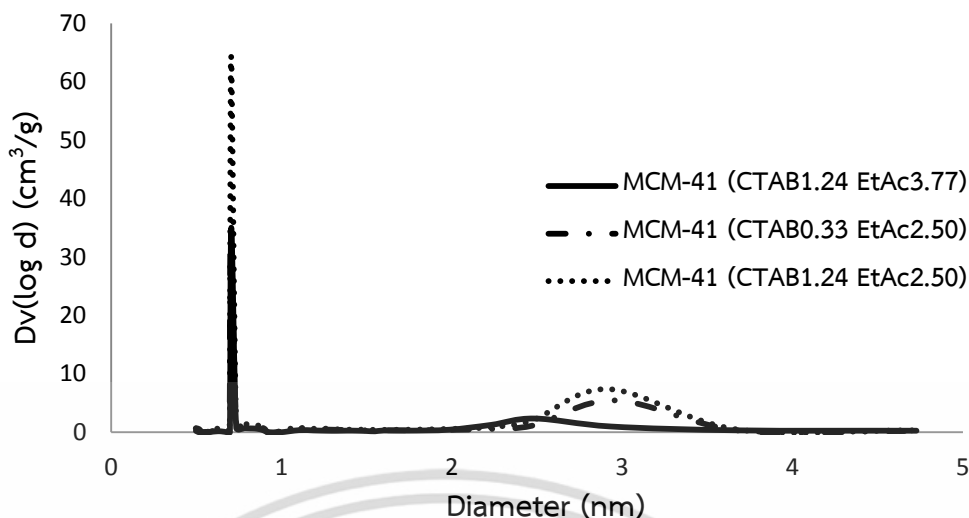
ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของ MCM-41 (EtAc : SiO₂ = 2.50) ที่เติม CTAB : SiO₂ ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.33 และ 1.24

| ตัวดูดซับ | q (mg/g) | | |
|---|------------|------------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | เฉลี่ย |
| MCM-41 (CTAB : SiO ₂ = 0.33) | 19.89 | 19.77 | 19.83 |
| MCM-41 (CTAB : SiO ₂ = 1.24) | 18.94 | 19.30 | 19.12 |

4.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยเทคนิคบีอีที

เปรียบเทียบพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ 3 ตัว คือ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM 41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) เพื่อศึกษาผลการปรับเปลี่ยนปริมาณเอทิลอะซิเตตและสารก่อโครงสร้าง ด้วยการดูดซับและการคายซับก๊าซไนโตรเจน โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคบีอีที แสดงดังตารางที่ 4.5 และการกระจายขนาดรูพรุนของตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูปพบว่า MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) มีรูพรุนขนาดเล็ก 0.69 – 0.73 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ 1.74 – 2.94 นาโนเมตร MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) มีรูพรุนขนาดเล็ก 0.70 – 0.73 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ 1.97 – 3.68 นาโนเมตร และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) มีรูพรุนขนาดเล็ก 0.70 – 0.73 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ 1.96 – 3.67 นาโนเมตร การดัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตต จะดัดแปรให้ตัวดูดซับมีรูพรุน 2 ขนาดในโครงสร้างเดียวกัน คือ รูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดใหญ่ โดยเอทิลอะซิเตตจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันของอนุภาคซิลิกา ส่งผลให้รูพรุนที่เกิดจากช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิกา มีขนาดใหญ่ขึ้น รูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างตัวดูดซับกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ขณะที่รูพรุนขนาดใหญ่จะเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ [11, 30] จากตารางที่ 4.5 พบว่า MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) มีพื้นที่ผิว 630 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 8.157 นาโนเมตร MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) มีพื้นที่ผิว 1289 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 6.902 นาโนเมตร และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) มีพื้นที่ผิว 989 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 5.435 นาโนเมตร แม้ว่า MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) จะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ที่สุด คือ 8.157 นาโนเมตร แต่ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่ำที่สุด เนื่องจากมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ซึ่งมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

| ตัวดูดซับ | พื้นที่ผิว (m ² /g) | ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm) |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) | 630 | 8.157 |
| MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) | 1289 | 6.902 |
| MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) | 989 | 5.435 |

4.6 การคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q)

เลือกตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู ตารางที่ 4.6 แสดงการออกแบบเมทริกซ์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และค่า q ที่คำนวณได้จากผลการทดลอง เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า q ดำเนินการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง ในหนึ่งบล็อกของการวัด และลำดับการทดลองแบบสุ่ม เพื่อลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ และผลกระทบที่มีนัยสำคัญของแต่ละปัจจัยของค่า q หาได้จากกราฟ Normal plot of the standardized effects แผนภูมิ Pareto และกราฟ Main effects and interaction plots

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การออกแบบเมทริกซ์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและค่า q

| Std Order | Run Order | ปัจจัย | | | | q (mg/g) |
|-----------|-----------|--------|----|------|------|---------------|
| | | [MB] | pH | Time | Temp | |
| 1 | 18 | -1 | -1 | -1 | -1 | 15.38 |
| 2 | 7 | 1 | -1 | -1 | -1 | 26.95 |
| 3 | 29 | -1 | 1 | -1 | -1 | 21.41 |
| 4 | 31 | 1 | 1 | -1 | -1 | 39.25 |
| 5 | 10 | -1 | -1 | 1 | -1 | 17.12 |
| 6 | 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | 27.33 |
| 7 | 12 | -1 | 1 | 1 | -1 | 20.89 |
| 8 | 24 | 1 | 1 | 1 | -1 | 38.26 |
| 9 | 5 | -1 | -1 | -1 | 1 | 12.99 |
| 10 | 30 | 1 | -1 | -1 | 1 | 24.87 |
| 11 | 20 | -1 | 1 | -1 | 1 | 21.09 |
| 12 | 26 | 1 | 1 | -1 | 1 | 37.64 |
| 13 | 22 | -1 | -1 | 1 | 1 | 13.11 |
| 14 | 3 | 1 | -1 | 1 | 1 | 23.55 |
| 15 | 17 | -1 | 1 | 1 | 1 | 20.86 |
| 16 | 27 | 1 | 1 | 1 | 1 | 39.25 |
| 17 | 32 | -1 | -1 | -1 | -1 | 14.92 |
| 18 | 14 | 1 | -1 | -1 | -1 | 26.79 |
| 19 | 16 | -1 | 1 | -1 | -1 | 21.41 |
| 20 | 13 | 1 | 1 | -1 | -1 | 39.54 |
| 21 | 19 | -1 | -1 | 1 | -1 | 17.13 |
| 22 | 23 | 1 | -1 | 1 | -1 | 27.01 |
| 23 | 4 | -1 | 1 | 1 | -1 | 20.97 |
| 24 | 9 | 1 | 1 | 1 | -1 | 38.27 |
| 25 | 25 | -1 | -1 | -1 | 1 | 13.09 |
| 26 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 25.31 |
| 27 | 21 | -1 | 1 | -1 | 1 | 21.03 |
| 28 | 15 | 1 | 1 | -1 | 1 | 37.76 |

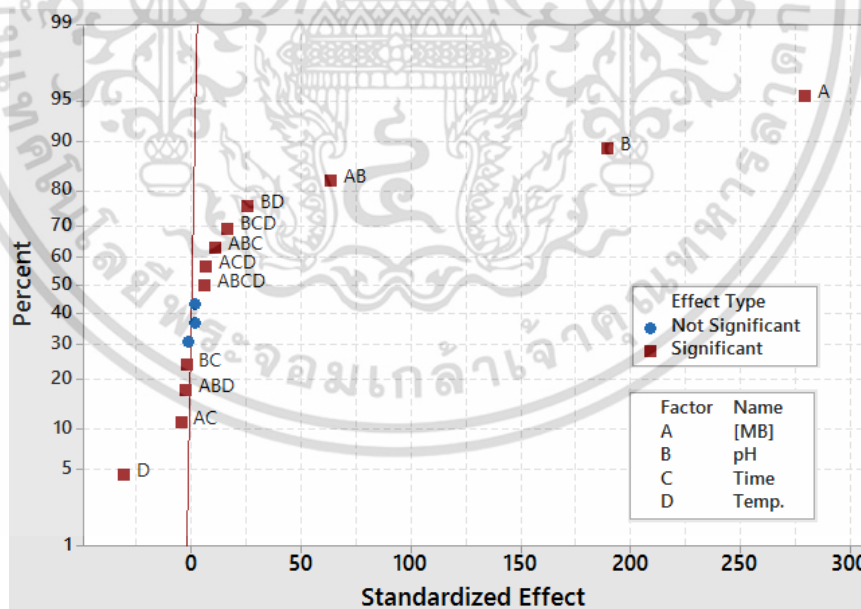
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

| Std Order | Run Order | ปัจจัย | | | | q (mg/g) |
|-----------|-----------|--------|----|------|------|-------------|
| | | [MB] | pH | Time | Temp | |
| 29 | 11 | -1 | -1 | 1 | 1 | 13.00 |
| 30 | 8 | 1 | -1 | 1 | 1 | 23.66 |
| 31 | 2 | -1 | 1 | 1 | 1 | 20.82 |
| 32 | 28 | 1 | 1 | 1 | 1 | 39.28 |

4.6.1 Normal plot of the standardized effects

ผลกระทบของปัจจัยแสดงในรูปแบบที่ 4.4 กราฟ Normal probability plot of effects ผลกระทบที่มีนัยสำคัญจะมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ห่างจากเส้นตรง ผลกระทบที่มีนัยสำคัญมากจะอยู่ห่างออกจากเส้นตรงมาก จากการวิเคราะห์ผลกระทบที่มีนัยสำคัญ พบว่าผลกระทบหลัก คือ [MB] pH และ Temp และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย คือ [MB]·pH pH·Temp pH·time และ [MB]·time ส่วนผลกระทบร่วม 3 ปัจจัยขึ้นไปจะมีค่าน้อยมาก จึงไม่นิยมนำมาพิจารณา [22, 26] พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า q เรียงตามลำดับความสำคัญ คือ [MB] pH [MB]·pH Temp pH·Temp [MB]·time และ pH·time ตามลำดับ

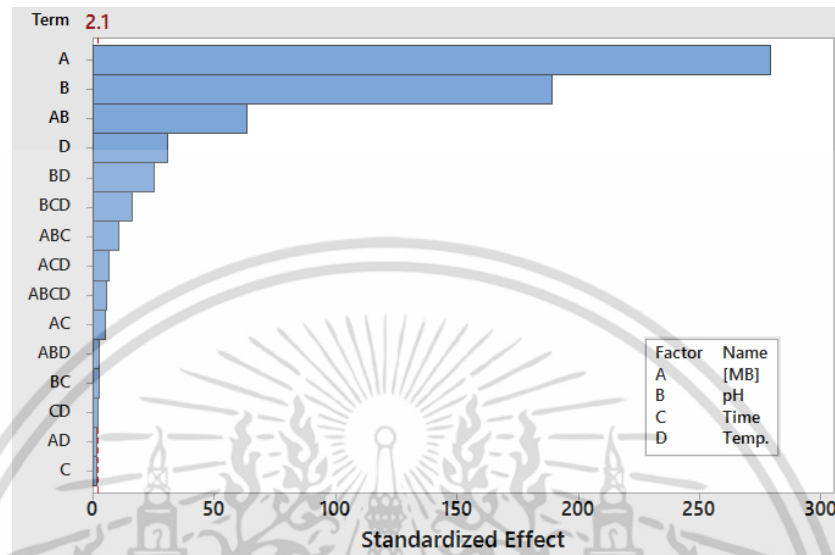


รูปที่ 4.4 กราฟ Normal plot of the standardized effects

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 แผนภูมิ Pareto

ผลที่ได้จาก Normal plot of the standardized effects (รูปที่ 4.4) ยืนยันด้วย แผนภูมิ Pareto แสดงดังรูปที่ 4.5



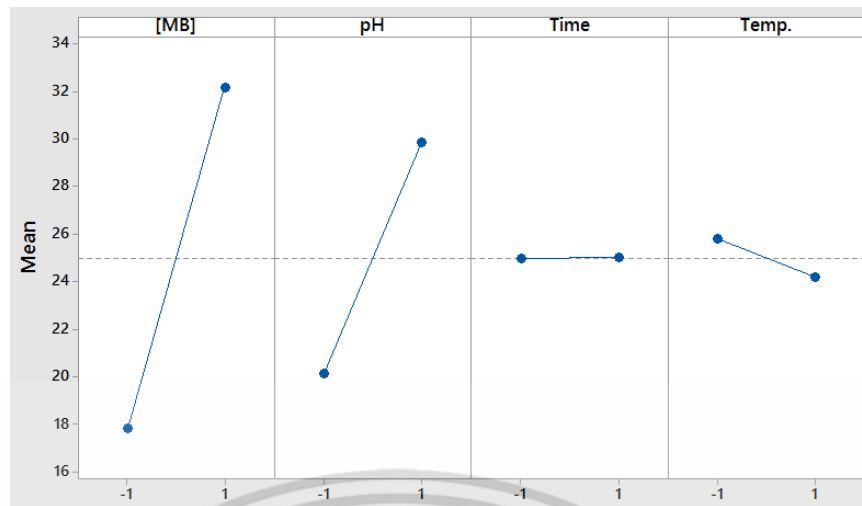
รูปที่ 4.5 แผนภูมิ Pareto ของค่า q

ผลกระทบใดๆ ที่เกินเส้นแนวตั้งซึ่งบ่งชี้ผลกระทบที่มีนัยสำคัญทางสถิติต่ำที่สุดจะถือว่า มีนัยสำคัญ ลำดับผลกระทบที่มีนัยสำคัญ พบว่า [MB] pH [MB]·pH Temp pH·Temp [MB]·time และ pH·time มีนัยสำคัญ ตามลำดับ

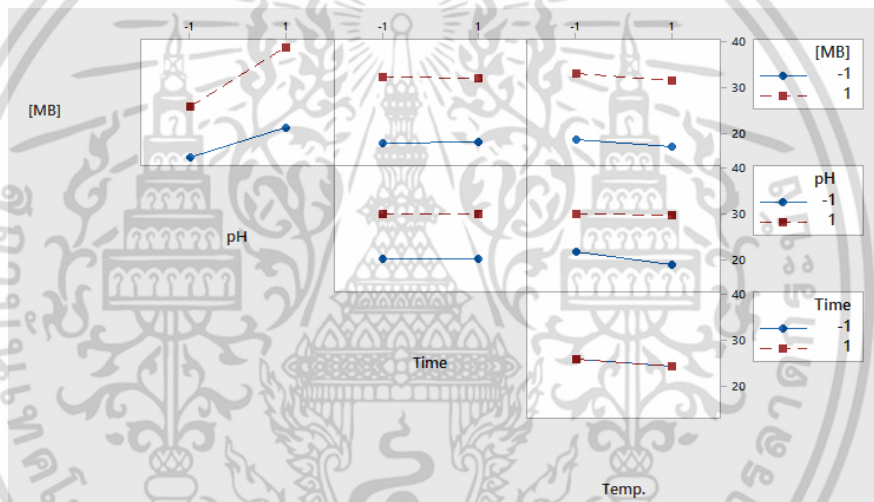
4.6.3 Main effects and interactions plots

ผลกระทบหลักแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเส้นกราฟของ [MB] pH และ Temp มีลักษณะ สูงชัน แสดงว่าเป็นผลกระทบที่มีนัยสำคัญ ผลกระทบร่วมแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าผลกระทบร่วม [MB]·pH และ pH·Temp มีลักษณะเส้นกราฟที่ไม่ขนานกัน แสดงว่ามีความสัมพันธ์ร่วมแบบสอง-ทาง (Two-way interaction) ระหว่างผลกระทบหลัก [MB] กับ pH และ pH กับ Temp เกิด ค่อนข้างมาก [22, 26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟ Main effects plot



รูปที่ 4.7 กราฟ Interaction plot

4.6.4 แบบจำลองการถดถอยของค่า q

ตารางที่ 4.7 แสดงผลกระทบที่คาดการณ์และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coef) พร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SE_{coef}) ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์การวัดการกระจาย (Measure of Dispersion) ค่าทางสถิติ (T) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบตัวแปร 2 ตัว และความน่าจะเป็น (P) สำหรับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมซึ่งหาได้จากวิธีตัวแปรยกกำลังสองที่มีค่าน้อยที่สุด แบบจำลองการถดถอยใน Coded Units ระหว่างค่า q กับตัวแปรแต่ละตัว แสดงดังสมการที่ (4.1) พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 99.99 เปอร์เซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = 24.9985 + 7.1720[\text{MB}] + 4.8601\text{pH} + 0.0332\text{time} - 0.7922\text{Temp} + 1.6258[\text{MB}] \cdot \text{pH} - 0.1273[\text{MB}] \cdot \text{time} + 0.0372[\text{MB}] \cdot \text{Temp} - 0.0661\text{pH} \cdot \text{time} + 0.6492\text{pH} \cdot \text{Temp} - 0.0490\text{time} \cdot \text{Temp} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.7 ผลกระทบโดยประมาณและค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยของค่า q

