

การดูดซับแบบคัดเลือกของสีย้อมชนิดมีประจุ โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว
โดยเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว
ในแอลจีเนตชนิดเม็ดโดยระบบคอลลอยด์

นายวีรวัฒน์ หาญอมรรุ่งเรือง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SELECTIVE ADSORPTION OF IONIC DYE, HEAVY METAL, AND SURFACTANT
BY FUNCTIONALIZED HEXAGONAL MESOPOROUS SILICATE
IN ALGINATE BEAD BY COLUMN SYSTEM

Mr. Veerawat Hanamornroongruang



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับแบบคัดเลือกของสีย้อมชนิดมีประจุ โลหะหนัก
และสารลดแรงตึงผิว โดยเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต
ที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวในแอลจีเนตชนิดเม็ด
โดยระบบคอลลอยด์

โดย

นายวิวัฒน์ หาญอมรรุ่งเรือง

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พนิดา ปรารัตน์)

วีรวัฒน์ หาญอมรรุ่งเรือง : การดูดซับแบบคัดเลือกของสีย้อมชนิดมีประจุ โลหะหนัก และ สารลดแรงตึงผิว โดยเฮกซะโกนอนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ในแอลจีเนตชนิดเม็ดโดยระบบคอลัมน์ (SELECTIVE ADSORPTION OF IONIC DYE, HEAVY METAL, AND SURFACTANT BY FUNCTIONALIZED HEXAGONAL MESOPOROUS SILICATE IN ALGINATE BEAD BY COLUMN SYSTEM) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล, 176 หน้า.

แอลจีเนต (Algi) ถูกนำมาใช้ขึ้นรูปร่วมกับเฮกซะโกนอนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (HMS) และ HMS ที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS) เพื่อทำให้เป็นเม็ด ได้แก่ Algi-HMS และ Algi-A-HMS ตามลำดับ จากผลการทดลองการดูดซับในระบบที่ละเทพบว่าตัวดูดซับทั้งสามชนิดสามารถดูดซับ ทองแดง (Cu) ได้เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิตกับหมู่คาร์บอกซิล ส่วน Algi-HMS สามารถดูดซับ TX-100® (TX100) ได้เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ซิลานอล และ Algi-A-HMS สามารถดูดซับแอสิตบลู 45 (AB45) ได้เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิตกับหมู่อะมิโน ซึ่งการดูดซับทั้งหมดเข้ากันได้กับ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเสมือน และสำหรับการทดสอบสมดุลการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงก์เมียร์ การดูดซับ AB45 และ Cu โดยใช้ Algi-A-HMS และการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS มีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมทุกชนิด ยกเว้นเส้นตรง และการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi เข้ากับไอโซเทอมทุกชนิดยกเว้นฟรอนด์ลิชและเส้นตรง และจากผลการทดลองการดูดซับในระบบคอลัมน์พบว่าเมื่อเพิ่มความยาวของคอลัมน์ทำให้อัตราการใช้ตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียที่ทำการบำบัดลดลง โดยความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นตัวดูดซับ และเวลาเบรกทฤษฎีมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามสมการเบรกทฤษฎีของโบฮาร์ทและอดัมส์ และในการ ออกแบบระบบคอลัมน์ที่มีการจัดเรียงลำดับจาก Algi Algi-HMS และ Algi-A-HMS ตามลำดับ สำหรับการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมพบว่าสามารถกำจัดมลสารที่ละชนิดคือ Cu TX100 และ AB45 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามลำดับ นอกจากนี้ Algi ที่ดูดซับ Cu แล้วสามารถนำไปฟื้นฟูได้โดยใช้สารละลาย (Extractant) กรดไนตริก โดยมีความจุการดูดซับลดลงเล็กน้อย แต่การฟื้นฟูตัวดูดซับ Algi-HMS และ Algi-A-HMS ด้วยสารละลายผสมของน้ำและแอลกอฮอล์อาจทำให้เกิดความเสียหาย ต่อโครงสร้างตัวดูดซับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยพระคุณของ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาแนะนำ ให้คำปรึกษา และถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนสนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน และคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ ดร.พนิดา ปรารัตน์ ที่ได้ให้เกียรติสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้ และได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาคเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอบพระคุณอาจารย์รามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สีย้อม.....	5
2.2 ผลกระทบของสีย้อมในน้ำเสีย.....	7
2.3 การบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย.....	9
2.4 โลหะหนัก.....	15
2.5 ผลกระทบของโลหะหนักในน้ำเสีย.....	16
2.6 การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	18
2.7 สารลดแรงตึงผิว.....	20
2.8 ผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสีย.....	22
2.9 การบำบัดสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสีย.....	22
2.10 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	23

2.11 ผลกระทบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	25
2.12 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	26
2.13 แอซิดบลู 45 (Acid Blue 45; AB45).....	28
2.14 ทองแดง (Copper; Cu)	30
2.15 TX-100 [®] (Triton [™] X-100; TX100).....	32
2.16 การดูดซับ	34
2.16.1 ลักษณะการดูดซับ.....	34
2.16.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	35
2.16.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดูดซับ	36
2.16.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	37
2.16.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	38
2.16.6 การดูดซับในระบบคอลัมน์.....	41
2.16.7 กราฟเบรกกทรู.....	42
2.16.8 สมการเบรกกทรูโดยใช้แบบจำลองของโรมัส	42
2.16.9 การออกแบบระบบคอลัมน์.....	43
2.17 เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (Hexagonal Mesoporous Silicate; HMS).....	47
2.18 หมู่ฟังก์ชัน	49
2.19 หมู่ฟังก์ชันอะมิโน	49
2.20 แอลจีเนต.....	50
2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	51
2.21.1 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับต่อการดูดซับสีย้อม.....	51
2.21.2 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับต่อการดูดซับโลหะหนัก.....	53
2.21.3 การดูดซับมลสารผสมของสารลดแรงตึงผิวโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกา	56

2.21.4 การดูดซับโลหะหนักโดยใช้แอลจีเนต.....	58
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	60
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	60
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	60
3.1.2 สารเคมี.....	61
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	62
3.2.1 การสังเคราะห์เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (HMS).....	64
3.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS).....	64
3.2.3 การขึ้นรูปตัวดูดซับ HMS ชนิดเม็ด (Algi-HMS) และ A-HMS ชนิดเม็ด (Algi-A-HMS).....	65
3.2.4 การขึ้นรูปตัวดูดซับแอลจีเนตชนิดเม็ด (Algi).....	65
3.2.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ.....	66
3.2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณมลสารในน้ำเสียสังเคราะห์.....	67
3.2.7 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท.....	69
3.2.8 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์.....	73
3.2.9 การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำกลับไปใช้ซ้ำ.....	78
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	79
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ.....	79
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	79
4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน.....	81
4.1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อะมิโนบนตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว.....	87
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ.....	87
4.2 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเทโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยว.....	91
4.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	91

4.2.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	96
4.3 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละลายโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารผสม	107
4.3.1 การศึกษากระบวนการดูดซับ AB45 ในน้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารผสมในระบบที่ละลาย... ..	107
4.3.2 การศึกษากระบวนการดูดซับ TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารผสมในระบบที่ละลาย. . .	108
4.3.3 การศึกษากระบวนการดูดซับ Cu ในน้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารผสมในระบบที่ละลาย ...	110
4.4 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารเดี่ยว.....	111
4.4.1 การศึกษากราฟเบรคทรูที่อัตราการไหลต่างๆ	111
4.4.2 การศึกษากราฟเบรคทรูที่ความหนาของชั้นตัวดูดซับต่างๆ	112
4.5 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารผสม.....	118
4.5.1 การจัดลำดับคอลัมน์ตัวดูดซับ	118
4.5.2 การออกแบบระบบคอลัมน์	119
4.6 การศึกษากระบวนการฟื้นฟูตัวดูดซับ	129
4.6.1 การฟื้นฟู Algi-A-HMS ในการดูดซับ AB45	129
4.6.2 การฟื้นฟู Algi-HMS ในการดูดซับ TX100.....	131
4.6.3 การฟื้นฟู Algi ในการดูดซับ Cu.....	132
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	133
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	133
5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	133
5.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	133
5.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	134
5.1.4 การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารผสมในระบบที่ละลาย	134
5.1.5 การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารเดี่ยวในระบบคอลัมน์	134
5.1.6 การศึกษาการออกแบบระบบคอลัมน์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ห้มลสารผสม	134

5.1.7 การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ	135
5.2 ข้อเสนอแนะ	135
รายการอ้างอิง	136
ภาคผนวก.....	141
ภาคผนวก ก	142
ภาคผนวก ข	150
ภาคผนวก ค	169
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	176



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถในการย้อมติดเส้นใยของสีย้อมชนิดต่างๆ.....	7
ตารางที่ 2.2 กระบวนการทางกายภาพ-เคมีที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย.....	9
ตารางที่ 2.3 กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็งต่างๆที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย ...	11
ตารางที่ 2.4 กระบวนการทางชีวภาพที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย	12
ตารางที่ 2.5 เทคโนโลยีอื่นๆที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย.....	12
ตารางที่ 2.6 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537).....	16
ตารางที่ 2.7 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539).....	17
ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวมีความอ่อนนุ่ม	21
ตารางที่ 2.9 แสดงวัตถุประสงค์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมและลักษณะของมลสารในน้ำเสียที่เกิดขึ้น.....	24
ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทั่วไปของแอซิดบลู 45 ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะทองแดงที่ใช้ในการทดลอง.....	31
ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติทั่วไปของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ TX-100® ที่ใช้ในการทดลอง	33
ตารางที่ 2.13 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต.....	48
ตารางที่ 2.14 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่พบได้ทั่วไป	49
ตารางที่ 2.15 คุณสมบัติทั่วไปของหมู่ฟังก์ชันอะมิโน.....	50
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวดูดซับ.....	66
ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของ HMS และ A-HMS.....	84
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆบน A-HMS ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer	87

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45.....	92
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100	93
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu.....	95
ตารางที่ 4.6 สรุปแนวโน้มการดูดซับ อัตราเร็ว และแบบจำลองจลนพลศาสตร์	95
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความจุการดูดซับ AB45 โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ	97
ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS.....	97
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความจุการดูดซับ TX100 โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	100
ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS.....	100
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบความจุการดูดซับ Cu โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ	103
ตารางที่ 4.12 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi..	103
ตารางที่ 4.13 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอมการดูดซับ .	106
ตารางที่ 4.14 ค่าคงสมการเบรคทรูของโรมัสของการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS.....	113
ตารางที่ 4.15 ค่าคงสมการเบรคทรูของโรมัสของการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS	115
ตารางที่ 4.16 ค่าคงสมการเบรคทรูของโรมัสของการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi	117
ตารางที่ 4.17 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi.	120
ตารางที่ 4.18 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS.....	121
ตารางที่ 4.19 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS.....	122
ตารางที่ 4.20 ค่าคงสมการเบรคทรูของโรมัสของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi..	123
ตารางที่ 4.21 ค่าคงสมการเบรคทรูของโรมัสของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-HMS.....	125
ตารางที่ 4.22 ค่าคงสมการเบรคทรูของโรมัสของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-A-HMS.....	127

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	20
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างไมเซลล์	21
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของแอสิตบลู 45.....	28
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว TX-100®	32
รูปที่ 2.5 กราฟเบรคทูและขอบเขตการถ่ายเทมวลในระบบคอลลอยด์.....	41
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้งานคอลลอยด์กับความหนาของชั้นตัวดูดซับ... 44	
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ตัวดูดซับกับ EBCT	46
รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต	47
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย	63
รูปที่ 3.2 การทดลองการดูดซับในระบบคอลลอยด์.....	73
รูปที่ 3.3 แผนผังระบบการดูดซับแบบคัดเลือกในระบบคอลลอยด์	76
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ HMS.....	79
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ A-HMS.....	80
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ HMS และ A-HMS	80
รูปที่ 4.4 ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง).....	82
รูปที่ 4.5 การจำแนกไอโซเทอม 6 ชนิดตาม IUPAC	83
รูปที่ 4.6 การกระจายของขนาดรูพรุนของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง).....	84
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม IR ของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง).....	86
รูปที่ 4.8 ภาพขยายพื้นผิวของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 15,000 เท่า.....	88
รูปที่ 4.9 ภาพขยายพื้นผิวของ Algi-HMS โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า (บน) และ 15,000 เท่า (ล่าง).....	89

รูปที่ 4.10 ภาพขยายพื้นผิวของ Algi-A-HMS โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า (บน) และ 15,000 เท่า (ล่าง).....	90
รูปที่ 4.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi.....	91
รูปที่ 4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi.....	93
รูปที่ 4.13 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi.....	94
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับ AB45.....	96
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ ฟรุนด์ลิช ซิปส์ เรดลิชและปีเตอร์สัน และ Radke และ Prausnitz.....	98
รูปที่ 4.16 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับ TX100	99
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ ฟรุนด์ลิช ซิปส์ เรดลิชและปีเตอร์สัน และ Radke และ Prausnitz.....	101
รูปที่ 4.18 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับ Cu.....	102
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS (บน) Algi-A-HMS (กลาง) และ Algi (ล่าง) กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ ฟรุนด์ลิช ซิปส์ เรดลิชและปีเตอร์สัน และ Radke และ Prausnitz.....	105
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS ในน้ำเสีย สังเคราะห์หมลสารเดี่ยวและหมลสารผสม	107
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างการเกิดอัตรการระหว่าง TX100 และ AB45 บนพื้นผิวของตัวดูดซับ Algi-A-HMS.	108
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในน้ำเสีย สังเคราะห์หมลสารเดี่ยวและหมลสารผสม	109
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการเกิดอัตรการระหว่าง AB45 และ TX100 บนพื้นผิวของตัวดูดซับ Algi-HMS.	109
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ในน้ำเสียสังเคราะห์ หมลสารเดี่ยวและหมลสารผสม.....	110

รูปที่ 4.25 ผลการทดลองการดูดซับ TX100 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ความยาว 10 เซนติเมตร ที่มีอัตราการไหล 0.93 และ 2.05 มิลลิลิตรต่อนาที	111
รูปที่ 4.26 ผลการทดลองการดูดซับ AB45 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-A-HMS ในระบบคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที ความยาว 10 15.3 และ 20 เซนติเมตร...	112
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับ Algi-A-HMS ในการดูดซับ AB45	113
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองการดูดซับ TX100 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที ความยาว 10 15.3 และ 20 เซนติเมตร	114
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับ Algi-HMS ในการดูดซับ TX100.....	115
รูปที่ 4.30 ผลการทดลองการดูดซับ Cu ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi ในระบบคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที ความยาว 5 10 และ 15.3 เซนติเมตร.....	116
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับ Algi ในการดูดซับ Cu..	117
รูปที่ 4.32 การจัดลำดับคอลัมน์ตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ผสมสารผสม	118
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทูล์ในการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ในระบบคอลัมน์	119
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทูล์ในการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์.....	120
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทูล์ในการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS ในระบบคอลัมน์.....	121
รูปที่ 4.36 ผลการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ผสมสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้ Algi ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที	124
รูปที่ 4.37 ผลการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ผสมสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้ Algi-HMS ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที.....	126

รูปที่ 4.38 ผลการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้ Algi-A-HMS ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที.....	128
รูปที่ 4.39 ผลการทดลองการฟื้นฟู Algi-A-HMS จากการดูดซับ AB45.....	129
รูปที่ 4.40 ภาพตัวอย่างสมมติฐานการพังทลายของพื้นผิวตัวดูดซับในกระบวนการฟื้นฟูตัวดูดซับ ..	130
รูปที่ 4.41 ผลการทดลองการฟื้นฟู Algi-HMS จากการดูดซับ TX100	131
รูปที่ 4.42 ผลการทดลองการฟื้นฟู Algi จากการดูดซับ Cu	132



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องมาจากการเติบโตทางเศรษฐกิจส่งผลให้มีการขยายกำลังการผลิตในอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอุตสาหกรรมพอกย้อม โดยอุตสาหกรรมพอกย้อมนั้นมีการใช้น้ำและสารเคมีเป็นจำนวนมากซึ่งน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งออกมาประกอบด้วย สีย้อม โลหะหนัก สารลดแรงตึงผิว กรด-ด่าง สารแขวนลอย ความร้อน และอื่นๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) โดยส่วนใหญ่แล้วน้ำเสียประเภทนี้ จะไม่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพจนผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งได้ มลสารส่วนใหญ่ โดยเฉพาะสีย้อมและสารลดแรงตึงผิวนั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งจุลชีพไม่สามารถย่อยสลายได้ หรือในกรณีที่ย่อยสลายได้ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายมักจะมีสารมัธยันตร์ (Intermediate) ซึ่งเป็นพิษ (Punyapalukul และ Takizawa, 2006) นอกจากนี้ยังมีโลหะหนักต่างๆ ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโรคร้ายแรง จึงมีความพยายามที่จะนำกระบวนการดูดซับมาใช้ร่วมกับกระบวนการบำบัดพื้นฐานในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมพอกย้อม (Gaikwad และ Misal, 2010)

การใช้กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในระบบบำบัดน้ำเสียมีข้อจำกัดเนื่องจาก ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับมลสารที่หลากหลายทำให้ต้องใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมากเพื่อบำบัดน้ำเสียให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้การทำให้โมเลกุลของสีย้อมและมลสารต่างๆ ที่ถูกดูดซับหลุดออกจากผิวถ่านกัมมันต์นั้นทำได้ยาก จึงไม่คุ้มค่าที่จะนำไปฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และเมื่อนำไปเผาต้องมีการกำจัดกากซึ่งมักมีส่วนประกอบของโลหะหนักปนอยู่ด้วยทำให้วิธีนี้มีต้นทุนสูง จึงได้มีการนำตัวดูดซับซิลิกามาทำการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว โดยพบว่าหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับซิลิกามีบทบาทสำคัญในการดูดซับมลสารชนิดต่างๆอย่างมาก โดยหมู่ฟังก์ชันอะมิโนนั้น จะเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิดมีประจุ และโลหะหนักได้ (Machida และคณะ, 2012) และในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุพบว่าตัวดูดซับซิลิกาที่ไม่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันมีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด (Paisanjit, 2008) แต่เนื่องจากตัวดูดซับซิลิกาที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น เฮกซะโกนอลเมโซพอร์ซิลิเกต มีขนาดที่เล็กมากทำให้แยกออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดได้ยากและไม่สามารถนำไปใช้ในระบบคอลัมน์ได้ จึงมีการนำแอลจินेटซึ่งเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งสกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาลมาใช้ในการบวกรูปตัวดูดซับซิลิกา ซึ่งแอลจินेटมีคุณสมบัติ

ในการดูดซับโลหะหนักได้ดีมากเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีรูพรุนสูง ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในที่สูงตามไปด้วย (Navarro และคณะ, 2014)

การวิจัยนี้มีความสนใจที่จะทำการศึกษากระบวนการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยมลสารผสมของสีย้อม โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว โดยใช้เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตซึ่งเป็นวัสดุซิลิกาสังเคราะห์ที่มีลักษณะพื้นผิวที่เป็นเอกรูปโดยประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันซิลานอลกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว นอกจากนี้ยังมีพื้นผิวและรูพรุนสูง และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มความสามารถในการคัดเลือกมลสารในการดูดซับจึงได้ทำการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และยังได้ทำการขึ้นรูปตัวดูดซับให้มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปใช้ในระบบคอลัมน์ได้โดยใช้แอลจินेट อีกทั้งยังทำการศึกษาผลกระทบจากการจัดลำดับของตัวดูดซับชนิดต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับแบบคัดเลือกของระบบและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟูตัวดูดซับ ซึ่งการทดลองนี้จะทำในระบบปฏิบัติการแบบคอลัมน์เพื่อให้สอดคล้องกับระบบปฏิบัติการจริงที่ใช้อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองการดูดซับเบื้องต้นและนำไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและประเมินศักยภาพของระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแบบคัดเลือกของสีย้อมแอซิดบลู 45 โลหะหนักทองแดง และสารลดแรงตึงผิว TX-100® โดยการดูดซับด้วยฟองก์ชั้นบนเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต ที่ทำการขึ้นรูปในกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์

1.2.2 ศึกษาข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงกระบวนการเพื่อใช้ในการออกแบบ และประเมินศักยภาพของระบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ทำการศึกษาการดูดซับในระบบคอลัมน์ด้วยคอลัมน์ทดลองในสถานะอุณหภูมิห้อง

1.3.3 ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตชนิดเม็ด เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการดูดซับฟองก์ชั้นอะมิโนชนิดเม็ด และแอลจินตชนิดเม็ด

1.3.4 ปรับแต่งฟองก์ชั้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยกระบวนการดูดซับฟองก์ชั้น (Grafting-method) โดยใช้หมู่ฟองก์ชั้นอะมิโน

1.3.5 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับโดยใช้ XRD FT-IR การวิเคราะห์ธาตุ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

1.3.6 ศึกษาน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้มลสารในการทดลอง ได้แก่ ทองแดง สีย้อมแอซิดบลู 45 และอัลคิลฟีนอล โพลีอีธอกซีเลท (TX-100®)

1.3.7 ศึกษาคุณภาพของน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ UV-Visible spectroscopy และ AAS

1.3.8 ศึกษาการดูดซับในระบบที่ละเทโดยการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ

1.3.9 ศึกษาการดูดซับในระบบคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีมลสาร 1 และ 3 ชนิด

1.3.10 ศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงศักยภาพในการดูดซับแบบคัดเลือกของสีย้อม โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว บนตัวดูดซับเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวและขึ้นรูปเป็นเม็ด โดยใช้แอลจีเนต

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบจากการเรียงลำดับตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับแบบคัดเลือก ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีมลสารผสมของสีย้อม โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว

1.4.3 สามารถประเมินศักยภาพของระบบปฏิบัติการการดูดซับแบบคอลัมน์และนำไปใช้ในการออกแบบระบบปฏิบัติการจริงได้

1.4.4 ทราบถึงความสามารถในการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อมคือสารที่มีคุณสมบัติในการให้สีแก่วัตถุ ซึ่งมีทั้งสีย้อมที่เกิดจากธรรมชาติและสีย้อมที่สังเคราะห์ขึ้น โดยสีย้อมจากธรรมชาติสกัดได้จากพืชและสัตว์โดยมีการใช้สารช่วยให้ยึดติด (mordant) เพื่อให้สีย้อมมีความคงทน สีย้อมธรรมชาตินั้นมีใช้มาอย่างยาวนานจนกระทั่งปี 1856 ได้มีการคิดค้นสีย้อมสังเคราะห์ขึ้น โดยสีย้อมสังเคราะห์นั้นเป็นสารประกอบอะโรมาติก-ไฮโดรคาร์บอนซึ่งสกัดมาจากปิโตรเลียม โดยความเป็นสีของสารสังเคราะห์เหล่านี้เกิดจากโครงสร้างหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ โดยหมู่โครโมฟอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือหมู่เอโซ (azo group) และหมู่แอนทราควิโนน (anthraquinone group) นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างหมู่ออกโซโครม (auxochrome) เป็นตัวกำหนดความเข้มของสีย้อม โดยมีสมบัติแตกตัวเป็นไอออนได้ ซึ่งช่วยให้สีย้อมติดกับเส้นใยได้ดี โดยหมู่ออกโซโครมที่นิยมคือ หมู่อะมิโน หมู่คาร์บอกซิล หมู่ซัลโฟเนต และหมู่ไฮดรอกซิล (กาวิ ศรีกุลกิจ, 2544)

นอกจากที่มาของสีย้อมแล้ว ยังมีวิธีที่ใช้จำแนกสีย้อมอีกสองวิธีคือ จำแนกตามลักษณะการใช้งาน และจำแนกตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี โดยการจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งานนั้นเป็นวิธีที่นิยมที่สุด เนื่องจากมีความสะดวกในการนำมาใช้ และยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง โดยการจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งานสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 12 ประเภท คือ (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิษฐ์, 2554)

1. สีดิสเพอร์ส (Disperse dyes) เป็นสีย้อมที่มีสมบัติละลายน้ำไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมากโดยจะกระจายตัวเป็นอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำที่มีสารช่วยกระจายตัวที่เหมาะสม สีดิสเพอร์สใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตท โดยสามารถนำมาย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ได้ด้วย ซึ่งสีย้อมชนิดนี้จะมีสมบัติทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี

2. สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีโดยจะมีประจุเป็นลบในน้ำที่มีพีเอช 9.5-11 สีรีแอกทีฟ เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยโมเลกุลของสีจะจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟจะให้สีที่สดใสและติดทนในทุกสภาวะ

3. สีเบสิก (Basic dyes) หรือสีแคทไอออน (Cationic dyes) เป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้ แต่ไม่สามารถย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ โดยจะต้องใช้สารช่วยติด (Mordant) เพื่อให้สีย้อมจับกับเส้นใยได้ โดยสีที่ได้มี ความสดใส แต่ไม่ทนแสง

4. สีแอซิด (Acid dyes) เป็นสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติละลายน้ำได้ดี ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน มีประจุเป็นลบ สามารถย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด และสามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และเส้นใยโพลีเอไมด์ เป็นต้น โดยสีที่ได้จะติดไม่แน่น

5. สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal-complex dyes) เป็นสีแอซิดที่สามารถก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะไม่ละลายน้ำ ทำให้สีที่ได้มีความคงทน โดยสีชนิดนี้ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน

6. สีไดเรกต์ (Direct dyes) เป็นสีสังเคราะห์ที่ใช้ในการย้อมเส้นใยฝ้ายโดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีหมู่กรดซัลโฟนิกช่วยให้ละลายน้ำได้ดี

7. สีเอโซอิก (Azoic dyes) เป็นสีในกลุ่มสารประกอบเอโซ มีสมบัติไม่ละลายน้ำ สามารถใช้ย้อมเส้นใยได้โดยใช้สารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ โดยจะก่อตัวเป็นผลึกสีภายในเส้นใย ซึ่งสีชนิดนี้ใช้ย้อมเส้นใย เซลลูโลสเท่านั้น เพราะสารประกอบฟีนอลเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน

8. สีแวลต์ (Vat dyes) เป็นสีย้อมที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมในการก่อตัวเป็นผลึกสีในเส้นใยเซลลูโลส โดยเป็นสีที่มีความคงทนดีที่สุดในสีย้อมเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนี้ยังสามารถใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้

9. สีกำมะถัน (Sulphur dyes) เป็นสีที่ย้อมติดบนเส้นใยเซลลูโลสได้ดีโดยละลายในน้ำที่มีสถานะเป็นต่าง โดยสีที่ได้จะไม่สดใส

10. สีออกซิไดซ์ (Oxidation colorants) เป็นสีที่มีความคงทน แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

11. สีโอเนียม (Onium dyes) เป็นพิกเมนต์ที่มีสมบัติคงทนต่อแสงและสารเคมี โดยนำมาปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันให้สามารถละลายน้ำได้ นิยมใช้ในการพิมพ์ผ้ามากกว่าการย้อม

12. สีมิเนอรัล (Mineral colorant) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิด โดยนิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

2.2 ผลกระทบของสีย้อมในน้ำเสีย

สีย้อมที่ปนมากับน้ำเสียนั้นส่วนใหญ่มาจากกระบวนการย้อมเส้นใยเซลลูโลส เช่น ผ้าฝ้าย ซึ่งมีปริมาณการบริโภคที่มากถึง 50% ของผลิตภัณฑ์สิ่งทอทั้งหมดทั่วโลก โดยตารางที่ 2.1 แสดงถึงความสามารถในการย้อมติดเส้นใยของสีย้อมชนิดต่างๆ และปริมาณสีย้อมที่สูญเสียในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม (Carmen และ Daniela, 2012)

ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถในการย้อมติดเส้นใยของสีย้อมชนิดต่างๆ (European Water Association, 2005)

ชนิดของสีย้อม	ชนิดของเส้นใย	การย้อมติด, %	ปริมาณสูญเสียในน้ำทิ้ง, %
Acid	Polyamide	80-95	5-20
Basic	Acrylic	95-100	0-5
Direct	Cellulose	70-95	5-30
Disperse	Polyester	90-100	0-10
Metal complex	Wool	90-98	2-10
Reactive	Cellulose	50-90	10-50
Sulphur	Cellulose	60-90	10-40
Dye-stuff	Cellulose	80-95	5-20

การมีสีย้อมในน้ำนั้นเป็นการขัดขวางไม่ให้เกิดการเติมออกซิเจนในน้ำและยังทำให้แสงส่องผ่านลงสู่ใต้น้ำได้น้อย ซึ่งส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและพืชน้ำต่างๆ โดยสีตามแม่น้ำลำคลองนั้นถูกมองเห็นเป็นปัญหาทางทัศนียภาพมากกว่าความเป็นพิษต่อระบบนิเวศเนื่องจากคนทั่วไปนั้นมีความรู้สึกว่ามีสีที่ดูเหมือนธรรมชาติเช่นสีน้ำเงิน สีเขียว และสีน้ำตาลนั้นเป็นที่ยอมรับได้ โดยจะตระหนักถึงปัญหาต่อเมื่อพบสีที่ไม่ค่อยพบตามธรรมชาติ เช่น สีแดงหรือสีม่วง เป็นต้น

ความเป็นพิษของสีย้อมในแหล่งน้ำนั้นสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากสีย้อมสามารถอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน เช่น สีย้อมบางชนิดซึ่งมีครึ่งชีวิตนานหลายปีเป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถสะสมตัวอยู่ในดินตะกอน ในปลา หรือในสิ่งมีชีวิตต่างๆในน้ำ และการย่อยสลายสีย้อมยังทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นสารก่อมะเร็งหรือสารที่ก่อให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม และเนื่องจากโครงสร้างของสีย้อมเป็นสารประกอบอะโรมาติกจึงทำให้สีย้อมส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลาย

ทางชีวภาพได้ โดยสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติเป็นสารก่อมะเร็งหรือทำให้เกิดการอักเสบ แพ้ ระบายเคือง หรือก่อให้เกิดความผิดปกติต่อเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ในสีย้อมเอโซหลายชนิด ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบอะโรมาติกนั้นมีความเป็นพิษทั้งในแบบฉับพลันและเรื้อรัง เนื่องจากความสามารถในการดูดซับและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลาย เช่น สารประกอบเอมีน ซึ่งมีความเป็นพิษในระบบทางเดินหายใจและผิวหนัง และยังสามารถยึดจับกับเฮโมโกลบิน และขัดขวางการสร้างเม็ดเลือด (Börnack และ Schmidt, 2006) นอกจากนี้ สีย้อมหลายชนิดสามารถ ก่อให้เกิดความเสียหายกับ DNA ซึ่งนำไปสู่การเกิดเนื้องอกหรือเนื้อร้าย โดยจากการศึกษา ทางพิษวิทยาพบว่าสีย้อม 98% จากสีย้อม 3000 ชนิด มีค่าความเข้มข้นที่เป็นอันตราย (LC_{50}) ต่อปลา สูงกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีสีย้อม 59% ที่มีค่าความเข้มข้นที่เป็นอันตรายสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Clarke และ Anliker, 1980) นอกจากนี้ยังมีการวิจัยในประเทศอังกฤษที่แสดงให้เห็นว่าสีย้อมมากกว่า 18% จากตัวอย่างสีย้อม 200 สี มีส่วนในการยับยั้งการหายใจของจุลชีพ เช่น แบคทีเรียในน้ำเสีย โดยสีย้อมทั้งหมดนั้นเป็นสีเบสิก (Cooper, 1995)