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Constant | | 24.9985 | 0.0257 | 973.17 | 0.000 |
| [MB] | 14.3440 | 7.1720 | 0.0257 | 279.20 | 0.000 |
| pH | 9.7202 | 4.8601 | 0.0257 | 189.20 | 0.000 |
| time | 0.0664 | 0.0332 | 0.0257 | 1.29 | 0.215 |
| Temp | -1.5844 | -0.7922 | 0.0257 | -30.84 | 0.000 |
| [MB]·pH | 3.2515 | 1.6258 | 0.0257 | 63.29 | 0.000 |
| [MB]·time | -0.2545 | -0.1273 | 0.0257 | -4.95 | 0.000 |
| [MB]·Temp | 0.0743 | 0.0372 | 0.0257 | 1.45 | 0.167 |
| pH·time | -0.1322 | -0.0661 | 0.0257 | -2.57 | 0.020 |
| pH·Temp | 1.2983 | 0.6492 | 0.0257 | 25.27 | 0.000 |
| time·Temp | -0.0979 | -0.0490 | 0.0257 | -1.91 | 0.075 |

หลังจากทดสอบที่ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ คือ เทอม P ที่มีค่ามากกว่า 0.05 (ตารางที่ 4.7) สามารถสร้างแบบจำลองที่ลดรูปได้ดังสมการที่ (4.2) พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 99.58 เปอร์เซ็นต์

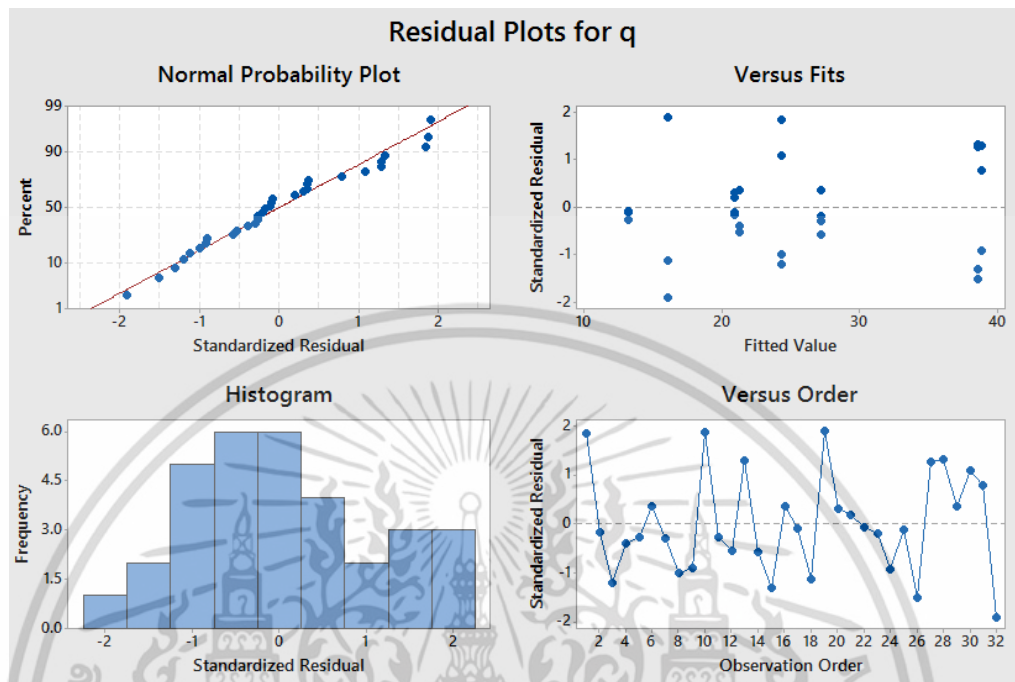
$$q = 24.998 + 7.172[\text{MB}] + 4.860\text{pH} - 0.792\text{Temp} + 1.626[\text{MB}] \cdot \text{pH} + 0.649\text{pH} \cdot \text{Temp} \quad (4.2)$$

4.6.5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

ในการทดลองมักจะมีปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมจำนวนมาก และปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของการทดลอง จึงวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากกราฟ Residual plot แสดงดังรูปที่ 4.8 ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติจากกราฟ Normal probability plot พบว่ากราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่จากกราฟ Residual กับ Fitted value ไม่พบสิ่งผิดปกติ กล่าวคือ ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวที่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน และตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากกราฟ Residual กับ Order พบการกระจายแบบไม่มีรูปแบบ แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.8 กราฟ Residual plot

4.6.6 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยที่ลดรูปสำหรับค่า q ในสมการที่ (4.2) พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 99.58 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามีเพียงแค่ 0.42 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนรวมที่ไม่ได้ถูกอธิบายด้วยแบบจำลอง ความแตกต่างระหว่างค่า R^2 และค่า R^2 (adj) (99.49 เปอร์เซ็นต์) มีค่าเท่ากับ 0.09 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามีโอกาสน้อยมากที่เทอมที่ไม่มีนัยสำคัญจะรวมอยู่ในแบบจำลอง

4.7 การหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

จากการคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ค่า pH และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จากนั้นศึกษาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนองของปัจจัย และใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite การออกแบบเมทริกซ์ของการทดลองแบบ Central Composite และค่า q ที่คำนวณได้จากผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การออกแบบเมทริกซ์ของการทดลองแบบ Central Composite และค่า q

| Std Order | Run Order | ปัจจัย | | | q (mg/g) |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|-------------|
| | | [MB] | pH | Temp | |
| 1 | 1 | -1.000 | -1.000 | -1.000 | 15.38 |
| 2 | 10 | 1.000 | -1.000 | -1.000 | 26.95 |
| 3 | 2 | -1.000 | 1.000 | -1.000 | 21.41 |
| 4 | 7 | 1.000 | 1.000 | -1.000 | 39.25 |
| 5 | 12 | -1.000 | -1.000 | 1.000 | 12.99 |
| 6 | 3 | 1.000 | -1.000 | 1.000 | 24.87 |
| 7 | 9 | -1.000 | 1.000 | 1.000 | 21.09 |
| 8 | 11 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 37.64 |
| 9 | 6 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 32.80 |
| 10 | 5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 33.31 |
| 11 | 8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 32.78 |
| 12 | 4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 32.89 |
| 13 | 16 | -1.633 | 0.000 | 0.000 | 16.64 |
| 14 | 18 | 1.633 | 0.000 | 0.000 | 38.14 |
| 15 | 13 | 0.000 | -1.633 | 0.000 | 22.91 |
| 16 | 14 | 0.000 | 1.633 | 0.000 | 36.06 |
| 17 | 19 | 0.000 | 0.000 | -1.633 | 35.03 |
| 18 | 17 | 0.000 | 0.000 | 1.633 | 33.10 |
| 19 | 15 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 32.93 |
| 20 | 20 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 32.80 |

หมายเหตุ : Coded Units -1.633 และ 1.633 ในตาราง หมายถึง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู เท่ากับ 18.67 และ 51.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่า pH เท่ากับ 2.101 และ 11.899 ตามลำดับ และอุณหภูมิเท่ากับ 28.67 และ 61.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.7.1 แบบจำลองพหุนามอันดับสอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับสมการพหุนามอันดับสองแสดงดัง ตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการพหุนามอันดับสอง

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value |
|-----------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Constant | | 33.562 | 0.695 | 48.29 | 0.000 |
| [MB] | 13.942 | 6.971 | 0.465 | 14.99 | 0.000 |
| pH | 9.100 | 4.55 | 0.465 | 9.78 | 0.000 |
| Temp | -1.431 | -0.716 | 0.465 | -1.54 | 0.158 |
| [MB]•[MB] | -6.470 | -3.235 | 0.467 | -6.92 | 0.000 |
| pH•pH | -4.900 | -2.45 | 0.467 | -5.24 | 0.001 |
| Temp•Temp | -1.465 | -0.732 | 0.467 | -1.57 | 0.151 |
| [MB]•pH | 2.734 | 1.367 | 0.600 | 2.28 | 0.049 |
| [MB]•Temp | -0.248 | -0.124 | 0.600 | -0.21 | 0.841 |
| pH•Temp | 0.636 | 0.318 | 0.600 | 0.53 | 0.609 |

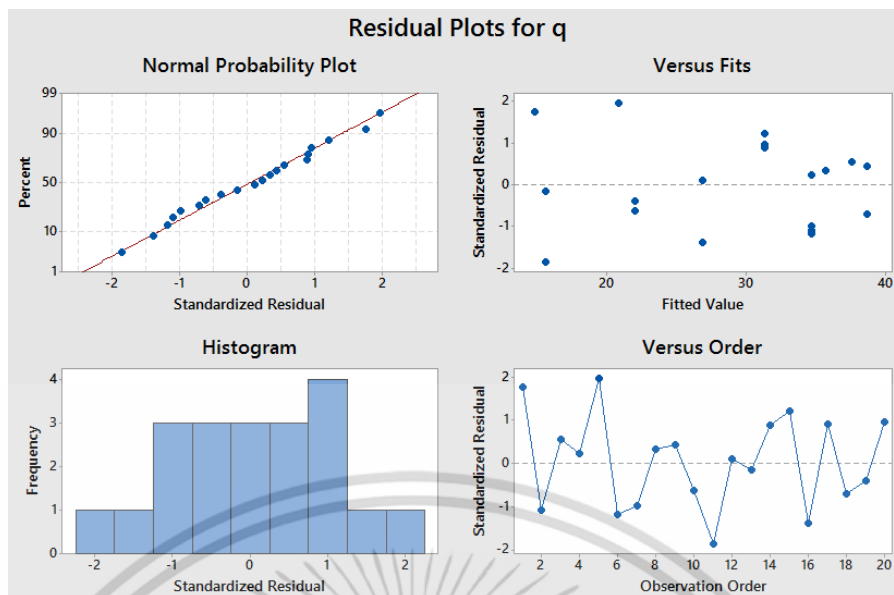
เมื่อละเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ คือ เทอม P ที่มีค่ามากกว่า 0.05 สามารถสร้างแบบจำลองที่ลดรูปใน Coded Units สำหรับสมการอันดับสองได้ ดังสมการที่ 4.3

$$q = 33.003 + 6.971[\text{MB}] + 4.550\text{pH} - 3.183[\text{MB}] \cdot [\text{MB}] - 2.398\text{pH} \cdot \text{pH} + 1.367[\text{MB}] \cdot \text{pH} \quad (4.3)$$

4.7.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองพหุนามอันดับสองจากกราฟ Residual plot แสดงดังรูปที่ 4.9 จากกราฟ Normal probability plot พบว่าลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จากกราฟ Residual กับ Fitted value ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวที่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน และตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากกราฟ Residual กับ Order พบการกระจายแบบไม่มีรูปแบบ แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟ Residual plot ของแบบจำลองพหุนามอันดับสอง

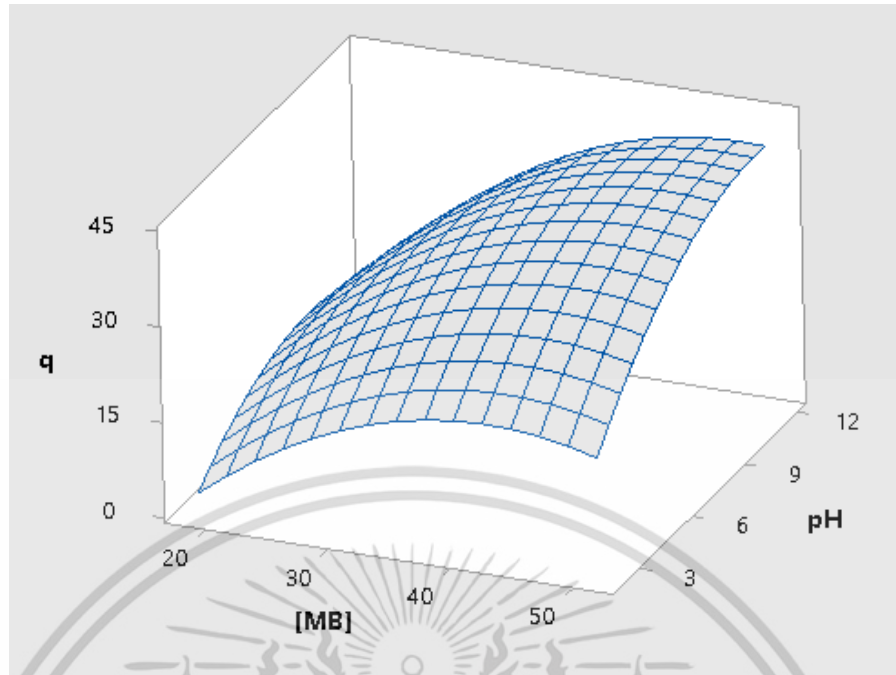
4.7.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ความเหมาะสมของแบบจำลองพหุนามอันดับสองที่ลดรูปสำหรับค่า q ในสมการที่ (4.3) พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 96.69 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามี 3.31 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนรวมที่ไม่ได้ถูกอธิบายด้วยแบบจำลองพหุนามอันดับสอง ซึ่งถือว่ายอมรับได้ และค่า R^2 (adj) ของแบบจำลองเท่ากับ 95.16 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างระหว่างค่า R^2 และค่า R^2 (adj) มีค่าเท่ากับ 1.53 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญมีโอกาสน้อยที่จะรวมอยู่ในแบบจำลอง

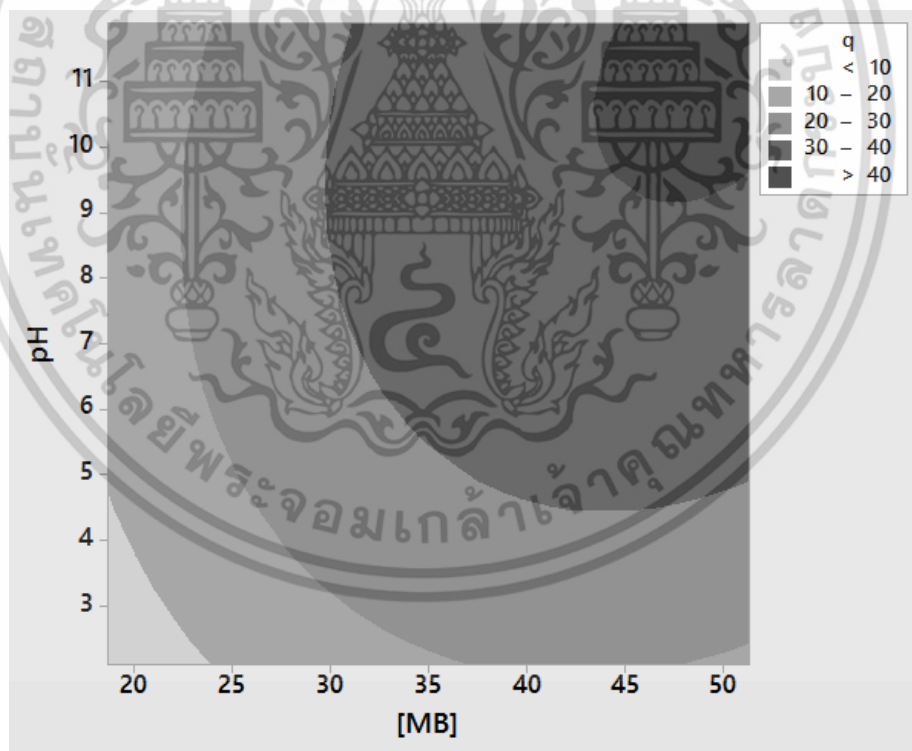
4.7.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูหาได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ซึ่งก็คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูและค่า pH แสดงดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเมทิลีนบลูและค่า pH เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



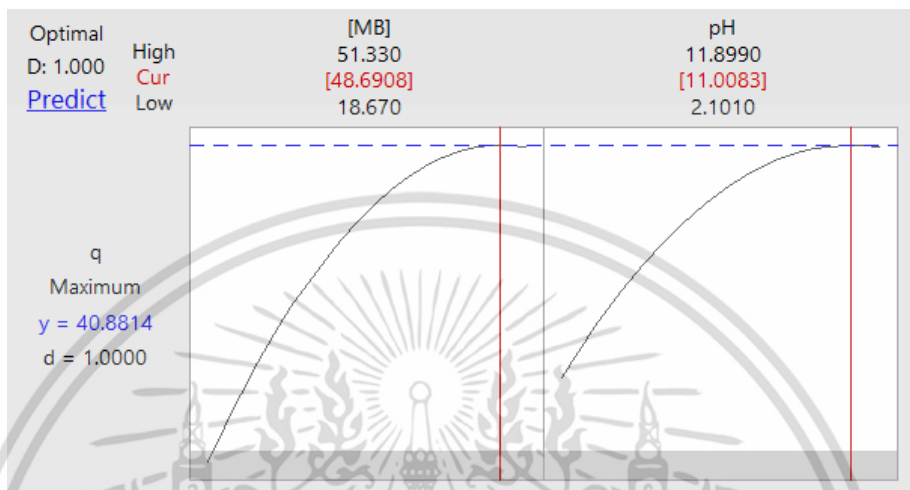
รูปที่ 4.10 กราฟ Surface plot



รูปที่ 4.11 กราฟ Contour plot

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองสามารถระบุสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูได้แค่เป็นช่วง ดังนั้นเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจนจึงต้องอาศัยการวิเคราะห์ Response Optimization แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าถ้าต้องการให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงที่สุด จะต้องเลือกใช้ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ 48.6908 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า pH ที่ 11.0083 ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงที่สุด คือ 40.8814 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ



รูปที่ 4.12 Optimization plot

4.7.5 การทวนสอบเพื่อยืนยันผลการวิจัย

เมื่อทำการทดลองเพื่อยืนยันผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab โดยทำการทดลองที่สถานะความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ 48.70 มิลลิกรัมต่อลิตรและที่ค่า pH เท่ากับ 11 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 48.70 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่า pH เท่ากับ 11

| ตัวดูดซับ | q (mg/g) | | |
|---------------------------------|------------|------------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | เฉลี่ย |
| MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) | 42.73 | 42.81 | 42.77 |

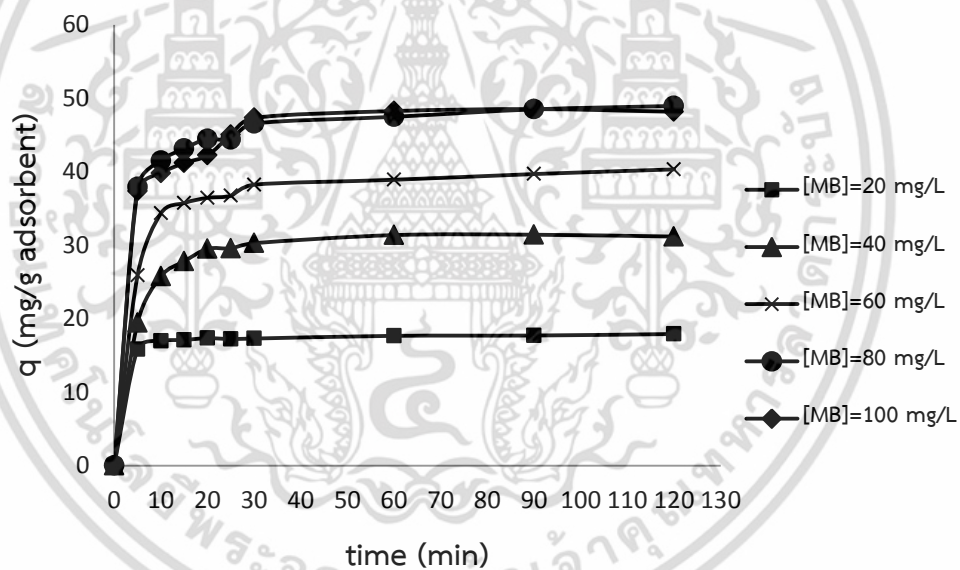
จากตารางที่ 4.10 พบว่าตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สามารถดูดซับเมทิลีนบลูเฉลี่ยได้เท่ากับ 42.77 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ได้จากการทำการทดลองจริงและจากโปรแกรม Minitab เท่ากับ 4.62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู

4.8.1 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ที่ความเข้มข้น 20 40 60 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5 10 15 20 25 30 60 90 และ 120 นาที แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับเมทิลีนบลูในช่วง 10 นาทีแรกจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตัวดูดซับมีบริเวณที่จะเกิดการดูดซับมาก และมีรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งจะเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ หลังจากนั้นการดูดซับก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคของเมทิลีนบลูจะเข้าไปยึดเกาะในรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้การดูดซับที่จะเกิดขึ้นใหม่นั้นเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูเริ่มคงที่หรือเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับ [1, 7]

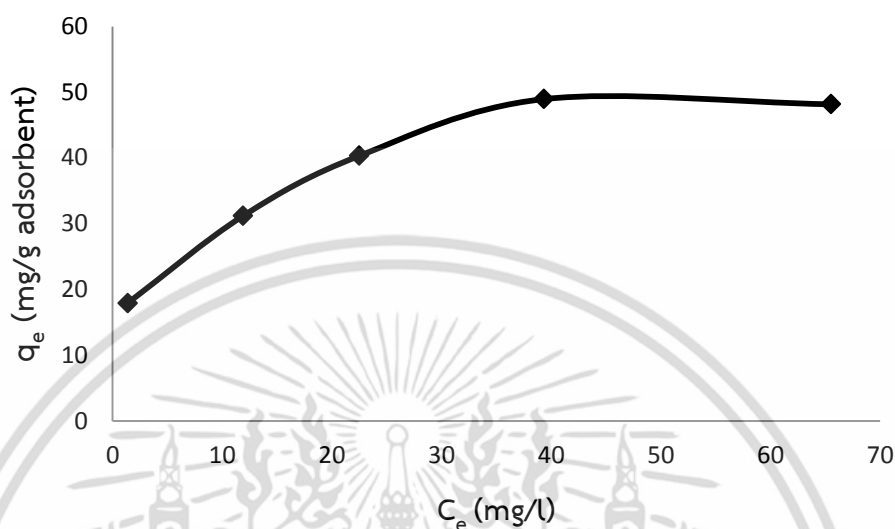


รูปที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 40 60 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลาในการดูดซับต่างๆ

4.8.2 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ที่ความเข้มข้นเมทิลีนบลูเริ่มต้น 20 40 60 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 120 นาที และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) และความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่เหลือในสภาวะสมดุล แสดงดังรูปที่ 4.14 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกมหาวิทยาลัยสุโขทัย มิฉะนั้นจะถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

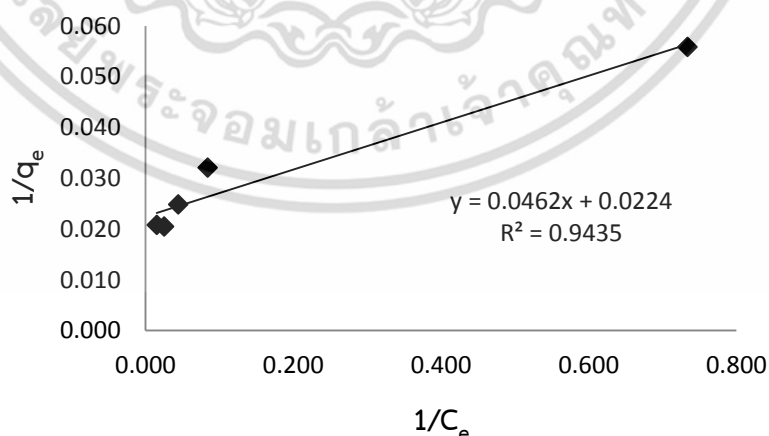
พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ และเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ปริมาณ 48.95 มิลลิกรัม-ต่อกรัมตัวดูดซับ



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

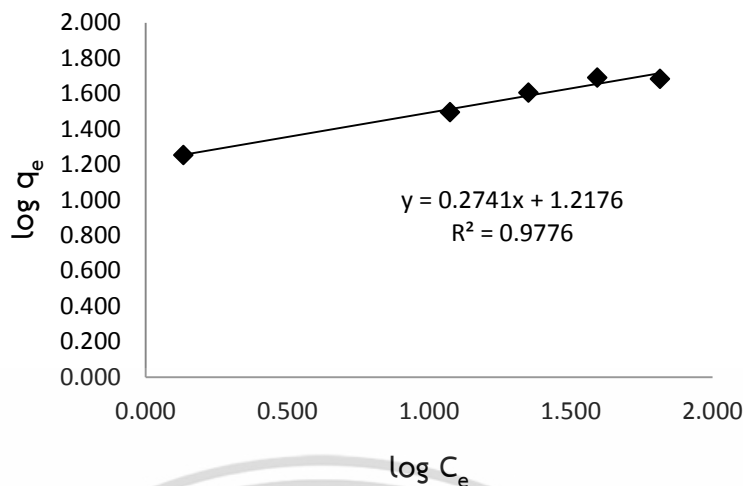
4.8.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้ทฤษฎีของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

จากการวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) โดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) โดยใช้สมการของแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) โดยใช้สมการของฟรุนดลิช

จากกราฟรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ ของสมการแลงเมียร์ สามารถหาความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (q_0) และค่าคงที่แลงเมียร์ (K_L) ได้จากจุดตัดแกน y และความชันของกราฟเส้นตรง ตามลำดับ และจากกราฟรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของสมการฟรุนดลิช สามารถหาค่าคงที่ฟรุนดลิช (K_F) และค่าคงที่ (n) จากจุดตัดแกน y และความชันของกราฟเส้นตรง ตามลำดับ ค่าคงที่จากการคำนวณตามสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่จากการคำนวณจากสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

| ตัวดูดซับ | Langmuir | | | Freundlich | | |
|---------------------------------|----------|--------|--------|------------|--------|--------|
| | q_0 | K_L | R^2 | K_F | n | R^2 |
| MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) | 44.6429 | 0.4848 | 0.9435 | 16.5044 | 3.6483 | 0.9776 |

จากตารางที่ 4.11 สามารถเขียนสมการของแลงเมียร์ได้ดังนี้ คือ $q_e = \frac{21.6429C_e}{1 + 0.4848C_e}$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) เท่ากับ 0.9435 และสามารถเขียนสมการของฟรุนดลิชได้ดังนี้ คือ $q_e = 16.5044C_e^{0.2741}$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) เท่ากับ 0.9776 แสดงให้เห็นว่าสมการของฟรุนดลิชใช้อธิบายสมดุลการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ได้ดีกว่าสมการของแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) ใกล้ 1 มากกว่า ดังนั้นการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น เนื่องจากเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นพื้นผิวของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่อนุญตให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งถือว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของตัว-
ดูดซับโดยตรง และเกิดการดูดซับบนชั้นของโมเลกุลของสารละลายเมทิลีนบลูที่สะสมบนผิวของ
ตัวดูดซับ [19]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตต โดยเติมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 1.88 2.50 3.77 5.63 และ 7.54 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ EtAc : SiO₂ เท่ากับ 2.50 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้สูงสุดถึง 19.12 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ เมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่นๆ จากนั้นปรับเปลี่ยนปริมาณสารก่อโครงสร้าง CTAB : SiO₂ จากที่อัตราส่วนโดยโมล 1.24 เป็น 0.33 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 19.83 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ซึ่งต่างกันอย่างไม่นัยสำคัญ และผลการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคบีอีที พบว่าตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) มีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก จึงดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด ดังนั้นตัวดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่จะนำมาศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลู คือ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) จากนั้นศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q) ได้แก่ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ([MB]) ค่า pH (pH) เวลา (time) และอุณหภูมิ (Temp) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และใช้โปรแกรม Minitab พบว่าผลกระทบหลัก คือ [MB] pH และ Temp และผลกระทบร่วม คือ [MB]·pH และ pH·Temp โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า q เรียงตามลำดับความสำคัญ คือ [MB] pH [MB]·pH Temp และ pH·Temp ตามลำดับ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite พบว่าสามารถสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสองใน coded units ได้ดังนี้ คือ $q = 33.003 + 6.971[MB] + 4.550pH - 3.183[MB] \cdot [MB] - 2.398pH \cdot pH + 1.367[MB] \cdot pH$ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab คือ ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 48.6908 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ค่า pH เท่ากับ 11.0083 สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงที่สุดเท่ากับ 40.8814 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ เมื่อทำการทดลองเพื่อยืนยันผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเท่ากับ 48.70 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ค่า pH เท่ากับ 11 สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงที่สุดเท่ากับ 42.77 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทำการทดลองจริงและจากโปรแกรม Minitab เท่ากับ 4.62 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูสอดคล้องกับสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟรุณฑลิมมากกว่าสมการของแลงเมียร์ แสดงว่าการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการดัดแปรขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลู เช่น การเติมสารอินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มขนาดรูพรุน
2. ศึกษาการออกแบบการทดลองวิธีอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบและหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู เช่น การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 3 ระดับ การทดลองแบบ Box-Behnken เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รวิินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิท ยิปะมังคลา. “จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบดัดแปร” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, พ.ศ. - ส.ศ. 2554. หน้า 337-348.
- [2] อรดี ฤทธิชัย และศศิธร มั่นเจริญ. “การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกปู” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, 2557. หน้า 131-140.
- [3] สราวุธ ศรีคุณ. “การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่ว ด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2550.
- [4] Xiao, X., Zhang, F., Feng, Z., Deng, S., and Wang, Y. “Adsorptive removal and kinetics of methylene blue from aqueous solution using NiO/MCM-41 composite” *Physica E*. Vol. 65, 2015. pp. 4-12.
- [5] Selvam, P., Bhatia, S. K. and Sonwane, C. G. “Reviews: Recent Advances in Processing and Characterization of Periodic Mesoporous MCM-41 Silicate Molecular Sieves” *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 40, 2001. pp. 3237-3261.
- [6] Bernal, C., Mesa, M., Jaber, M., Guth, J. L., and Sierra, L. “Contribution to the understanding of the formation mechanism of bimodal mesoporous MCM41-type silica with large defect cavities” *Microporous and Mesoporous Materials*. Vol. 153, 2012. pp. 217-226.
- [7] ขวัญปวีณ์ สิทธิเขตรกรณ์. “การปรับปรุงขนาดรูพรุนและความเป็นขั้วของตัวดูดซับ MCM-41 เพื่อใช้ในการดูดซับวิตามินอีในน้ำมันปาล์มโอเลอิน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [8] Iler, R. K. *The Chemistry of Silica*. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1979.
- [9] Zhuravlev, L. T. “The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 173, 2000. pp. 1-38.
- [10] Copyright. “The Surface Chemistry of silica.” [Online]. Available : <http://www.cntq.gob.ve/cdb/documentos/quimica/224/6.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] อรอนงค์ จุลพันธ์, ธงไทย วิฑูรย์ และเมตตา เจริญพานิช. “การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซ-พอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ” **วิศวกรรมสาร มก.** ปีที่ 24, ฉบับที่ 75, มีนาคม 2554. หน้า 103-120.
- [12] Vadia, N. and Rajput, S. “Mesoporous Material, MCM41: A New Drug Carrier” **Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research.** Vol. 4, 2011. pp. 44-53.
- [13] Brinker, C. J. “Porous inorganic materials” **Solid State and Materials Science.** Vol.1, 1996. pp. 798-805.
- [14] ชนิษฐา. “สีย้อม.” [Online]. Available : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3&read=true&count=true. 2007.
- [15] บุญรักษ์ กาญจนวราวิชย์. “สารนำรู้: การพัฒนาสีย้อมผ้า และผ้าที่ต้านทานแบคทีเรีย.” [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/1427->. 2016.
- [16] จีรวรรณ พิจารณ์, วาสนา พันชน, มิถิ กัณณะ, สราวุฒิ สมนาม, และสัมพันธ์ วงศ์นาวา. “การพอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลีนบลู และเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน” **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา** ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, มกราคม – มิถุนายน 2558. หน้า 174-185.
- [17] Ghaedi, M., Ghazanfarkhani, M. D., Khodadoust, S., Sohrabi, N., and Oftade M. “Acceleration of methylene blue adsorption onto activated carbon prepared from dross licorice by ultrasonic: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies” **Journal of Industrial and Engineering Chemistry.** Vol. 20, 2014. pp. 2548–2560.
- [18] เตชา ฉัตรศิริเวช. **กระบวนการดูดซับ.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ส.เอเชีย-เพรส (1989) จำกัด. 2552.
- [19] Seader, J. D., Henley, E. J. and Roper, D. K. **Separation Process Principles Chemical and Biochemical Operations.** 3rd ED. United States of America : John Wiley & Sons. Inc. 2011.
- [20] Al-Othman Z. A. “A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials” **Materials.** Vol. 5, 2012. pp. 2874-2902.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8th ED. United States: John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [22] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. กรุงเทพมหานคร : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. 2551.
- [23] ยศวัจน ศิริกมลชัย. “การศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการไซนิน” **ปริญญาทิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทร-วิโรฒ**. 2554.
- [24] Schulz-Ekloff, G., Rathouský, J. and Zukal, A. “Mesoporous silica with controlled porous structure and regular morphology” **International Journal of Inorganic Materials**. Vol. 1, 1999. pp. 97–102.
- [25] Cao, J., Wu, Y., Jin, Y., Yilhan, P., and Huang, W. “Response surface methodology approach for optimization of the removal of chromium (VI) by NH₂-MCM-41” **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. Vol. 45, 2014. pp. 860–868.
- [26] Chang, S. H., Teng, T. T., and Ismail, N. “Screening of factors influencing Cu(II) extraction by soybean oil-based organic solvents using fractional factorial design” **Journal of Environmental Management**. Vol. 92, 2011. pp. 2580–2585.
- [27] Tripathi, P., Srivastava, V.C. and Kumar, A. “Optimization of an azo dye batch adsorption parameters using Box–Behnken design” **Desalination** Vol. 249, 2009. pp. 1273–1279.
- [28] Beck, J. S., Vartuli, J. C., Roth, W. J., Leonowicz, M. E., Kresge, C. T., Schmitt, K. D., Chu, C. T-W., Olson, D. H., Sheppard, E. W., McCullen, S. B., Higgins, J. B., and Schlenker, J. L. “A New Family of Mesoporous Molecular Sieves Prepared with Liquid Crystal Templates” **J. Am. Chem. Soc.** Vol. 114, 1992. pp. 10834–10843.
- [29] Bernal, C., Mesa, M., and Sierra, L. “Synthesis of new silicas with high stable and large mesopores and macropores for biocatalysis applications” **Materials Science and Engineering**. Vol. C32, 2012. pp. 1380–1385.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] Jullaphan, O., Witoon, T. and Chareonpanich, M. “Synthesis of mixed-phase uniformly infiltrated SBA-3-like in SBA-15 bimodal mesoporous silica from rice husk ash” **Materials Letters** Vol. 63, 2009. pp. 1303–1306.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



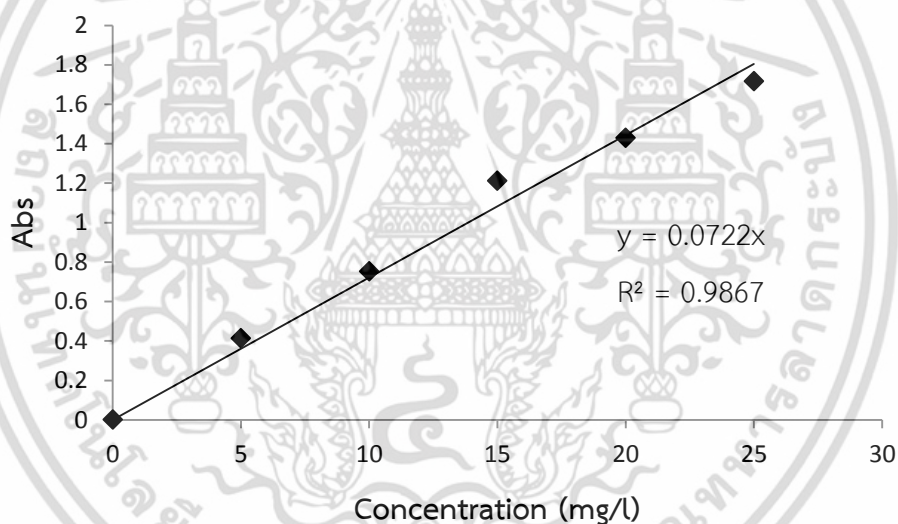
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ

| ความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐานเมทิลีนบลู (mg/l) | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลู | | | |
|--|-------------------------------|------------|------------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 5 | 0.414 | 0.415 | 0.41 | 0.413 |
| 10 | 0.752 | 0.753 | 0.752 | 0.752 |
| 15 | 1.211 | 1.214 | 1.209 | 1.211 |
| 20 | 1.425 | 1.432 | 1.431 | 1.429 |
| 25 | 1.714 | 1.715 | 1.719 | 1.716 |



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูของ MCM-41 และ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ

| ตัวดูดซับ | ครั้งที่ | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือ | | |
|---------------------------------|----------|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|
| | | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |
| MCM-41 | 1 | 0.0501 | 1.597 | 0.298 | 0.292 | 0.294 |
| | 2 | 0.0525 | 1.597 | 0.221 | 0.221 | 0.224 |
| MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) | 1 | 0.0495 | 1.597 | 0.243 | 0.241 | 0.245 |
| | 2 | 0.0517 | 1.597 | 0.153 | 0.161 | 0.155 |
| MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) | 1 | 0.0503 | 1.599 | 0.303 | 0.302 | 0.299 |
| | 2 | 0.0510 | 1.599 | 0.288 | 0.282 | 0.298 |
| MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 5.63) | 1 | 0.0495 | 1.599 | 0.358 | 0.359 | 0.358 |
| | 2 | 0.0503 | 1.599 | 0.334 | 0.335 | 0.334 |
| MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) | 1 | 0.0500 | 1.643 | 0.205 | 0.204 | 0.212 |
| | 2 | 0.0508 | 1.643 | 0.191 | 0.192 | 0.197 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

| Std Order | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือ | | | |
|-----------|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 1 | 0.0502 | 1.654 | 0.541 | 0.536 | 0.540 | 0.539 |
| 2* | 0.0499 | 0.743 | 1.395 | 1.402 | 1.399 | 1.399 |
| 3 | 0.0499 | 1.553 | 0.010 | 0.012 | 0.009 | 0.010 |
| 4* | 0.0502 | 0.636 | 0.014 | 0.015 | 0.014 | 0.014 |
| 5 | 0.0499 | 1.654 | 0.426 | 0.418 | 0.417 | 0.420 |
| 6* | 0.0502 | 0.743 | 1.363 | 1.359 | 1.358 | 1.360 |
| 7 | 0.0502 | 1.527 | 0.012 | 0.012 | 0.014 | 0.013 |
| 8* | 0.0503 | 0.621 | 0.014 | 0.015 | 0.011 | 0.013 |
| 9 | 0.0500 | 1.641 | 0.705 | 0.702 | 0.702 | 0.703 |
| 10* | 0.0503 | 0.743 | 1.542 | 1.534 | 1.527 | 1.534 |
| 11 | 0.0500 | 1.541 | 0.021 | 0.017 | 0.016 | 0.018 |
| 12* | 0.0500 | 0.608 | 0.019 | 0.016 | 0.014 | 0.016 |
| 13 | 0.0502 | 1.641 | 0.693 | 0.688 | 0.692 | 0.691 |
| 14* | 0.0498 | 0.749 | 1.665 | 1.674 | 1.684 | 1.674 |
| 15 | 0.0500 | 1.527 | 0.021 | 0.020 | 0.022 | 0.021 |
| 16* | 0.0501 | 0.636 | 0.021 | 0.017 | 0.022 | 0.020 |
| 17 | 0.0499 | 1.654 | 0.579 | 0.579 | 0.578 | 0.579 |
| 18* | 0.0498 | 0.728 | 1.349 | 1.347 | 1.344 | 1.347 |
| 19 | 0.0499 | 1.553 | 0.008 | 0.007 | 0.015 | 0.010 |
| 20* | 0.0498 | 0.636 | 0.016 | 0.016 | 0.017 | 0.016 |
| 21 | 0.0503 | 1.654 | 0.408 | 0.408 | 0.413 | 0.410 |
| 22* | 0.0501 | 0.743 | 1.386 | 1.387 | 1.388 | 1.387 |
| 23 | 0.0499 | 1.527 | 0.014 | 0.015 | 0.018 | 0.016 |
| 24* | 0.0502 | 0.621 | 0.019 | 0.018 | 0.017 | 0.018 |
| 25 | 0.0501 | 1.641 | 0.691 | 0.696 | 0.696 | 0.694 |
| 26* | 0.0503 | 0.743 | 1.507 | 1.505 | 1.495 | 1.502 |
| 27 | 0.0503 | 1.541 | 0.011 | 0.015 | 0.015 | 0.014 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Std Order | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของ เมทิลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือ | | | |
|--------------|-------------------|---|---------------------------------------|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 28* | 0.0499 | 0.608 | 0.015 | 0.014 | 0.011 | 0.013 |
| 29 | 0.0500 | 1.641 | 0.702 | 0.705 | 0.701 | 0.703 |
| 30* | 0.0499 | 0.749 | 1.665 | 1.663 | 1.660 | 1.663 |
| 31 | 0.0502 | 1.527 | 0.019 | 0.019 | 0.016 | 0.018 |
| 32* | 0.0500 | 0.636 | 0.023 | 0.024 | 0.024 | 0.024 |

หมายเหตุ : * หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่เจือจาง 4.5 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมททีลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สำหรับการทดลองแบบ Central Composite

| Std Order | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูที่เหลือ | | | |
|-----------|----------------|--|--|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 1 | 0.0502 | 1.654 | 0.541 | 0.536 | 0.540 | 0.539 |
| 2* | 0.0499 | 0.743 | 1.395 | 1.402 | 1.399 | 1.399 |
| 3 | 0.0499 | 1.553 | 0.010 | 0.012 | 0.009 | 0.010 |
| 4* | 0.0502 | 0.636 | 0.014 | 0.015 | 0.014 | 0.014 |
| 5 | 0.0500 | 1.641 | 0.705 | 0.702 | 0.702 | 0.703 |
| 6* | 0.0503 | 0.743 | 1.542 | 1.534 | 1.527 | 1.534 |
| 7 | 0.0500 | 1.541 | 0.021 | 0.017 | 0.016 | 0.018 |
| 8* | 0.0500 | 0.608 | 0.019 | 0.016 | 0.014 | 0.016 |
| 9* | 0.0499 | 0.575 | 0.223 | 0.223 | 0.220 | 0.222 |
| 10** | 0.0503 | 0.765 | 0.255 | 0.254 | 0.258 | 0.256 |
| 11* | 0.0498 | 0.575 | 0.228 | 0.233 | 0.224 | 0.228 |
| 12** | 0.0500 | 0.766 | 0.303 | 0.307 | 0.302 | 0.304 |
| 13 | 0.0501 | 1.225 | 0.019 | 0.020 | 0.024 | 0.021 |
| 14*** | 0.0500 | 0.765 | 1.174 | 1.169 | 1.164 | 1.169 |
| 15** | 0.0497 | 0.794 | 1.129 | 1.131 | 1.136 | 1.132 |
| 16** | 0.0500 | 0.747 | 0.012 | 0.007 | 0.006 | 0.008 |
| 17** | 0.0498 | 0.765 | 0.161 | 0.156 | 0.151 | 0.156 |
| 18** | 0.0500 | 0.765 | 0.285 | 0.284 | 0.285 | 0.285 |
| 19** | 0.0501 | 0.766 | 0.293 | 0.295 | 0.299 | 0.296 |
| 20* | 0.0499 | 0.575 | 0.223 | 0.223 | 0.220 | 0.222 |

หมายเหตุ : * หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูเริ่มต้นที่เจือจาง 4.5 เท่า

** หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูเริ่มต้นที่เจือจาง 3.5 เท่า

***หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูเริ่มต้นและเมททีลีนบลูที่เหลือที่เจือจาง

5.13 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สำหรับการทวนสอบเพื่อยืนยันผลการวิจัย

| ตัวดูดซับ | ครั้งที่ | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือ | | | |
|---------------------------------|----------|-------------------|---------------------------------------|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) | 1 | 0.0498 | 0.053 | 0.053 | 0.054 | 0.053 |
| | 2 | 0.0499 | 0.042 | 0.042 | 0.041 | 0.042 |

หมายเหตุ : ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูเริ่มต้นเท่ากับ 0.322

ตารางที่ ก.6 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษาวเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

| เวลา (นาที) | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของ เมทิลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือ | | | |
|----------------|-------------------|---|---------------------------------------|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 5 | 0.0503 | 1.386 | 0.235 | 0.241 | 0.239 | 0.238 |
| 10 | 0.0502 | 1.386 | 0.159 | 0.155 | 0.157 | 0.157 |
| 15 | 0.0499 | 1.386 | 0.159 | 0.153 | 0.148 | 0.153 |
| 20 | 0.0499 | 1.386 | 0.139 | 0.138 | 0.133 | 0.137 |
| 25 | 0.0498 | 1.386 | 0.151 | 0.148 | 0.144 | 0.148 |
| 30 | 0.0498 | 1.386 | 0.145 | 0.143 | 0.140 | 0.143 |
| 60 | 0.0502 | 1.386 | 0.105 | 0.104 | 0.109 | 0.106 |
| 90 | 0.0501 | 1.386 | 0.105 | 0.106 | 0.105 | 0.105 |
| 120 | 0.0498 | 1.386 | 0.099 | 0.099 | 0.097 | 0.098 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมททีลีนบลูที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษเวลาดำเนินการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

| เวลา (นาทีก) | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของ เมททีลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูที่เหลือ | | | |
|-----------------|-------------------|--|--|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 5 | 0.0497 | 0.776 | 1.706 | 1.710 | 1.709 | 1.708 |
| 10 | 0.0498 | 0.776 | 1.253 | 1.253 | 1.254 | 1.253 |
| 15 | 0.0498 | 0.776 | 1.105 | 1.105 | 1.107 | 1.106 |
| 20 | 0.0497 | 0.776 | 0.988 | 0.986 | 0.985 | 0.986 |
| 25 | 0.0503 | 0.776 | 0.959 | 0.957 | 0.956 | 0.957 |
| 30 | 0.0500 | 0.776 | 0.919 | 0.918 | 0.919 | 0.919 |
| 60 | 0.0497 | 0.776 | 0.855 | 0.852 | 0.851 | 0.853 |
| 90 | 0.0497 | 0.776 | 0.850 | 0.847 | 0.850 | 0.849 |
| 120 | 0.0499 | 0.776 | 0.859 | 0.860 | 0.855 | 0.858 |

หมายเหตุ : ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูเริ่มต้นเจือจาง 4 เท่า

ตารางที่ ก.8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมททีลีนบลูที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษเวลาดำเนินการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

| เวลา (นาทีก) | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของ เมททีลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูที่เหลือ | | | |
|-----------------|-------------------|--|--|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 5 | 0.0498 | 1.132 | 0.269 | 0.267 | 0.264 | 0.267 |
| 10 | 0.0500 | 1.132 | 0.202 | 0.208 | 0.205 | 0.205 |
| 15 | 0.0499 | 1.132 | 0.196 | 0.195 | 0.195 | 0.195 |
| 20 | 0.0502 | 1.132 | 0.192 | 0.187 | 0.187 | 0.189 |
| 25 | 0.0500 | 1.132 | 0.193 | 0.188 | 0.182 | 0.188 |
| 30 | 0.0499 | 1.132 | 0.173 | 0.180 | 0.179 | 0.177 |
| 60 | 0.0497 | 1.132 | 0.171 | 0.175 | 0.175 | 0.174 |
| 90 | 0.0500 | 1.132 | 0.167 | 0.164 | 0.168 | 0.166 |
| 120 | 0.0499 | 1.132 | 0.165 | 0.161 | 0.161 | 0.162 |

หมายเหตุ : ค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูเริ่มต้นเจือจาง 4 เท่า และค่าการดูดกลืนแสงของเมททีลีนบลูที่เหลือเจือจาง 10 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษเวลาดำเนินการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

| เวลา (นาทีก) | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของ เมทิลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือ | | | |
|-----------------|-------------------|---|---------------------------------------|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 5 | 0.0500 | 0.795 | 0.365 | 0.362 | 0.360 | 0.362 |
| 10 | 0.0502 | 0.795 | 0.334 | 0.339 | 0.333 | 0.335 |
| 15 | 0.0498 | 0.795 | 0.327 | 0.322 | 0.328 | 0.326 |
| 20 | 0.0498 | 0.795 | 0.321 | 0.317 | 0.311 | 0.316 |
| 25 | 0.0501 | 0.795 | 0.315 | 0.319 | 0.311 | 0.315 |
| 30 | 0.0497 | 0.795 | 0.301 | 0.303 | 0.302 | 0.302 |
| 60 | 0.0498 | 0.795 | 0.295 | 0.299 | 0.290 | 0.295 |
| 90 | 0.0499 | 0.795 | 0.289 | 0.286 | 0.285 | 0.287 |
| 120 | 0.0498 | 0.795 | 0.284 | 0.280 | 0.288 | 0.284 |

หมายเหตุ : ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูเริ่มต้นเจือจาง 8 เท่า และค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือเจือจาง 10 เท่า

ตารางที่ ก.10 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษเวลาดำเนินการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50)

| เวลา (นาทีก) | น้ำหนักสาร (g) | ค่าการดูดกลืนแสงของ เมทิลีนบลูเริ่มต้น | ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เหลือ | | | |
|-----------------|-------------------|---|---------------------------------------|------------|------------|--------|
| | | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 5 | 0.0502 | 0.817 | 0.550 | 0.540 | 0.549 | 0.546 |
| 10 | 0.0498 | 0.817 | 0.532 | 0.531 | 0.530 | 0.531 |
| 15 | 0.0500 | 0.817 | 0.525 | 0.518 | 0.516 | 0.520 |
| 20 | 0.0497 | 0.817 | 0.514 | 0.511 | 0.517 | 0.514 |
| 25 | 0.0499 | 0.817 | 0.493 | 0.491 | 0.494 | 0.493 |
| 30 | 0.0503 | 0.817 | 0.473 | 0.473 | 0.474 | 0.473 |
| 60 | 0.0499 | 0.817 | 0.469 | 0.469 | 0.470 | 0.469 |
| 90 | 0.0501 | 0.817 | 0.466 | 0.467 | 0.465 | 0.466 |
| 120 | 0.0499 | 0.817 | 0.470 | 0.470 | 0.470 | 0.470 |