การสะสมทางชีวภาพของสีย้อมในปลานั้นแสดงให้เห็นถึงค่าความสามารถในการสะสม ทางชีวภาพ (ความเข้มข้นของสีย้อมในปลา/ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำ) โดยการสะสมทางชีวภาพ จะไม่เกิดขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสีย้อมสูงกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเนื่องจากสีย้อมไม่สามารถย่อยสลายได้ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศจึงทำให้ สีย้อมบางส่วนเกิดการดูดซับลงบนสลัดจ์ในระบบบำบัดทางชีวภาพ (Carmen และ Daniela, 2012)

2.3 การบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

เนื่องจากผลกระทบต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีความจำเป็นในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย โดยสามารถแบ่งลักษณะวิธีการบำบัดได้ 2 แบบ วิธีการแรกคือการแยกมลสารสีย้อมออกจากน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วยวิธีทางกลศาสตร์ของไหลเช่น การตกตะกอน การใช้แรงเหวี่ยง การกรอง และการลอยตัว หรือใช้เยื่อเลือกผ่านสังเคราะห์เช่น ไมโคร- อัลตรา- และนาโน-ฟิลเทรชัน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการทางกายภาพเคมี (physic-chemical processes) เช่น การดูดซับ การตกตะกอนทางเคมี การรวมตะกอน และการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งกระบวนการแยกมลสารเหล่านี้สามารถแยกสีย้อมซึ่งละลายหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ โดยนอกจากการแยกมลสารสีย้อมออกจากน้ำเสียแล้วยังมีวิธีการบำบัดสีย้อมอีกวิธีคือการย่อยสลายมลสารสีย้อมในน้ำเสียซึ่งสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ และกระบวนการบำบัดทางเคมี โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพโดยทั่วไปนั้นไม่สามารถบำบัดสีย้อมได้เนื่องจากความซับซ้อนของโมเลกุลสีย้อมทำให้จุลชีพไม่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ และหากย่อยสลายได้ สารมัธยันตร์ (intermediate) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายมักจะมีสารประกอบที่เป็นพิษเช่น สารประกอบอะโรมาติกเอมีน เบนซีนีนและสารอนุพันธ์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องใช้จุลชีพเฉพาะทางที่มีความคุ้นเคยและสามารถย่อยสลายสีย้อมเหล่านี้ได้ (Carmen และ Daniela, 2012)

ตารางที่ 2.2 กระบวนการทางกายภาพ-เคมีที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย (Carmen และ Daniela, 2012)

กระบวนการหรือเทคโนโลยี	ลำดับขั้นการบำบัด	ข้อดี	ข้อจำกัด
การตกตะกอนและการรวมตะกอน	ระบบบำบัดขั้นต้น/หลัก	- มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ค่อนข้างดี - ใช้เวลาน้อย - ต้นทุนต่ำ	- ต้องมีการจัดการแยกและกำจัดตะกอน - ทำได้ในสภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น
การรวมตะกอนด้วยกระบวนการไฟฟ้า	ระบบบำบัดขั้นต้น/หลัก	- มีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์	- เกิดตะกอนจำนวนมากทำให้มีปัญหาในการกำจัดตะกอน

กระบวนการหรือเทคโนโลยี	ลำดับขั้นการบำบัด	ข้อดี	ข้อจำกัด
กระบวนการเพนตัน	ระบบบำบัดขั้นต้น/หลัก	- มีประสิทธิภาพกับทั้งมลสารสีย้อมที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ - ไม่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ	- เกิดตะกอนจำนวนมาก ทำให้มีปัญหาในการกำจัดตะกอน - มีราคาแพงมาก
การใช้โอโซน	ระบบบำบัดหลัก	- เหมาะสำหรับบำบัดสีเอโซ - ไม่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ	- ไม่เหมาะกับสีดีสเพอร์ส - ทำให้เกิดสารประกอบอะโรมาติก - โอโซนมีครึ่งชีวิตสั้น (20 นาที)
การออกซิไดซ์ด้วย NaOCl	ระบบบำบัดขั้นหลัง	- ใช้อุณหภูมิต่ำ - สามารถทำลายพันธะของสีเอโซได้	- มีต้นทุนสูง - ทำให้เกิดสารประกอบอะโรมาติก-เอมีน
การฉายรังสี	ระบบบำบัดขั้นหลัง	- มีประสิทธิภาพที่ดีในระดับการทดลอง	- ใช้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำสูง
กระบวนการโฟโตเคมีคอล	ระบบบำบัดขั้นหลัง	- ไม่เกิดตะกอน	- เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่พึงประสงค์
การออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี	ระบบบำบัดขั้นต้น	- ไม่ต้องใช้สารเคมี - ผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่เป็นพิษและไม่มีอันตราย	- มีต้นทุนสูงเนื่องจากใช้ปริมาณไฟฟ้ามาก
การแลกเปลี่ยนไอออน	ระบบบำบัดหลัก	- สามารถฟื้นฟูสภาพได้โดยสูญเสียตัวดูดซับน้อย	- การใช้งานมีความจำเพาะเจาะจง - ใช้ได้กับสีย้อมบางชนิดเท่านั้น

ตารางที่ 2.3 กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็งต่างๆที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย (Carmen และ Daniela, 2012)

กระบวนการหรือเทคโนโลยี	ลำดับขั้นการบำบัด	ข้อดี	ข้อจำกัด
ถ่านกัมมันต์	ระบบบำบัดขั้นต้น/ขั้นหลัง	<ul style="list-style-type: none"> - มีความน่าสนใจในทางเศรษฐศาสตร์ - มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีกับสีย้อมหลายชนิด 	<ul style="list-style-type: none"> - มีต้นทุนสูงมากเนื่องจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ
พีต	ระบบบำบัดขั้นต้น	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีเนื่องจากโครงสร้างรูพรุน - ไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้น 	<ul style="list-style-type: none"> - มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์
ถ่าน	ระบบบำบัดขั้นต้น	<ul style="list-style-type: none"> - มีความน่าสนใจในทางเศรษฐศาสตร์ - มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เวลานาน - ใช้ปริมาณเยอะ - พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับน้อยกว่าถ่านกัมมันต์
เศษไม้และขี้เลื่อย	ระบบบำบัดขั้นต้น	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีเนื่องจากโครงสร้างรูพรุน - มีความน่าสนใจในทางเศรษฐศาสตร์ - มีประสิทธิภาพการดูดซับสีแอสิตได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เวลานาน - ใช้ปริมาณเยอะ
ซิลิกาเจล	ระบบบำบัดขั้นต้น	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเร็วในการดูดซับช้า - ดูดซับมลสารได้ไม่หลากหลาย

ตารางที่ 2.4 กระบวนการทางชีวภาพที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย (Carmen และ Daniela, 2012)

กระบวนการหรือเทคโนโลยี	ลำดับขั้นการบำบัด	ข้อดี	ข้อจำกัด
ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ	ระบบบำบัดขั้นหลัง	- ใช้ในการย่อยสลายและกำจัดสีจากสีย้อมได้ทุกชนิด	- มีราคาแพง
ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ	ระบบบำบัดหลัก	- มีความทนทานต่อสารประกอบหลายชนิด - เกิดก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้	- ใช้เวลาในการปรับตัวเข้ากับมลสารนานมาก
การบำบัดด้วยจุลชีพ (ฟังไจสหาร่าย และแบคทีเรีย)	ระบบบำบัดขั้นหลัง	- มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีในปริมาณและความเข้มข้นน้อยๆ - มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อมเฉพาะอย่าง	- การควบคุมความบริสุทธิ์ของจุลชีพมีค่าใช้จ่ายสูง - ไม่สามารถนำไปปรับใช้เข้ากับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีขนาดใหญ่ได้

ตารางที่ 2.5 เทคโนโลยีอื่นๆที่นำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย (Carmen และ Daniela, 2012)

กระบวนการหรือเทคโนโลยี	ลำดับขั้นการบำบัด	ข้อดี	ข้อจำกัด
การออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการขั้นสูงอื่นๆ	ระบบบำบัดหลัก	- สามารถย่อยสลายได้จนถึงผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย - มีการนำมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆ - สามารถนำไปใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าระบบบำบัดอื่นๆแล้วช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการย่อยสลายทางชีวภาพ	- มีต้นทุนสูง

กระบวนการหรือเทคโนโลยี (ต่อ)	ลำดับขั้นการบำบัด (ต่อ)	ข้อดี (ต่อ)	ข้อจำกัด (ต่อ)
การกรองด้วยเยื่อเลือกผ่าน	ระบบบำบัดหลัก	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดสีได้ทุกชนิด - สามารถนำน้ำและสารเคมีต่างๆกลับไปใช้ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีต้นทุนในการเดินระบบสูง - เกิดสลัดจ์ความเข้มข้นสูง - ไม่สามารถกำจัดของแข็งที่ละลายน้ำได้
โฟโตคะตะไลซิส	ระบบบำบัดขั้นหลัง	<ul style="list-style-type: none"> - กระบวนการสามารถเกิดได้ในสภาวะอากาศทั่วไป - สารเคมีที่ใช้ไม่มีความเป็นพิษและมีราคาไม่แพง - ย่อยสลายจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้โดยใช้เวลาน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถใช้ได้เฉพาะสีย้อมที่มีปริมาณน้อย - ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง
การใช้คลื่นเสียง	ระบบบำบัดขั้นต้น	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานง่าย - มีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ร่วมกับระบบอื่นๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นวิธีที่ค่อนข้างใหม่ และอยู่ในระหว่างการพัฒนา
การบำบัดด้วยเอนไซม์	ระบบบำบัดขั้นหลัง	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพในการบำบัดแบบเฉพาะเจาะจง - ไม่มีผลกระทบในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอย่างกะทันหัน - ใช้เวลาสัมผัสน้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - การคัดแยกและเพิ่มควมบริสุทธิ์ให้กับเอนไซม์สามารถทำได้ลำบาก - ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อมีสารที่รบกวนระบบ
การใช้ตัวกลางรีด็อกซ์	ระบบบำบัดขั้นต้น/เสริม	<ul style="list-style-type: none"> - ทำได้ง่ายและช่วยเสริมประสิทธิภาพให้กับระบบได้ด้วยการเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของตัวกลางรีด็อกซ์ที่ใช้ อาจทำให้เกิดผลตรงกันข้าม โดยขึ้นอยู่กับกิจกรรมทางชีวภาพของระบบ

กระบวนการ หรือเทคโนโลยี (ต่อ)	ลำดับขั้น การบำบัด (ต่อ)	ข้อดี (ต่อ)	ข้อจำกัด (ต่อ)
ระบบบำบัดโดยใช้พีชน้ำในบึงประดิษฐ์	ระบบบำบัดขั้นต้น/ขั้นหลัง	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นเทคโนโลยีที่มีความคุ้มค่า - สามารถใช้กับน้ำเสียปริมาณมากได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีต้นทุนในการติดตั้งสูง - ต้องใช้ความชำนาญ และการจัดการในช่วงที่เกิดมรสุม



2.4 โลหะหนัก

โลหะหนักคือธาตุโลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะทรานซิชัน เช่น พรอท ตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม เป็นต้น โดยโลหะหนักนั้นสามารถพบได้ทั่วไปในระบบนิเวศ ซึ่งโลหะหนักบางชนิดนั้นเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส โมลิบดีนัม และสังกะสี แต่หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปก็เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้เช่นกัน ในขณะที่โลหะหนักบางชนิด เช่น พรอท พลูโตเนียม และตะกั่ว ไม่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต และเมื่อมีการสะสมในร่างกาย จะก่อให้เกิดการเจ็บป่วยร้ายแรงได้ เช่น พรอท ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกายมาก โดยเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำลายเนื้อเยื่อสมองและระบบประสาทส่วนกลาง ซึ่งพรอทนั้นยังเป็นต้นเหตุของโรคมินามาตะ โดยมีความเป็นพิษทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง หรือสารตะกั่วซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร ระบบประสาท กล้ามเนื้อ และสมอง (Kennish, 1992)

โลหะหนักนั้นสามารถพบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เนื่องจากโลหะหนักนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของยา หรือนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถแพร่กระจายปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศและแหล่งน้ำได้ง่าย โดยการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำนั้นพบว่าแหล่งกำเนิดมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหลัก เนื่องจากมีการใช้สารเคมีซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะหนักจำนวนมากในกระบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.5 ผลกระทบของโลหะหนักในน้ำเสีย

โลหะหนักเป็นแร่ธาตุซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนไปในน้ำเสียหรือในแหล่งน้ำแล้วจะก่อให้เกิดการสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมขึ้น โดยสามารถสะสมอยู่ในตะกอนดินต่างๆ และในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต เช่น พืชน้ำหรือปลาเป็นต้น ดังนั้นเมื่อมีการจับสัตว์น้ำในแหล่งที่มีการปนเปื้อนมากขึ้น จะทำให้มีการสะสมของโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร

โลหะหนักนั้นมีความเป็นพิษสูง โดยความเป็นพิษของโลหะหนักส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากการไปรบกวนการทำงานของเอ็นไซม์ของเซลล์ และยึดจับกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้การควบคุมการลำเลียงสารต่างๆผ่านเยื่อหุ้มเซลล์มีความผิดปกติ นอกจากนี้ความเป็นพิษของโลหะหนักยังขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบโลหะหนักและวิธีในการรับเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งเมื่อสะสมอยู่ในร่างกายจนถึงระดับหนึ่งจึงจะแสดงอาการออกมา ซึ่งพิษของโลหะหนักต่อกลไกในระดับเซลล์คือ การทำให้เซลล์ตาย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ ทำให้เกิดมะเร็งและความผิดปกติทางพันธุกรรม และสร้างความเสียหายต่อโครโมโซม (Klaassen, 2007) โดยได้มีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำที่มีโลหะหนักเจือปนดังตารางที่ 2.6 และ 2.7

ตารางที่ 2.6 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)

โลหะหนัก	ค่าความเข้มข้นตามมาตรฐาน (มก./ล.)
ทองแดง	0.1
นิกเกิล	0.1
แมงกานีส	1.0
สังกะสี	1.0
แคดเมียม	0.005
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์	0.05
ตะกั่ว	0.05
ปรอท	0.002
สารหนู	0.01

ตารางที่ 2.7 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและ
นิคมอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3
(พ.ศ. 2539)

โลหะหนัก	ค่าความเข้มข้นตามมาตรฐาน (มก./ล.)
สังกะสี	5.0
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์	0.25
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์	0.75
ทองแดง	2.0
แคดเมียม	0.03
แบเรียม	1.0
ตะกั่ว	0.2
นิกเกิล	1.0
แมงกานีส	5.0
สารหนู	0.25
เซเลเนียม	0.02
ปรอท	0.005

2.6 การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย

โลหะหนักเป็นสารที่มีความเป็นพิษและไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยโลหะหนักที่พบในน้ำเสียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารละลายทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำเสียได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพทั่วไป ซึ่งการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี โดยการพิจารณาเลือกใช้กระบวนการใดในการบำบัดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของปัจจัยต่างๆ เช่น คุณภาพของน้ำก่อนและหลังการบำบัด ความเป็นไปได้ในการนำน้ำกลับมาใช้ พื้นที่ และค่าใช้จ่าย โดยสามารถสรุปกระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียได้ดังนี้ (นริศรา โพธิ์มูล, 2545)

1. การตกตะกอนทางเคมี เป็นการทำให้โลหะหนักซึ่งละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยลงโดยปรับสภาพของน้ำเสียด้วยสารเคมีเพื่อให้เกิดตะกอนของโลหะหนัก โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ โดยการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์นั้นจะใช้ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยวิธีการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากโลหะไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8 – 11 จึงต้องใช้สารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำก่อนและหลังการตกตะกอนจำนวนมาก และการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์นั้น จะใช้โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเฟอร์รัสซัลไฟด์ ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งซัลไฟด์ของโลหะหนักที่เกิดขึ้นจะละลายน้ำได้น้อยกว่าไฮดรอกไซด์ของโลหะหนัก แต่มีข้อจำกัดในเรื่องกลิ่นเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากการเติมซัลไฟด์ที่มากเกินไป

2. การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นการดูดซับไอออนของโลหะหนักในน้ำซึ่งมีความชอบบนเรซินที่ไม่เท่ากัน โดยบนพื้นผิวของเรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันซึ่งมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักอยู่ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องมีการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นๆในน้ำเสียออกก่อน เนื่องจากไอออนของสารละลายชนิดอื่นในน้ำจะเข้าไปรบกวนการแลกเปลี่ยนไอออน หรือมีการแย่งจับกับหมู่ฟังก์ชันของเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน และป้องกันไม่ให้เกิดการอุดตันขึ้นภายในชั้นของเรซิน

3. การเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน เป็นการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบโลหะหนักที่ต้องการกำจัด ทำให้เปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่มีพิษหรือตกตะกอนได้ โดยสารเคมีที่นิยมใช้เพื่อให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมต และไนเตรต และสารเคมีที่นิยมใช้เพื่อให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เฟอร์ริกซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4. การใช้ออสโมซิสผันกลับ เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้ความแตกต่างของแรงดันผ่านเยื่อเลือกผ่านโดยจะสามารถแยกไอออนและสารละลายเกือบทั้งหมดออกมาจากน้ำได้ ซึ่งมี

ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องทำการบำบัดขั้นต้นในการแยกสารแขวนลอยและสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงออกจากรน้ำเสียก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันหรือเสียหายต่อเยื่อเลือกผ่าน และต้องใช้แรงดันสูงมาก

5. การระเหย เป็นการทำให้สารประกอบโลหะหนักมีความเข้มข้นสูงกว่าความดันไอเพื่อให้เกิดการระเหยซึ่งมีทั้งการระเหยในบรรยากาศและการระเหยในสุญญากาศ โดยวิธีการนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงและมีต้นทุนในการดำเนินงานที่สูง

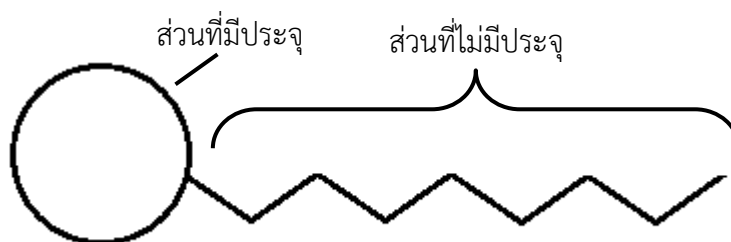
6. อิเล็กโตรไดอะไลซิส เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายโดยใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับเยื่อเลือกผ่านโดยสามารถเลือกชนิดของไอออนได้จากชนิดของเยื่อเลือกผ่าน โดยน้ำเสียที่จะผ่านกระบวนการนี้จำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งกระบวนการนี้มีต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง

7. การแยกด้วยไฟฟ้า เป็นการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการแยกไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียโดยจะเกิดการรวมตัวอยู่ในรูปของธาตุโลหะที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนขึ้นที่ขั้วแอโนด โดยกระบวนการดังกล่าวเหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูง และไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมาก

8. กระบวนการดูดซับ เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับซึ่งมีคุณสมบัติในการดึงดูดโมเลกุลที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยคุณสมบัติในการคัดเลือกดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวดูดซับโดยการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวให้มีความเหมาะสมในการเลือกดูดซับโลหะหนักได้ และสามารถสังเคราะห์ตัวดูดซับที่มีพื้นผิวที่เป็นเอกรูปและมีโครงสร้างรูพรุนซับซ้อนช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง นอกจากนี้ยังสามารถนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วไปฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ

2.7 สารลดแรงตึงผิว (วิชาฯ ภูจินดา, 2548)

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อละลายน้ำแล้วจะทำให้แรงตึงผิวของน้ำลดลง โดยสารลดแรงตึงผิวนั้นจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นประจุมีสมบัติละลายน้ำได้ และส่วนที่ไม่เป็นประจุ มีสมบัติไม่ละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว

หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิว คือ ส่วนที่มีประจุจะทำการยึดจับกับโมเลกุลน้ำ ในขณะที่ส่วนที่ไม่มีประจุจะทำการยึดจับกับโมเลกุลของสารที่ไม่มีประจุ เช่น น้ำมัน หรือสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้สารที่ไม่มีประจุสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ โดยสารลดแรงตึงผิวนั้นเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น สบู่ ยาสระผม ผงซักฟอก และน้ำยาล้างจาน เป็นต้น

สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. Anionic surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นลบ โดยมีส่วนมากอยู่ในรูปของคาร์บอกซีเลท ซัลเฟต ซัลโฟเนต หรือฟอสเฟต ซึ่งได้มาจากปิโตรเคมี เช่น LAS (linear alkylbenzene sulphonate) อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต หรืออัลเคนซัลโฟเนต หรือสารตั้งต้นจากธรรมชาติ เช่น น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ นำมาผ่านกระบวนการซัลเฟชัน โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้นิยมใช้มากถึง 49% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด โดยใช้เป็นผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด และน้ำยาล้างจาน

2. Cationic surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นบวก โดยส่วนมากมีส่วนผสมของควอเตอร์นารีแอมโมเนียม ซึ่งเกิดจากกระบวนการควอเตอร์เนชันของแพตตีเอมีน โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะที่เป็นด่างสูง เนื่องจากเกลือของแอมโมเนียมจะสูญเสียประจุบวกและเกิดการตกตะกอน โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้อาจทำให้เกิดการระคายเคืองได้ นิยมใช้ในน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์จัดแต่งทรงผม

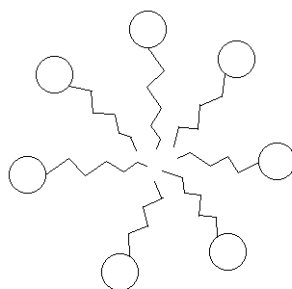
3. Nonionic surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ โดยจะมีส่วนผสมของโพลีอีเทอร์ หรือโพลีไฮดรอกซิล ที่มีสมบัติคล้ายสารมีประจุ โดยใช้สารปิโตรเคมีหรือไขมันจากธรรมชาติ นำมาเติมหมู่เอทิลีนออกไซด์ โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิวต่างๆ

4. Amphoteric surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยขึ้นอยู่กับสภาวะความเป็นกรด-ด่างของน้ำ โดยจะมีประจุเป็นลบถ้ามีค่าพีเอชมากกว่า 7 และจะมีประจุเป็นบวกถ้ามีค่าพีเอชน้อยกว่า 7 โดยจะไม่ให้ประจุไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง ซึ่งสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้เกิดจากกระบวนการทางเคมีของสารประกอบเทอร์เชียรีแพตตีเอมีนกับเกลือโซเดียมของกรดคลอโรอะซิติก โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวมีความอ่อนนุ่ม (วิชา ภาวจุลศาสตร์, 2548)

สารลดแรงตึงผิว	การเกิดฟอง	ความสามารถในการซักล้าง	ความสามารถในการทำให้พื้นผิวอ่อนนุ่ม
Anionic surfactant	ดีมาก	ค่อนข้างดี	ไม่แน่นอน
Cationic surfactant	ดี	ดี	ดี
Nonionic surfactant	ไม่ดี	ปานกลาง	ไม่ดี
Amphoteric surfactant	ปานกลาง	ดี	ดีมาก

สารลดแรงตึงผิวนั้นสามารถรวมตัวกันเมื่อมีความเข้มข้นมากถึงค่าเฉพาะค่าหนึ่ง โดยเรียกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC) โดยกลุ่มโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวกันเป็นทรงกลมโดยหันส่วนที่ไม่ละลายน้ำเข้าหากันและหันส่วนที่ละลายน้ำออกดังรูปที่ 2.2 โดยกลุ่มโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวนี้เรียกว่า ไมเซลล์



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างไมเซลล์

2.8 ผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสีย

สารลดแรงตึงผิวนั้นนอกจากจะมีการนำมาใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆแล้ว ยังมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นสบู่ แชมพู ผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน หรือผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดต่างๆ ส่งผลให้มีสารลดแรงตึงผิวปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากชุมชนและอุตสาหกรรมจำนวนมาก ซึ่งสารลดแรงตึงผิวนี้นี้ประกอบด้วยส่วนที่ละลายน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ โดยส่วนที่ไม่ละลายน้ำนี้สามารถยึดจับกับสารอินทรีย์ต่างๆในแหล่งน้ำ ตามดินตะกอน หรือสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น สามารถยึดจับกับเหงือกปลา ทำให้ปลาสูญเสียความสามารถในการควบคุมปริมาณเกลือ เป็นต้น

สารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดสามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบและความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวบางชนิดนั้นไม่สามารถย่อยสลายได้และเกิดการสะสมและตกค้างอยู่ในแหล่งน้ำ หรือในกรณีที่เกิดการย่อยสลายอาจได้สารผลิตภัณฑ์ หรือสารมัธยันตร์ (intermediate) ที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ เช่น อัลคิลฟีนอลพอลิอีท็อกซิเลท (APnEOs) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่มีสมบัติเป็นสารยับยั้งการทำงานของเซลล์ในต่อมไร้ท่อ โดยเมื่อถูกย่อยสลาย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงเป็นสารที่มีสมบัติเป็นพิษอยู่ เป็นต้น (Punyapalukul และ Takizawa, 2006)

2.9 การบำบัดสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสีย

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติพิเศษในการละลายได้ทั้งในน้ำและสารอินทรีย์จึงทำให้การแยกสารลดแรงตึงผิวออกจากน้ำเสียมีความลำบาก โดยในปัจจุบันการบำบัดสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียนิยมใช้กระบวนการทางชีวภาพในการย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในน้ำ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่สังเคราะห์ขึ้นจากสารอินทรีย์ เช่น สารปิโตรเคมี หรือไขมันธรรมชาติ ทำให้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่ด้วยข้อจำกัดของจุลชีพที่ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวบางชนิดที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อนไม่สามารถถูกย่อยสลายได้

สารลดแรงตึงผิวบางชนิดไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เนื่องจากขนาดหรือความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุล สามารถใช้สารออกซิไดซ์ เช่น โอโซน มาทำการออกซิไดซ์สารลดแรงตึงผิวให้เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลงเพื่อให้จุลชีพสามารถย่อยสลายได้ จึงมีการนำกระบวนการออกซิเดชันไปใช้ร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดสารลดแรงตึงผิวในน้ำ โดยในสารลดแรงตึงผิวบางชนิดที่มีสมบัติเป็นพิษหรือมีสมบัตียับยั้งหรือทำให้เซลล์เกิดการดำเนินงานผิดปกติก็อาจใช้กระบวนการออกซิเดชันเพื่อออกซิไดซ์สารที่มีพิษเหล่านั้นเป็น

สารที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่ในสารลดแรงตึงผิวบางชนิดไม่สามารถใช้กระบวนการดังกล่าวได้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีความเป็นพิษหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น การออกซิไดซ์หรือการย่อยสลายสารอัลคิลฟีนอลพอลิอีเทอร์ออกซีเลท ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุชนิดหนึ่ง จะได้สารมัธยันตร์และสารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษและไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ จึงมีการนำกระบวนการดูดซับมาใช้ในการบำบัดสารลดแรงตึงผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับเพื่อแยกสารลดแรงตึงผิวออกจากน้ำเสีย ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับมลสารที่หลากหลายทำให้ต้องใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมากเพื่อบำบัดน้ำเสียให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้การทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ถูกดูดซับหลุดออกจากผิวถ่านกัมมันต์นั้นทำได้ยาก จึงไม่คุ้มค่าที่จะนำไปฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ ทำให้กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นี้มีต้นทุนสูง จึงมีการพัฒนากระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับชนิดอื่นๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการบำบัดสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสีย เช่น การใช้วัสดุธรรมชาติ การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชัน หรือการเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่าย เป็นต้น

2.10 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2545)

อุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นเป็นอุตสาหกรรมย่อยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยกระบวนการฟอกย้อมนั้นเป็นการทำให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีสันทที่สวยงาม และมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม โดยอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่นั้นมีการใช้สารเคมีและสีย้อม โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในกระบวนการเกือบทุกขั้นตอน จึงทำให้อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำปริมาณมาก และก่อให้เกิดน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนสารเคมีจำนวนมาก เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม และโลหะหนัก โดยสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมแต่ละแห่งจะมีความแตกต่างกันไปตามประเภทของโรงงานฟอกย้อม โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย
2. กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ
3. กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก

กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้ายนั้น เส้นด้ายจะถูกนำไปจัดตั้งสกรปรกด้วยความร้อน โดยใช้สารเคมีที่เป็นต่าง เช่น โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก และสารช่วยเปียก จากนั้นจึงนำไปฟอกขาวโดยใช้สารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ หรือ โซเดียม-คลอไรต์ รวมทั้งกรดและด่าง และจึงนำไปผ่านการย้อมซึ่งจะมีการใช้สารเคมีจำพวกสีย้อม

สารเคมีช่วยย้อม และกรดและด่าง โดยใช้ความร้อนช่วยในกระบวนการ จากนั้นจึงนำด้าย ที่ผ่านการย้อมไปทำการล้างด้วยน้ำสบู่ โดยใช้สารสบู่อะลูมิเนียมและสารลดแรงตึงผิว

กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอมีขั้นตอนใกล้เคียงกับการฟอกย้อมเส้นด้าย โดยจะต้อง มีการลอกแป้งออกจะผ้าดิบก่อนโดยใช้สารเคมี เช่น เอนไซม์ หรือกรดซัลฟิวริก หรือสารออกซิไดซ์ และสารช่วยเปียก โดยใช้ความร้อน และเมื่อผ้าผ่านขั้นตอนการฟอกขาวแล้วจะต้องนำไปชุบมันก่อนที่จะนำไปย้อมโดยใช้โซดาไฟ และเมื่อผ่านการย้อมแล้วจะต้องมีการตกแต่งสำเร็จโดยใช้ สารตกแต่ง เช่น เรซิน หรือสารกันน้ำ เป็นต้น โดยใช้ความร้อนร่วมด้วยเช่นกัน

กระบวนการฟอกย้อมผ้าถักนั้นจะมีขั้นตอนการฟอกย้อมเช่นเดียวกับการฟอกย้อมผ้าทอ โดยจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง จึงทำให้ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการมีความใกล้เคียงกัน และเมื่อ พิจารณาจากวัตถุดิบต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมแล้วสามารถสรุป ลักษณะของมลสารในน้ำเสียได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมและลักษณะของมลสาร ในน้ำเสียที่เกิดขึ้น (Carmen และ Daniela, 2012)

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรม	ลักษณะมลสารที่เกิดขึ้น
โลหะอัลคาไล กรดแร่ เกลือ และสารออกซิแดนท์	สารอนินทรีย์ต่างๆ โดยส่วนใหญ่ไม่เป็นอันตราย
สารต้านการซีดน้ำที่ผลิตจากแป้งมัน ซีผึ้ง ไขมัน สารลดแรงตึงผิวที่ย่อยสลายได้ น้ำมันธรรมชาติ กรดอินทรีย์ และสารรีดิวซ์	ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ทำให้มีค่าบีโอดี ปานกลาง-มาก
สีย้อมและสารฟอกขาวต่างๆ เส้นใยและสิ่งปนเปื้อนตามธรรมชาติ เรซินสังเคราะห์ และซิลิโคน	ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ น้ำมันแร่ สารลดแรงตึงผิวที่ย่อยสลายยาก	ย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อย ทำให้มีค่าบีโอดี ปานกลาง
พอลิเมอร์ไฮดรอกซีหรือสารโพลีเมทิลโลลิก สารประกอบหรือตัวเร่งสี สารประกอบ-เชิงซ้อน และเกลือของโลหะหนัก	ไม่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยปกติได้ และมีค่าบีโอดีต่ำ