หมายเหตุ : ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูเริ่มต้นและเมทิลีนบลูที่เหลือเจือจาง 10 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการทดลองการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ที่เวลา 120 นาที

| ความเข้มข้นของสารละลาย เมทิลีนบลู (mg/l) | ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่เหลือ ในสภาวะสมดุล, C_e (mg/l) | ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ ที่สภาวะสมดุล, q_e (mg/g) |
|---|---|---|
| 20 | 1.3620 | 17.91 |
| 40 | 11.8837 | 31.17 |
| 60 | 22.4838 | 40.31 |
| 80 | 39.3352 | 48.95 |
| 100 | 65.5125 | 48.16 |

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลการทดลองการดูดซับของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สำหรับ
สมการแลงเมียร์

| $1/C_e$ | $1/q_e$ |
|---------|---------|
| 0.734 | 0.056 |
| 0.084 | 0.032 |
| 0.044 | 0.025 |
| 0.025 | 0.020 |
| 0.015 | 0.021 |

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลการทดลองการดูดซับของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สำหรับ
สมการฟรุนดลิช

| $\log C_e$ | $\log q_e$ |
|------------|------------|
| 1.253 | 0.134 |
| 1.494 | 1.075 |
| 1.605 | 1.352 |
| 1.690 | 1.595 |
| 1.683 | 1.816 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

ข.1 การคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลู

การคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลู หาได้จากกราฟมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ ก.1 จากกราฟสมการเส้นตรง คือ

$$y = 0.0722x$$

เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)

y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

ตัวอย่างที่ 1

จากตาราง ก.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ เลือกลง Std Order 1 มาคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} 0.539 &= 0.0722x \\ x &= 7.4654 \end{aligned}$$

ข.2 การคำนวณหาปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ

การคำนวณหาปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ หาได้จากสมการ

$$q_t = \left[\frac{c_0 - c_t}{m} \right] \times \frac{V}{1000}$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

c_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

c_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

V คือ ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ (มิลลิลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2

จากตาราง ก.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป เลือก Std Order 1 มาคำนวณหาปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ ได้เท่ากับ

$$q_t = \left[\frac{22.9086 - 7.4654}{0.0502} \right] \times \frac{50}{1000} = 15.38$$



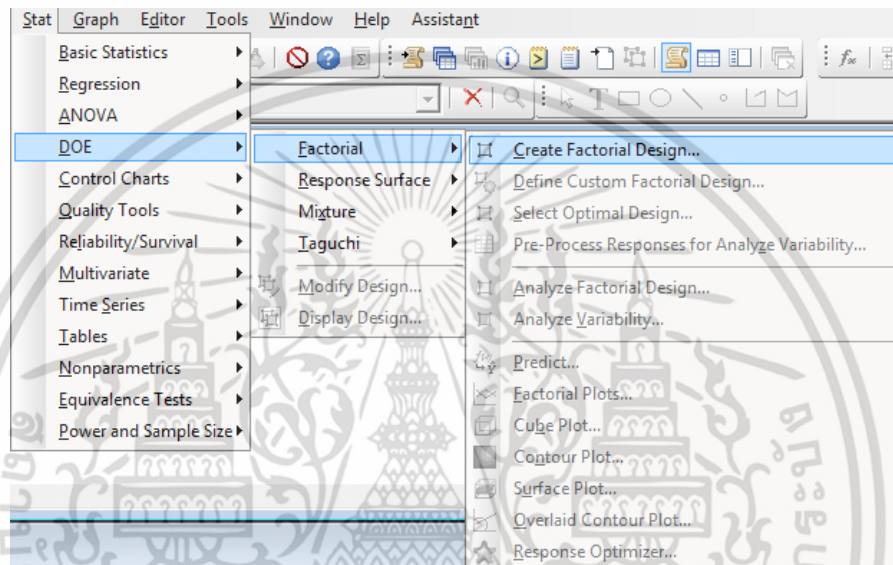
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การออกแบบการทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab

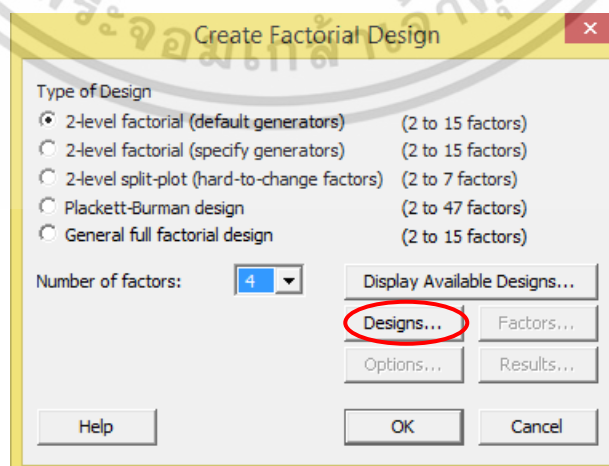
ค.1 การใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับแบบสุ่ม

1. เลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design เพื่อให้โปรแกรมสร้างแผนการทดลอง แสดงดังรูป ค.1



รูปที่ ค.1 การสร้างแผนการทดลองสำหรับการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียล

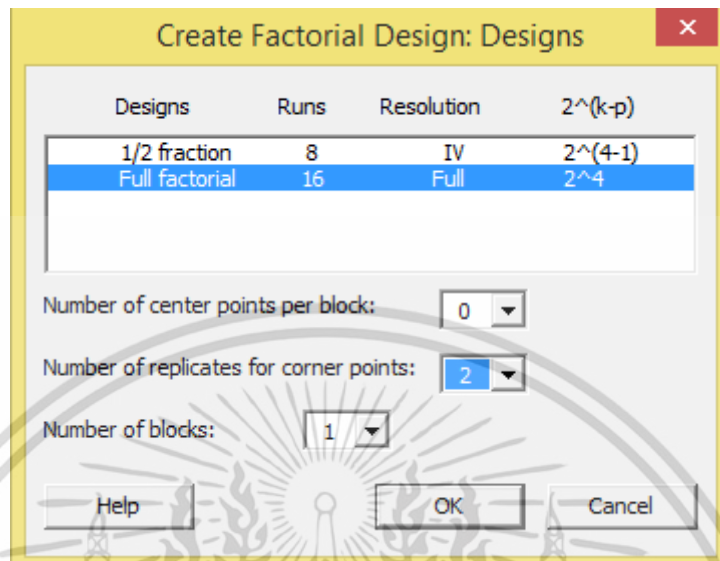
2. ที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก 2-level factorial (default generators) และใส่ Number of factors = 4 แล้วเลือก Designs แสดงดังรูป ค.2



รูปที่ ค.2 การเลือกจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

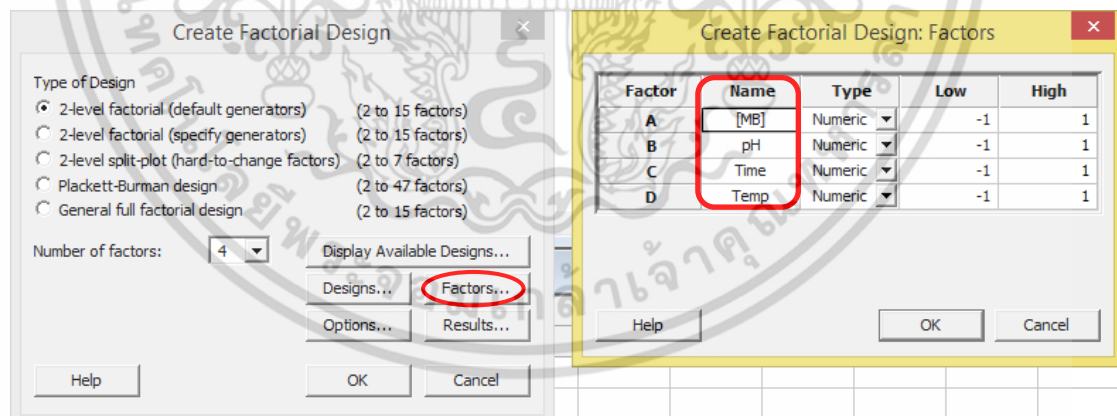
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่หน้าต่าง Create Factorial Design: Design เลือก Full factorial และเลือกจำนวนครั้ง การทดลอง แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.3



รูปที่ ค.3 การเลือกการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

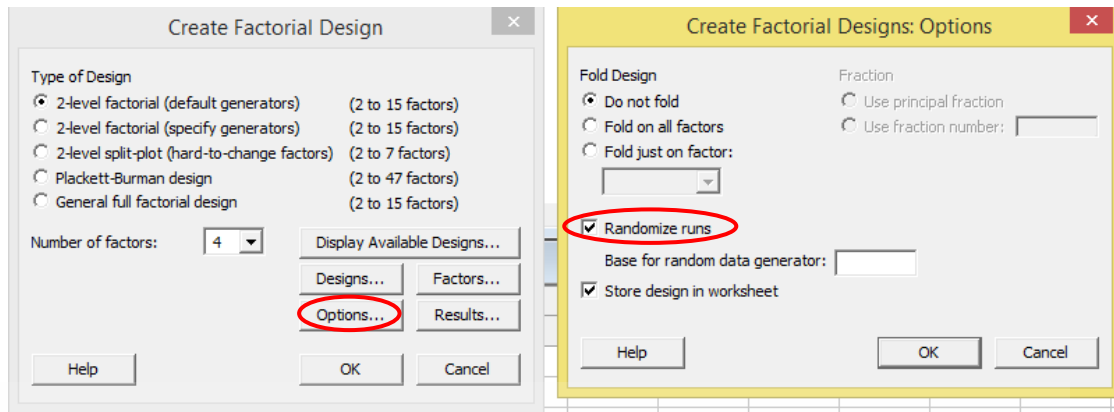
4. กลับมาที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก Factors ที่หน้าต่าง Create Factorial Design: Factors พิมพ์ชื่อปัจจัย แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.4



รูปที่ ค.4 การกำหนดชื่อปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

5. กลับมาที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก Options หน้าต่าง Create Factorial Design: Options เลือก Randomize runs เพื่อลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แล้ว กด OK แสดงดังรูป ค.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 การเลือกการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสุ่ม

6. กลับมาที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก OK เพื่อสร้างแผนการทดลอง จะได้ตารางการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นดำเนินการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากรอกค่าใส่แสดงดังรูป ค.6

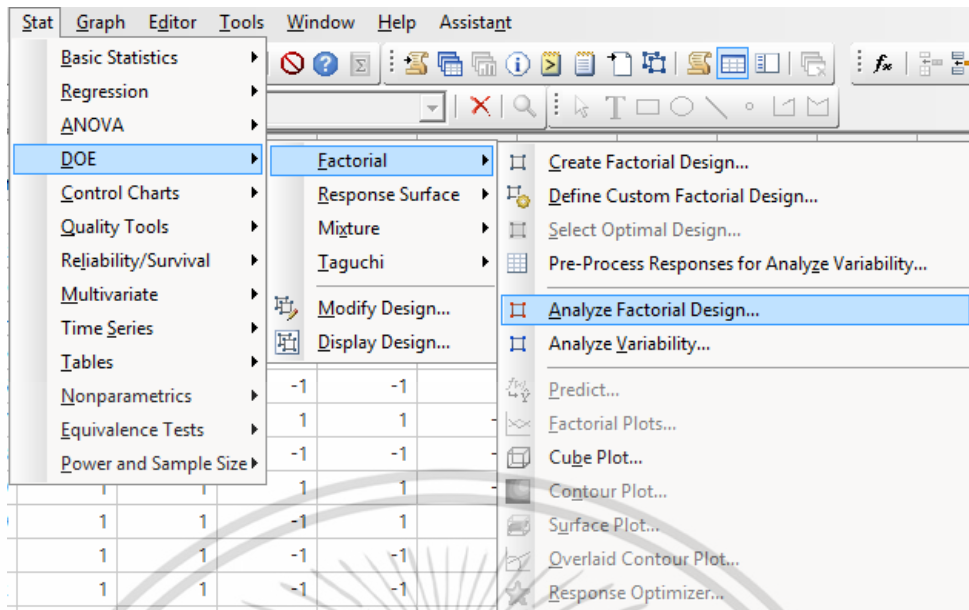
| ↓ | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 |
|----|----------|----------|----------|--------|------|----|------|------|-------|
| | StdOrder | RunOrder | CenterPt | Blocks | [MB] | pH | Time | Temp | q |
| 1 | 22 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 15.38 |
| 2 | 28 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 26.95 |
| 3 | 19 | 3 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 21.41 |
| 4 | 8 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 39.25 |
| 5 | 21 | 5 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 17.12 |
| 6 | 13 | 6 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 27.33 |
| 7 | 12 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 20.89 |
| 8 | 25 | 8 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 38.26 |
| 9 | 4 | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 12.99 |
| 10 | 15 | 10 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 24.87 |
| 11 | 5 | 11 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 21.09 |
| 12 | 29 | 12 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 37.64 |
| 13 | 10 | 13 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 13.11 |
| 14 | 30 | 14 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 23.55 |
| 15 | 18 | 15 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 20.86 |
| 16 | 27 | 16 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 39.25 |
| 17 | 11 | 17 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 14.92 |
| 18 | 26 | 18 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 26.79 |
| 19 | 9 | 19 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 21.41 |
| 20 | 2 | 20 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 39.54 |
| 21 | 20 | 21 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 17.13 |
| 22 | 23 | 22 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 27.01 |

รูปที่ ค.6 ตารางการทดลองแบบสุ่มสำหรับการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Factorial >

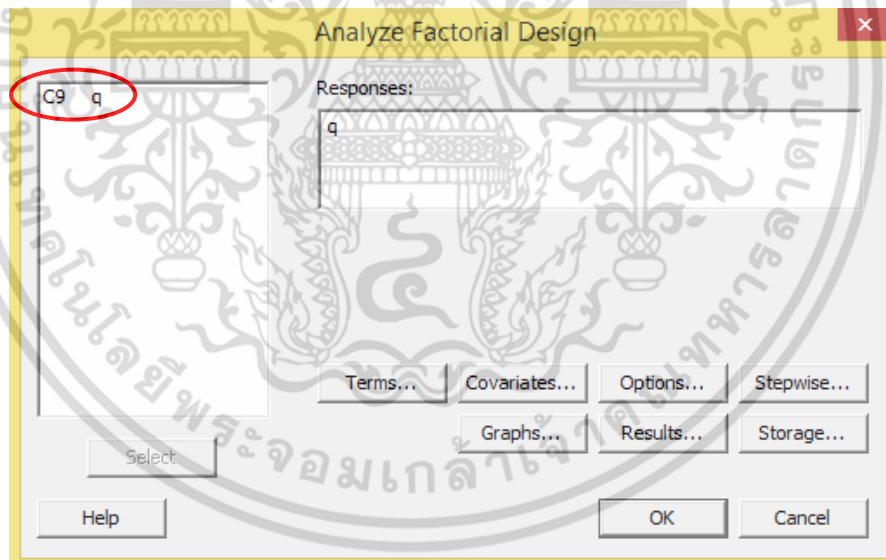
Analyze Factorial Design แสดงดังรูป ค.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.7 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

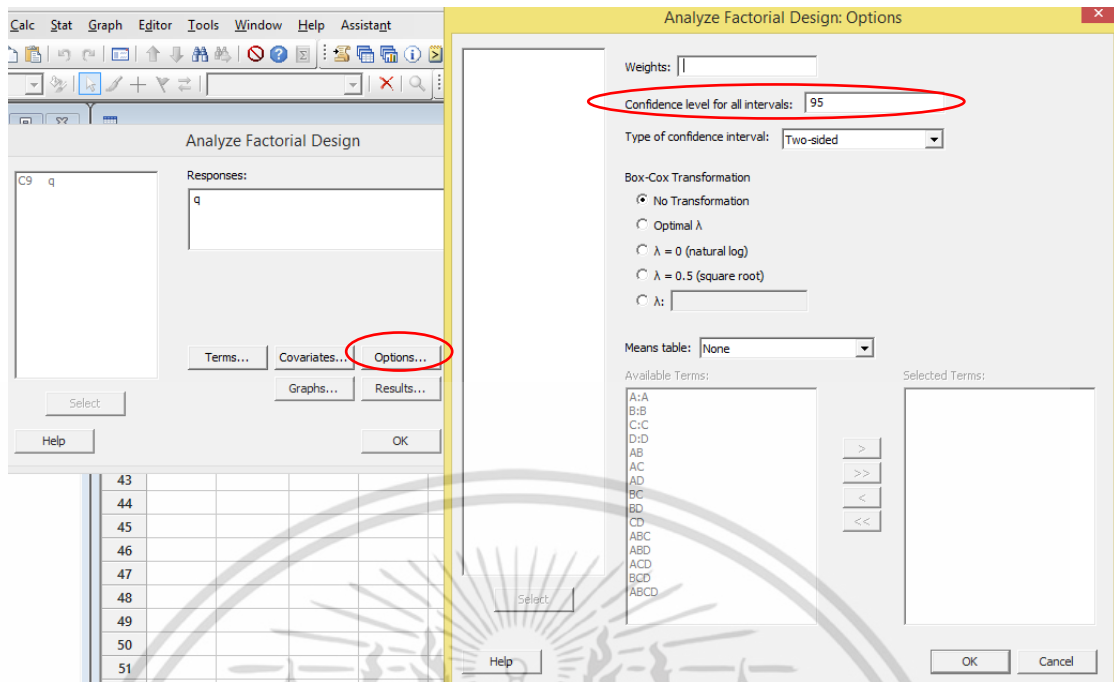
8. ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก Responses q แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.8



รูปที่ ค.8 การเลือกตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูล

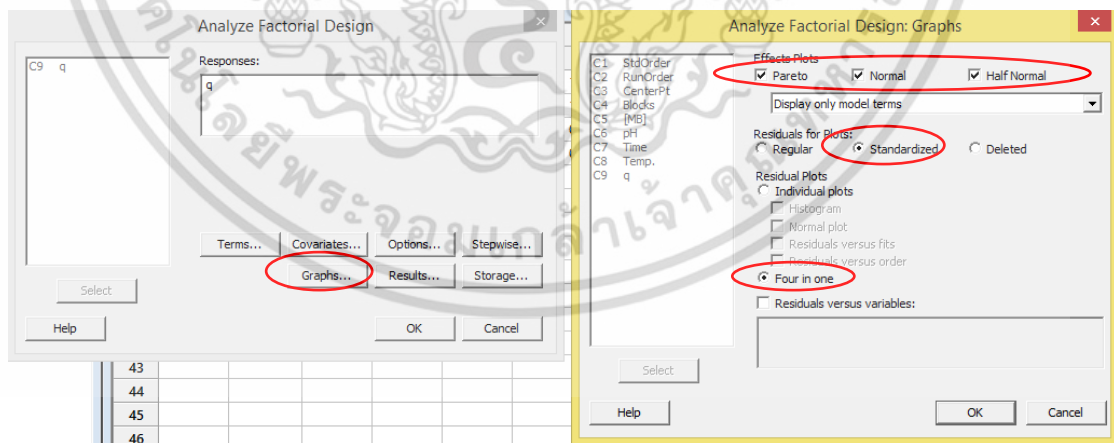
9. ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก Options แล้วเลือก Confidence level = 95 แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.9 การเลือกช่วงความเชื่อมั่นในการวิเคราะห์ข้อมูล

10. กลับมาที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก Graphs ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design: Graphs สำหรับ Effects Plots เลือกทั้ง Pareto, Normal และ Half Normal สำหรับ Residual Plot เลือก Standardized และ Four in one แล้วกด OK เมื่อกลับมาที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก OK แสดงดังรูป ค.10

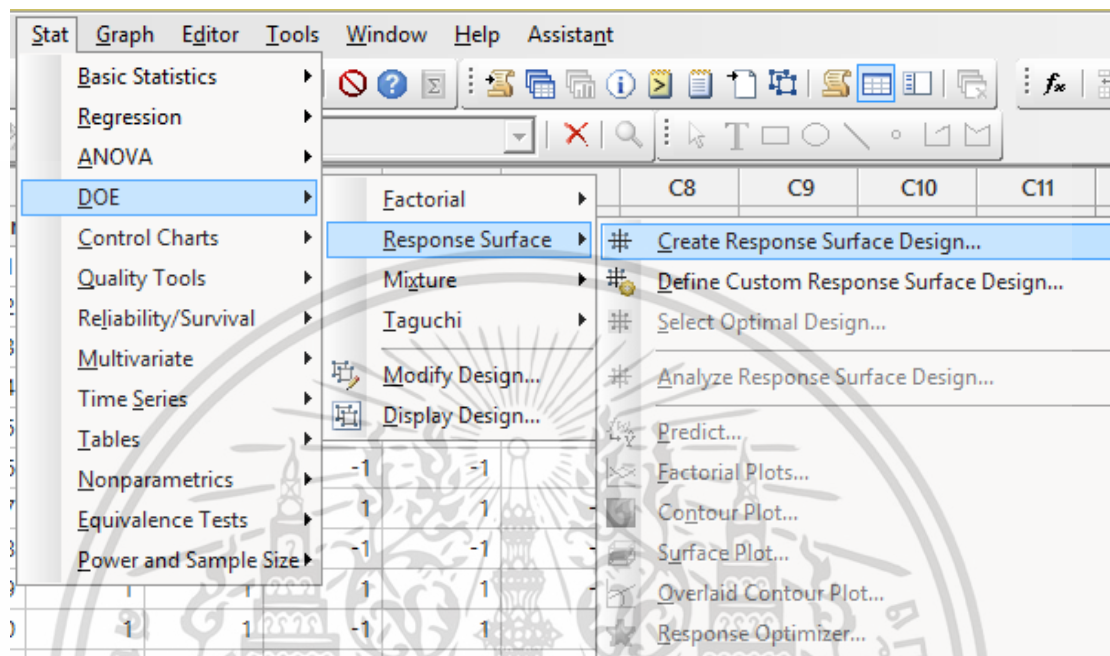


รูปที่ ค.10 การเลือกกราฟเพื่อแสดงผลการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

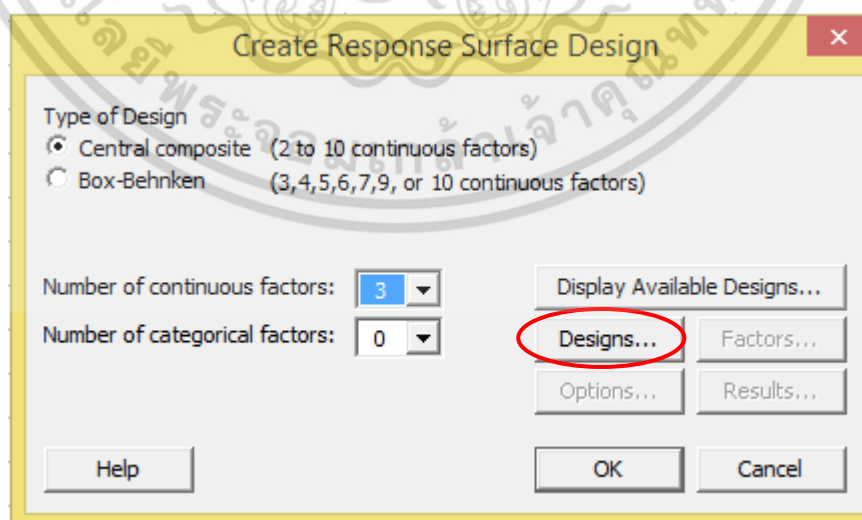
ค.2 การใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบทดลองแบบ Central Composite

1. เลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design เพื่อให้โปรแกรมสร้างแผนการทดลอง แสดงดังรูป ค.11



รูปที่ ค.11 การสร้างแผนการทดลองสำหรับการออกแบบทดลองแบบ Central Composite

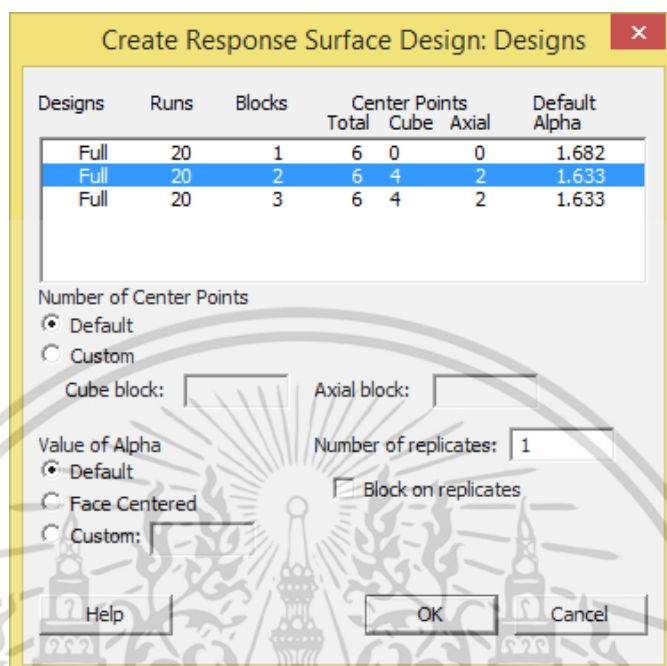
2. ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Central Composite และใส่ Number of continuous factors = 3 แล้วเลือก Designs แสดงดังรูป ค.12



รูปที่ ค.12 การเลือกการออกแบบทดลองและจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

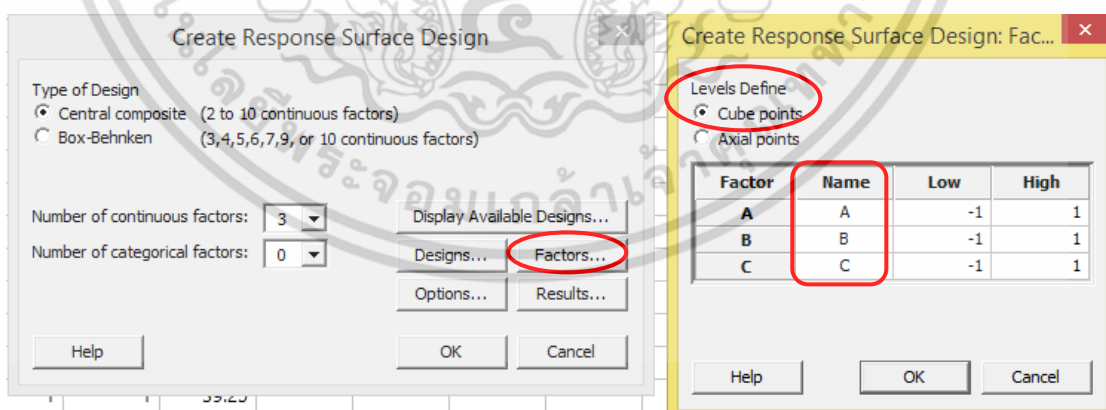
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design: Designs เลือก Default Alpha = 1.633 แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.13



รูปที่ ค.13 การเลือกการออกแบบทดลองแบบ Central Composite

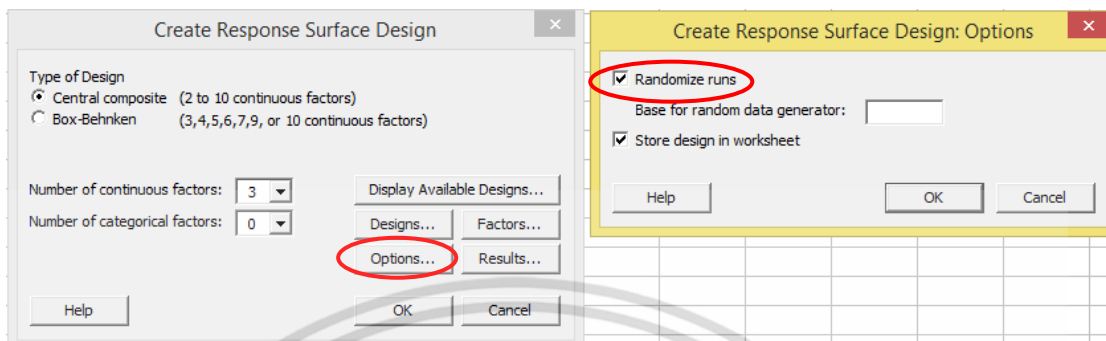
4. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Factors ที่หน้าต่าง Create Factorial Design: Factors เลือก Cube points แล้วพิมพ์ชื่อปัจจัย แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.14



รูปที่ ค.14 การกำหนดชื่อปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ Central Composite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Options ที่หน้าต่าง Create Factorial Design: Options เลือก Randomize runs เพื่อลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.15



รูปที่ ค.15 การเลือกการออกแบบทดลองแบบ Central Composite

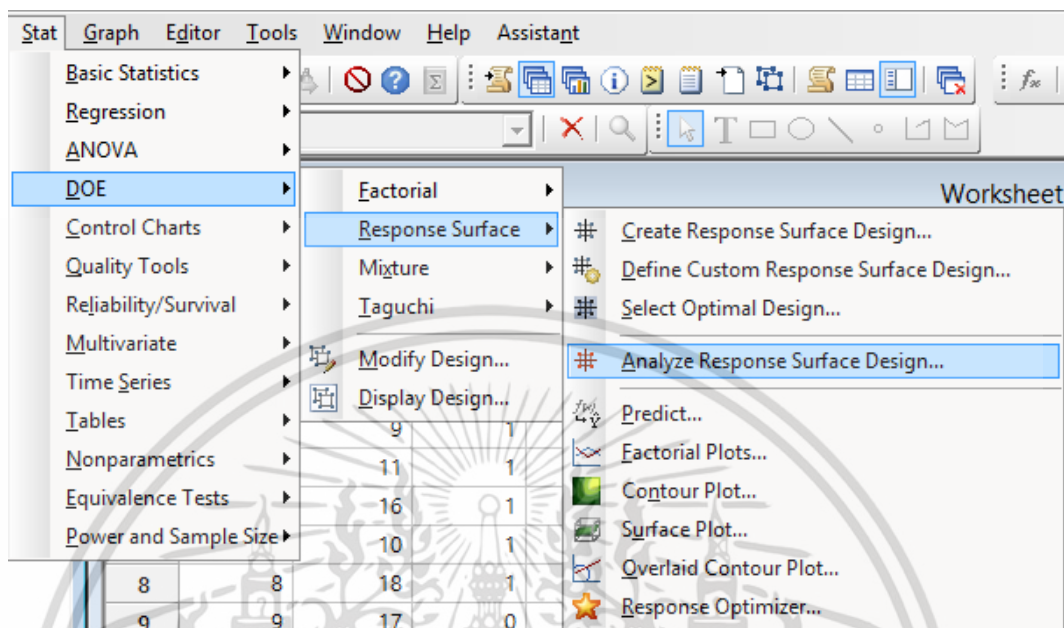
6. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก OK เพื่อสร้างแผนการทดลอง จะได้ตารางการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นดำเนินการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมารอกรอกค่าใส่ แสดงดังรูป ค.16

| ↓ | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | ✓ |
|----|----------|----------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|---|
| | StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | [MB] | pH | Temp | q | |
| 1 | 1 | 13 | 1 | 1 | 25.00 | 4.000 | 35.00 | 15.38 | |
| 2 | 2 | 12 | 1 | 1 | 45.00 | 4.000 | 35.00 | 26.95 | |
| 3 | 3 | 19 | 1 | 1 | 25.00 | 10.000 | 35.00 | 21.41 | |
| 4 | 4 | 9 | 1 | 1 | 45.00 | 10.000 | 35.00 | 39.25 | |
| 5 | 5 | 11 | 1 | 1 | 25.00 | 4.000 | 55.00 | 12.99 | |
| 6 | 6 | 16 | 1 | 1 | 45.00 | 4.000 | 55.00 | 24.87 | |
| 7 | 7 | 10 | 1 | 1 | 25.00 | 10.000 | 55.00 | 21.09 | |
| 8 | 8 | 18 | 1 | 1 | 45.00 | 10.000 | 55.00 | 37.64 | |
| 9 | 9 | 17 | 0 | 1 | 35.00 | 7.000 | 45.00 | 32.80 | |
| 10 | 10 | 15 | 0 | 1 | 35.00 | 7.000 | 45.00 | 33.31 | |
| 11 | 11 | 14 | 0 | 1 | 35.00 | 7.000 | 45.00 | 32.78 | |
| 12 | 12 | 20 | 0 | 1 | 35.00 | 7.000 | 45.00 | 32.89 | |
| 13 | 13 | 1 | -1 | 2 | 18.67 | 7.000 | 45.00 | 16.64 | |
| 14 | 14 | 3 | -1 | 2 | 51.33 | 7.000 | 45.00 | 38.14 | |
| 15 | 15 | 5 | -1 | 2 | 35.00 | 2.101 | 45.00 | 22.91 | |
| 16 | 16 | 8 | -1 | 2 | 35.00 | 11.899 | 45.00 | 36.06 | |
| 17 | 17 | 4 | -1 | 2 | 35.00 | 7.000 | 28.67 | 35.03 | |
| 18 | 18 | 7 | -1 | 2 | 35.00 | 7.000 | 61.33 | 33.10 | |
| 19 | 19 | 2 | 0 | 2 | 35.00 | 7.000 | 45.00 | 32.93 | |
| 20 | 20 | 6 | 0 | 2 | 35.00 | 7.000 | 45.00 | 32.80 | |