ทั้งนี้ นอกจากน้ำเสียที่เกิดจากน้ำใช้ในกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีน้ำเสียที่เกิดจากหม้อไอน้ำ น้ำหล่อเย็น น้ำล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน และน้ำเสียอื่นๆ เช่น น้ำใช้ของคณงาน น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำ เป็นต้น

2.11 ผลกระทบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2545)

1. สารอินทรีย์ ทำให้ค่าบีโอดีในน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง และทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำตายได้ โดยสารอินทรีย์บางชนิดอาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต และสะสมอยู่ในระบบนิเวศทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถฟื้นตัวเองได้ เช่น สารประกอบอะโรมาติกต่างๆที่มีความซับซ้อนและไม่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง หรือทำให้เกิดการอักเสบ แพ้ ระบายเคือง หรือก่อให้เกิดความผิดปกติต่อเนื้อเยื่อ และนอกจากนี้ ยังอาจทำให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์และไม่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

2. อุณหภูมิสูง ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการใช้ออกซิเจนที่สูงขึ้น และทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง

3. ของแข็งแขวนลอยต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนของเส้นใย และสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับเส้นใยซึ่งไม่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ เป็นการทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำและอาจตกตะกอนจนทำให้น้ำตื้นเขินได้ และถ้าหากเป็นสารอินทรีย์จะส่งผลให้น้ำเน่าเสียส่งกลิ่นเหม็น และเป็นที่น่ารังเกียจ

4. ของแข็งละลายน้ำ เช่น สารเคมีต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมถึงผลิตภัณฑ์ชั้นกลางจากการย่อยสลายสารเคมีและสีย้อมในน้ำเสีย ซึ่งสารประกอบบางชนิดเป็นสารพิษ ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ พืช สัตว์น้ำ และคนที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ นอกจากนี้สารประกอบบางชนิดมีส่วนประกอบของโลหะหนัก เช่น โครเมียม หรือ ทองแดง ซึ่งเมื่อมีความเข้มข้นสูง จะทำให้เป็นพิษต่อจุลชีพในน้ำและเป็นสารก่อโรคร้ายแรงต่างๆ

5. สี ทำให้แสงส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำได้น้อยลง ส่งผลให้พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง จนทำแหล่งน้ำเน่าเสีย และยังทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำด้วย นอกจากนี้ สีที่เกิดจากสีย้อมบางชนิดมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมสูง และย่อยสลายยากทำให้มีการสะสมตัวอยู่ในแหล่งน้ำเป็นเวลานาน โดยสีย้อมส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโรมาติกซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งหรือทำให้เกิดการอักเสบ แพ้ ระบายเคือง หรือก่อให้เกิดความผิดปกติต่อเนื้อเยื่อ และเมื่อถูกย่อยสลายจะได้สารประกอบที่มีสมบัติเป็นสารก่อมะเร็งหรือสารที่ก่อให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม นอกจากนี้สีย้อมบางชนิดยังมีความเป็นพิษสูงทั้งในแบบฉับพลันและเรื้อรัง

6. โลหะหนัก ก่อให้เกิดโรคร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและมนุษย์โดยกระบวนการทำงานของเอ็นไซม์ของเซลล์ และยึดจับกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้การควบคุมการลำเลียงสารต่างๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์มีความผิดปกติ นอกจากนี้ยังเป็นแร่ธาตุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงสามารถสะสมตัวอยู่ในระบบนิเวศของแหล่งน้ำ โดยสามารถสะสมอยู่ในตะกอนดินต่างๆ และในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต เช่น พืชน้ำ หรือปลา เป็นต้น ดังนั้นเมื่อมีการจับสัตว์น้ำในแหล่งที่มีการปนเปื้อนมากิน จะทำให้มีการสะสมของโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร

2.12 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม (Wang และคณะ, 2011)

สิ่งเจือปนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่นั้นจะเป็นสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในการผลิต โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีการนำมาใช้กัน ได้แก่

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี โดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียเพื่อให้สีย้อมและสารเคมีบางชนิดตกตะกอน หรือทำให้อนุภาคมลสารต่างๆ รวมตัวกันเป็นตะกอน โดยสารเคมีที่นิยมใช้ เช่น ปูนขาว สารส้ม เพอร์คลอไรด์ หรือเพอร์ซัลเฟต เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจใช้สารช่วยรวมตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ ร่วมด้วย โดยการตกตะกอนทางเคมีนี้สามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา

2. กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เป็นการบำบัดสีย้อมโดยใช้จุลชีพในน้ำเสีย ซึ่งเมื่อจุลชีพมีการเจริญเติบโตจะทำการดูดซับสีและสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียมาใช้ โดยแบ่งออกเป็น ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ และระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ โดยน้ำทิ้งจากกระบวนการนี้ยังไม่สามารถกำจัดสีและสารเคมีต่างๆ ให้หมดไปได้เนื่องจากความซับซ้อนของโมเลกุลสีย้อมทำให้จุลชีพไม่สามารถย่อยสลายได้ ในกรณีที่ย่อยสลายได้ สารมัธยันตร์ (intermediate) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายมักจะมีสารประกอบที่เป็นพิษเช่น สารประกอบอะโรมาติกเอมีน เบนซีนีน และสารอนุพันธ์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องใช้จุลชีพเฉพาะทางที่มีความคุ้นเคยและสามารถย่อยสลายสีย้อมและสารเคมีเหล่านี้ได้

3. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากจะต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อนเนื่องจากสารแขวนลอยต่างๆ จะเข้าไปอุดตันในชั้นกรองของถ่านกัมมันต์ และเนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับมลสารที่หลากหลายทำให้ต้องใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมากเพื่อบำบัดน้ำเสียให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้การทำให้โมเลกุลของสีย้อมที่ถูกดูดซับหลุดออกจากผิวถ่านกัมมันต์นั้นทำได้ยาก และเมื่อนำไปเผาต้องมีการกำจัดกากซึ่งอาจมีส่วนประกอบของโลหะหนัก จึงทำให้วิธีนี้มีต้นทุนสูง

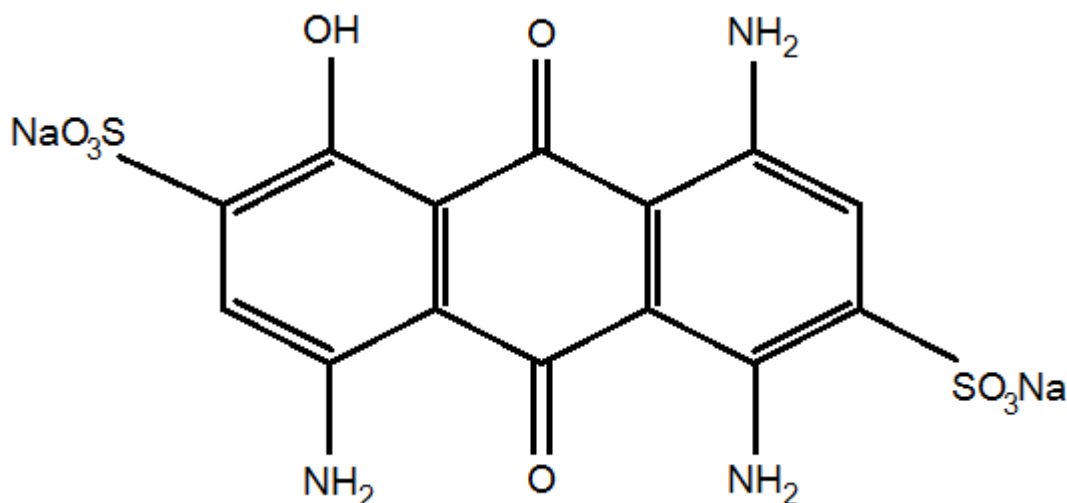
4. การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ในโครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์ ในโมเลกุลสีด้วยโอโซนซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงมาก แต่เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงมาก โดยจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำที่ทั้งหมดซึ่งส่วนมากจะประกอบด้วย ไนโตรเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์ ทำให้ได้สารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเดิม นอกจากนี้ โอโซนยังสลายตัวได้เร็ว จึงไม่สามารถเก็บไว้ใช้ได้ ทำให้ต้องผลิตเพื่อใช้ให้ได้เท่ากับปริมาณที่ต้องการ ส่งผลให้ต้องใช้อุปกรณ์ในการผลิตโอโซนขนาดใหญ่ และมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

5. การใช้เยื่อเลือกผ่าน เป็นการใช้เมมเบรนในการกำจัดสีและสารเคมี โดยสามารถนำน้ำและสารเคมี รวมถึงสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยระบบที่นิยมนำมาใช้ คือ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน และออสโมซิสผันกลับ ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำภายหลังการบำบัดที่ต้องการ โดยไมโครฟิลเตรชันนั้นสามารถกรองของแข็งแขวนลอย คอลลอยด์ และสารประกอบโมเลกุลใหญ่ในน้ำเสียได้ โดยสามารถนำมาใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้นก่อนผ่านเข้าระบบ นาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับ ในระบบอัลตราฟิลเตรชันนั้นสามารถกรองสารโมเลกุลขนาดใหญ่และมลสารต่างๆได้ แต่ยังไม่สามารถกรองสีย้อมได้ดีนัก โดยน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบนี้ยังไม่สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ โดยระบบอัลตราฟิลเตรชันนิยมใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าระบบออสโมซิสผันกลับหรือก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยสามารถกำจัดโลหะไฮดรอกไซด์ให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ส่วนในล้านส่วนได้ ระบบนาโนฟิลเตรชันนั้นนิยมใช้ร่วมกับกระบวนการดูดซับเพื่อลดความเข้มข้นในกระบวนการกรองเนื่องจากมีความอ่อนไหวต่อโมเลกุลขนาดเล็กและสารคอลลอยด์ต่างๆ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้มากกว่า 90 % สำหรับระบบออสโมซิสผันกลับนั้น สามารถใช้กำจัดสารประกอบ อีออน สีย้อม และสารเคมีในน้ำได้เกือบทุกชนิด โดยน้ำที่ผ่านระบบดังกล่าวจะมีความบริสุทธิ์สูงมาก แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับการอุดตันและน้ำเสียที่จะผ่านระบบต้องมีการบำบัดขั้นต้นมาเป็นอย่างดี

6. เทคโนโลยีอื่นๆ เช่น การใช้ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่มีการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูง โดยการใช้ตัวดูดซับที่มีการปรับปรุงนี้ได้เริ่มมีการนำมาใช้โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี และมีอัตราการบำบัดที่รวดเร็ว โดยสามารถบำบัดให้เป็นไปตามมาตรฐานได้ถึงแม้จะมีความผันแปรของสารเคมีสูงก็ตาม นอกจากนี้สารเคมีและสีย้อมบางชนิดยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งต้นทุนของวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆที่ใกล้เคียงกัน และเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

2.13 แอซิดบลู 45 (Acid Blue 45; AB45)

เป็นสีย้อมชนิดสีแอซิด (Acid dyes) โดยให้สีน้ำเงิน มีสูตรโมเลกุล $C_{14}H_8N_2Na_2O_{10}S_2$ มีลักษณะโครงสร้างแบบแอนทราควิโนนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของแอซิดบลู 45

สีแอซิดบลูมีลักษณะเป็นผงสีน้ำเงิน มีสมบัติละลายน้ำได้ดี ละลายในเอทานอลได้เล็กน้อย และไม่ละลายในอะซิโตน เบนซีน และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ใช้ในการย้อมสี ขนสัตว์ ไหม ผ้าผสมขนสัตว์ กระดาษ ผนัง สบู่ และเครื่องสำอาง โดยเกลือของโลหะหนักสามารถนำมาใช้เป็นหมึกสีได้

การกำจัดสามารถทำได้โดยนำไปละลายหรือผสมกับตัวทำละลายที่เผาไหม้ได้ แล้วนำไปเผาด้วยเตาเผาที่มีระบบห้องเผาไหม้ (Afterburner) โดยเมื่อเผาจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนออกไซด์ ซึ่งมีก๊าซพิษ จึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยสู่บรรยากาศด้วยระบบสครีบบอร์ (Sigma-Aldrich, 2006)

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติทั่วไปของแอซิดบลู 45 ที่ใช้ในการทดลอง (Sigma-Aldrich, 2006)

ชื่อ	C.I. Acid Blue 45, C.I.63010
หมายเลข CAS	2861-02-1
สูตรโมเลกุล	$C_{14}H_8N_2Na_2O_{10}S_2$
น้ำหนักโมเลกุล	474.83
โครงสร้างโมเลกุล	แอนทราควิโนน
จุดหลอมเหลว	300 องศาเซลเซียส
จุดวาบไฟ	>300 องศาเซลเซียส
ขนาดโมเลกุล (กว้าง × ยาว)	0.69 (นาโนเมตร) × 1.13 (นาโนเมตร)
ประจุ	ลบ
ความสามารถในการละลายน้ำ	20-30 กรัม/ลิตร
ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการวิเคราะห์	275 นาโนเมตร

2.14 ทองแดง (Copper; Cu) (Mureseanu และคณะ, 2008)

ทองแดง คือธาตุที่มีสัญลักษณ์ Cu มีเลขอะตอม 29 โดยมีน้ำหนักอะตอม 63.546 และอยู่ในหมู่ 1B เช่นเดียวกับเงิน และทอง โดยทองแดงเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความอ่อนนิ่มสามารถดัดงอได้ง่าย และมีผิวเป็นสีชมพู ซึ่งเป็นโลหะเพียงไม่กี่ชนิดที่มีสีตามธรรมชาติที่ไม่ใช่สีเทาหรือขาวนอกจากทองและซีเซียม

ทองแดงถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ตัวนำความร้อน ท่อน้ำร้อน ใช้ในโรงงานชุบโลหะ และเป็นส่วนประกอบของโลหะผสมต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้ในงานรักษาเนื้อไม้ เป็นสารประกอบช่วยในการผลิตกระดาษ ผลิตซีเมนต์ ผลิตยารักษาโรค และสี โดยทองแดงนั้นมีความถ่วงจำเพาะ 8.96 มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,083 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่อุณหภูมิ 2,595 องศาเซลเซียส โดยสามารถละลายในกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกร้อนเข้มข้นได้ และสามารถละลายช้าๆได้ในกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกเจือจางในสภาวะบรรยากาศ (Paisanjit, 2008)

ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้น ทองแดงถูกนำไปใช้เป็นสารช่วยย้อม (Mordant) โดยเป็นสารที่ช่วยให้สียึดติดกับเส้นใยได้ดีขึ้น และทำให้สีเข้มข้น โดยนิยมใช้กับการย้อมสีเขียว-น้ำตาล โดยหากใช้ในปริมาณมากจะทำให้เกิดการตกค้างของทองแดงในน้ำทิ้งหลังการย้อม (ศูนย์วิชาการและเทคโนโลยีสิ่งทอพื้นบ้าน, 2556)

โลหะทองแดงมีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าหากได้รับฝุ่น คิววัน ไอร์ระเหย หรือเกลือของทองแดงผ่านทางเดินหายใจสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองตา จมูก และคอ โดยทองแดงในรูป Cu^{2+} เป็นสารที่มีพิษมากโดยเฉพาะเมื่ออยู่ในน้ำอ่อน และจะมีพิษน้อยลงเมื่ออยู่ในน้ำกระด้าง ซึ่งทองแดงเป็นโลหะหนักที่พบได้ทั่วไปในน้ำเสีย โดยถ้าหากมีความเข้มข้นสูงจะเป็นอันตรายต่อพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำ และยังขัดขวางการฟื้นตัวของแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นสารก่อมะเร็งในคนด้วย โดยทองแดงสามารถถูกกำจัดได้โดย วิธีตกตะกอนผลึกเคมีด้วยการใช้ต่าง ไฮดรอกไซด์ ปูนขาว และซัลไฟด์ วิธีดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ อะลูมินากัมมันต์ และผงตะไบเหล็ก วิธีแลกเปลี่ยนไอออน วิธีระเหย และวิธีออสโมซิสผันกลับ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546)

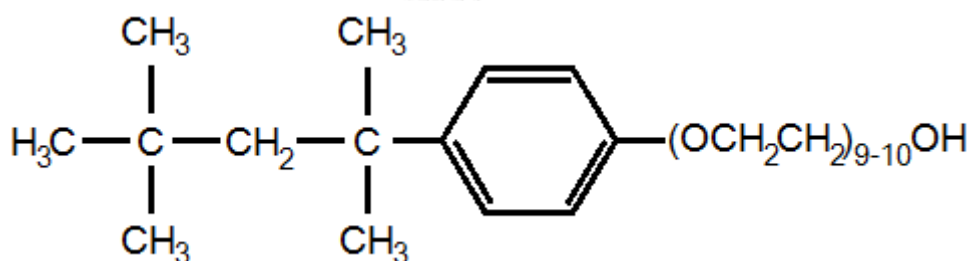
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะทองแดงที่ใช้ในการทดลอง (Sigma-Aldrich, 2006)

ชื่อ	Copper ICP Standard Solution FLUKA
ผู้ผลิต	Sigma-Aldrich
สูตรโมเลกุล	Cu(II)NO_3
ส่วนประกอบ	ทองแดง : 0.1 % กรดไนตริก : 3.2 % น้ำ : 98 %
ความหนาแน่น	1.0200 ก./ลบ.ซม.



2.15 TX-100[®] (Triton™ X-100; TX100)

TX-100[®] หรือ Triton™ X-100 (ICN Biomedicals Inc., TX-100[®]) เป็นชื่อทางการค้าของสารอัลคิลฟีนอล โพลีอีธอกซีเลท หรือ APnEO ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุ โดย TX-100[®] นั้นเป็นสารลดแรงตึงผิว ไอโซออกทิลฟีนอล อีธอกซีเลท ซึ่งมีความยาวของสายโซ่โพลีเอธิลีนออกไซด์ยาว 9.5 หน่วยโมโนเมอร์ และมีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.4 โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสุดประมาณ 1.48 ตารางนาโนเมตร โดยเมื่อจัดเรียงตัวเป็นไมเซลล์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.6 นาโนเมตร และความหนาแน่นของไมเซลล์รวม 8.15×10^{15} ไมเซลล์ต่อตารางเมตร (Takizawa และ Punyapalakul, 2008)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว TX-100[®]

TX-100[®] มีลักษณะเป็นของเหลวสีไม่มีลักษณะหนืดเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของพอลิเอธิลีนออกไซด์ โดยมีแรงตึงผิว 240 เซนติพอยส์ ที่อุณหภูมิ 25 °C TX-100[®] สามารถละลายได้ในน้ำ โทลูอีน ไซลีน ไตรคลอโรเอทิลีน เอทิลีน-ไกลคอล เอทิลอีเทอร์ เอทิลแอลกอฮอล์ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และเอทิลีนไดคลอไรด์ (Sigma-Aldrich, 2012)

สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้มีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมากเป็นอันดับที่สามของโลก โดยมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายซึ่งจะพบได้ในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมฟอกย้อม และร้านซักรีด นอกจากนี้ยังปรากฏให้เห็นได้ทั่วไปในระบบนิเวศตามธรรมชาติ และในระบบบำบัดน้ำเสียทั้งที่ใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ

อัลคิลฟีนอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นกลางของการย่อยสลายทางชีวภาพของอัลคิลฟีนอล-โพลีอีธอกซีเลทนั้น มีลักษณะคล้ายเอสโตรเจนซึ่งเป็นฮอร์โมนสเตอรอยด์ชนิดหนึ่ง โดยอาจจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อคล้ายฮอร์โมนหรือยับยั้งการทำงานของฮอร์โมนได้ (Punyapalakul และ Takizawa, 2006)

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติทั่วไปของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ TX-100[®] ที่ใช้ในการทดลอง (Sigma-Aldrich, 2012)

ชื่อ	Triton [®] X-100, Laboratory grade
หมายเลข CAS	9002-93-1
สูตรโมเลกุล	$(C_2H_4O)_n C_{14}H_{22}O$ (n = 9 – 10)
มวลโมเลกุลเฉลี่ย	625
ขนาดโมเลกุล (กว้าง × ยาว)	0.49 (นาโนเมตร) × 3.43 (นาโนเมตร)
ความหนาแน่น	1.07 g/ml ที่ 25 องศาเซลเซียส
การดูดกลืนรังสี UV (λ_{max})	275 นาโนเมตร และ 283 นาโนเมตร
ความหนืด	240 เซนติพอยส์
Cloud point (สารละลายเข้มข้น 1%)	63 – 69 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	6 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	270 องศาเซลเซียส
ความดันไอ	<1 มม.ปรอท ที่ 25 องศาเซลเซียส
จุดวาบไฟ	251 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิวสัมผัสมรวม (CSA)	1.48 ตารางนาโนเมตร
พื้นที่ผิวสัมผัสของส่วนชอบน้ำ	0.975 ตารางนาโนเมตร
พื้นที่ผิวสัมผัสของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ	0.508 ตารางนาโนเมตร
CMC	0.22 – 0.24 มิลลิโมล/ล. (147 มก./ล.)
จำนวนโมเลกุลต่อไมเซลล์ (AN)	200
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไมเซลล์	11.6 นาโนเมตร
ความหนาแน่นของไมเซลล์	8.15×10^{15} ไมเซลล์ต่อตารางเมตร

2.16 การดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการในการแยกสารประกอบจากวัฏภาคของไหลไปยังวัฏภาคของแข็ง โดยการถ่ายเทมวลสาร โดยในกระบวนการบำบัดน้ำเสียและการผลิตน้ำประปานั้น ตัวถูกดูดซับหรือตัวถูกละลายในสารละลายของเหลวจะถูกย้ายไปยังพื้นผิวของวัฏภาคของแข็งหรือตัวดูดซับ ทำให้เกิดการสะสมตัวของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับนั้น โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากความไม่สมดุลของแรงในการยึดเหนี่ยวมวลสารหรือตัวถูกละลายในน้ำกับแรงดึงดูดของพื้นผิวตัวดูดซับ โดยการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.16.1 ลักษณะการดูดซับ (ธนพร คำขจร, 2552)

1. การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพซึ่งมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวมวลสารในน้ำ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวทั้งหมดของตัวดูดซับ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิบรรยากาศ โดยเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงและเกิดการคายโมเลกุลที่ดูดซับไว้ โดยแรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดอ่อนๆระหว่างโมเลกุลสองชนิดโดยสามารถแบ่งเป็นแรงย่อยคือ แรงแลอนดอน ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้น โดยแรงชนิดนี้เป็นแรงอ่อนๆและจะมีแรงดึงดูดเพิ่มขึ้นเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ แรงชนิดที่สองคือแรงจากการเหนี่ยวนำ โดยเกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนในโมเลกุลที่ไม่มีขั้วทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และแรงสุดท้ายคือ แรงทางไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารที่มีขั้ว โดยเป็นแรงที่มีค่ามากที่สุด ในแรงทั้ง 3 ชนิด

2. การดูดซับทางเคมี

เป็นการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับทำให้เกิดสารประกอบใหม่ยึดเกาะอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โดยการดูดซับชนิดนี้ก็จะเกิดขึ้นเฉพาะบนพื้นผิวบางแห่งที่มีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหมือนกันเท่านั้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีค่าน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ นอกจากนี้ยังเป็นการดูดซับขั้นเดียวเท่านั้น โดยพันธะเคมีที่เกิดขึ้นมีการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง โดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ซึ่งอาจมีความต้องการพลังงานก่อกัมมันต์ในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ การดูดซับทางเคมียังเป็น

ปรากฏการณ์ที่ผันกลับไม่ได้เนื่องจากมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยมักพบในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะ เช่น หมู่เมอร์แคปโต เป็นต้น

2.16.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Cooney, 1999)

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสั่นไหวของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับส่งผลให้เกิดการคายมลสารที่ถูกดูดซับ และทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการควบคุมอุณหภูมิในการทดลองการดูดซับเพื่อให้ระบบทั้งหมดอยู่ในสภาวะอุณหภูมิคงที่

2. คุณสมบัติของตัวทำละลาย

ตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับมากเนื่องจากตัวดูดซับจำเป็นต้องแข่งขันกับตัวทำละลายในการดึงดูดตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับให้เกิดการเคลื่อนย้ายมาอยู่บนผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นการดูดซับตัวถูกละลายที่เป็นสารอินทรีย์ออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ย่อมทำได้ยากเมื่อเทียบกับตัวทำละลายที่เป็นน้ำ

3. พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ โดยพื้นที่ผิวภายในของตัวดูดซับมีผลต่อพื้นที่ผิวรวมของตัวดูดซับมากกว่าพื้นที่ผิวนอกมากมาย แต่ทั้งนี้ไม่เป็นจริงเสมอไป เนื่องจากการหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นใช้การดูดซับไนโตรเจนซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กมาก ดังนั้นการดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ อาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากพื้นที่ผิวรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็กภายใน

4. โครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ

โครงสร้างรูพรุนเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งเนื่องจากขนาดของรูพรุนนั้นจะเป็นตัวกำหนดขนาดของโมเลกุลที่สามารถเข้าไปยังพื้นผิวภายในได้ ดังนั้นการกำหนดช่วงขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับนั้นทำให้ตัวดูดซับเลือกดูดซับเฉพาะมลสารที่ต้องการได้

5. คุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ

สิ่งที่สำคัญเกี่ยวกับตัวถูกดูดซับอย่างหนึ่งคือลักษณะของตัวถูกละลายที่ปรากฏอยู่ในสารละลายนั้นอยู่ในรูปไอออนหรือไม่ เนื่องจากตัวถูกละลายที่แตกตัวในตัวทำละลายได้จะทำให้เกิดการดูดซับได้ยาก สำหรับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากขนาดที่เพิ่มขึ้นมักจะส่งผลให้เกิดการดูดซับมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ขนาดโมเลกุลจะถูกจำกัดด้วยขนาดของรูพรุน โครงสร้างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับนั้นมีผลต่อการดูดซับเช่นกัน เช่น สารประกอบอะโรมาติกมักจะถูกดูดซับได้

มากกว่าสารประกอบอะลิฟาติกที่มีขนาดโมเลกุลเท่ากัน โมเลกุลที่มีลักษณะเป็นกิ่งมักจะถูกลดซับได้มากกว่าโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว และผลกระทบของตำแหน่งของหมู่แทนที่ เป็นต้น นอกจากนี้ ความสามารถในการละลายน้ำก็จัดเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญว่ามลสารนั้นจะถูกดูดซับได้หรือไม่เช่นกัน ถ้าหากมลสารมีความสามารถในการละลายน้ำได้มากจะถูกดูดซับได้น้อยเนื่องจากมีความชอบน้ำสูง

6. ค่าพีเอชของสารละลาย

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถถูกดูดซับบนพื้นผิวได้อย่างแข็งแรง นอกจากนี้แล้วค่าพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและความสามารถในการละลายของสารต่างๆ ซึ่งเมื่อมลสารมีการแตกตัวเป็นไอออนจะทำให้ดูดซับได้ยาก และทำให้มลสารที่ถูกดูดซับไปแล้วหลุดออกมาด้วยเนื่องจากมีประจุชนิดเดียวกับในสารละลายและทำให้เกิดแรงผลักรั้งที่สูงกว่าแรงดึงดูดอย่างแวนเดอร์วาลส์ นอกจากนี้ยังทำให้การดูดซับบนพื้นผิวมีความหนาแน่นน้อยลง ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ

7. ความหลากหลายของมลสาร

เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำกัด ดังนั้นการที่มีตัวถูกละลายที่สามารถดูดซับได้มากกว่าหนึ่งชนิดจึงทำให้เกิดการแย่งชิงพื้นที่บนตัวดูดซับ แต่เนื่องจากบางพื้นที่นั้นสามารถดูดซับตัวถูกละลายได้บางชนิดเท่านั้นจึงไม่จำเป็นว่าจะเกิดการแย่งชิงพื้นที่เดียวกัน อย่างไรก็ตาม การที่มีตัวถูกละลายอื่นๆเพิ่มเข้ามาในระบบมักจะทำให้ความสามารถในการดูดซับตัวถูกละลายเดิมลดลง

2.16.3 การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดูดซับ (ฉมนรี สุขเกษม, 2556)

การดูดซับหรือการดูดติดผิวนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยมีแรงกระทำระหว่างตัวดูดซับและมลสาร โดยการดูดซับนั้นอาจไม่เกิดขึ้นทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดซับเนื่องจากปัจจัยต่างๆ โดยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการดูดซับขึ้นในบริเวณนั้น ซึ่งอาจเกิดจากแรงทางประจุ หรือเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้กับตัวดูดซับนั้น การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจึงเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากโดยเฉพาะในตัวดูดซับสังเคราะห์ที่มีลักษณะของเคมีบนพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน เช่น ซิลิกาเจล เมโซพอร์สซิลิเกต อลูมินา เป็นต้น ซึ่งการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดูดซับนั้นนอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมลสารที่ต้องการแล้วยังเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในการเลือกดูดซับมลสารแต่ละชนิดอีกด้วย โดยการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดูดซับนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. กระบวนการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (Grafting method) เป็นการนำหมู่ฟังก์ชันทางเคมีมาต่อเพิ่มจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเดิม โดยเป็นวิธีการที่ง่ายและคงไว้ซึ่งโครงสร้างเดิมของตัวดูดซับ การต่อติดหมู่ฟังก์ชันนี้สามารถใช้ในการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับได้หลากหลาย โดยเฉพาะหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ เช่น การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันของเมโซพอร์ซิไลต์เกิดด้วยหมู่ฟังก์ชัน 3-อะมิโนโพรพิล หรือ 3-เมอร์แคปโตโพรพิล และอื่นๆ โดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันนี้มีข้อเสียโดยการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวด้านนอกและภายในรูพรุนที่สารตัวกลางปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเข้าถึงเท่านั้น

2. กระบวนการควบแน่นร่วม (Co-condensation process) เป็นการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวไปพร้อมกับการสังเคราะห์ตัวดูดซับ การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้กับทั้งหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยตัวดูดซับที่ผ่านการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันจะมีการจัดเรียงโครงสร้างของตัวดูดซับใหม่และมีฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวที่สม่ำเสมอทั้งหมด

2.16.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (ธนพร คำขจร, 2552)

จลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับมวลสารของตัวดูดซับกับเวลา โดยทั่วไปแล้วอัตราการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการดูดซับ จากนั้นอัตราการดูดซับจะลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ โดยสมการที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับนั้น ได้แก่ จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน (Pseudo first order kinetic) และจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน (Pseudo second order kinetic)

1. จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน (Pseudo first order kinetic) มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.1

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad (2.1)$$

เมื่อหาปริพันธ์ของสมการที่ 2.1 ในช่วง $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q=0$ ถึง $q=q_t$ และจัดรูปจะได้สมการเส้นตรงตามสมการที่ 2.2

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.2)$$

โดยที่ q_t และ q_e คือ ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ (มก./ก.) และปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุล (มก./ก.) ตามลำดับ k_1 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 1 เสมือน (นาที⁻¹) และ t คือ ระยะเวลาของการดูดซับ (นาที)

2. จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน (Pseudo second order kinetic) มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.3

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อหาปริพันธ์ของสมการที่ 2.3 ในช่วง $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q=0$ ถึง $q=q_t$ และจัดรูปจะได้สมการเส้นตรงตามสมการที่ 2.4

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.4)$$

โดยที่ k_2 คือค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 2 เสมือน (ก./มก.·นาที)

2.16.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ

การดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังตัวดูดซับนั้นจะดำเนินไปโดยมีอัตราการดูดซับลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับซึ่งเป็นสภาวะที่การดูดซับและการคายตัวถูกละลายเกิดขึ้นในอัตราที่เท่ากัน ซึ่งหมายความว่าปริมาณตัวถูกละลายในสารละลายจะไม่มีเปลี่ยนแปลงโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายสมดุลการดูดซับคือ สมการไอโซเทอม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง โดยสมการไอโซเทอมที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนด์ลิช ไอโซเทอมการดูดซับของชิปส์ ไอโซเทอมการดูดซับของ Radke และ Prausnitz และไอโซเทอมการดูดซับของ Redlich และ Peterson

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Isotherm) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับปริมาณของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลในลักษณะเส้นตรงโดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.5

$$q_e = K_p C_e \quad (2.5)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับในสภาวะสมดุล (มก./ก.) K_p คือค่าคงที่สมดุลแบบเส้นตรง (ล./ก.) และ C_e คือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายในสภาวะสมดุล (มก./ล.)

2. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมนำมาใช้และเป็นสมการพื้นฐานที่นำไปพัฒนาเป็นไอโซเทอมชนิดอื่นๆโดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับชั้นเดียว โดยมีพลังงานของการดูดซับคงที่และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.6

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.6)$$

โดยที่ q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มก./ก.) และ K_L คือค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์

3. ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายสมดุลการดูดซับอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีสมมติฐานว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.7

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.7)$$

โดยที่ K_F และ $1/n$ คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรอนด์ลิช

4. ไอโซเทอมการดูดซับของชิปส์ (Punyapalakul และคณะ, 2013) เป็นไอโซเทอมที่รวมไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิชเข้าด้วยกัน และมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า แลงเมียร์-ฟรอนด์ลิชไอโซเทอม ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในการดูดซับแบบชั้นเดียวและหลายชั้น โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.8

$$q_e = \frac{q_m K_S C_e^{1/n}}{1 + K_S C_e^{1/n}} \quad (2.8)$$

โดยที่ K_S คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของซิปส์

5. ไอโซเทอมการดูดซับของ Radke และ Prausnitz (Cooney, 1999) เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่ประกอบด้วย 3 ตัวแปรที่ได้จากผลการทดลอง โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.9

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{aC_e} + \frac{1}{bC_e^\beta} \quad (2.9)$$

โดยที่ a b และ β คือค่าคงที่การดูดซับของ Radke และ Prausnitz และเมื่อใช้ในความเข้มข้นต่ำๆ สมการจะเปลี่ยนรูปเป็นไอโซเทอมแบบเส้นตรงและเมื่อใช้ในความเข้มข้นที่สูงมากๆ สมการจะเปลี่ยนรูปเป็นไอโซเทอมของฟรอนด์ลิช โดยเมื่อค่า $\beta = 0$ จะทำให้สมการเปลี่ยนรูปเป็นไอโซเทอมของแลงเมียร์

6. ไอโซเทอมการดูดซับของ Redlich และ Peterson (McKay, 1996) เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่ประกอบด้วย 3 ตัวแปร โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับแบบหลายชั้นเกิดขึ้นในช่วงแรกเท่านั้น ซึ่งการนำไอโซเทอมชนิดนี้ไปใช้ถูกจำกัดในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการทดลองเท่านั้นเนื่องจากความลำบากในการวิเคราะห์ค่าคงที่ โดยรูปแบบของสมการไอโซเทอมการดูดซับของ Redlich และ Peterson แสดงดังสมการที่ 2.10

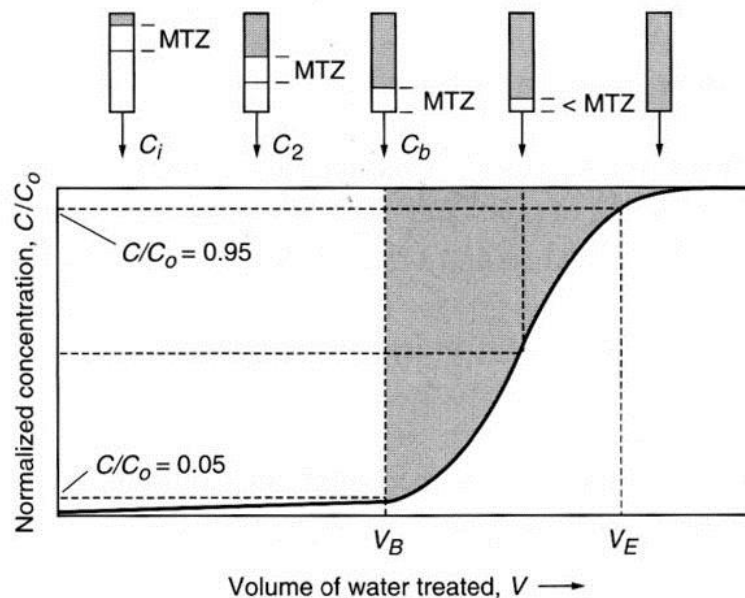
$$q_e = \frac{K_j C_e}{1 + b_j C_e^\beta} \quad (2.10)$$

โดยที่ K_j และ b_j คือ ค่าคงที่การดูดซับของ Redlich และ Peterson และ β คือตัวประกอบความหลากหลายของพื้นผิว

2.16.6 การดูดซับในระบบคอลัมน์ (Cooney, 1999)

การดูดซับในระบบคอลัมน์นั้นมีความแตกต่างจากระบบที่ละเทโดยที่ระบบที่ละเทนั้นจะเป็นการกวนผสมกันระหว่างตัวดูดซับและสารละลายโดยใช้เวลาที่มากเกินพอ ดังนั้นกระบวนการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะสมดุลเสมอ ในขณะที่ระบบคอลัมน์นั้น สารละลายจะไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับจะเกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่สมดุลโดยความเข้มข้นของสารละลายในพื้นที่ที่เกิดการดูดซับนั้นจะมีค่าลดลงในลักษณะของกราฟรูปตัว S โดยสารละลายจะไหลผ่านชั้นตัวกลางไปเรื่อยๆ โดยไม่อยู่ในสภาวะสมดุลการดูดซับ

เมื่อสารละลายไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับจะเกิดขอบเขตการถ่ายเทมวลขึ้น โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในชั้นบนของตัวดูดซับ จากนั้นจะมีการดูดซับอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุล ซึ่งตัวดูดซับในชั้นบนที่มีการดูดซับเกิดขึ้นจะหมดสภาพการใช้งาน และเกิดการดูดซับขึ้นในชั้นของตัวดูดซับที่อยู่ต่ำลงมา โดยขอบเขตที่เกิดการดูดซับนี้เรียกว่า ขอบเขตการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Zone, MTZ) หรือพื้นที่การดูดซับ (Adsorption Zone) ซึ่งความกว้างของขอบเขตการถ่ายเทมวลนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น โครงสร้างของตัวดูดซับ ชนิดของมลสาร และลักษณะการดูดซับ เป็นต้น โดยขอบเขตการถ่ายเทมวลนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟเบรกทรูและขอบเขตการถ่ายเทมวลในระบบคอลัมน์ (Metcalf และ Eddy, 2004)

2.16.7 กราฟเบรกทรู

ในการดูดซับในระบบคอลัมน์นั้น เมื่อทำการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการดูดซับในระบบคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่ออกจากคอลัมน์กับเวลาหรือปริมาตรสารละลายที่ผ่านระบบเรียกว่ากราฟเบรกทรู ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์นั้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับถูกใช้หมดไปเรื่อยๆ โดยความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ที่สูงที่สุดที่กำหนดไว้เรียกว่าความเข้มข้นเบรกทรู โดยกราฟเบรกทรูโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัว S ซึ่งถ้าหากเส้นกราฟมีความชันมาก แสดงถึงความสามารถในการแพร่ของมลสารผ่านชั้นฟิล์มหรือรูพรุนของตัวดูดซับที่สูง โดยลักษณะของกราฟเบรกทรูนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5

2.16.8 สมการเบรกทรูโดยใช้แบบจำลองของโรมัส (Chowdhury และคณะ, 2013; Trgo และคณะ, 2011)

กราฟเบรกทรูที่ได้จากการทดลองการดูดซับในระบบคอลัมน์นั้นสามารถนำเสนอสมการแบบจำลองของโรมัสมาใช้ในการอธิบายได้ โดยโรมัสได้นำเสนอสมการทั่วไปในการวิเคราะห์กราฟเบรกทรูซึ่งมีสมมติฐานอ้างอิงจากสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 และไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.11

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{k_{Th}}{Q}(qm - C_0V)\right]} \quad (2.11)$$

โดยที่ C คือค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ (มก./ล.) C_0 คือค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่คอลัมน์ (มก./ล.) k_{Th} คือค่าคงที่อัตราของโรมัส (ล./มก.·นาท) Q คือค่าอัตราการไหลของสารละลาย (ล./นาท) q คือค่าความจุการดูดซับ (มก./ก.) m คือมวลของตัวดูดซับ (กรัม) และ V คือปริมาตรของสารละลายที่ผ่านคอลัมน์

ในการวิเคราะห์ค่า q และ k_{Th} นั้น สามารถทำได้โดยการจัดรูปสมการแบบจำลองของโรมัสให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของ $\ln[(C_0/C) - 1]$ กับ t ดังสมการที่ 2.12

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_{Th}qm}{Q} - k_{Th}C_0t \quad (2.12)$$

2.16.9 การออกแบบระบบคอลัมน์ (Cooney, 1999; Faust และ Aly, 1987)

ในการออกแบบระบบคอลัมน์การดูดซับนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองในคอลัมน์จำลองที่ความยาวต่างๆโดยกำหนดให้ขนาดของตัวดูดซับและความเร็วในการไหลเท่ากับของระบบคอลัมน์จริง จากนั้นจึงบันทึกค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ ณ เวลาต่างๆ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่ออกจากคอลัมน์กับเวลาเรียกว่ากราฟเบรกทรู ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์นั้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับถูกใช้หมดไปเรื่อยๆ โดยความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ที่สูงที่สุดที่กำหนดไว้เรียกว่าความเข้มข้นเบรกทรู จากนั้นจึงนำข้อมูลจากกราฟเบรกทรูที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเบรกทรูกับความยาวของคอลัมน์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งวิธีดังกล่าวเรียกว่า Bed Depth-Service Time (BDST) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการอธิบายนี้คือสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์

สมการของโบฮาร์ทและอดัมส์นั้นใช้กฎอัตราเคมีควอไซโดยมีสมมติฐานว่าไม่มีการแพร่เกิดขึ้นในแนวการไหลและแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเบรกทรูกับความยาวของคอลัมน์โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 2.13

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_B} - 1\right) = \ln\left[\exp\left(\frac{kN_0D}{V}\right) - 1\right] - kC_0t \quad (2.13)$$

โดยที่ t คือระยะเวลาที่ใช้งานคอลัมน์ (นาท) V คืออัตราเร็วการไหลของสารละลาย (ชม./นาท) D คือความหนาของชั้นตัวดูดซับ (ชม.) D_0 คือความหนาวิกฤตหรือความหนาของชั้นตัวดูดซับที่ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเท่ากับความเข้มข้นเบรกทรู (ชม.) k คือค่าคงที่อัตรา (ลบ.ชม./มก./นาท) N_0 คือความจุการดูดซับของตัวดูดซับ (มก./ลบ.ชม.) C_0 คือความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่คอลัมน์ (มก./ล.) และ C_B คือความเข้มข้นเบรกทรู (มก./ล.)

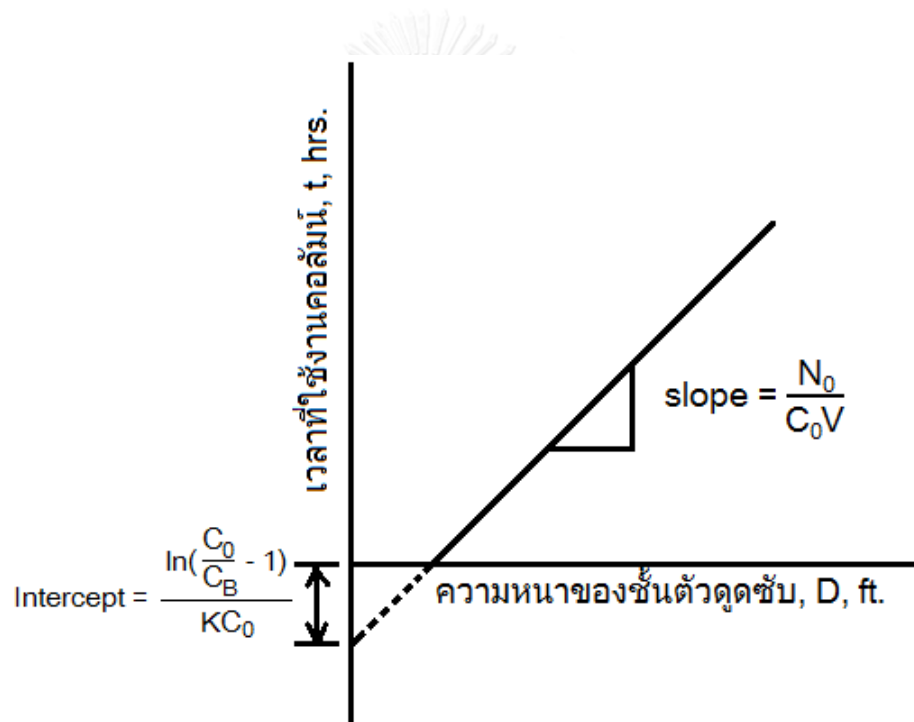
เนื่องจาก $\exp\left(\frac{kN_0D}{V}\right) \gg 1$ (Trgo และคณะ, 2011) ดังนั้นจึงสามารถจัดรูปสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ใหม่เพื่อให้เกิดความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของเวลาและความหนาของชั้นตัวดูดซับเพื่อหาค่าคงที่ k และ N_0 จะได้สมการใหม่ดังสมการที่ 2.14

$$t = \frac{N_0}{C_0V}D - \left[\frac{1}{kC_0} \ln\left(\frac{C_0}{C_B} - 1\right)\right] \quad (2.14)$$

ในการออกแบบคอลัมน์นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงความหนาของตัวดูดซับเพื่อไม่ให้มีความหนาน้อยเกินไป โดยความหนาวิกฤตหรือความหนาของชั้นตัวดูดซับที่ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเท่ากับความเข้มข้นเบรกทรู หรือ D_0 หาได้จากสมการที่ 2.15

$$D_0 = \frac{V}{kN_0} \left[\ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \right] \quad (2.15)$$

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้งานคอลัมน์กับความหนาของชั้นตัวดูดซับได้แสดงในเห็นในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้งานคอลัมน์กับความหนาของชั้นตัวดูดซับ

หลังจากที่ได้สมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ของระบบคอลัมน์การดูดซับแล้วสามารถนำไปใช้ในการออกแบบคอลัมน์ใหม่ที่มีคุณสมบัติเหมือนคอลัมน์เดิมโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบและ/หรือเปลี่ยนความเข้มข้นเบรกทรูของระบบ โดยฮัทชินสันได้จัดรูปของสมการให้อยู่ในรูปสมการกราฟเส้นตรงดังสมการที่ 2.16

$$t = ax + b \quad (2.16)$$

โดยที่ t คือระยะเวลาใช้งานคอลัมน์ (นาทีก) x คือความลึกของชั้นตัวดูดซับ (ซม.)
 a คือความชันของกราฟเส้นตรง (นาทีก/ซม.) และ b คือจุดตัดแกน y ของกราฟเส้นตรง
 โดยแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายและอัตราเร็วการไหลในระบบเดิม
 และระบบใหม่ดังสมการที่ 2.17 2.18 และ 2.19

กรณีที่มีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายเข้าสู่ระบบ

$$a' = \frac{Va}{V'} \quad (2.17)$$

กรณีที่มีการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเข้าสู่ระบบ

$$a' = \frac{C_0 a}{C_1} \quad (2.18)$$

กรณีที่มีการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเข้าสู่ระบบและความเข้มข้นเบรกทรูของระบบ

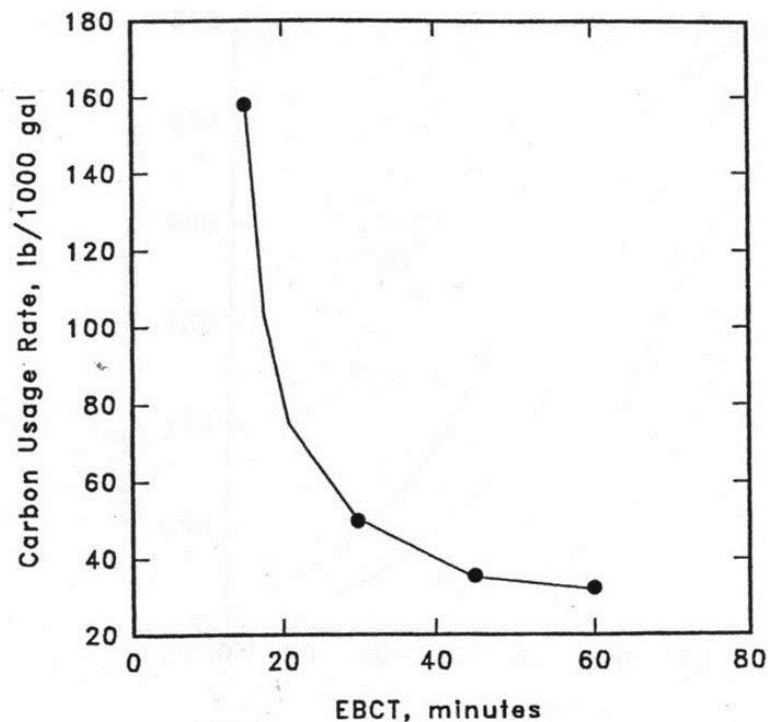
$$b' = b \left(\frac{C_0}{C_1} \right) \frac{\ln[(C_1/C_F) - 1]}{\ln[(C_0/C_B) - 1]} \quad (2.19)$$

โดยที่ C_0 และ C_1 คือความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบเดิมและใหม่ตามลำดับ (มก./ล.)
 V และ V' คืออัตราเร็วการไหลของสารละลายในระบบเดิมและใหม่ตามลำดับ (ซม./นาทีก) และ
 C_B และ C_F คือความเข้มข้นเบรกทรูของระบบเดิมและใหม่ตามลำดับ (มก./ล.)

นอกจากนี้ยังมีวิธี Empty Bed Contact Time (EBCT) ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ของอัตรา
 การใช้ตัวดูดซับต่อปริมาณสารละลายที่ผ่านระบบซึ่งได้มาจากการทดลองการดูดซับในระบบคอลัมน์
 โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลกับระยะเวลาในการไหลของสารละลายผ่านคอลัมน์ที่ไม่มีชั้นตัวดูดซับ
 หรือ EBCT (นาทีก) แล้วจึงเลือกใช้ค่า EBCT ที่เหมาะสมมาใช้ในการออกแบบ โดยกราฟ
 ความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 2.7 โดยค่า EBCT สามารถคำนวณได้จาก
 สมการที่ 2.20 และอัตราการใช้ตัวดูดซับต่อปริมาณสารละลายที่ผ่านระบบคอลัมน์สามารถคำนวณได้
 จากสมการที่ 2.21

$$EBCT = \frac{\text{ปริมาณของชั้นตัวดูดซับ}}{\text{อัตราการไหลของสารละลาย}} \quad (2.20)$$

$$\text{อัตราการใช้ตัวดูดซับ} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวดูดซับในคอลัมน์}}{\text{ปริมาณของสารละลายที่ผ่านคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดเบรคทูร์}} \quad (2.21)$$



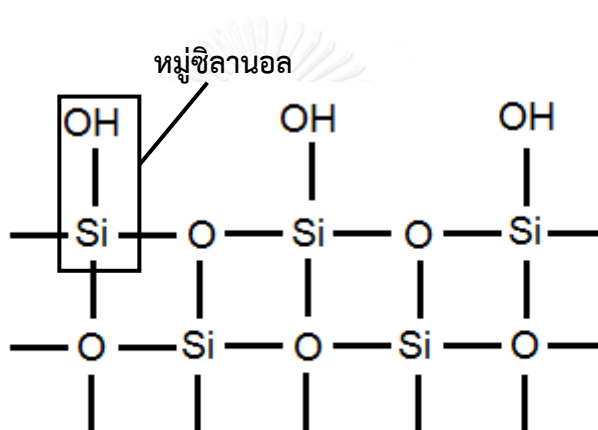
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ตัวดูดซับกับ EBCT (Cooney, 1999)

2.16.10 การจัดลำดับตัวดูดซับ

ในการออกแบบระบบคอลัมน์การดูดซับเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยมลสารหลายชนิดนั้น การจัดลำดับตัวดูดซับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้นได้ โดยการดูดซับเฉพาะมลสารที่ต้องการกำจัดก่อน ซึ่งอาจเป็นมลสารที่มีความอันตรายสูงหรือส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยการจัดลำดับตัวดูดซับนั้นจะเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับแบบคัดเลือกสูง (High Selectivity) ซึ่งสามารถดูดซับมลสารที่ต้องการก่อน แล้วจึงเลือกใช้ตัวดูดซับอื่นๆที่มีความสามารถในการดูดซับแบบคัดเลือกรองลงมา

2.17 เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (Hexagonal Mesoporous Silicate; HMS)

เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต เป็นสารประกอบซิลิเกตสังเคราะห์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นทรงหกเหลี่ยม มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 – 30 นาโนเมตร ซึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตเป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง มีคุณสมบัติทนความร้อนได้มากและมีพื้นผิวเป็นเอกรูป โดยโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Si-O-Si) และบนพื้นผิวประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Si-OH) ดังรูปที่ 2.8 โดยหมู่ฟังก์ชันที่พบในเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้อุปกรณ์ Fourier transform infrared (FT-IR) แสดงดังตารางที่ 2.13



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต

หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตนั้นสามารถนำมาต่อเติมหมู่ฟังก์ชันได้โดยกระบวนการต่อเติมหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้มีความเจาะจงในการเลือกดูดซับมลสารได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันนั้น โครงสร้างของเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2.13 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่พบในเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (ฉมนรี สุขเกษม, 2556)

หมู่ฟังก์ชัน	IR spectra bands (cm ⁻¹)	อ้างอิง
O-Si-O	470	(Carrado, 2000; Roy และคณะ, 1996; Wang และคณะ, 1999)
Si-O	1100	(Carrado, 2000; Roy และคณะ, 1996; Wang และคณะ, 1999)
Ring structure of SiO ₄	800	(Carrado, 2000; Roy และคณะ, 1996; Wang และคณะ, 1999)
Si-OH	973	(Roy และคณะ, 1996)
H-O-H	3457	(Decottignies และคณะ, 1978; Roy และคณะ, 1996)
Deformation mode of H ₂ O	1650-1600	(Decottignies และคณะ, 1978; Roy และคณะ, 1996)
O-H	3750	(Parfitt และ Rochester, 1983)

2.18 หมู่ฟังก์ชัน (Smith และ March, 2007)

หมู่ฟังก์ชัน คือ กลุ่มของอะตอมที่เป็นโครงสร้างย่อยของโมเลกุลที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างเฉพาะตัว ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนั้นมักเป็นตัวกำหนดสมบัติทางเคมีของโมเลกุลและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกันนั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหมือนกัน แม้ว่าจะมีขนาดโมเลกุลที่ต่างกันก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนำหมู่ฟังก์ชันซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวเหล่านี้ไปทำการปรับแต่งพื้นผิวของวัสดุต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าวลงไปบนวัสดุเหล่านั้น เช่น การเคลือบผิววัสดุเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทางชีวภาพ การเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำให้กับพื้นผิวของคอนแทคเลนส์ และการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดูดซับเพื่อให้มีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารแบบจำเพาะเจาะจง โดยหมู่ฟังก์ชันที่พบได้ทั่วไปแสดงดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่พบได้ทั่วไป

หมู่ฟังก์ชัน	สูตรโครงสร้าง	หมู่ฟังก์ชัน	สูตรโครงสร้าง
ไฮดรอกซิล	R-OH	อัลดีไฮด์	R-C(=O)H
เมทิล	R-CH ₃	คีโตน	R-C(=O)-R'
เอไมด์	R-C(=O)N(-H)-R'	อีเทอร์	R-O-R'
เอมีน (อะมิโน)	R-NH ₂	เอสเทอร์	R-C(=O)O-R'
เอโซ	R-N=N-R'	ฮาโลเจน	R-F, R-Cl, R-Br และ R-I
คาร์บอกซิล	R-C(=O)OH	ฟีนิล	R-C ₆ H ₅
เปอร์ออกซี	R-O-O-R	เมอร์แคปโต	R-SH

2.19 หมู่ฟังก์ชันอะมิโน

หมู่ฟังก์ชันอะมิโนคือหมู่ฟังก์ชันที่มีส่วนประกอบของเอมีนอยู่บนโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชัน โดยหมู่ฟังก์ชันอะมิโนมีคุณสมบัติเป็นเบสและสามารถพบได้ในโปรตีน กรดอะมิโน DNA และ RNA นอกจากนี้ยังมีสมบัติชอบน้ำ โดยเมื่อละลายน้ำจะรับโปรตอนจากน้ำ

หมู่ฟังก์ชันอะมิโนนิยมใช้ในการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวดูดซับเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำให้กับพื้นผิวและทำให้มีประจุบนพื้นผิวเป็นบวก โดยคุณสมบัติทั่วไปของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนแสดงดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 คุณสมบัติทั่วไปของหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (Takizawa และ Punyapalukul, 2008)

ชื่อ	หมู่ฟังก์ชันอะมิโน
สูตรโครงสร้าง	R-NH ₂
pH _{ZPC}	8
คุณสมบัติความชอบน้ำ	ชอบน้ำ
ความเป็นกรด-เบส	เบส

2.20 แอลจีเนต

แอลจีเนตเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ของอนุพันธ์ของน้ำตาล 2 ชนิดคือ กรดแมนนูโรนิก (D-mannuronic acid) กรดกลูคูโรนิก (Guluronic acid) โดยส่วนมากจะอยู่ในรูปของเกลืออนินทรีย์ของกรดแอลจินิก (Alginic) โดยที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารคือโซเดียมแอลจีเนต (Sodium Alginate)

แอลจีเนตสามารถสกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล เช่น *Macrocystis pyrifera*, *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea* และผ่านการทำแห้ง มีลักษณะเป็นผง เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล (Gelling agent) โดยเจลที่ได้มีคุณสมบัติทนความร้อน เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนประจุบวกมากกว่าหนึ่ง เช่น แคลเซียม จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (Crosslinking) ทำให้เจลมีความแข็งแรง และตกตะกอนได้ ใช้เป็นวัตถุเติมในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ไอศกรีม เบเกอรี่ ซอส น้ำสลัด และขนมที่มีลักษณะเป็นเจล

2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.21.1 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับต่อการดูดซับสีย้อม

Anbia และ Salehi, 2012 ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมแอสิตจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายโดยใช้ตัวดูดซับนาโนพอร์ซิลิกา (SBA-3) ที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนลงบนพื้นผิวโดยเลือกใช้หมู่อะมิโน 3 ชนิด ได้แก่ หมู่เอธิลีนไดเอมีน (SBA-3/EDA) หมู่อะมิโนโพรพิล (SBA-3/APTES) และหมู่เพนตะเอธิลีนเฮกซะไดเอมีน (SBA-3/PEHA) และทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของตัวดูดซับโดยใช้ FT-IR XRD และการวิเคราะห์การดูดซับไนโตรเจน และทำการทดลองดูดซับสีแอสิต 5 ชนิด ได้แก่ แอสิตบลู-113 แอสิตเรด-114 แอสิตกรีน-28 แอสิตเยลโล-127 และแอสิตออเรนจ์-67 โดยจากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับสีแอสิตทุกชนิดของตัวดูดซับมีการเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ SBA-3/PEHA > SBA-3/APTES > SBA-3/EDA > SBA-3 จึงสรุปได้ว่า การต่อติดหมู่ฟังก์ชันเอมีนนั้นช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีแอสิตโดย SBA-3/PEHA นั้นมีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด ณ สมดุลการดูดซับที่ใช้เวลาไม่เกิน 60 นาที โดยความสามารถในการดูดซับของ SBA-3/PEHA มีมากที่สุดเนื่องจากแนวทางไฟฟ้าสถิตและพันธะไฮโดรเจนระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับและโมเลกุลของสีแอสิต โดยมีค่าพีเอชเป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งถ้าหากทำการลดค่าพีเอชของสารละลายลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของ SBA-3/PEHA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอุณหภูมิในการทดลองที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดคือ 20 องศาเซลเซียส และจะลดลงเรื่อยๆตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการนำมาอธิบายสมดุลการดูดซับคือสมการไอโซเทอมของฟรุนด์ลิช และสมการทางจลพลศาสตร์ที่เหมาะสมคือสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน

Atia และคณะ, 2009 ทำการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสีย้อมแอสิตออเรนจ์ 10 โดยใช้แมกเนติกซิลิกาที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเอมีน โดยนำซิลิกาที่มีและไม่มีอนุภาคแมกเนไทต์ (Fe₃O₄) มาทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันโดยใช้ 3-อะมิโนโพรพิลไตรอโทกซีซิเลน ทำการทดลองการดูดซับสารละลายแอสิตออเรนจ์ 10 ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายด้วยระบบการดูดซับแบบที่ละเท โดยทำการทดลองในภาวะค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าแมกเนไทต์ซิลิกาที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันมอโนเอมีน (MAMMS) มีความจุการดูดซับและอัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมแอสิตออเรนจ์ 10 สูงกว่าซิลิกาที่ไม่มีอนุภาคแมกเนไทต์ที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชันมอโนเอมีน(MAMPS) โดยความจุการดูดซับสีย้อมแอสิตออเรนจ์ 10

สูงสุดของ MAMPS และ MAMMS คือ 48.98 และ 61.33 มก./ก. ตามลำดับ ในสภาวะค่าพีเอชเท่ากับ 3 เนื่องมาจากมีโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนน้อยกว่าจึงทำให้อนุภาคสีย้อมสามารถเข้าถึงได้โดยไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ และมีจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษากการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ที่สภาวะค่าพีเอชเท่ากับ 10 พบว่ามีอัตราการฟื้นฟู 98% หลังจากที่มีการใช้งาน-ฟื้นฟู 3 รอบ

Gaikwad และ Misal, 2010 ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ซิลิกาเจล โดยทำการทดลองการดูดซับในระบบการดูดซับแบบที่ละเทโดยใช้สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 12.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับของมลสารที่สภาวะค่าพีเอชเท่ากับ 8 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนสูงสุดที่ 600 มิลลิกรัมตัวดูดซับต่อมิลลิลิตร และจะมีอัตราการดูดซับคงที่แม้จะเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ และได้ทำการทดลองการดูดซับที่สภาวะค่าพีเอช 1 3 6 8 และ 10 พบว่าที่สภาวะค่าพีเอช 8 – 10 มีความจุการดูดซับสูงสุด และทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 35 45 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสมีความจุการดูดซับสูงสุด และจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยมีความจุการดูดซับสูงสุด 195 มิลลิกรัมต่อลิตร ไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช และจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามสมการของแลงเกอเรน (Langergren's equation) และได้ทำการศึกษากการดูดซับในระบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 8 ผ่านชั้นตัวดูดซับซิลิกาเจลหนา 1.6 เซนติเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด 97.6% โดยเมื่อกำหนดความเข้มข้นเบรทรวูไว้ที่ 170 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาตรสารละลายที่บำบัดได้ประมาณ 1,400 มิลลิลิตร