รูปที่ ค.16 ตารางการทดลองแบบสุ่มสำหรับการออกแบบทดลองแบบ Central Composite

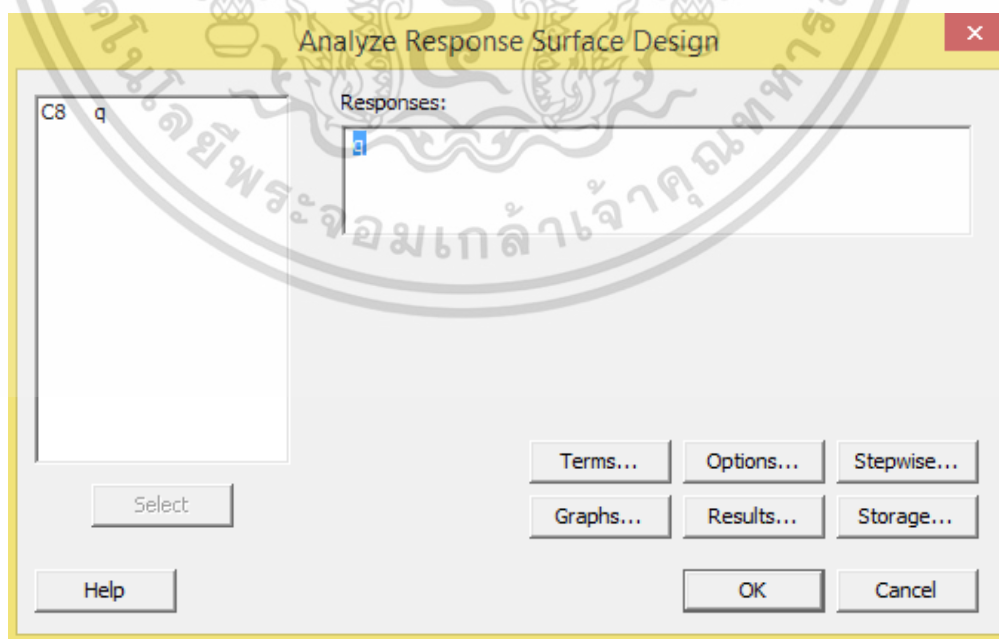
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design แสดงดังรูป ค.17



รูปที่ ค.17 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการออกแบบทดลองแบบ Central Composite

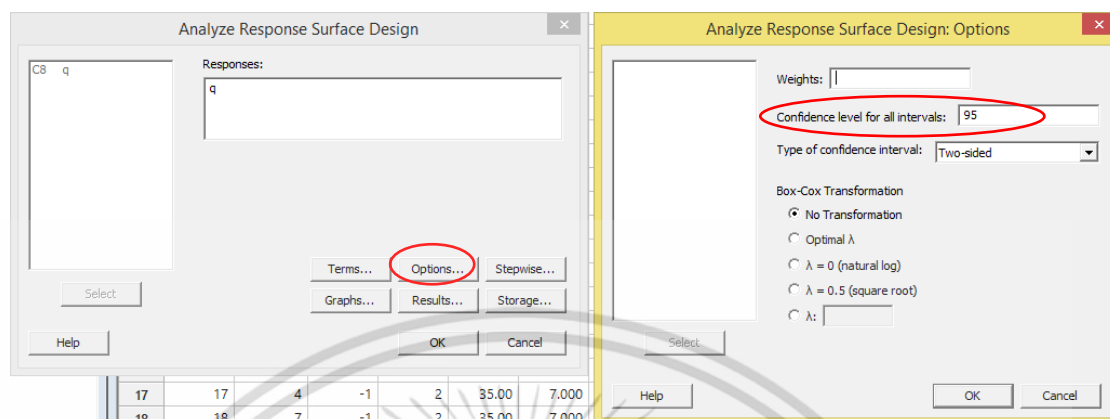
8. ที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Responses q แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.18



รูปที่ ค.18 การเลือกตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูล

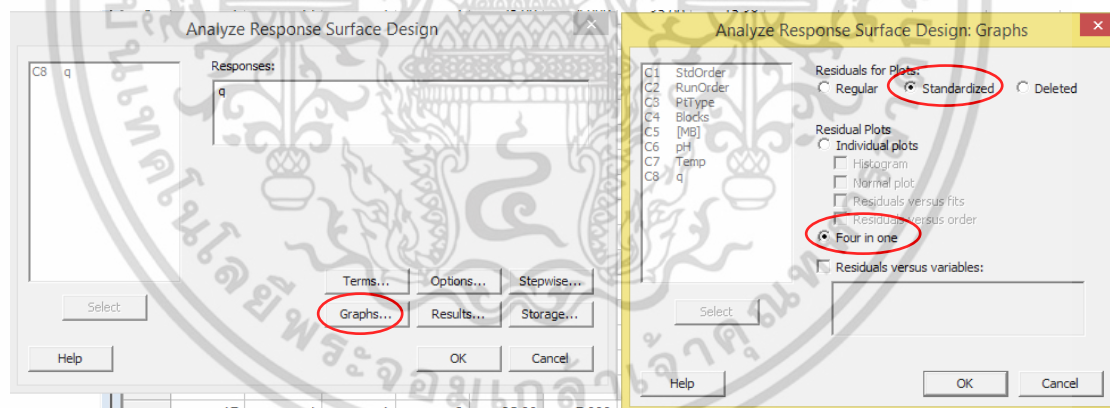
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Options แล้วเลือก Confidence level = 95 แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.19



รูปที่ ค.19 การเลือกช่วงความเชื่อมั่นในการวิเคราะห์ข้อมูล

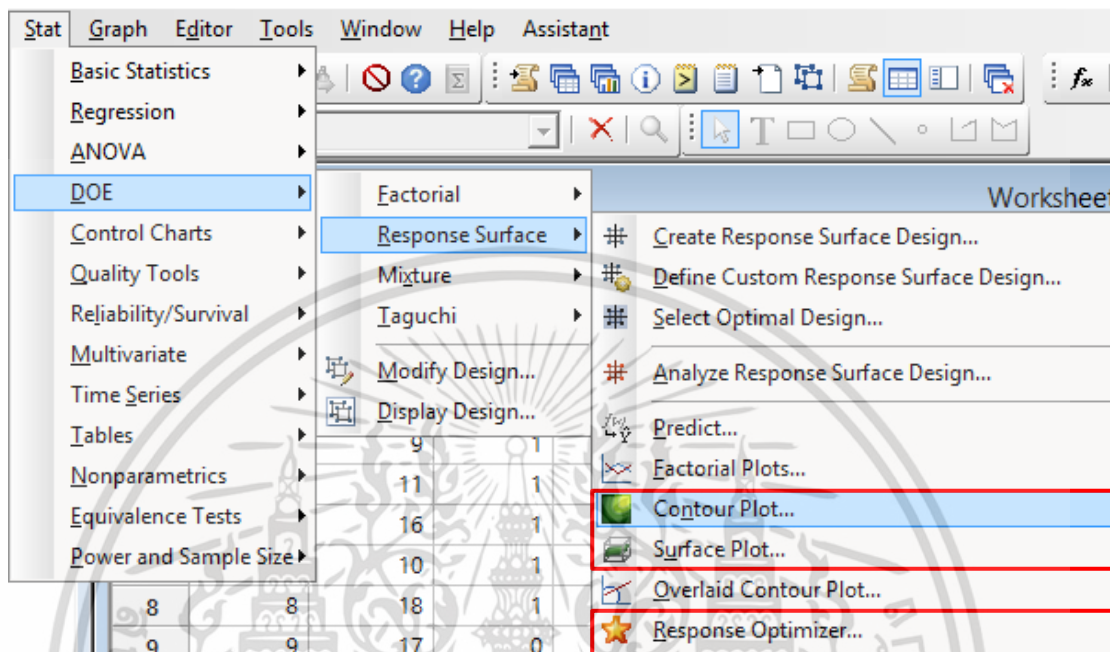
10. กลับมาที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Graphs ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design: Graphs สำหรับ Residual Plot เลือก Standardized และ Four in one แล้วกด OK เมื่อกลับมาที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก OK แสดงดังรูป ค.20



รูปที่ ค.20 การเลือกกราฟเพื่อแสดงผลการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. หาสมการที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง โดยดูจากกราฟ Surface plot กราฟ Contour plot และ Optimization plot เลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response Surface > Contour plot/ Surface plot/ Response Optimizer แสดงดังรูป ค.21



รูปที่ ค.21 การวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมของปัจจัยจากกราฟ Surface plot กราฟ Contour plot และ Optimization plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลู ด้วย MCM-41 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตต

โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป

Study of Factors Affecting Methylene Blue Adsorption on Ethyl Acetate-Modified MCM-41 Using Full Factorial Design

ชวิศา เชื้อเป็น พรสวรรค์ อัสวเสงรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการดัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยเติมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 1.88 2.50 3.77 5.63 และ 7.54 พบว่าที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 2.50 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 25 ppm ได้สูงสุดถึง 19.12 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ เมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่นๆ จากนั้นปรับเปลี่ยนปริมาณสารก่อโครงสร้าง CTAB:SiO₂ ที่อัตราส่วน 0.33 และ 1.24 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญ ดังนั้นจึงใช้ตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.5) ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q) ได้แก่ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ([MB]) ค่า pH (pH) เวลา (time) และ อุณหภูมิ (Temp) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปและใช้ซอฟต์แวร์ Minitab พบว่าผลกระทบหลักคือ [MB] pH และ Temp ผลกระทบร่วมคือ [MB]*pH และ pH*Temp ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า q เรียงตามลำดับความสำคัญคือ [MB], pH, [MB]*pH, Temp และ pH*Temp ตามลำดับ และสามารถหาแบบจำลองการถดถอยและแบบจำลองที่ลดรูปของ q ได้

คำสำคัญ: การดูดซับ, MCM-41, เมทิลีนบลู, การออกแบบการทดลอง

Abstract

This research aims to modify MCM-41 using ethyl acetate to increase methylene blue adsorption efficiency by varying molar ratios of EtAc:SiO₂ were 1.88, 2.50, 3.77, 5.63, and 7.54, respectively. Among molar ratios were studied, EtAc:SiO₂ = 2.50 adsorbed the highest amount of methylene blue (25 ppm initial concentration) i.e. 19.12 mg/g adsorbent. Molar ratios of CTAB:SiO₂ were varied from 0.33 and 1.24. However, it was found CTAB:SiO₂ did not insignificantly affect methylene blue adsorption capacities. Then MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.5) was studied factors affecting methylene blue adsorption capacities (q), such as concentration of methylene blue ([MB]), pH, time, and temperature (Temp), were also investigated using full factorial design with Minitab. The results showed that main effect of factors were [MB], pH and Temp, and second-order interaction were [MB]*pH and pH*Temp. The importance of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

factors affected to q in the following order, i.e. [MB], pH, [MB]*pH, Temp, and pH*Temp, respectively. Regression models for q were developed and the adequacy of the reduced model was also examined.

Keywords : adsorption, MCM-41, methylene blue, experimental design

1. บทนำ

ปัญหาหน้าเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีเป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างยิ่ง เนื่องจากใช้น้ำในกระบวนการผลิตเกือบทุกขั้นตอน และมักจะมีสีย้อมตกค้างอยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำมีสีที่ไม่พึงประสงค์และอาจส่งกลิ่นเหม็น หากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยไม่มีการบำบัดจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ [1]

เมททีลีนบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายในน้ำ ได้ดีทำให้กำจัดออกจากน้ำเสียได้ยาก หากเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากจะก่อให้เกิดอันตราย เช่น เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง หัวใจเต้นเร็วผิดปกติ หายใจลำบาก เป็นต้น [2] ดังนั้นจึงควรกำจัดสีย้อมในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ กระบวนการในการกำจัดสีย้อมที่น่าสนใจวิธีหนึ่งคือ การดูดซับ (Adsorption) ซึ่งมีข้อดี คือ ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก สามารถดำเนินการได้ที่ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ [3]

MCM-41 เป็นวัสดุ mesoporous molecular sieve ชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) เนื่องจากมีการกระจายขนาดรูพรุนแคบ สามารถปรับขนาดของรูพรุนได้ในช่วง 1.5-10 นาโนเมตร ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่า 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อกรัม พื้นที่ผิวสูงถึง 700-1500 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้สูง สามารถดัดแปรสมบัติบนพื้นผิวได้ [3] การดัดแปร MCM-41 มีหลากหลายวิธี เช่น การเติมสารอินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มขนาดรูพรุน [4] แต่วิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มขนาดรูพรุนได้เพียงเล็กน้อย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการดัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมททีลีนบลู โดยเอทิลอะซิเตตทำหน้าที่เป็นสารก่ออิมัลชันที่ดัด

แปรให้ตัวดูดซับมีรูพรุน 2 ขนาดในโครงสร้างเดียวกัน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมททีลีนบลู โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

2. การทดลอง

2.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ

2.1.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41

ซึ่ง Hexadecyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) 4.5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 90 กรัม ปั่นกวน 4 ชั่วโมง จากนั้นเติมโซเดียมซิลิเกต 17.5 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ประมาณ 10 ด้วยกรดซัลฟิวริก ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง เทสารละลายใส่ลงใน Teflon-lined autoclave และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 72 ชั่วโมง จากนั้นนำสารมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เท่ากับ 7 นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง

2.1.2 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41 ที่ดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตต

องค์ประกอบในการสังเคราะห์คือ $1\text{SiO}_2:1\text{Na}_2\text{O}:1.24\text{CTAB}:x\text{EtAc}$ ซึ่งโซเดียมซิลิเกต 100 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นไฮดรอกไซด์ 25.62 กรัม ปั่นกวนจนสารละลาย ซึ่งสารละลายที่เตรียมได้ 4.6 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 35 กรัม ปั่นกวนจนสารละลาย (สารละลาย A) เตรียมสารละลาย B โดยชั่ง CTAB 4.66 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 34 กรัม ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสจนสารละลาย ก่อยุๆ เติมน้ำกลั่น A ลงในสารละลาย B พร้อมปั่นกวน จากนั้นเติมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ ($x=1.88\ 2.50\ 3.77\ 5.63$ และ 7.54) ปั่นกวน 30 วินาที เทสารละลายใส่ลงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Teflon-lined autoclave ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 5 ชั่วโมง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง จากนั้นนำสารมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เท่ากับ 7 นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง และทำการสังเคราะห์สารใหม่โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน CTAB จาก 1.24 เป็น 0.33

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับ

วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) และวิเคราะห์ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้บีอีที (Brunauer-Emmett-Teller: BET)

2.3 การหาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

ชั่งตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 25 ppm ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมาเท้วยกตัวดูดซับที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง คำนวณหาปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับดังสมการที่ (1) [1]

$$q_t = \left[\frac{c_0 - c_t}{m} \right] \times \frac{V}{1000} \quad (1)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ) c_0 และ c_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้นและที่เวลาใดๆ ตามลำดับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) m คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม) และ V คือ ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ (มิลลิลิตร)

2.4 การออกแบบการทดลอง

2.4.1 การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ค่า pH เวลา และอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q) โดยใช้การ

ทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ที่ระดับนัยสำคัญ 5% โดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab แสดงดังตารางที่ 1 โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

| ปัจจัย | หน่วย | ระดับ | |
|--------------------------------|-------|----------|----------|
| | | สูง (+1) | ต่ำ (-1) |
| ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู, [MB] | Mg/l | 45 | 25 |
| ค่า pH, pH | - | 10 | 4 |
| เวลา, time | min | 90 | 60 |
| อุณหภูมิ, Temp | °C | 55 | 35 |

2.4.2 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุสอดคล้องกับรูปแบบฟังก์ชัน first-order response [5]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j < i} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

เมื่อ β_0 , β_i และ β_{ij} คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่จุดตัด ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ร่วมตามลำดับ x_i และ x_j คือตัวแปรอิสระใน coded units และ ε คือค่าความคลาดเคลื่อน

2.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ANOVA ที่มีนัยสำคัญของการถดถอยหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและตัวแปรถดถอยผ่านการทดสอบทางสถิติฟิชเชอร์ (F-test) R^2 มีค่า 0-1 ดังสมการ [5]

$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \left(\frac{SSE}{SST} \right) \quad (3)$$

เมื่อ SST และ SSE เป็นผลรวมกำลังสองและผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาดตามลำดับ

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการสังเคราะห์ตัวดูดซับ MCM-41 ที่คัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วนต่างๆ

ผลการสังเคราะห์ตัวดูดซับที่เดิมเอทิลอะซิเตตที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 1.88 2.50 3.77 5.63 และ

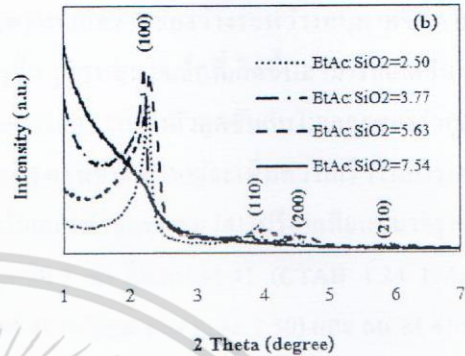
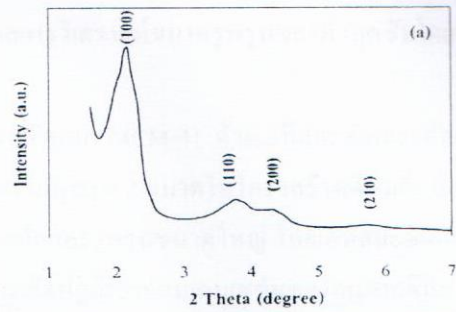
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.54 แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าอัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 1.88 สารไม่เกิดการตกตะกอน เนื่องจากปริมาณเอทิลอะซิเตตน้อยเกินไป เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นกรดอะซิติกและเอทานอลส่งผลให้ค่า pH ลดลงเล็กน้อย ไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ MCM-41 ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ MCM-41 อยู่ในช่วง 8-11 [3, 6] ส่วนที่อัตราส่วนอื่นๆ สารที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว

ตารางที่ 2 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วนต่างๆ

| EtAc:SiO ₂ | ค่า pH ที่ 5 ชั่วโมง | ค่า pH หลังจาก 2 วัน | ลักษณะสารที่สังเคราะห์ได้ |
|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 1.88 | 12.78 | 12.05 | สารไม่เกิดการตกตะกอน |
| 2.50 | 10.67 | 10.11 | ของแข็งสีขาว |
| 3.77 | 9.20 | 6.07 | ของแข็งสีขาว |
| 5.63 | 8.74 | 5.78 | ของแข็งสีขาว |
| 7.54 | 7.44 | 5.44 | ของแข็งสีขาว |

เมื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า MCM-41 ปรากฏที่คี่หลักที่มุม 2θ เท่ากับ 2.18 องศา ตรงกับระนาบ (100) ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างเป็นระเบียบภายในตัวดูดซับ และปรากฏที่คี่ขนาดเล็กที่มุม 2θ เท่ากับ 3.78 และ 4.33 องศา ซึ่งตรงกับระนาบ (110) และ (200) ตามลำดับ [7] สำหรับ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 2.50 3.77 และ 5.63 ปรากฏที่คี่ที่ระนาบเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นคือ MCM-41 ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ส่วนที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 7.54 ไม่ปรากฏที่คี่ใดๆ แสดงว่าที่อัตราส่วนนี้สารที่สังเคราะห์ได้ไม่ได้สร้างตัวเป็น MCM-41 เนื่องจากค่า pH ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไม่เหมาะสม [3] ดังนั้นที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 2.50 จึงเป็นอัตราส่วนที่ใช้ปริมาณเอทิลอะซิเตดน้อยที่สุดและยังคงเป็น MCM-41 อยู่



รูปที่ 1 กราฟ XRD ของตัวดูดซับ (a) MCM-41 และ (b) MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วนต่างๆ

3.2 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 และ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วนต่างๆ

ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้น 25 ppm เวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสของ MCM-41 และ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า MCM-41 ที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 2.50 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุดถึง 19.12 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ

ตารางที่ 3 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของ MCM-41 และ MCM-41 ที่ตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วนต่างๆ

| ตัวดูดซับ | q (mg/g) | | |
|--------------------------------------|------------|------------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | เฉลี่ย |
| MCM-41 | 17.97 | 18.14 | 18.06 |
| MCM-41 (EtAc:SiO ₂ =2.50) | 18.94 | 19.30 | 19.12 |
| MCM-41 (EtAc:SiO ₂ =3.77) | 17.87 | 17.79 | 17.83 |
| MCM-41 (EtAc:SiO ₂ =5.63) | 17.36 | 17.42 | 17.39 |

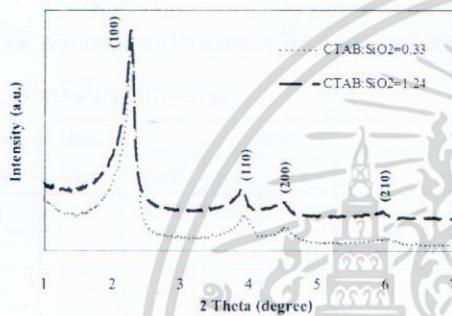
3.3 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 (EtAc:SiO₂=2.50) ที่เติม CTAB ที่อัตราส่วนต่างๆ

ผลการสังเคราะห์ MCM-41 ที่เติมเอทิลอะซิเตดที่อัตราส่วน 2.50 เติม CTAB:SiO₂ ที่อัตราส่วน 0.33 และ

1.24 แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าค่า pH ในการสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน และสารที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ผลการวิเคราะห์ โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าปรากฏพีคที่ระนาบเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ CTAB ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของตัวดูดซับ

ตารางที่ 4 ผลการสังเคราะห์ MCM-41 (EtAc:SiO₂=2.50) ที่เติม CTAB:SiO₂ ที่อัตราส่วน 0.33 และ 1.24

| CTAB:SiO ₂ | ค่า pH ที่ 5 ชั่วโมง | ค่า pH หลังจาก 2 วัน | ลักษณะสารที่สังเคราะห์ได้ |
|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 0.33 | 10.67 | 10.11 | ของแข็งสีขาว |
| 1.24 | 10.65 | 10.17 | ของแข็งสีขาว |



รูปที่ 2 กราฟ XRD ของ MCM-41 (EtAc:SiO₂=2.50) ที่เติม CTAB:SiO₂ ที่อัตราส่วน 0.33 และ 1.24

3.4 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ MCM-41 (EtAc:SiO₂=2.50) ที่เติม CTAB ที่อัตราส่วนต่างๆ

ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของ MCM-41 (EtAc:SiO₂=2.50) ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วน CTAB:SiO₂ จาก 1.24 เป็น 0.33 แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นที่อัตราส่วน CTAB:SiO₂ เท่ากับ 0.33 จึงเป็นอัตราส่วนที่ใช้ปริมาณสารก่อโครงสร้างน้อยที่สุดและดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงที่สุด

ตารางที่ 5 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของ MCM-41 (EtAc:SiO₂=2.50) ที่เติม CTAB:SiO₂ ที่อัตราส่วน 0.33 และ 1.24

| ตัวดูดซับ | q (mg/g) | | |
|--------------------------------------|------------|------------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | เฉลี่ย |
| MCM-41 (CTAB:SiO ₂ =0.33) | 19.89 | 19.77 | 19.83 |
| MCM-41 (CTAB:SiO ₂ =1.24) | 18.94 | 19.30 | 19.12 |

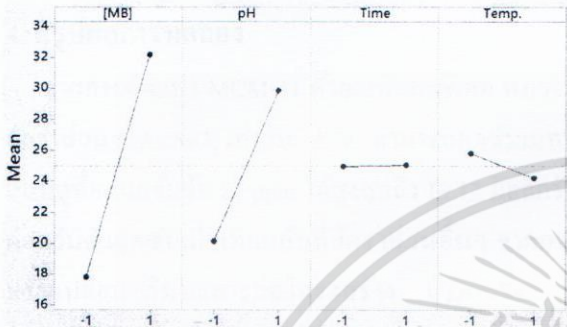
3.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยเทคนิคบีอีที

การคัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตตจะคัดแปรให้ตัวดูดซับมีรูพรุน 2 ขนาดในโครงสร้างเดียวกัน คือ รูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดใหญ่ โดยเอทิลอะซิเตตจะช่วยให้เร่งการเกิดปฏิกิริยากอนเดนเซชันของอนุภาคซิลิกา ส่งผลให้รูพรุนที่เกิดจากช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิกามีขนาดใหญ่ขึ้น รูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างตัวดูดซับกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ขณะที่รูพรุนขนาดใหญ่จะเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ [4] เปรียบเทียบขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ 3 ตัว คือ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM 41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ด้วยเทคนิคบีอีที การกระจายขนาดรูพรุนของตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 3 จากรูปพบว่า MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) มีรูพรุนขนาดเล็ก 0.69–0.73 นาโนเมตร รูพรุนขนาดใหญ่ 1.74–2.94 นาโนเมตรและขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 8.157 นาโนเมตร MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) มีรูพรุนขนาดเล็ก 0.70–0.73 นาโนเมตร รูพรุนขนาดใหญ่ 1.97–3.68 นาโนเมตรและขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 6.902 นาโนเมตร และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) มีรูพรุนขนาดเล็ก 0.70–0.73 นาโนเมตร รูพรุนขนาดใหญ่ 1.96–3.67 นาโนเมตรและขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 5.435 นาโนเมตร แม้ว่า MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 3.77) จะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ที่สุด คือ 8.157 นาโนเมตร แต่ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่ำที่สุด เนื่องจากมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) ซึ่งมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก และ MCM-41 (CTAB 1.24 EtAc 2.50) และ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 Main effects and interactions plots

ผลกระทบหลักแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าเส้นกราฟของ [MB] pH และ Temp มีลักษณะสูงชันแสดงว่าเป็นผลกระทบที่มีนัยสำคัญ ผลกระทบร่วมแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าผลกระทบร่วม [MB]*pH และ pH*Temp มีลักษณะเส้นกราฟที่ไม่ขนานกัน แสดงความสัมพันธ์ร่วมแบบสองทาง (Two-way interaction) ระหว่างผลกระทบหลัก [MB] กับ pH และ pH กับ Temp เกิดค่อนข้างมาก [5, 8]



รูปที่ 5 กราฟ Main effects plot



รูปที่ 6 กราฟ Interaction plot

3.6.3 แบบจำลองการถดถอยของค่า q

ตารางที่ 7 แสดงผลกระทบที่คาดและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coef) พร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SE_{coef}) ค่าทางสถิติและความน่าจะเป็น (P) สำหรับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมซึ่งหาได้จากวิธีตัวแปรกำลังสองที่มีค่าน้อยที่สุด แบบจำลองการถดถอยใน coded units ระหว่างค่า q กับตัวแปรแต่ละตัวแสดงดังสมการที่ (4)

$$q = 24.9985 + 7.1720[MB] + 4.8601pH + 0.0332time - 0.7922Temp + 1.6258[MB]*pH - 0.1273[MB]*time + 0.0372[MB]*Temp - 0.0661pH*time + 0.6492pH*Temp - 0.0490time*Temp \quad (4)$$

ตารางที่ 7 ผลกระทบโดยประมาณและค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยของค่า q

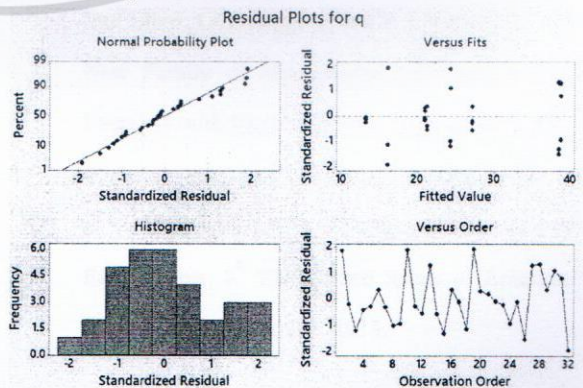
| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value |
|-----------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Constant | | 24.9985 | 0.0257 | 973.17 | 0.000 |
| [MB] | | 7.1720 | 0.0257 | 279.20 | 0.000 |
| pH | | 4.8601 | 0.0257 | 189.20 | 0.000 |
| time | | 0.0332 | 0.0257 | 1.29 | 0.215 |
| Temp | | -0.7922 | 0.0257 | -30.84 | 0.000 |
| [MB]*pH | | 1.6258 | 0.0257 | 63.29 | 0.000 |
| [MB]*time | | -0.1273 | 0.0257 | -4.95 | 0.000 |
| [MB]*Temp | | 0.0372 | 0.0257 | 1.45 | 0.167 |
| pH*time | | -0.0661 | 0.0257 | -2.57 | 0.020 |
| pH*Temp | | 0.6492 | 0.0257 | 25.27 | 0.000 |
| time*Temp | | -0.0490 | 0.0257 | -1.91 | 0.075 |

หลังจากทดสอบที่ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 5% คือ เทอม P ที่มีค่ามากกว่า 0.05 (ตารางที่ 7) สามารถสร้างแบบจำลองที่ลดรูปได้ดังสมการที่ (5)

$$q = 24.998 + 7.172[MB] + 4.860pH - 0.792Temp + 1.626[MB]*pH + 0.649pH*Temp \quad (5)$$

3.6.4 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

ในการทดลองมักจะมีปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมจำนวนมาก และปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการทดลอง จึงวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากกราฟ Residual plot แสดงดังรูปที่ 7 ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติจากกราฟ Normal probability plot พบว่ากราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่จากกราฟ Residual กับ Fitted value ไม่พบสิ่งผิดปกติ และตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากกราฟ Residual กับ Order พบการกระจายแบบไม่มีรูปแบบ แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 7 กราฟ Residual plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยที่ลดรูปสำหรับค่า q ในสมการ (5) พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 99.58% แสดงว่ามีเพียงแค่ 0.42% ของความแปรปรวนรวมที่ไม่ได้ถูกอธิบายด้วยแบบจำลอง ความแตกต่างระหว่าง R^2 และ R^2 (adj)(99.49%) มีค่าเท่ากับ 0.09% แสดงว่ามีโอกาสน้อยมากที่เทอมที่ไม่มีนัยสำคัญจะรวมอยู่ในแบบจำลอง

4. สรุปผลการทดลอง

จากการคัดแปร MCM-41 ด้วยเอทิลอะซิเตต พบว่าที่อัตราส่วน EtAc:SiO₂ เท่ากับ 2.50 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 25 ppm ได้สูงสุดถึง 19.12 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่นๆ จากการปรับเปลี่ยนปริมาณสารก่อโครงสร้าง CTAB:SiO₂ ที่อัตราส่วน 0.33 และ 1.24 พบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงเลือกตัวดูดซับ MCM-41 (CTAB 0.33 EtAc 2.50) มาศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (q) พบว่า [MB], pH, [MB]*pH, Temp และ pH*Temp เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติตามลำดับ และหาแบบจำลองการถดถอยที่ลดรูปของ q ได้เท่ากับ $24.998 + 7.172[MB] + 4.860pH - 0.792Temp + 1.626[MB]*pH + 0.649pH*Temp$ ค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 99.58%

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Suttananl and K. Piyamongkala, "Kinetic and Thermodynamic Adsorption of Methylene Blue by Modified Rice Husk," The Journal of KMUTNB., Vol. 21, No. 2, May. - Aug. 2011
- [2] X. Xiao, F. Zhang, Z. Feng, S. Deng and Y. Wang, "Adsorptive removal and kinetics of methylene blue from aqueous solution using

NiO/MCM-41 composite," Physica E, Vol. 65, pp. 4-12, 2015.

- [3] P. Selvam, S. K. Bhatia and C. G. Sonwane, "Reviews: Recent Advances in Processing and Characterization of Periodic Mesoporous MCM-41 Silicate Molecular Sieves," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 40, pp. 3237-3261, 2001.
- [4] C. Bernal, M. Mesa, M. Jaber, J. L. Guth, and L. Sierra, "Contribution to the understanding of the formation mechanism of bimodal mesoporous MCM41-type silica with large defect cavities," Microporous and Mesoporous Materials. Vol. 153, pp. 217-226, 2012.
- [5] S. H. Chang, T. T. Teng and N. Ismail, "Screening of factors influencing Cu(II) extraction by soybean oil-based organic solvents using fractional factorial design," Journal of Environmental Management, Vol. 92, pp. 2580-2585, 2011.
- [6] C. Bernal, M. Mesa, M. Jaber, J. L. Guth and L. Sierra, "Contribution to the understanding of the formation mechanism of bimodal mesoporous MCM41-type silica with large defect cavities," Microporous and Mesoporous Materials, Vol. 153, pp. 217-226, 2012.
- [7] J. S. Beck, J. C. Vartuli, W. J. Roth, M. E. Leonowicz, C. T. Kresge, K. D. Schmitt C. T-W. Chu, D. H. Olson, E. W. Sheppard, S. B. McCullen, J. B. Higgins, and J. L. Schlenker, "A New Family of Mesoporous Molecular Sieves Prepared with Liquid Crystal Templates" J. Am. Chem. Soc., Vol. 114, pp. 10834-10843, 1992.
- [8] D. C. MONTGOMERY, Design and Analysis of Experiments, 8th ED. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวชวิศา เชื้อแป้น
วัน เดือน ปีเกิด 10 สิงหาคม 2533 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ 8/1 หมู่ที่ 3 ต.กุ่มหัก อ.หนองแค จ.สระบุรี 18140
โทร. 090-971-4479
อีเมล chavi.ch@hotmail.com
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2546-2552 มัธยมศึกษา โรงเรียนสระบุรีวิทยาคม จ.สระบุรี
พ.ศ. 2552-2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2557-2559 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานทางวิชาการ

- ปริญญาโทในระดับปริญญาตรี เรื่องการสังเคราะห์และศึกษาสมบัตินาโนแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต โดยวิธีการเผาไหม้แบบอัดโนมิตโดยใช้ไกลซีน-ไนเตรทเป็นสารตั้งต้น
- บทความวิจัยเรื่อง การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลูด้วย MCM-41 ที่ผ่านการตัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Study of Factors Affecting Methylene Blue Adsorption on Ethyl Acetate-Modified MCM-41 Using Full Factorial Design) ตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปีที่ 33 เล่มที่ 2 มิถุนายน 2559 หน้า 84 - 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้