Donia และคณะ, 2009 ทำการศึกษาผลกระทบจากคุณสมบัติของโครงสร้างของสีย้อมแอซิดต่อการดูดซับโดยบนซิลิกาที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเอมีนโดยนำซิลิกาเจลเกรดการค้าที่ทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันเอมีนโดยใช้ 3-อะมิโนโพรพิลไดรอิทอกซีซิลเลน โดยทำการทดลองการดูดซับแบบที่ละเทโดยใช้สีย้อมแอซิดออเรนจ์ 10 และแอซิดออเรนจ์ 12 ซึ่งมีลักษณะการแตกตัวของหมู่ฟังก์ชัน $-SO_3H$ และขนาดความยาวของโครงสร้างที่แตกต่างกันโดยพบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับของแอซิดออเรนจ์ 10 เป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน ในขณะที่จลนพลศาสตร์การดูดซับของแอซิดออเรนจ์ 12 เป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน ซึ่งพบว่า

แอซิดออเรนจ์ 10 มีความจุการดูดซับและอัตราการดูดซับที่สูงกว่า โดยไอโซเทอมการดูดซับของ สีย้อมทั้งสองเป็นไปตามไอโซเทอมของแลงเมียร์ และได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารละลาย อิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ต่อการดูดซับสีย้อมพบว่าความจุการดูดซับแอซิดออเรนจ์ 12 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความจุการดูดซับแอซิดออเรนจ์ 10 ลดลง เนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของ ซิลิกาเจลกับสีย้อมทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน โดยคลอไรด์จะเข้าไปแย่งพื้นที่ดูดซับของ แอซิดออเรนจ์ 10 ในขณะที่สารละลายอิเล็กโตรไลต์จะเข้าไปเพิ่มแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ของ พื้นระไฮโดรเจนและปฏิสัมพันธ์แบบพาย ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคสีย้อมบนพื้นผิวของ ซิลิกาเจล นอกจากนี้ยังทำการศึกษากาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มี ค่าพีเอช 10 พบว่ามีอัตราการฟื้นฟูจากการดูดซับสีย้อมแอซิดออเรนจ์ 12 และแอซิดออเรนจ์ 10 อยู่ที่ 10.4 และ 91.6 % ตามลำดับ

2.21.2 ผลของหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับต่อการดูดซับโลหะหนัก

Shahbazi และคณะ, 2012 ทำการศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม ทั้งในระบบที่ละลาย (สารละลายเดี่ยว) และระบบคอลัมน์ (สารละลายผสม 3 ชนิด) โดยใช้เมโซพอร์ซิลิกาที่มีการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (PAMAM-SBA-15) โดยจากการทดลองในระบบที่ละลายโดยใช้สารละลายที่มีค่าพีเอช 4 – 5 และใช้ตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร พบว่าผลการทดลองมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดย ในช่วงแรกของกราฟที่มีความเข้มข้นแสดงถึงประสิทธิภาพที่สูงในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก ที่ความเข้มข้นต่ำของตัวดูดซับซึ่งเป็นวัสดุกิ่งอินทรีย์ แต่ในสภาวะสมดุลการดูดซับนั้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก โดยเรียงลำดับ ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก 3 ชนิดบน PAMAM-SBA-15 คือ ทองแดง > ตะกั่ว > แคดเมียม โดยมีค่าความกระด้างของโลหะเป็นปัจจัยสำคัญ และการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่า การดูดซับเป็นไปอย่างรวดเร็วโดยเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 และจากพลังงานในการดูดซับคาดว่ากลไกหลักในการดูดซับน่าจะเป็นการดูดซับทางเคมี โดยจากเสถียรภาพทางเคมีของวัสดุที่ทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันนั้นทำให้สามารถนำตัวดูดซับ กลับมาใช้ซ้ำได้อย่างน้อย 3 รอบ ในระบบที่ละลาย และจากการทดลองในระบบคอลัมน์พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรมัสโดยความสามารถในการดูดซับสูงสุด

ของทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม คือ 1.6 1.3 และ 1.0 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ โดยใช้ อัตราการไหล 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที และความหนาของชั้นตัวดูดซับ 8 เซนติเมตร โดยมี ค่าร้อยละการบำบัดสูงสุด ณ สถานะนี้ คือ 83% 75% และ 73% ของทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม ตามลำดับ และจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นตัวดูดซับเป็นไปตามแบบจำลอง BDST ซึ่งผลลัพธ์จากการศึกษาทั้งหมดนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักเหล่านี้ได้

Standeker และคณะ, 2011 ทำการศึกษาความสามารถของซิลิกาแอโรเจลที่มีหมู่ ฟังก์ชันเมอร์แคปโต (-HS) ในการกำจัดไอออนของทองแดงและปรอท จากน้ำด้วยการใช้ระบบที่ละเท โดยนำซิลิกาแอโรเจลที่ทำการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน และเตตระเมทอกซีซิลเลนในการสังเคราะห์ sol-gel มาตรฐานในสัดส่วนที่ต่างกัน 3 ค่า จากนั้น ทำให้แห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือวิกฤต แล้วจึงนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพพบว่าแอโรเจลที่ได้มีเสถียรภาพทางความร้อน จนกระทั่งอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเมอร์แคปโตโพรพิล- ไตรเมทอกซีซิลเลนต่อเตตระเมทอกซีซิลเลนในการสังเคราะห์ตัวดูดซับจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง แต่สัดส่วนของซิลิกาแอโรเจลที่ทำการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันนั้นได้รับผลกระทบไม่มาก และจากการทดลองพบว่าซิลิกาแอโรเจลที่ทำการต่อเติมหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีสัดส่วนของ เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลนต่อเตตระเมทอกซีซิลเลนในปริมาณที่น้อยที่สุดนั้น มีความสามารถในการดูดซับมากที่สุดเนื่องจากยังคงมีพื้นที่ผิวจำเพาะจำนวนมาก และจากการศึกษา สถานะที่เหมาะสมพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงที่สุดเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเป็น 4 และ 6 สำหรับทองแดงและปรอท ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 2 ชั่วโมง โดยข้อมูลไอโซเทอมที่ได้มีความสอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของทั้งแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช โดยจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าซิลิกาแอโรเจลที่มีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตนั้น สามารถนำมาใช้ในการกำจัดไอออนของทองแดงและปรอทจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายได้

Xue และ Li, 2008 ได้ทำการศึกษาการกำจัดทองแดงโดยการดูดซับลงบนตัวดูดซับ เมโซพอร์ซิลิกา (SBA-16) ที่มีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตโดยใช้ 3-เมอร์แคปโตโพรพิล- ไตรอโรกซิลเลน (TMMPS) ในสัดส่วนของเตตระเอทิล ออโรซิลิเกต (TEOS) ต่อ TMMPS ที่ 3:4 ในการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันในกระบวนการควบแน่นร่วม โดยเมื่อเพิ่ม TMMPS พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน และความสม่ำเสมอมีแนวโน้มลดลง โดยทำการทดลองการดูดซับ

ในระบบที่ละเทซึ่งจากผลลัพธ์พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความใกล้เคียงกับสมการไอโซเทอมของเรดลิชและปีเตอร์สันมากที่สุดโดยให้ค่า $r^2 = 0.9999$ และรองลงมาคือสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์โดยให้ค่า $r^2 = 0.9847$ โดยมีปริมาณการดูดซับสูงสุด 36.38 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5-6 โดยกลไกในการดูดซับที่สำคัญน่าจะเป็นการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต ซึ่งตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ง่ายโดยการนำไปล้างด้วยกรด ซึ่งสามารถดูดซับได้มากกว่า 23 มิลลิกรัมต่อกรัมในการใช้ซ้ำ 7 รอบ

Machida และคณะ, 2012 ได้ทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยเมโซพอร์สซิลิกาที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันและถ่านกัมมันต์ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และเมอร์แคปโต จากการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันของเมโซพอร์สซิลิกาและหมู่คาร์บอกซิลิกจากกระบวนการออกซิเดชันของถ่านกัมมันต์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของเมโซพอร์สซิลิกาที่ทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันโมโนอะมิโน ไดอะมิโน และไตรอะมิโน พบว่าหมู่โมโนอะมิโนมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด จึงได้ทำการเลือกหมู่ฟังก์ชันโมโนอะมิโนมาใช้ในการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีการควบแน่นร่วม โดยเมื่อนำมาทำการทดลองการดูดซับแคดเมียมเปรียบเทียบกับเมโซพอร์สซิลิกาที่ปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตด้วยการควบแน่นร่วมและถ่านกัมมันต์ที่สภาวะเดียวกันแล้วพบว่าหมู่โมโนอะมิโนมีความจุการดูดซับสูงสุด 0.25 มิลลิโมลต่อกรัม เทียบกับหมู่เมอร์แคปโตและหมู่คาร์บอกซิลที่มีความจุการดูดซับประมาณ 0.12 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ทั้งหมด และมีค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ 60 70 และ 60 ตามลำดับ และเมื่อทำการปรับค่าพีเอชในการทดลองแล้วพบว่าหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโตและคาร์บอกซิลมีช่วงค่าพีเอชในการใช้งานที่กว้างกว่าหมู่อะมิโน เนื่องจากหมู่อะมิโนใช้ส่วนที่เป็นเบสในการดูดซับแคดเมียม ในขณะที่หมู่เมอร์แคปโตและคาร์บอกซิลใช้การแลกเปลี่ยนไอออน โดยจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวมีบทบาทสำคัญในกระบวนการดูดซับมากกว่าโครงสร้างของตัวดูดซับซิลิกาและถ่านในการดูดซับแคดเมียม

2.21.3 การดูดซับมลสารผสมของสารลดแรงตึงผิวโดยใช้ตัวดูดซับชนิดซิลิกา

Punyapalukul และ Takizawa, 2006 ทำการศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกของสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุอัลคิลฟีนอลโพลีอีเธอร์ออกซีเลน (APnEOs) ลงบนตัวดูดซับเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (HMSs) ในสารละลายที่มีสีย้อมชนิดแตกตัวเป็นประจุ โดยเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่ใช้ นั้นมีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันด้วยการต่อเติมหมู่ฟังก์ชัน 3 ชนิด คือ หมู่เอ็น-ออกทิลโดเมทิล หมู่ 3-อะมิโนโพรพิลไทรอิธอกซี และหมู่ 3-เมอร์แคปโตโพรพิล และต่อเติมหมู่ฟังก์ชันด้วยการควบแน่นร่วมอีก 1 ชนิด คือ ไททาเนียม ในสารละลายที่มีสีย้อมชนิดแตกตัวเป็นประจุ 2 ชนิด คือ เบสียลโลล 1 และแอซิดบลู 45 ซึ่งแตกตัวเป็นประจุบวกและลบตามลำดับ โดยทำการทดลองแบบทีละเทในสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม โดยจากผลการทดลองพบว่า HMS ทั้งหมดยกเว้น HMS ที่ทำการต่อเติมหมู่ฟังก์ชัน 3-อะมิโนโพรพิลไทรอิธอกซี มีความสามารถในการดูดซับ APnEO สูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง โดยความสามารถในการดูดซับของ HMS นั้นไม่ขึ้นอยู่กับประจุบนพื้นผิวแต่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่ทำการต่อติดลงไป โดยการดูดซับสีย้อมชนิดประจุบวกนั้นขึ้นอยู่กับประจุลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับมากกว่าพันธะไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ ในขณะที่สีย้อมชนิดประจุลบนั้นจะสามารถดูดซับลงบนพื้นผิวที่มีประจุบวกของถ่านกัมมันต์และ AM-HMS เท่านั้น โดยความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวนั้นไม่ถูกรบกวนโดยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ยกเว้นการดูดซับสีย้อมแอซิดบลูลงบน AM-HMS อย่างไรก็ตามการดูดซับสารลดแรงตึงผิวนั้นทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสียลโลลลดลงในตัวดูดซับทุกชนิด ในขณะที่การดูดซับสีย้อมแอซิดบลูลงบน AM-HMS นั้นจะไม่ถูกรบกวนโดยสารลดแรงตึงผิวแต่จะทำให้การดูดซับสารลดแรงตึงผิวนั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวบนถ่านกัมมันต์ชนิดผงนั้นไม่เฉพาะเจาะจงกับชนิดประจุของสีย้อมซึ่งแสดงถึงผลกระทบทางกายภาพเช่นการอุดตันของรูพรุนขนาดเล็กเป็นกลไกหลักในการขัดขวางการดูดซับโดยสารลดแรงตึงผิว

Paisanjit, 2008 ทำการศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกโดยใช้เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันเป็นตัวดูดซับในสารละลายที่ประกอบด้วย โลหะหนัก 2 ชนิด คือ ทองแดง และแคดเมียม สีย้อมชนิดที่มีประจุเมธิลีนบลู และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (TX-100®) โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยการสังเคราะห์ตัวดูดซับใช้วิธีการควบแน่นร่วมซึ่งสารที่ใช้ในการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันคือ 3-อะมิโนโพรพิลไทรอิธอกซีเลน 3-เมอร์แคปโตโพรพิลไทรเมธอกซีเลน และไดเอทิลออกทิลคลอโรซีเลน โดยทำการทดลองในระบบทีละเทโดยใช้

สารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม 2 ชนิด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง ซึ่งพบว่า จลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งหมดเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน โดยการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีโดยเฉพาะปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไอออนของโลหะและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ซึ่งจากผลลัพธ์พบว่าตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดที่ไม่ชอบน้ำ เช่น เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันเมอร์แคปโต (M-HMS) เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันออกทิล (OD-HMS) และถ่านกัมมันต์ชนิดผงจะมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมและทองแดงที่ความเข้มข้นสูงมากกว่าตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดที่ชอบน้ำ เช่น เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS) นอกจากนี้ เนื่องจากความไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมชนิดมีประจุส่งผลให้ OD-HMS ซึ่งมีแรงแวนเดอร์วาลส์สูงที่สุดมีความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูสูงที่สุดในทางกลับกัน A-HMS ซึ่งมีประจุบวกบนพื้นผิวจึงมีความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูต่ำที่สุดโดยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโนกับเมธิลีนบลูนั้นไม่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูสูงที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากที่สุดและบนพื้นผิวประกอบด้วยหมู่อินทรีย์ที่แตกต่างกันจำนวนมากจนผลกระทบจากประจุบวกบนพื้นผิวนั้นไม่มีความสำคัญ ในส่วนของ การดูดซับ TX-100[®] นั้น พบว่า HMS ที่สังเคราะห์ได้ทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับ TX-100[®] สูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงยกเว้น A-HMS โดยขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว และความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว โดยตัวดูดซับที่มีความชอบน้ำจะมีความสามารถในการดูดซับ TX-100[®] สูงกว่า เนื่องจากสามารถเกิดการรวมตัวอย่างสมบูรณ์ได้บนพื้นผิวภายนอกที่ชอบน้ำ และข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชใกล้เคียงกัน และการทดลองการดูดซับแบบคัดเลือกในสารละลายผสม 2 ชนิดนั้นพบว่าตัวดูดซับทุกชนิดมีการคัดเลือกการดูดซับโลหะหนักทั้งแคดเมียมและทองแดงที่สูงในสารละลายผสม TX-100[®] เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของพื้นผิวของตัวดูดซับโดย TX-100[®] และปฏิสัมพันธ์ที่ต่างกัน โดย HMS และ TX-100[®] นั้นจะดูดซับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ ในขณะที่ HMS และแคดเมียมหรือทองแดงนั้นจะดูดซับกันด้วยพันธะเคมี นอกจากนี้ การดูดซับแบบคัดเลือกของโลหะหนักนั้นจะลดลงเมื่ออยู่ในสารละลายผสมของเมธิลีนบลูเนื่องจาก HMS และ เมธิลีนบลูนั้นดูดซับกันด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต ดังนั้น HMS ที่มีการต่อเติมหมู่ฟังก์ชันยกเว้น A-HMS จะมีความสามารถในการดูดซับแบบคัดเลือกของ TX-100[®] ในสารละลายผสม

เมธิลินบลูที่สูงเนื่องจาก HMS และ TX-100[®] นั้นดูดซับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยที่ HMS และเมธิลินบลูนั้นดูดซับกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์

2.21.4 การดูดซับโลหะหนักโดยใช้แอลจินต

Navarro และคณะ, 2014 ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับอออนของโคบอลต์(II)ในน้ำโดยใช้เม็ดแอลจินตพบว่าใช้เวลาน้อยกว่า 30 นาที ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยกราฟจลนพลศาสตร์เป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน นอกจากนี้ยังพบว่าในสภาวะที่มีเกลือจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้น้อยลงเนื่องจากอออนของโซเดียมสามารถเข้าแย่งชิงพื้นผิวการดูดซับกับอออนของโคบอลต์ได้ โดยในสภาวะที่ไม่มีเกลือสามารถดูดซับได้ 230 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่มีเกลือสามารถดูดซับได้ 211 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยการทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้อง และใช้โซเดียมไนเตรตเป็นสารตัวแทนของเกลือ และได้ทำการเปรียบเทียบการดูดซับโคบอลต์ด้วยตัวดูดซับอื่นๆพบว่าแอลจินตมีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่ามาก และมีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่นๆได้สูงเช่นกัน

Soltani และคณะ, 2013 ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วโดยใช้เม็ดแอลจินตที่มีซิลิกานาโนพาวเดอร์ที่ถูกกักไว้ภายใน โดยได้ทำการพิจารณา อุณหพลศาสตร์ จลนพลศาสตร์ และไอโซเทอม พบว่าค่าพีเอช 5 เป็นค่าที่เหมาะสมในการเกิดการดูดซับตะกั่ว โดยสามารถดูดซับได้สูงสุด 83 มิลลิกรัมต่อกรัม และใช้เวลาในการดูดซับ 90 นาที ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยในการศึกษาอัตราเร็วการดูดซับพบว่าผลการทดลองเป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน และจากการศึกษาสมดุลการดูดซับพบว่าเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของแลงก์เมียร์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich พบว่ากลไกในการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี และในการศึกษาอุณหพลศาสตร์พบว่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีและพลังงานอิสระของกิบส์ มีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงว่าการดูดซับตะกั่ว นั้น เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและสามารถเกิดขึ้นได้เองตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการดูดซับในแบบต่อเนื่องในคอลัมน์แบบฟิกซ์เบดพบว่าการเพิ่มขึ้นของ EBCT จาก 5 นาที เป็น 20 นาที ส่งผลให้ปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้ต่อตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 8.42 มิลลิลิตรต่อกรัม เป็น 11.22 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ

2.21.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำตัวดูดซับซิลิกาชนิดต่างๆมาทำการปรับปรุง หมูฟังก์ชั้นบนพื้นผิวด้วยหมูฟังก์ชั้นอะมิโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม โลหะหนัก และ สารลดแรงตึงผิว โดยพบว่าหมูฟังก์ชั้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับซิลิกามีบทบาทสำคัญในการดูดซับ มลสารชนิดต่างๆอย่างมาก โดยหมูฟังก์ชั้นอะมิโนนั้นจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อม ชนิดมีประจุ และโลหะหนักได้ดี และในการทดลองการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุพบว่า ตัวดูดซับซิลิกาที่ไม่มีการปรับแต่งหมูฟังก์ชั้นมีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด นอกจากนี้ การทดลองการดูดซับมลสารผสมของสีย้อม โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิวในระบบที่ละเท่นั้น พบว่าการมีอยู่ของสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นจะไปรบกวนการดูดซับสีย้อมชนิดมีประจุ ในขณะที่การดูดซับโลหะหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังได้มีการนำแอลจินेटมาใช้ ในการตรึงตัวดูดซับซิลิกาไว้ภายในเพื่อนำมาใช้ดูดซับในระบบคอลัมน์ ซึ่งแอลจินेटมีความสามารถ ในการดูดซับโลหะหนักได้เป็นอย่างดี โดยยังไม่มีการวิจัยที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยมลสาร 3 ชนิด คือ สีย้อม โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว ในระบบคอลัมน์ ผู้วิจัยจึงมีสนใจในการศึกษา กระบวนการดูดซับแบบคัดเลือกโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยสีย้อม โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว มาผ่านกระบวนการดูดซับในระบบคอลัมน์ซึ่งจัดเรียงกันโดยใช้ตัวดูดซับซิลิกา ที่มีการต่อติดหมูฟังก์ชั้นและขึ้นรูปโดยใช้แอลจินेटเพื่อทำการดูดซับแบบคัดเลือกมลสาร ออกจากน้ำเสียที่ละชนิด

บทที่ 3
แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

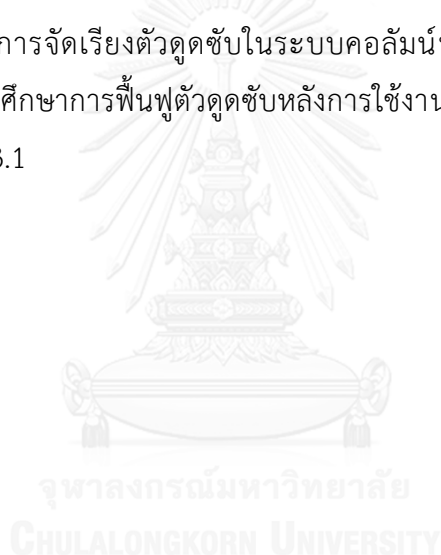
1. เครื่อง X-ray diffractometer (Bruker AXS model D8 Discover)
2. เครื่อง Surface Area Analyzer
3. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
4. เครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10 UV-Vis spectrophotometer)
5. เครื่อง CHNS/O Analyzer (Thermo Scientific™ FLASH 2000)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)
7. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
8. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
9. เครื่องเขย่า
10. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
11. ตู้อบ
12. เตาเผาอุณหภูมิสูง
13. ตู้ดูดควัน
14. ชุดกรองแบบสุญญากาศ
15. กระดาษกรอง GF/C (ขนาด 25 มิลลิเมตร, Whatman)
16. กระดาษกรอง เบอร์ 1 (ขนาด 90 มิลลิเมตร, Whatman)
17. อุปกรณ์รีฟลักซ์
18. เครื่องแก้วที่จำเป็น
19. ถ้วยกระเบื้อง
20. ชุดคอลัมน์ทดลอง
21. ปั๊มรีดท่อ (Peristaltic Pump)
22. ปิเปต
23. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
24. กระจกฉีดยา
25. เข็มฉีดยา

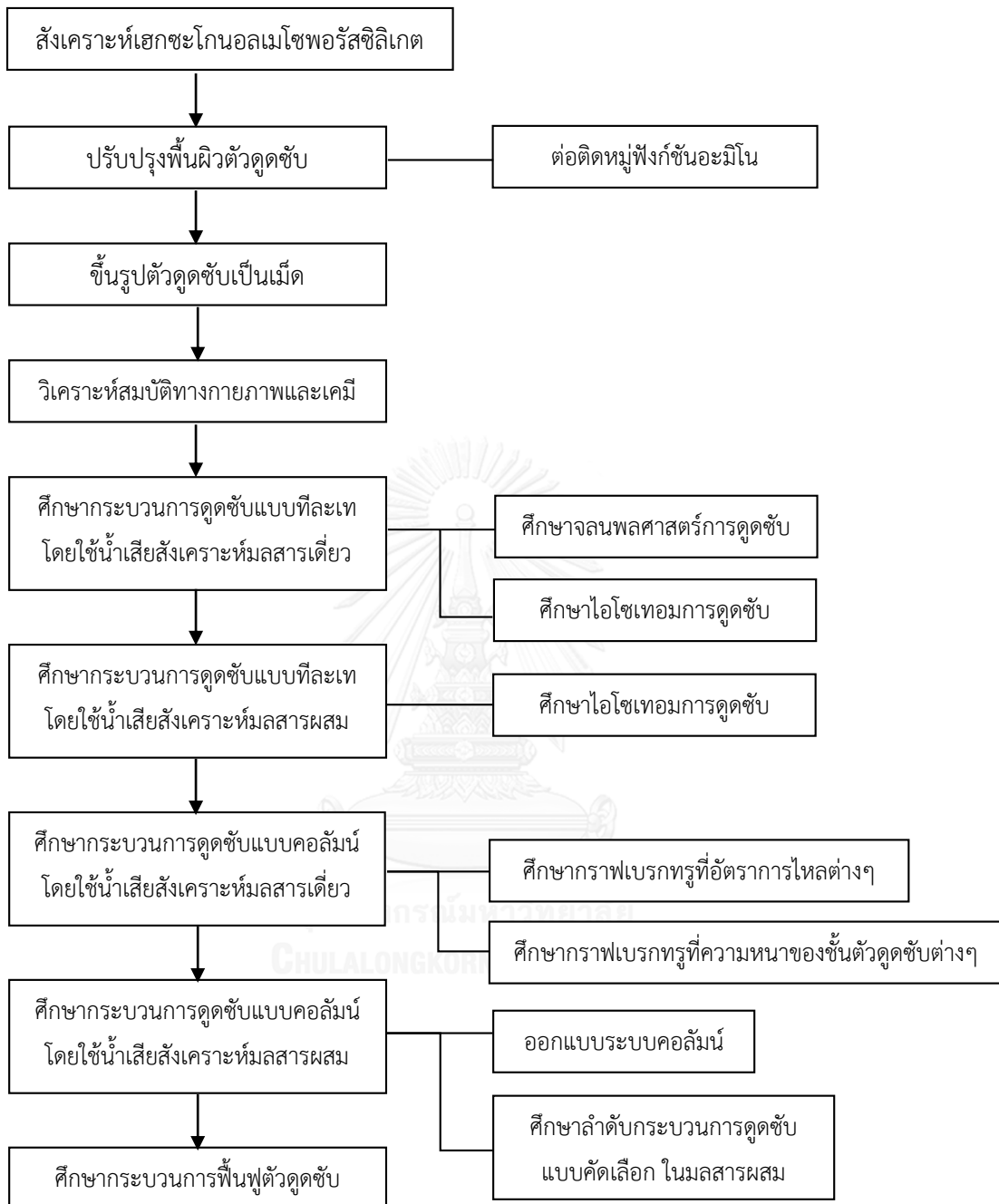
3.1.2 สารเคมี

1. Triton X-100[®], Laboratory Grade บริษัท Sigma-Aldrich
2. Acid Blue 45, C.I. 63010 บริษัท Sigma-Aldrich
3. Standard ICP Copper 1000 ppm in 2-3% HNO₃ บริษัท Sigma-Aldrich
4. เอทานอล (C₂H₅OH) 99.9% บริษัท QREC
5. น้ำดีไอเออนซ์ (D.I. water)
6. โดเดคซิลลามีน (Dodecylamine) 98% บริษัท Sigma-Aldrich
7. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) 99% บริษัท Sigma-Aldrich
8. โทลูอีน (Toluene)
9. 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีซิลเลน (3-aminopropyltriethoxysilane) บริษัท Sigma-Aldrich
10. โซเดียมแอลจีเนต Laboratory Grade บริษัท Sigma-Aldrich
11. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂)
12. กรดไนตริก (HNO₃) 65%
13. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
14. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH₂PO₄)
15. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K₂HPO₄)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ทำการสังเคราะห์เฮกซะโกนอนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (HMS) ปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS) และทำการขึ้นรูปตัวดูดซับเป็นเม็ดโดยใช้แอลจินेट ซึ่งจะได้ตัวดูดซับ HMS ชนิดเม็ด (Algi-HMS) ตัวดูดซับ A-HMS ชนิดเม็ด (Algi-A-HMS) และตัวดูดซับแอลจินेटชนิดเม็ด (Algi) และทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว จากนั้นทำการทดสอบการดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ น้ำเสียสังเคราะห์ของสีย้อมแอซิดบลู 45 (AB45) โลหะหนักทองแดง (Muresanu และคณะ, 2008) และสารลดแรงตึงผิว TX-100[®] (TX100) ด้วยการทดลองแบบทีละเทโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ชนิดมลสารเดี่ยวและน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดมลสารผสม จากนั้นศึกษาการดูดซับด้วยการทดลองในคอลัมน์ทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ชนิดมลสารเดี่ยวเพื่อนำข้อมูลมาออกแบบระบบคอลัมน์ และศึกษาผลของลำดับการจัดเรียงตัวดูดซับในระบบคอลัมน์ที่ออกแบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดมลสารผสม จากนั้นศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับหลังการใช้งานเพื่อนำกลับไปใช้ซ้ำ โดยมีแผนผังการดำเนินงานตามรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์เฮกซะโกนอลเมโฆพอร์สซิลิเกต (HMS) (Punyapalukul และ Takizawa, 2006)

การสังเคราะห์ HMS โดยใช้สารละลายผสมของเอทานอล น้ำ และโตเดคซิลลามีน เป็นสารแม่แบบมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ผสมเอทานอล 9.09 โมล และน้ำ 29.6 โมล จนเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) ผสมโตเดคซิลลามีน 0.27 โมล ลงในสารละลายผสมของเอทานอลและน้ำโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กจนสารละลายใสและไม่มีฟอง
- 3) ผสมสารเตตระเอทิลออโรซิลิเกต 1 โมล ลงในสารละลายแล้วกวนผสมทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) กรองเอาเฉพาะส่วนของแข็งแล้วนำไปรีฟลักซ์โดยใช้เอทานอลเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ
- 5) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับโดยการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS) (Punyapalukul และ Takizawa, 2006)

การสังเคราะห์ A-HMS ด้วยการเพิ่มหมู่อะมิโนให้แก่ HMS โดยใช้ 3-aminopropyltriethoxysilane ในการต่อติดหมู่ฟังก์ชัน (Grafting method) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำให้กับตัวดูดซับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำ HMS ปริมาณ 8 กรัม ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำออก
- 2) นำไปกวนผสมกับ 3-aminopropyltriethoxysilane 5.2 กรัม ในโทลูอีนปริมาตร 115 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 3) ทำการกรอง แล้วล้างด้วยโทลูอีน
- 4) นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง

3.2.3 การขึ้นรูปตัวดูดซับ HMS ชนิดเม็ด (Algi-HMS) และ A-HMS ชนิดเม็ด (Algi-A-HMS)

การขึ้นรูปตัวดูดซับโดยใช้แอลจิเนตมีขั้นตอนดังนี้

- 1) กวนผสมแอลจิเนต 0.5 กรัม ในน้ำ 50 มิลลิลิตร จนสารละลายใส
- 2) นำ HMS หรือ A-HMS 5 กรัม ไปกวนผสมกับสารละลายแอลจิเนตเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) นำสารละลายผสมไปหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรที่มีการกวนผสมช้าๆโดยใช้กระบอกลัดยาละเอียดและเข็มฉีดยา
- 4) หยุดกวนผสมแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) นำไปล้างน้ำกลั่นอย่างน้อย 3 รอบ
- 6) นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

3.2.4 การขึ้นรูปตัวดูดซับแอลจิเนตชนิดเม็ด (Algi)

การขึ้นรูปตัวดูดซับแอลจิเนตมีขั้นตอนดังนี้

- 1) กวนผสมแอลจิเนต 0.5 กรัม ในน้ำ 50 มิลลิลิตร จนสารละลายใส
- 2) นำสารละลายผสมไปหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรที่มีการกวนผสมช้าๆโดยใช้กระบอกลัดยาละเอียดและเข็มฉีดยา
- 3) หยุดกวนผสมแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำไปล้างน้ำกลั่นอย่างน้อย 3 รอบ
- 5) เก็บตัวดูดซับโดยแช่ไว้ในน้ำกลั่น

3.2.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ (ฉมนรี สุขเกษม, 2556)

ทำการศึกษาสมบัติทางเคมี และกายภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดจากขั้นตอนข้างต้นตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวดูดซับ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
โครงสร้างผลึก	Powder X-ray Diffractometer (XRD)
พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน	Nitrogen Adsorption/Desorption Isotherm
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	Fourier Transform Infrared (FT-IR)
ปริมาณไนโตรเจน	CHNS/O Analyzer
ขนาดของอนุภาคและลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น Bruker AXS model D8 Discover โดยใช้ Cu K α radiation โดยวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนในช่วงมุม (2θ) 1 ถึง 10 องศา ด้วยอัตรากวาดวิเคราะห์ 0.04 องศาต่อวินาที

3.2.5.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนโดยใช้การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน โดยใช้สมการของ Brunner-Eller-Teller (BET) ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และสมการของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ในการวิเคราะห์ขนาดและปริมาตรรูพรุน

3.2.5.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยเครื่อง Fourier transform infrared (FT-IR) วิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคป ในช่วงสเปกตรัม 400 – 4,000 ซม.⁻¹

3.2.5.4 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อะมิโนบนตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

ใช้บริการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุไนโตรเจนของหมู่อะมิโนที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHNS/O Analyzer) ยี่ห้อ Thermo Scientific™ รุ่น FLASH 2000 ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.5.5 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (Punyapalakul และ Takizawa, 2004)

ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้กำลังขยาย 5,000 และ 15,000 เท่า

3.2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณมลสารในน้ำเสียสังเคราะห์ (Paisanjit, 2008; Punyapalakul และ Takizawa, 2006)

3.2.6.1 การวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียม 45 (AB45) ในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดมลสารเดี่ยว

การวิเคราะห์หาปริมาณ AB45 นั้นสามารถทำได้โดยนำสารละลายมาทำการกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยคลื่นแสงที่ใช้มีความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

3.2.6.2 การวิเคราะห์หาปริมาณทองแดง (Cu) ในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดมลสารเดี่ยว

การวิเคราะห์หาปริมาณ Cu นั้นสามารถทำได้โดยนำสารละลายมาทำการกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic adsorption spectroscopy

3.2.6.3 การวิเคราะห์หาปริมาณ TX-100® (TX100) ในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดมลสารเดี่ยว

การวิเคราะห์หาปริมาณ TX100 นั้นสามารถทำได้โดยนำสารละลายมาทำการกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยคลื่นแสงที่ใช้มีความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

3.2.6.4 การวิเคราะห์หาปริมาณ AB45 ในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดผสม

การวิเคราะห์หาปริมาณ AB45 ในสารละลายผสมนั้นสามารถทำได้โดยนำสารละลายผสมมาทำการกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยคลื่นแสงที่ใช้มีความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

3.2.6.5 การวิเคราะห์หาปริมาณ Cu ในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดผสม

การวิเคราะห์หาปริมาณ Cu ในสารละลายผสมนั้นสามารถทำได้โดยนำสารละลายผสมไปทำการกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic adsorption spectroscopy

3.2.6.6 การวิเคราะห์หาปริมาณ TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดผสม

การวิเคราะห์หาปริมาณ TX100 ในสารละลายผสมนั้นสามารถทำได้โดยนำสารละลายผสมไปทำการกรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยคลื่นแสงที่ใช้มีความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาปริมาณ AB45 จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้ความยาวคลื่นแสง 275 นาโนเมตร แล้วทำการหักลบด้วยค่าการดูดกลืนแสงของ AB45 ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

3.2.7 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเท

3.2.7.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45

- 1) เตรียมสารละลาย AB45 เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ตามจำนวนตัวอย่างที่ต้องการเก็บโดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 0 10 30 60 และ 120 นาที ตามลำดับ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสารละลายทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- 5) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ AB45

3.2.7.2 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu

- 1) เตรียมสารละลาย Cu เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ตามจำนวนตัวอย่างที่ต้องการเก็บ โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 0 10 30 60 และ 120 นาที ตามลำดับ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสารละลายทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- 5) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cu

3.2.7.3 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100

- 1) เตรียมสารละลาย TX100 เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ในขวดรูปชมพู่ตามจำนวนตัวอย่างที่ต้องการเก็บโดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 0 10 30 60 และ 120 นาที ตามลำดับ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสารละลายทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- 5) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ TX100

3.2.7.4 การวิเคราะห์ไอโซเทอมสมดุลการดูดซับ AB45

- 1) เตรียมสารละลาย AB45 เข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ในขวดรูปชมพู่ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ
- 4) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ AB45

3.2.7.5 การวิเคราะห์ไอโซเทอมสมดุลการดูดซับ Cu

- 1) เตรียมสารละลาย Cu เข้มข้น 5 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ในขวดรูปชมพู่ และปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ
- 4) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cu

3.2.7.6 การวิเคราะห์ไอโซโทมสมมูลการดูดซับ TX100

- 1) เตรียมสารละลาย TX100 เข้มข้น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมมูลการดูดซับ
- 4) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ TX100

3.2.7.7 การวิเคราะห์ไอโซโทมสมมูลการดูดซับ AB45 ในน้ำเสียมลสารผสม

- 1) เตรียมสารละลาย AB45 เข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมี Cu และ TX100 เข้มข้น 10 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ และปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมมูลการดูดซับ
- 4) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cu AB45 และ TX100

3.2.7.8 การวิเคราะห์ไอโซโทมสมมูลการดูดซับ TX100 ในน้ำเสียมลสารผสม

- 1) เตรียมสารละลาย TX100 เข้มข้น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมี Cu และ AB45 เข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ และปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมมูลการดูดซับ
- 4) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cu AB45 และ TX100

3.2.7.9 การวิเคราะห์ไอโซโทมสมมูลการดูดซับ Cu ในน้ำเสียมลสารผสม

- 1) เตรียมสารละลาย Cu เข้มข้น 5 10 20 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมี AB45 และ TX100 เข้มข้น 20 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ และปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก
- 2) นำตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดสารละลาย
- 3) นำขวดสารละลายไปเขย่าในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความถี่ 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมมูลการดูดซับ
- 4) นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cu AB45 และ TX100



3.2.8 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยการใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ผ่านเข้าสู่คอลัมน์ทดลองที่บรรจุตัวดูดซับไว้ภายใน โดยคอลัมน์ทดลองเป็นคอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร โดยน้ำเสียสังเคราะห์จะผ่านเข้าสู่ระบบจากด้านล่างของคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ในการควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่ระบบ โดยเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านระบบแล้วจะไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทดลองการดูดซับในระบบคอลัมน์

3.2.8.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับ AB45 ในระบบคอลัมน์

- 1) เตรียมสารละลาย AB45 เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 2) นำตัวดูดซับใส่ลงในคอลัมน์ทดลองความยาว 10 เซนติเมตร แล้วทำการซังน้ำหนักตัวดูดซับ
- 3) นำสารละลาย AB45 ผ่านเข้าระบบคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายที่ผ่านคอลัมน์แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณ AB45 จนกระทั่งปริมาณที่วิเคราะห์ได้มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นเบรกทูล
- 5) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเบรกทูล
- 6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึงข้อ 5) โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นตัวดูดซับเป็น 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.2.8.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับ Cu ในระบบคอลัมน์

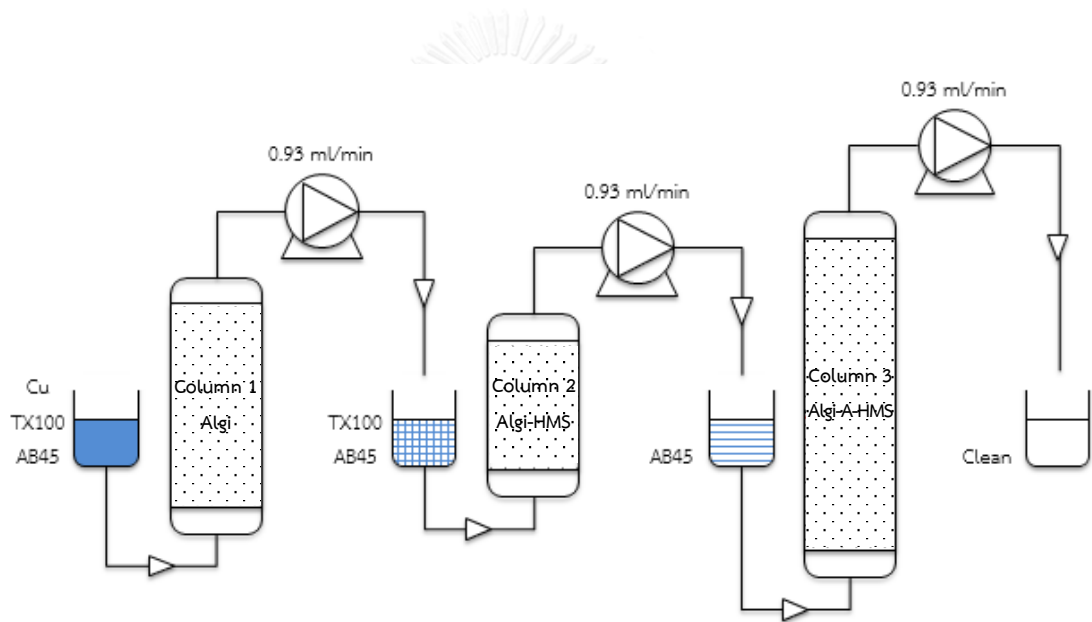
- 1) เตรียมสารละลาย Cu เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก
- 2) นำตัวดูดซับใส่ลงในคอลัมน์ทดลองความยาว 5 เซนติเมตร แล้วทำการซังน้ำหนักตัวดูดซับ
- 3) นำสารละลายทองแดงผ่านเข้าระบบคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายที่ผ่านคอลัมน์แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณ Cu จนกระทั่งปริมาณที่วิเคราะห์ได้มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นเบรกทูล
- 5) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเบรกทูล
- 6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึงข้อ 5) โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นตัวดูดซับเป็น 10 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.2.8.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับ TX100 ในระบบคอลัมน์

- 1) เตรียมสารละลาย TX100 เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
- 2) นำตัวดูดซับใส่ลงในคอลัมน์ทดลองความยาว 10 เซนติเมตร แล้วทำการซั่งน้ำหนักตัวดูดซับ
- 3) นำสารละลาย TX100 ผ่านเข้าระบบคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายที่ผ่านคอลัมน์แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณ TX100 จนกระทั่งปริมาณที่วิเคราะห์ได้มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นเบรคทูร
- 5) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเบรคทูร
- 6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึงข้อ 5) โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นตัวดูดซับเป็น 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.2.8.4 การศึกษาผลการจัดเรียงตัวดูดซับในการดูดซับแบบคัดเลือกมลสารผสมในระบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยการใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเป็นสารละลายผสมของ AB45 Cu และ TX100 ผ่านเข้าสู่คอลัมน์ทดลอง 3 คอลัมน์ โดยในคอลัมน์บรรจุตัวดูดซับแต่ละชนิดไว้ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์จะไหลผ่านเข้าสู่คอลัมน์จากด้านล่างของคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ในการควบคุมอัตราการไหล และเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์แรกแล้วจะไหลออกทางด้านบน และนำไปเก็บไว้ในถังพักน้ำเพื่อนำเข้าสู่คอลัมน์ถัดไป จนครบทั้ง 3 คอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังระบบการดูดซับแบบคัดเลือกในระบบคอลัมน์

- 1) เตรียมสารละลายผสมซึ่งประกอบด้วย Cu AB45 และ TX100 ความเข้มข้น 10 20 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก
- 2) นำตัวดูดซับ Algi ใส่ลงในคอลัมน์ที่มีความหนาของชั้นตัวดูดซับตามที่ออกแบบไว้
- 3) นำสารละลายผสมผ่านเข้าระบบคอลัมน์โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เก็บสารละลายที่ผ่านคอลัมน์แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณ AB45 Cu และ TX100 จนกระทั่งปริมาณที่วิเคราะห์ได้มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นเบรกทรู
- 5) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเบรกทรู
- 6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึงข้อ 5) โดยใช้ตัวดูดซับ Algi-HMS และเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่ระบบตามความเข้มข้นเฉลี่ยของมลสารที่ผ่านคอลัมน์แรกจนกระทั่งถึงความเข้มข้นเบรกทรู
- 7) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึงข้อ 5) โดยใช้ตัวดูดซับ Algi-A-HMS และเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่ระบบตามความเข้มข้นเฉลี่ยของมลสารที่ผ่านคอลัมน์ที่สองจนกระทั่งถึงความเข้มข้นเบรกทรู

3.2.9 การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำกลับไปใช้ซ้ำ

การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับนี้จะใช้สารละลาย (Extractant) เป็นตัวแยกมลสารออกจากตัวดูดซับ โดยสารละลายที่ใช้ในการแยก AB45 และ TX100 ออกจากตัวดูดซับคือ สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำ สัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร (Takizawa และ Punyapalukul, 2008) และสารละลายที่ใช้ในการแยก Cu ออกจากตัวดูดซับคือสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1% โดยมีขั้นตอนดังนี้

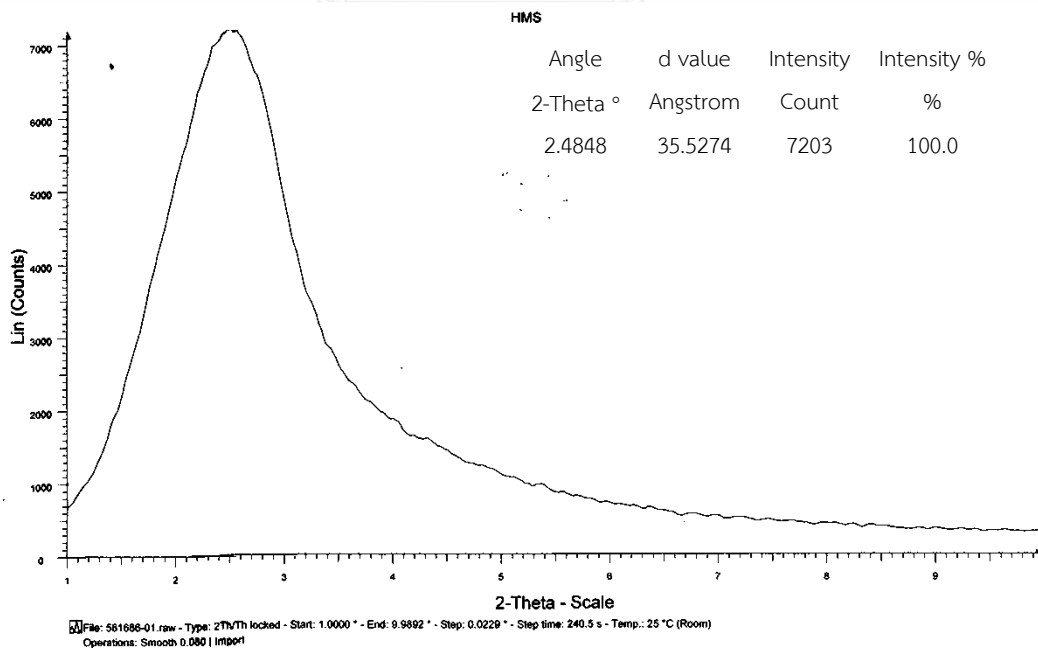
- 1) ทำการทดลองการดูดซับ TX100 เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยใช้ Algi-HMS 0.1 กรัม ในระบบที่ละเทจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ
- 2) วิเคราะห์ปริมาณ TX100 ที่ถูกดูดซับ
- 3) ทำการทดลองฟื้นฟูตัวดูดซับโดยใช้สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำ สัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในระบบที่ละเทเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) ทำการทดลองการดูดซับ TX100 เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซ้ำอีกครั้ง
- 5) วิเคราะห์ปริมาณ TX100 ที่ถูกดูดซับครั้งที่สอง
- 6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึงข้อ 5) อีกครั้ง โดยเปลี่ยนมลสารเป็น AB45 เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเปลี่ยนตัวดูดซับเป็น Algi-A-HMS และใช้สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำ สัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร เป็น Extractant
- 7) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึงข้อ 5) อีกครั้ง โดยเปลี่ยนมลสารเป็น Cu เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเปลี่ยนตัวดูดซับเป็น Algi และใช้สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1% เป็น Extractant

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

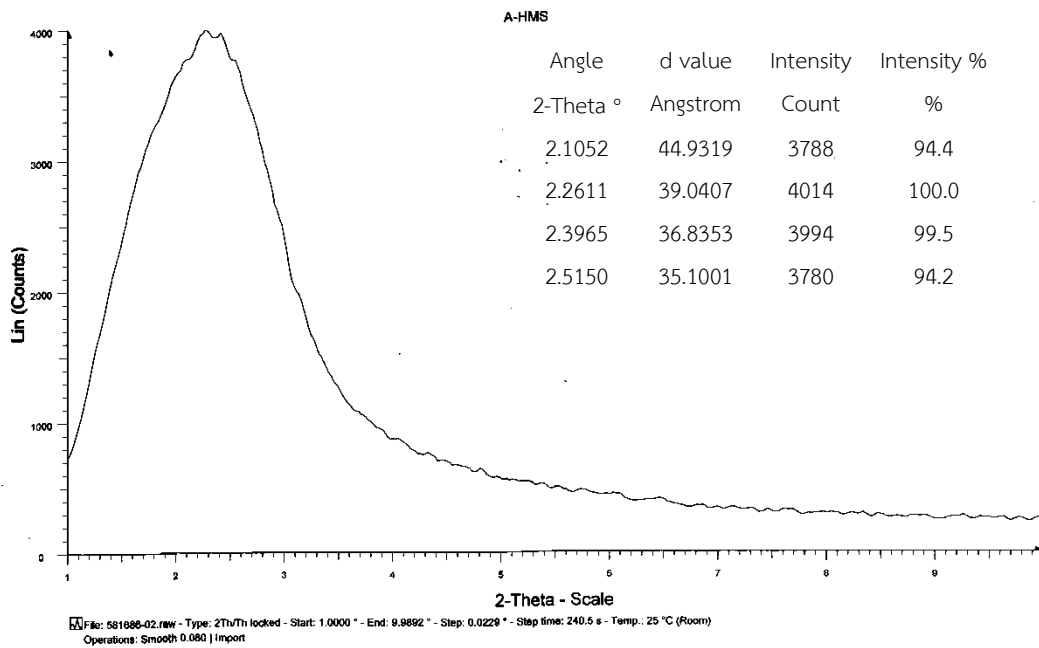
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

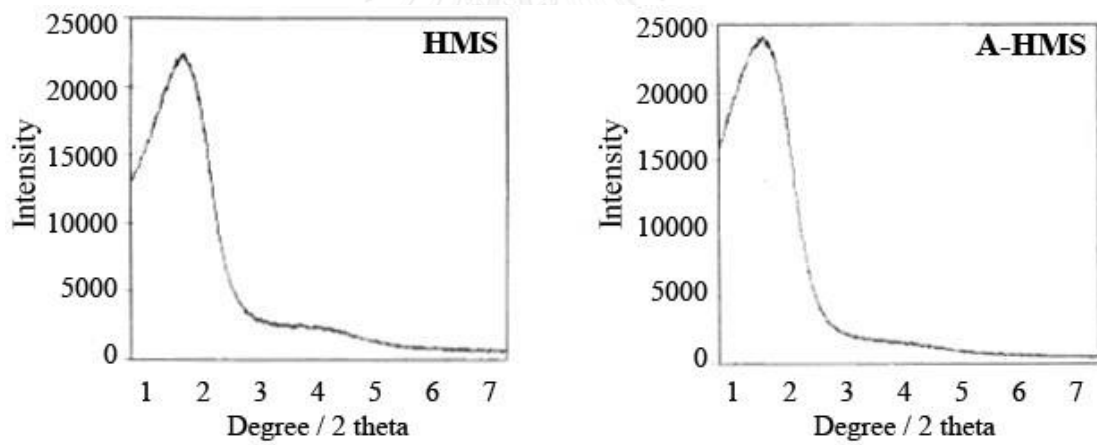
จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ HMS และ A-HMS โดยใช้ X-Ray Powder Diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น Bruker AXS model D8 Discover โดยใช้ Cu K α radiation โดยวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบนในช่วงมุม (2θ) 1 ถึง 10 องศา ด้วยอัตรากวาดวิเคราะห์ 0.04 องศาต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ HMS ปรากฏเป็นพีคเดี่ยวที่ 2.48 โดยมีลักษณะเบ้ขวา จึงเป็นไปได้ว่ามีพีคย่อยถูกกลืนรวมอยู่ ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยม โดยมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ HMS และ A-HMS ในงานวิจัยของ Paisanjit, 2008 ดังรูปที่ 4.3 นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ A-HMS ปรากฏพีคมีลักษณะของพีคไม่ค่อยสมบูรณ์และมีค่าความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนลดลง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการพังทลายของโครงสร้างหกเหลี่ยมในกระบวนการดูดซับน้ำฟังก์ชัน โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้อาจส่งผลให้ A-HMS มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับลดลง



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ HMS



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ A-HMS



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ HMS และ A-HMS (Paisanjit, 2008)

4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน

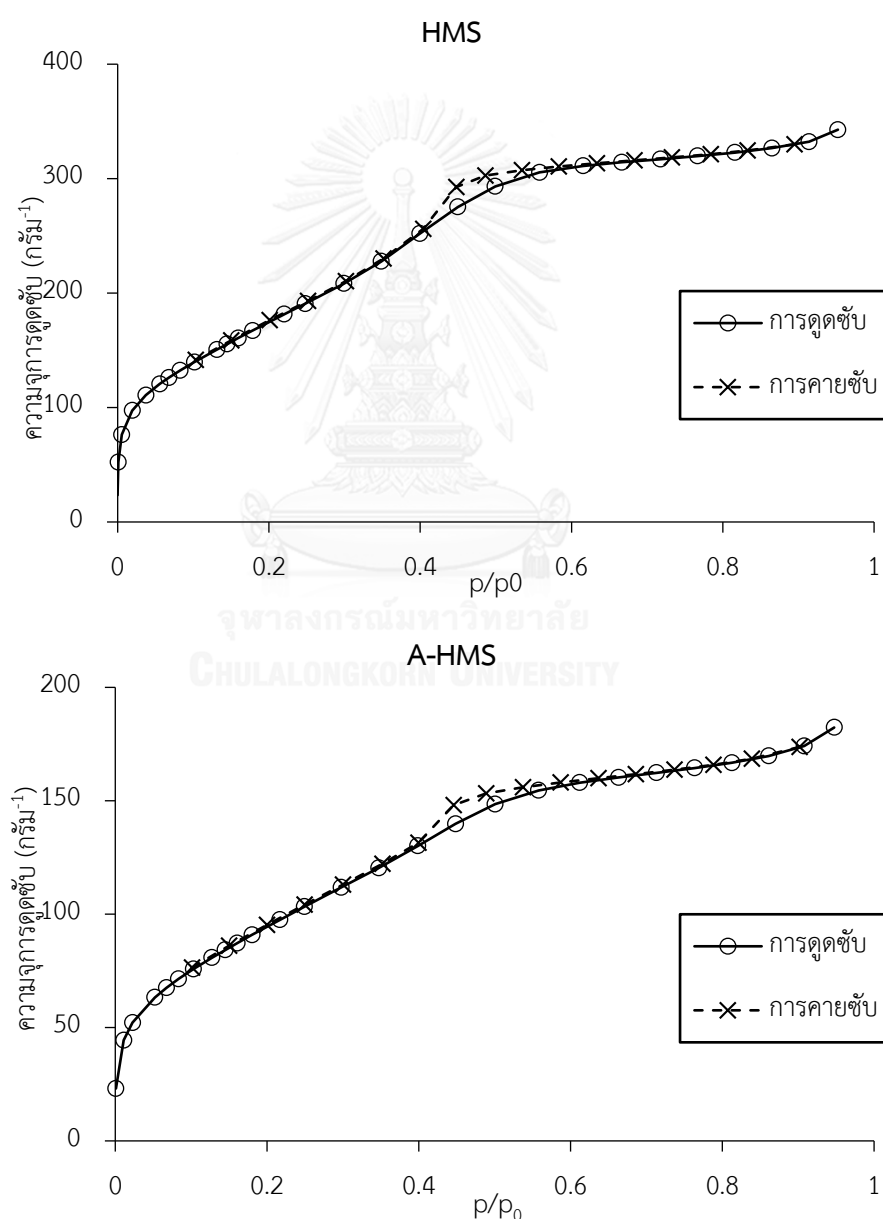
วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนโดยใช้การวิเคราะห์ไอโซเทอม การดูดซับและการคายซับไนโตรเจน ที่สภาวะอุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน ซึ่งสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะคือ สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ซึ่งมีรูปดังสมการ 4.1 และ 4.2

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{cV_m} + \frac{C - 1}{cV_m} \frac{P}{P_0} \quad (4.1)$$

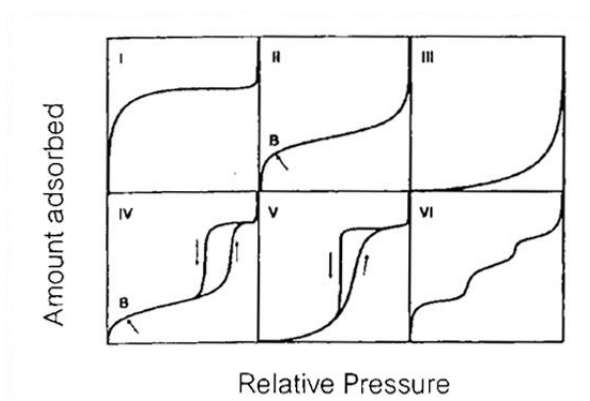
$$S = \frac{N_0 V_m A}{22414m} \quad (4.2)$$

โดยที่	P	คือความดัน ณ สภาวะสมดุล (พาสคัล)
	P ₀	คือความดันไอหรือความดันอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน (พาสคัล)
	V	คือปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P (ลบ.ซม.)
	V _m	คือปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (ลบ.ซม.)
	c	คือค่าจำเพาะการดูดซับก๊าซ
	S	คือพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม.ต่อกรัม)
	N ₀	คือเลขอาโวกาโดร (6.02 × 10 ²³ โมล ⁻¹)
	m	คือมวลของตัวดูดซับ (กรัม)
	A	คือพื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลก๊าซไนโตรเจน (1.62 อังสตรอม ²)

ผลการวิเคราะห์การดูดซับไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยพบว่าปริมาณการดูดซับก๊าซไนโตรเจนลดลงหลังจากผ่านกระบวนการต่อติตหมู่ฟังก์ชันซึ่งแสดงถึงพื้นที่ผิวจำเพาะที่ลดลง โดยจากการคำนวณพบว่า HMS และ A-HMS มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 639.49 และ 356.48 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะของกราฟไอโซเทอมตาม IUPAC ดังรูปที่ 4.5 (Sing, 1982) พบว่าเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับชนิดที่ 4 โดยเกิดฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) เนื่องจากการควบแน่นของก๊าซไนโตรเจนภายในรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งมักพบในวัสดุที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) ซึ่งมีขนาดรูพรุน 2-50 นาโนเมตร



รูปที่ 4.4 ไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง)



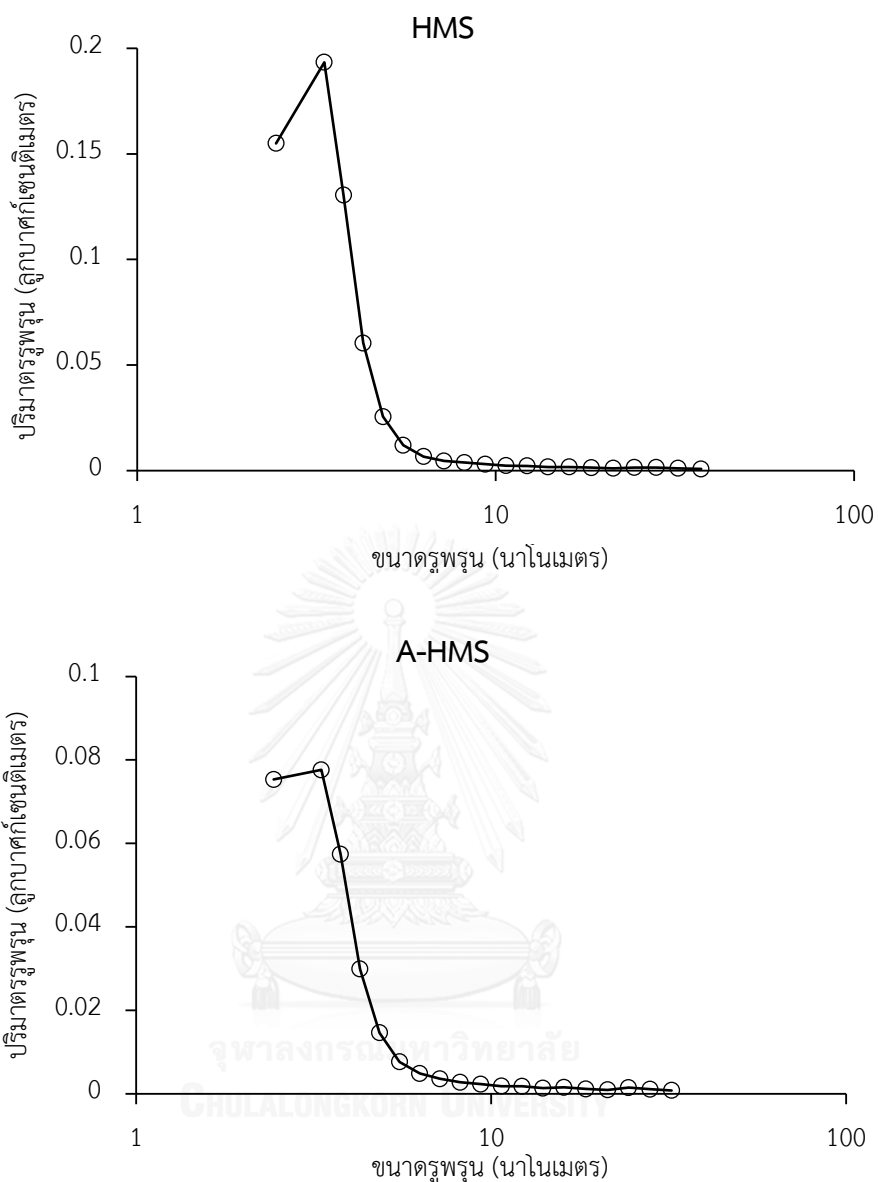
รูปที่ 4.5 การจำแนกไอโซเทอม 6 ชนิดตาม IUPAC (Sing, 1982)

การวิเคราะห์ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับโดยใช้สมการ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ในการคำนวณการกระจายของขนาดรูพรุนจากผลการวิเคราะห์การคายซับไนโตรเจนโดยมีรูปสมการดัง สมการ 4.3

$$\ln \frac{P_0}{P} = \frac{2\gamma V_L}{\gamma RT} \quad (4.3)$$

โดยที่ V_L คือปริมาตรของไหล (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ γ คือ แรงตึงผิว (นิวตันต่อเมตร)

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของรูพรุนที่คำนวณโดยใช้สมการ BJH แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยพบว่า HMS และ A-HMS มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 3.9 และ 4.2 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งขนาดรูพรุนของ A-HMS มีขนาดใหญ่กว่า HMS เนื่องจากการพังทลายของโครงสร้างในกระบวนการต่อติดหมู่ฟังก์ชันและส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง โดยผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของ HMS และ A-HMS แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.6 การกระจายของขนาดรูพรุนของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง)

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุนของ HMS และ A-HMS

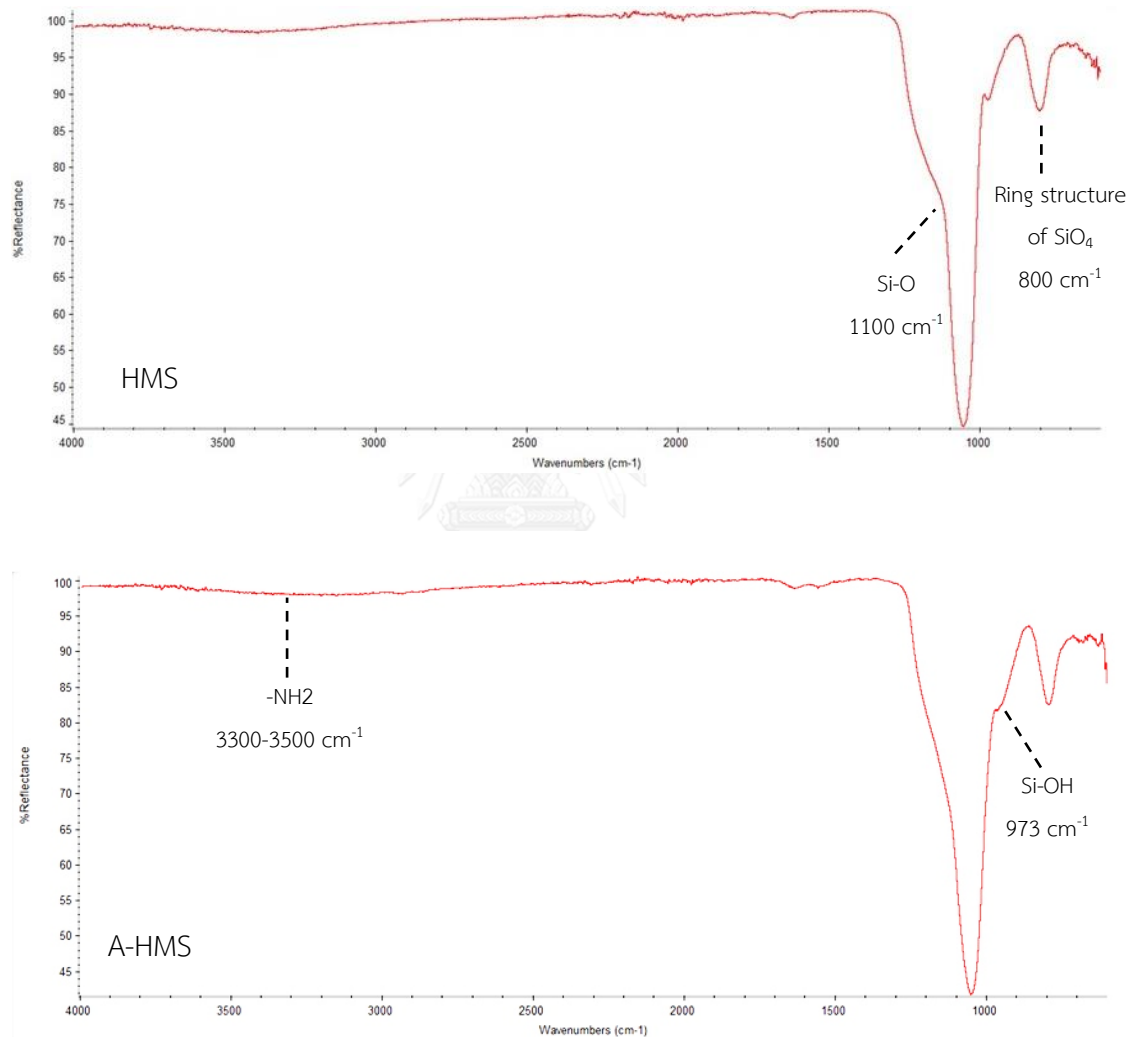
ตัวดูดซับ	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)
HMS	3.9	0.4663	572.54
A-HMS	4.2	0.2348	274.35

จากการวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนเปรียบเทียบกับขนาดโมเลกุลของ TX100 ซึ่งมีขนาดกว้าง 0.49 นาโนเมตร และยาว 3.43 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุน จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดการดูดซับขึ้นทั้งบนพื้นผิวภายในและภายนอกของตัวดูดซับ แต่เนื่องจากขนาดโมเลกุลของ TX100 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.6 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่าขนาดรูพรุน จึงสามารถเกิดการดูดซับขึ้นที่พื้นผิวภายนอกเท่านั้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดโมเลกุลของ AB45 ซึ่งมีขนาดกว้าง 0.69 นาโนเมตร และยาว 1.13 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ารูพรุน จึงสามารถเกิดการดูดซับขึ้นได้ทั้งพื้นที่ผิวภายนอกและพื้นที่ผิวภายใน



4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ HMS และ A-HMS สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) โดยการวัดสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่น การยืด และการงอของพันธะภายในโมเลกุลจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวจะแตกต่างกันไปตามชนิดหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม IR ของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง)

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม IR พบว่า HMS ปรากฏหมู่ฟังก์ชัน SiO₄ Si-O และ Si-OH ซึ่งเป็นโครงสร้างของ HMS อย่างชัดเจน โดยผลการวิเคราะห์ A-HMS มีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหมู่อะมิโนที่ทำการต่อติดมีปริมาณน้อย จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็น

ความแตกต่างของแถบสเปกตรัมในช่วงความถี่ 3300-3500 cm^{-1} ที่แสดงถึงหมู่ $-\text{NH}_2$ ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ยังสามารถยืนยันการมีอยู่ของหมู่อะมิโนที่ทำการต่อติดบนพื้นผิวได้ด้วยการวิเคราะห์ธาตุไนโตรเจนโดยใช้ CHNS/O Analyzer

4.1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อะมิโนบนตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุไนโตรเจนในตัวดูดซับที่ทำการต่อติดหมู่ฟังก์ชันสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer ของ Thermo Scientific™ รุ่น FLASH 2000 เพื่อใช้ยืนยันผลการต่อติดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่า A-HMS มีปริมาณธาตุไนโตรเจนเท่ากับ 1.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%w/w) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ A-HMS จากงานวิจัยของ Paisanjit, 2008 พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนมากกว่า โดยมีปริมาณธาตุไนโตรเจน 1.42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%w/w) จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวดูดซับ A-HMS ได้ถูกต่อติดหมู่อะมิโนเป็นผลสำเร็จ

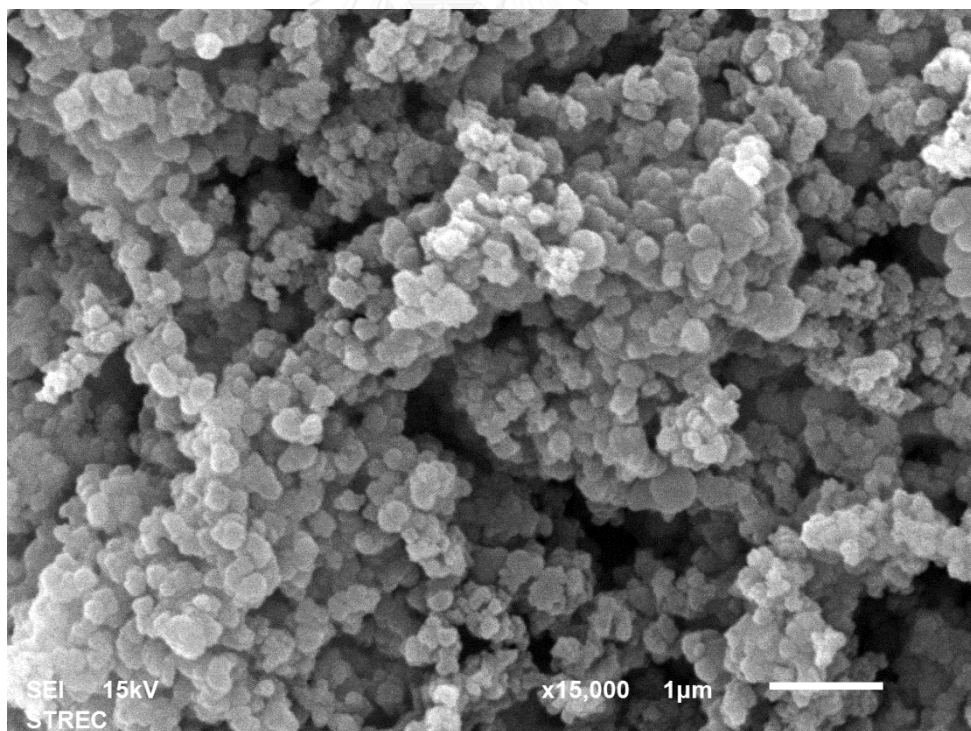
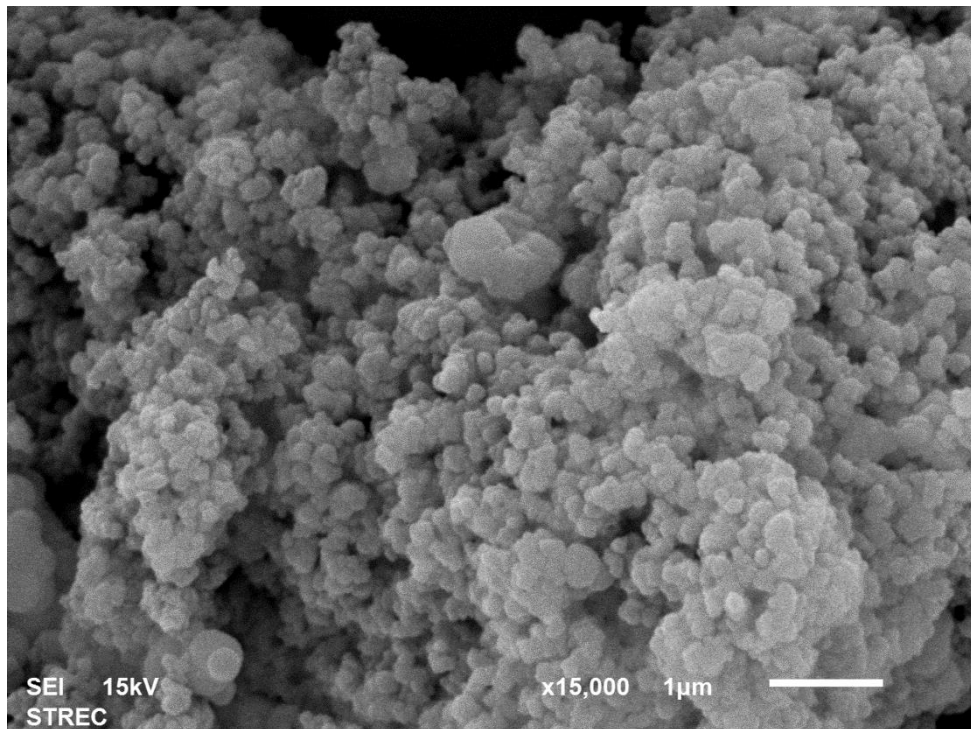
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆบน A-HMS ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer

การวิเคราะห์	คาร์บอน (%)	ไฮโดรเจน (%)	ไนโตรเจน (%)
ครั้งที่ 1	5.99	1.72	1.85
ครั้งที่ 2	5.94	1.97	1.86
ครั้งที่ 3	6.01	1.70	1.79
ครั้งที่ 4	5.96	1.94	1.80
ค่าเฉลี่ย	5.97	1.83	1.83

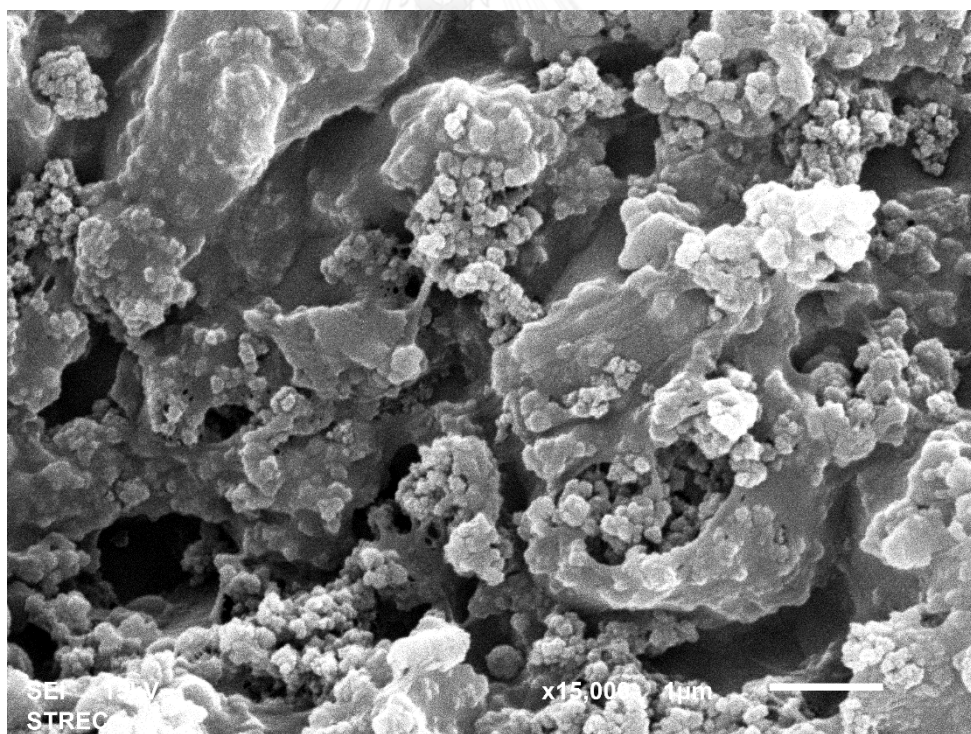
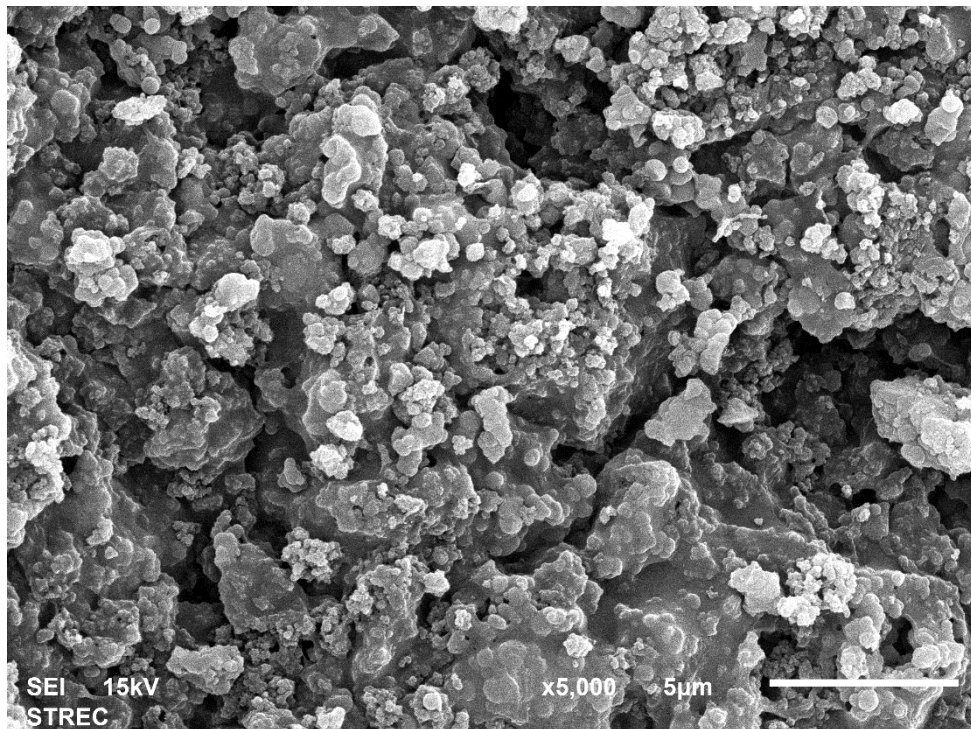
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของ HMS และ A-HMS โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 4.8 และผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของ Algi-HMS และ Algi-A-HMS โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

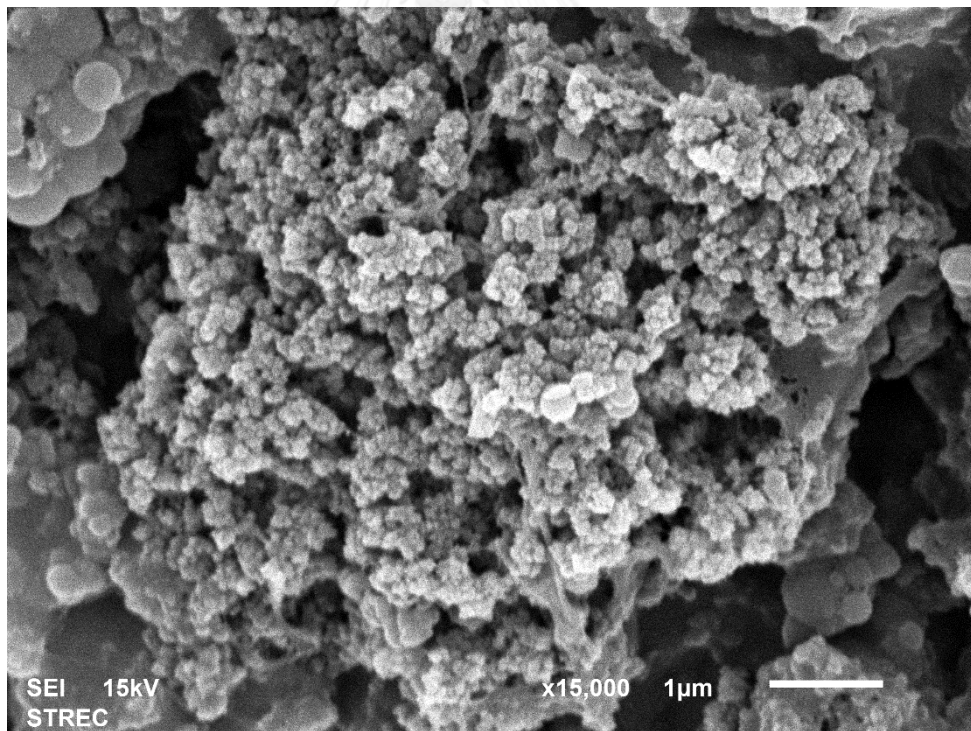
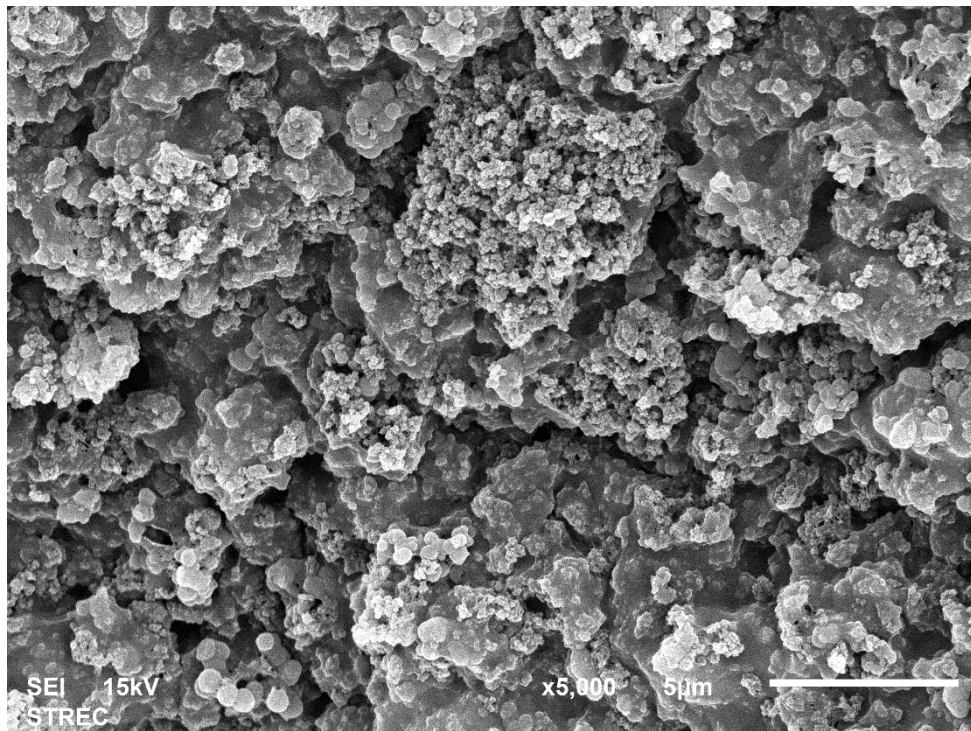
จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีแอลจินेटซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเยื่อ ซึ่งเก็บกัก HMS หรือ A-HMS เอาไว้ในโครงสร้างที่เป็นเม็ด นอกจากนี้ยังพบว่าแอลจินेटมีพื้นผิวที่ขรุขระและมีความพรุนสูง ซึ่งน่าจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่มากตามไปด้วย



รูปที่ 4.8 ภาพขยายพื้นผิวของ HMS (บน) และ A-HMS (ล่าง) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 15,000 เท่า



รูปที่ 4.9 ภาพขยายพื้นผิวของ Algi-HMS โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า (บน) และ 15,000 เท่า (ล่าง)



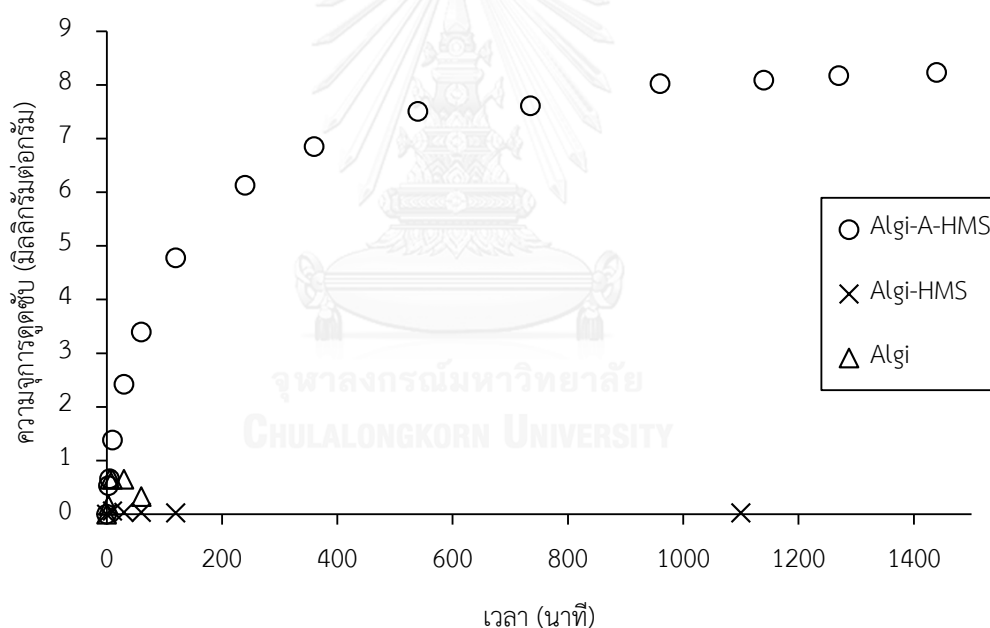
รูปที่ 4.10 ภาพขยายพื้นผิวของ Algi-A-HMS โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า (บน) และ 15,000 เท่า (ล่าง)

4.2 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเทโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยว

4.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4.2.1.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้น AB45 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัมต่อลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 190 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ AB45 ที่เหลืออยู่ในสารละลายอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงและนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและเวลาตามรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 5 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

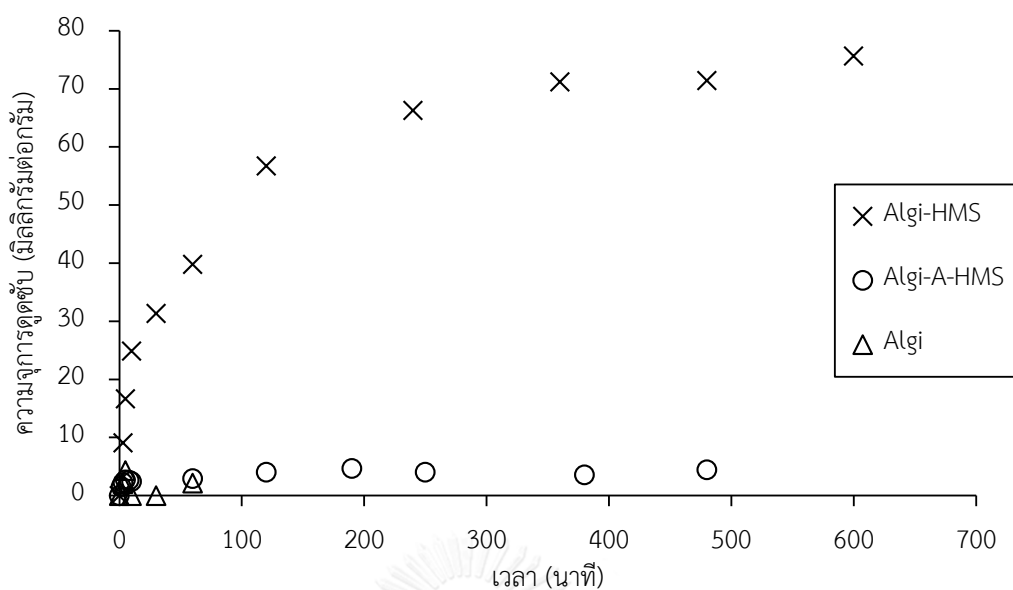
จากผลการทดลองพบว่า มีเพียง Algi-A-HMS เท่านั้นที่เกิดการดูดซับขึ้น โดยค่าการดูดซับของ Algi เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการวิเคราะห์เนื่องจากมีปริมาณน้อยมากและมีลักษณะไม่เป็นไปตามธรรมชาติของการดูดซับ ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ ข.2 โดย Algi-A-HMS ใช้เวลาประมาณ 9 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ และจากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 ของตัวดูดซับ Algi-A-HMS สามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน และอันดับที่ 2 เสมือนโดยใช้โปรแกรม OriginPro 2015 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.3 พบว่ามีความเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน โดยมีค่า $R^2 = 0.9959$ และสามารถคำนวณความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุล $q_e = 8.66$ มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 2 เสมือน $k_2 = 0.0013$ กรัมต่อมิลลิกรัมนาที

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45

ตัวดูดซับ	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน			จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน		
	q_e (มก./ก.)	k_1 (/นาที)	R^2	q_e (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.·นาที)	R^2
Algi-A-HMS	7.82 ± 0.18	0.0082 ± 0.0009	0.9803	8.66 ± 0.12	0.0013 ± 0.0001	0.9959

4.2.1.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi โดยทำการทดลองในระบบที่ละเหยที่ความเข้มข้น TX100 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัมต่อลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 190 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ TX100 ที่เหลืออยู่ในสารละลายอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงและนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและเวลาตามรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 5 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

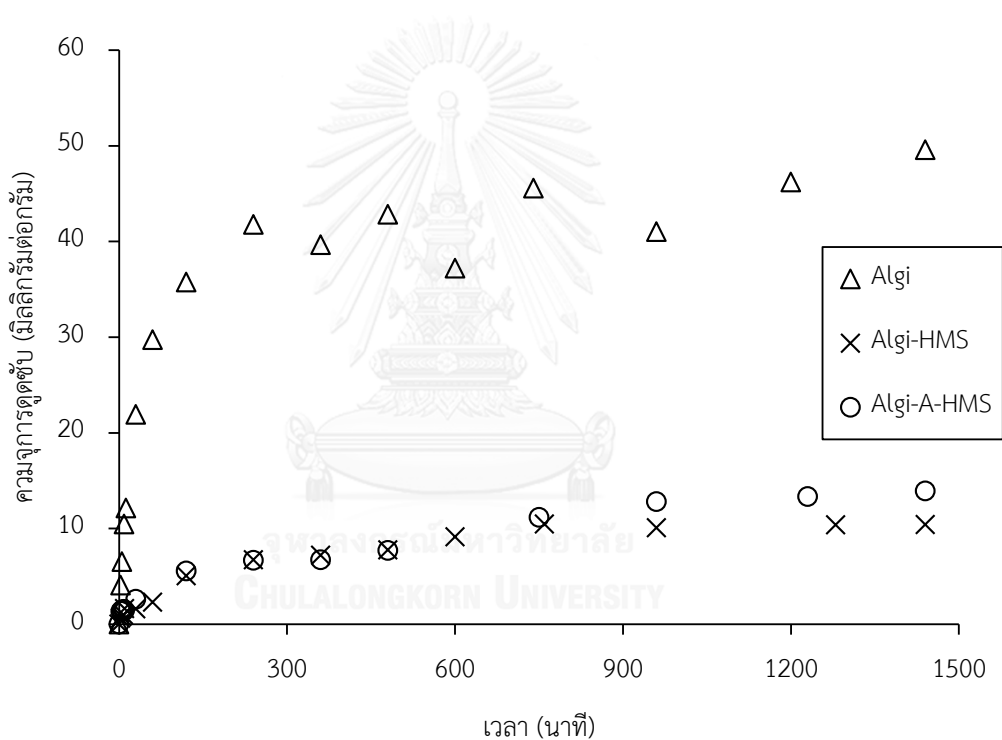
จากผลการทดลองพบว่า Algi-HMS เกิดการดูดซับขึ้นมากที่สุด โดยใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ และจากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100 ของตัวดูดซับ Algi-HMS สามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน และอันดับที่ 2 เสมือนโดยใช้โปรแกรม OriginPro 2015 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.4 พบว่า การดูดซับโดย Algi-HMS มีความเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน โดยมีค่า $R^2 = 0.9668$ และสามารถคำนวณความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุล $q_e = 77.05$ มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 2 เสมือน $k_2 = 0.0004$ กรัมต่อมิลลิกรัมนาที นอกจากนี้ยังพบว่า Algi-A-HMS สามารถดูดซับ TX100 ได้เล็กน้อย และมีความเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือนเช่นกัน โดยเข้าสู่สมดุลการดูดซับอย่างรวดเร็วจึงทำให้ค่าคงที่ k_2 ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า Algi-HMS

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100

ตัวดูดซับ	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน			จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน		
	q_e (มก./ก.)	k_1 (/นาที)	R^2	q_e (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.·นาที)	R^2
Algi-HMS	70.27 ± 3.52	0.0179 ± 0.0036	0.9358	77.05 ± 3.49	0.0004 ± 0.0001	0.9668
Algi-A-HMS	3.84 ± 0.24	0.2028 ± 0.053	0.7947	3.97 ± 0.21	0.0829 ± 0.0267	0.8681

4.2.1.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้น Cu 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 190 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ Cu ที่เหลืออยู่ในสารละลายอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงและนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและเวลาตามรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดสามารถดูดซับ Cu ได้โดยใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ และจากข้อมูลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu ของตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi สามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน และอันดับที่ 2 เสมือนโดยใช้โปรแกรม OriginPro 2015 พบว่าตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีความเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน โดยมี

ค่าตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.5 พบว่าการดูดซับโดย Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi มีความเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน โดยมีค่า $R^2 = 0.9826$ 0.9482 และ 0.9789 ตามลำดับ และจากการคำนวณความจุการดูดซับที่สภาวะสมดุลพบว่า Algi มีความสามารถในการดูดซับ Cu สูงที่สุด โดยมีค่า $q_e = 45.53$ มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ยังพบว่ามียัตราเร็วในการดูดซับสูงที่สุด โดยมีค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่ 2 เสมือน $k_2 = 0.0007$ กรัมต่อมิลลิกรัมนาที

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu

ตัวดูดซับ	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน			จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน		
	q_e (มก./ก.)	k_1 (/นาที)	R^2	q_e (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.·นาที)	R^2
Algi-HMS	10.19 ±0.36	0.0042 ±0.0005	0.9743	11.99 ±0.49	0.0004 ±0.0001	0.9826
Algi-A-HMS	14.10 ±1.19	0.0022 ±0.0005	0.9379	17.58 ±1.92	0.0001 ±0.0001	0.9482
Algi	42.58 ±1.12	0.0226 ±0.0031	0.9639	45.53 ±1.06	0.0007 ±0.0001	0.9789

จากผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสามารถสรุปแนวโน้มการดูดซับ อัตราเร็ว และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปแนวโน้มการดูดซับ อัตราเร็ว และแบบจำลองจลนพลศาสตร์

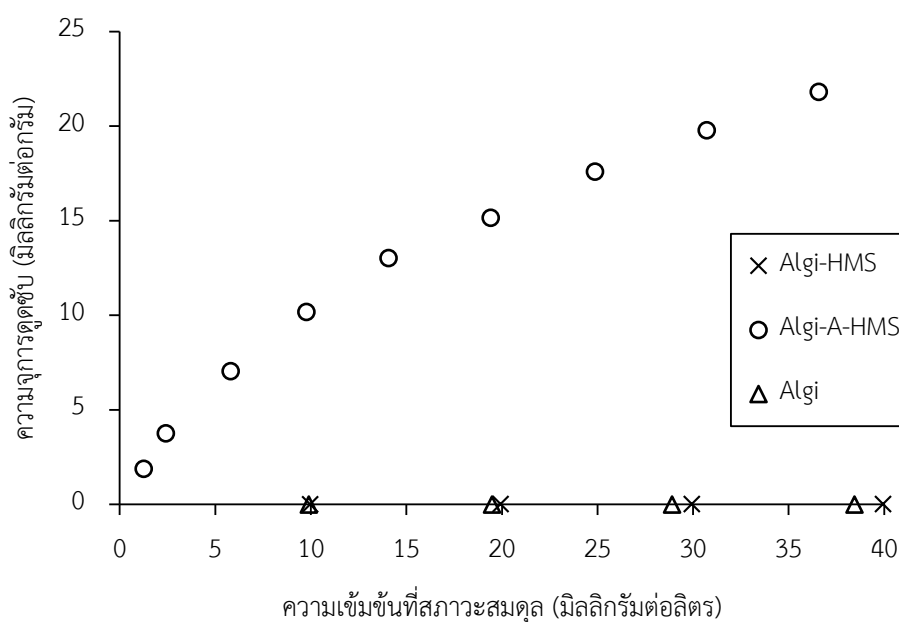
ตัวดูดซับ	มลสารที่ดูดซับได้	เวลาในการเข้าสู่สมดุล	แบบจำลองจลนพลศาสตร์
Algi-A-HMS	AB45	9 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน
	TX100	2 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน
	Cu	16 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน
Algi-HMS	TX100	5 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน
	Cu	16 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน
Algi	Cu	4 ชั่วโมง	จลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน

4.2.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุการดูดซับกับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลการดูดซับโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้คือ ไอโซเทอมแบบเส้นตรง ไอโซเทอมของแลงเมียร์ ไอโซเทอมของฟรุนด์ลิช ไอโซเทอมของชิปส์ ไอโซเทอมของเรดลิชและปีเตอร์สัน และไอโซเทอมของ Radke และ Prausnitz และใช้โปรแกรม OriginPro 2015 โดยใช้อัลกอริทึมแบบวนซ้ำของ Levenberg Marquardt

4.2.2.1 ไอโซเทอมการดูดซับ AB45

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ AB45 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยใช้ฟอสเฟตบัพเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับและทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ AB45 ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับ AB45 (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองพบว่ามีเพียง Algi-A-HMS เท่านั้นที่เกิดการดูดซับขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองจลนพลศาสตร์ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับแบบคัดเลือกของหมู่อะมิโนที่มีต่อการดูดซับ AB5 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ HMS และ A-HMS ดังตารางที่ 4.7 พบว่าความจุการดูดซับมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียพื้นที่ผิวไปในการขึ้นรูปกับแอลจีเนต และจากข้อมูลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ AB45 ของตัวดูดซับ Algi-A-HMS สามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมโดยใช้โปรแกรม OriginPro 2015 ได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4.8 โดยพบว่าสมการไอโซเทอมทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมแบบเส้นตรงมีค่า R^2 ที่สูงใกล้เคียงกันมากจึงไม่สามารถพิจารณาได้ว่ามีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมชนิดใดมากที่สุด โดยรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากไอโซเทอมทั้ง 5 สมการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความจุการดูดซับ AB45 โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	ความจุการดูดซับสูงสุด (มก./ก)	หมายเหตุ
HMS	0	(Punyapalakul และ Takizawa, 2006)
Algi-HMS	0	ผลการทดลอง
A-HMS	29 ($C_e \approx 90$ มก./ล.)	(Punyapalakul และ Takizawa, 2006)
Algi-A-HMS	22 ($C_e = 36$ มก./ล.)	ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์พบว่าไม่เกิดการดูดซับ AB45 บนพื้นผิวของ Algi จึงเป็นไปได้ว่าการดูดซับของ AB45 บนพื้นผิวของ Algi-A-HMS นั้นเกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนกับ AB45 เช่นเดียวกับการดูดซับ AB45 บนพื้นผิวของ A-HMS (Punyapalakul และ Takizawa, 2006)

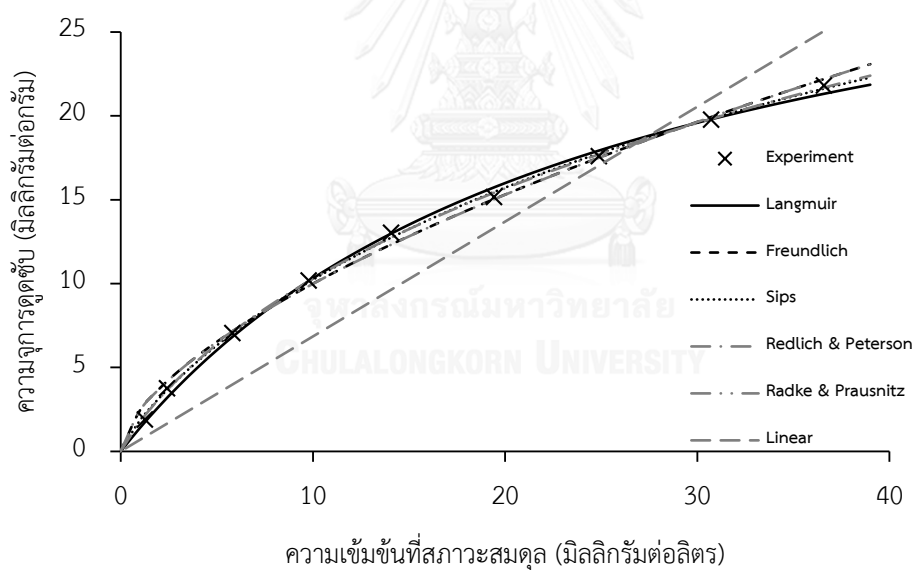
ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS (ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

แลงก์เมียร์			ฟรุนด์ลิช		
q_m (มก./ก.)	K_L (ล./มก.)	R^2	K_F (มก./ล.)(ล./มก.) ^{1/n}	1/n	R^2
35.60 ± 1.59	0.0408 ± 0.0035	0.9968	2.4222 ± 0.1735	0.6152 ± 0.0222	0.9949

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS (ควบคุมค่าพีเอช เท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) (ต่อ)

เส้นตรง		ชิปส์			
K_p (ล./ก.)	R^2	q_m (มก./ก.)	K_s (ล./มก.) ^{1/n}	1/n	R^2
0.6846 ±0.0434	0.9649	51.29 ±7.90	0.037 ±0.004	0.8280 ±0.0470	0.9988

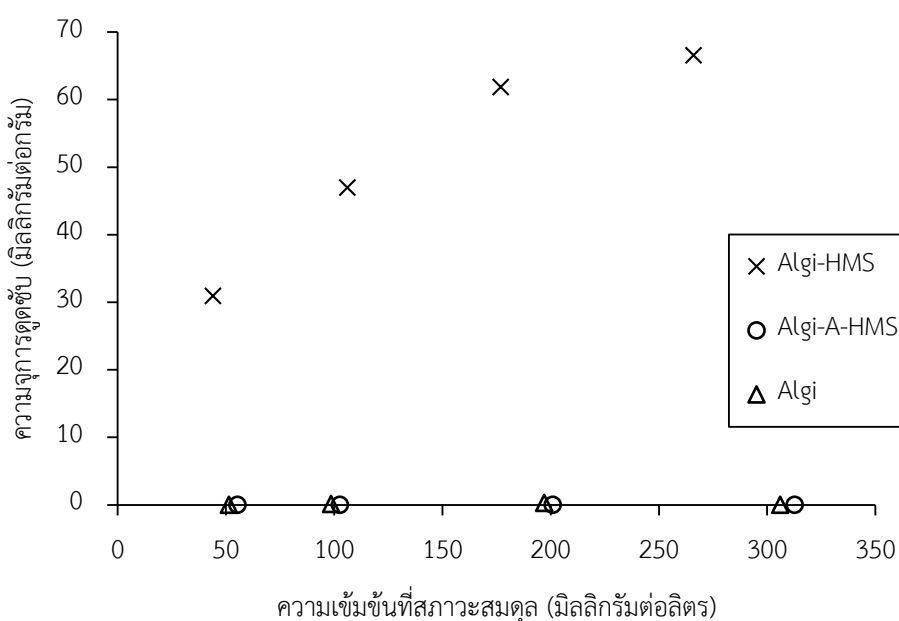
เรดลิชและปีเตอร์สัน				Radke และ Prausnitz			
K_j (ล./ก.)	b_j (ล./มก.) ^{1/β}	β	R^2	a (ล./ก.)	b (ล./ก.) ^{1/β}	β	R^2
2.116 ±0.272	0.219 ±0.086	0.684 ±0.062	0.9992	2.116 ±0.269	9.659 ±2.542	0.316 ±0.061	0.9992



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ ฟรอนด์ลิช ชิปส์ เรดลิชและปีเตอร์สัน และ Radke และ Prausnitz

4.2.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับ TX100

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ TX100 บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยใช้ฟอสเฟตบัพเฟอร์ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับและทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ TX100 ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับ TX100 (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองพบว่า Algi-HMS เกิดการดูดซับขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองจลนพลศาสตร์ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ TX100 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ HMS และ A-HMS ดังตารางที่ 4.9 พบว่าความจุการดูดซับมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียพื้นที่ผิวไปในการขึ้นรูปกับแอลจีเนต และจากข้อมูลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ TX100 ของตัวดูดซับ Algi-HMS สามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมโดยใช้โปรแกรม OriginPro 2015 ได้ค่าตัวแปรต่างๆดังตารางที่ 4.10 โดยพบว่ามีความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมของแลงก์เมียร์

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9813 โดยรูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากไอโซเทอมทั้ง 5 สมการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความจุการดูดซับ TX100 โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	ความจุการดูดซับสูงสุด (มก./ก)	หมายเหตุ
HMS	550 ($C_e \approx 300$ มก./ล.)	(Punyapalakul และ Takizawa, 2006)
Algi-HMS	66 ($C_e = 266$ มก./ล.)	ผลการทดลอง
A-HMS	100 ($C_e \approx 300$ มก./ล.)	(Punyapalakul และ Takizawa, 2006)
Algi-A-HMS	0	ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์พบว่าไม่เกิดการดูดซับ TX100 บนพื้นผิวของ Algi จึงเป็นไปได้ว่าการดูดซับของ TX100 บนพื้นผิวของ Algi-HMS นั้นเกิดจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนของหมู่ฟังก์ชันซิลานอลกับ TX100 เช่นเดียวกับการดูดซับ TX100 บนพื้นผิวของ HMS และ A-HMS (Punyapalakul และ Takizawa, 2006)

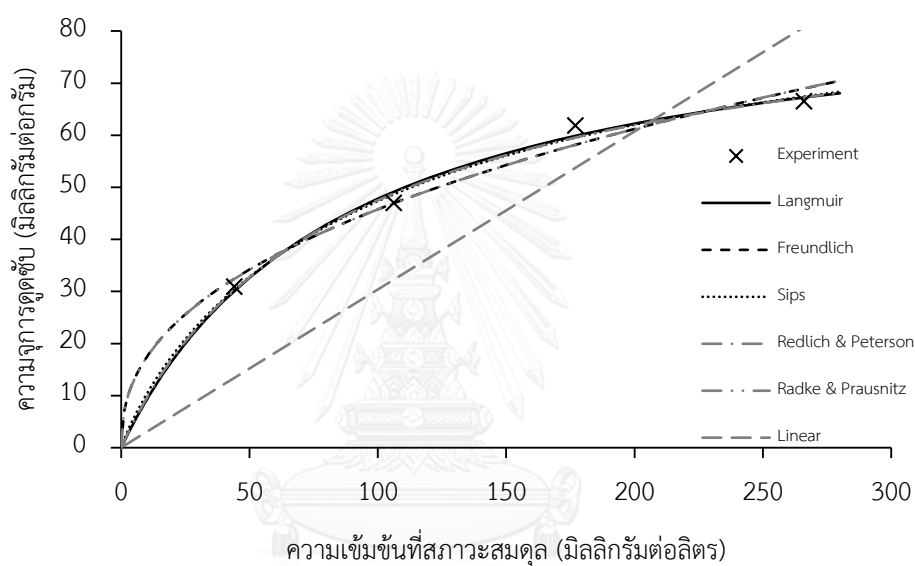
ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS (ควบคุมค่าพีเอช เท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

แลงก์เมียร์			ฟรุนด์ลิช		
q_m (มก./ก.)	K_L (ล./มก.)	R^2	K_F (มก./ล.)(ล./มก.) ^{1/n}	1/n	R^2
89.03 ± 5.63	0.0116 ± 0.0020	0.9813	6.648 ± 1.945	0.419 ± 0.056	0.9576

เส้นตรง		ชิปส์			
K_p (ล./ก.)	R^2	q_m (มก./ก.)	K_S (ล./มก.) ^{1/n}	1/n	R^2
0.3036 ± 0.0479	0.9073	96.07 ± 39.58	0.015 ± 0.018	0.9044 ± 0.4402	0.9644

ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS (ควบคุมค่าพีเอช เท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) (ต่อ)

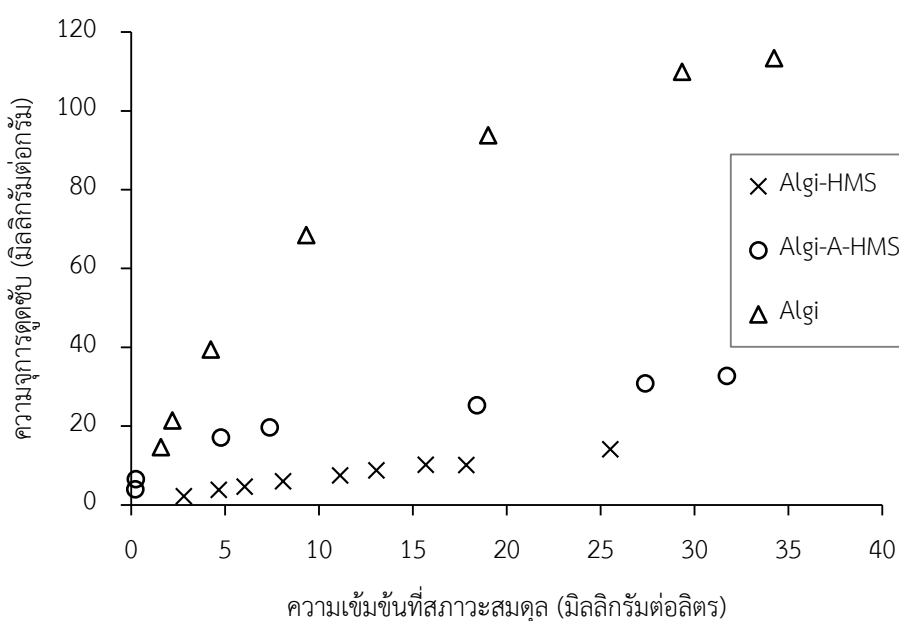
เรดลิชและปีเตอร์สัน				Radke และ Prausnitz			
K_j (ล./ก.)	b_j (ล./มก.) ^{1/β}	β	R^2	a (ล./ก.)	b (ล./ก.) ^{1/β}	β	R^2
1.096 ± 0.626	0.015 ± 0.041	0.958 ± 0.350	0.9630	1.095 ± 0.604	69.74 ± 140.29	0.041 ± 0.337	0.9630



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ ฟรอนด์ลิช ซิปส์ เรดลิชและปีเตอร์สัน และ Radke และ Prausnitz

4.2.2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ Cu

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ Cu บนตัวดูดซับ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi โดยทำการทดลองในระบบที่ละเทที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันโดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 190 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับและทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณ Cu ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปคำนวณความจุการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการทดลองสมดุลการดูดซับ Cu (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองพบว่า Algi มีการดูดซับ Cu ได้ดีที่สุดเช่นเดียวกับผลการทดลองจลนพลศาสตร์ โดยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดสามารถดูดซับ Cu ได้ทั้งหมดซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับของหมู่คาร์บอกซิลบนพื้นผิวของแอลจิเนตที่มีต่อการดูดซับ Cu เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิต และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ HMS และ A-HMS ดังตารางที่ 4.11 พบว่าความจุการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลบนแอลจิเนตมีความดึงดูดต่อ Cu สูง และจากข้อมูลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับ Cu ของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดสามารถนำมาวิเคราะห์ความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมโดยใช้โปรแกรม OriginPro 2015 ได้ค่าตัวแปรต่างๆ

ดังตารางที่ 4.12 โดยพบว่าสมการไอโซเทอมทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมแบบเส้นตรงมีค่า R^2 ที่สูงใกล้เคียงกันมากจึงไม่สามารถพิจารณาได้ว่ามีความเข้ากันได้กับไอโซเทอมชนิดใดมากที่สุด โดยรูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากไอโซเทอมทั้ง 5 สมการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบความจุการดูดซับ Cu โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	ความจุการดูดซับสูงสุด (มก./ก)	หมายเหตุ
HMS	8 (ไม่ระบุ C_e)	(Muresanu และคณะ, 2008)
Algi-HMS	14 ($C_e = 25$ มก./ล.)	ผลการทดลอง
A-HMS	19 (ไม่ระบุ C_e)	(Shahbazi และคณะ, 2012)
Algi-A-HMS	33 ($C_e = 32$ มก./ล.)	ผลการทดลอง
Algi	113 ($C_e = 34$ มก./ล.)	ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์พบว่าการดูดซับของ Cu บนพื้นผิวของ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลในแอลจิเนตกับ Cu เช่นเดียวกับการดูดซับ โคบอลต์ (Navarro และคณะ, 2014) และ ตะกั่ว (Soltani และคณะ, 2014) บนพื้นผิวของตัวดูดซับแอลจิเนต ถึงแม้จะพบการดูดซับบน HMS และ A-HMS ก็ตาม แต่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Algi

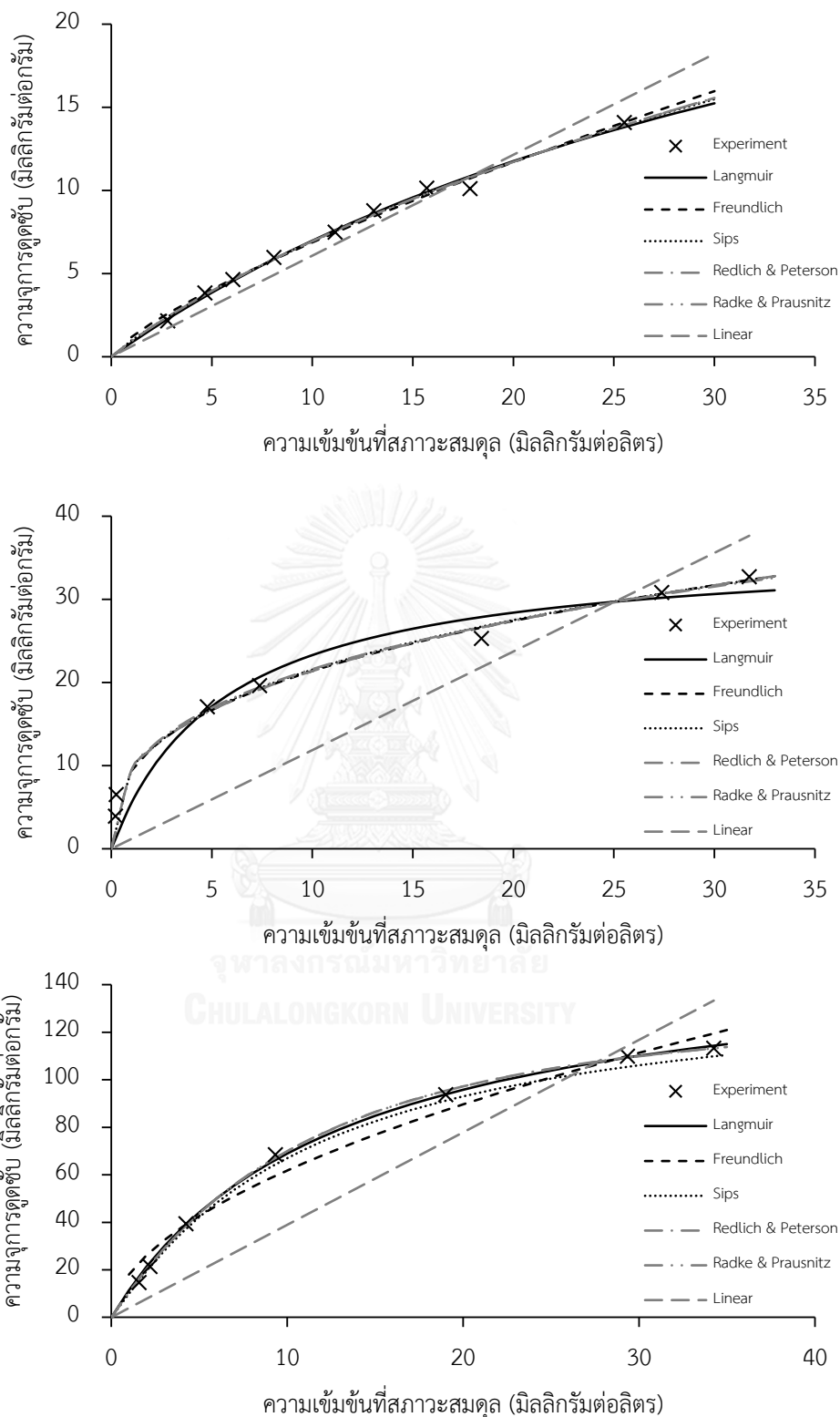
ตารางที่ 4.12 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi (ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตัวดูดซับ	แลงก์เมียร์			ฟรุนด์ลิช		
	q_m (มก./ก.)	K_L (ล./มก.)	R^2	K_F (มก./ล.)(ล./มก.) ^{1/n}	1/n	R^2
Algi-HMS	37.32 ±4.74	0.023 ±0.004	0.9916	1.173 ±0.100	0.768 ±0.030	0.9910
Algi-A-HMS	36.38 ±3.96	0.178 ±0.070	0.9313	9.367 ±0.596	0.358 ±0.021	0.9914
Algi	156.98 ±3.92	0.078 ±0.005	0.9982	18.028 ±3.070	0.535 ±0.054	0.9688

ตารางที่ 4.12 ค่าตัวแปรสมการไอโซเทอมการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi (ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) (ต่อ)

ตัวดูดซับ	เส้นตรง		ชิปส์			
	K_p (ล./ก.)	R^2	q_m (มก./ก.)	K_s (ล./มก.) ^{1/n}	1/n	R^2
Algi-HMS	0.607 ±0.024	0.9864	56.82 ±47.65	0.017 ±0.012	0.902 ±0.137	0.9910
Algi-A-HMS	1.186 ±0.162	0.8832	389.07 ±1713.02	0.025 ±0.110	0.377 ±0.090	0.9894
Algi	3.893 ±0.416	0.9252	136.52 ±4.47	0.073 ±0.004	1.173 ±0.053	0.9990

ตัวดูดซับ	เรดลิกซ์และปีเตอร์สัน				Radke และ Prausnitz			
	K_j (ล./ก.)	b_j (ล./มก.) ^{1/β}	β	R^2	a (ล./ก.)	b (ล./ก.) ^{1/β}	β	R^2
Algi-HMS	1.042 ±0.431	0.114 ±0.431	0.641 ±0.443	0.9912	1.042 ±0.428	9.117 ±16.906	0.359 ±0.442	0.9912
Algi-A-HMS	158.587 ±296.637	15.774 ±31.644	0.662 ±0.043	0.9900	5.04×10 ³⁴ ±5.57×10 ⁴⁴	9.368 ±0.682	0.358 ±0.024	0.9893
Algi	11.118 ±0.698	0.044 ±0.016	1.129 ±0.081	0.9987	11.123 ±0.693	253.57 ±75.442	-0.128 ±0.079	0.9987



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองสมดุลการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS (บน) Algi-A-HMS (กลาง) และ Algi (ล่าง) กับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ ฟรูนด์ลิช ซิปส์ เรดลิชและปีเตอร์สัน และ Radke และ Prausnitz

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ผ่านมาสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอมได้ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบระบบบำบัดโดยใช้กระบวนการดูดซับแบบที่ละเทได้

ตารางที่ 4.13 สรุปผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองกับสมการไอโซเทอมการดูดซับ

ตัวดูดซับ	มลสาร	ไอโซเทอมการดูดซับ
Algi-A-HMS	AB45	ทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมแบบเส้นตรง
	Cu	ทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมแบบเส้นตรง
Algi-HMS	TX100	ไอโซเทอมของแลงก์เมียร์
	Cu	ทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมแบบเส้นตรง
Algi	Cu	ทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมของฟรุนด์ลิชและแบบเส้นตรง

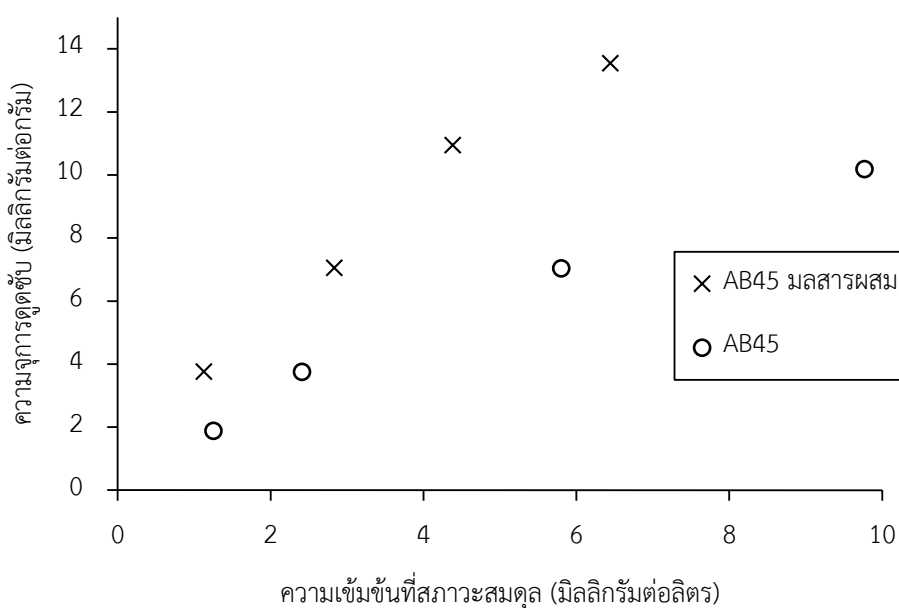


4.3 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบที่ละเทโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม

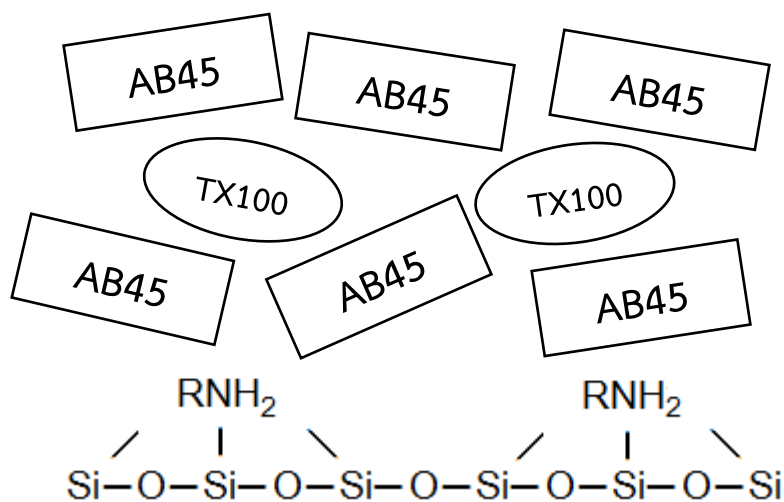
การศึกษากระบวนการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมนั้นได้ทำการทดลองในระบบที่ละเท โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองสมดุลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยว

4.3.1 การศึกษากระบวนการดูดซับ AB45 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบที่ละเท

ผลการทดลองการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมแสดงดังรูปที่ 4.20 โดยพบว่าตัวดูดซับ Algi-A-HMS มีความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นมากกว่าการดูดซับในน้ำเสียมลสารเดี่ยวและยังพบว่ามี การดูดซับ TX100 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า AB45 ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวอาจเกิดอันตรกิริยากับ TX100 ในน้ำและทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายชั้นขึ้น ส่งผลให้ Algi-A-HMS สามารถดูดซับ AB45 ได้มากขึ้น ดังรูปที่ 4.21 นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับ Cu ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Navarro, 2014 ซึ่งพบว่าแอลจีเนตสามารถดูดซับโลหะหนักได้น้อยลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีเกลือ



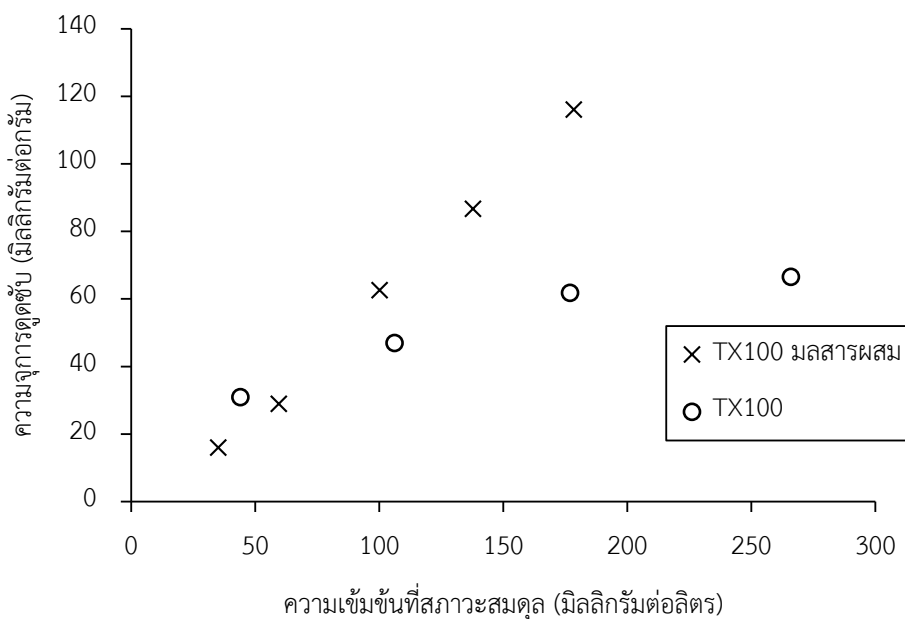
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวและมลสารผสม (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



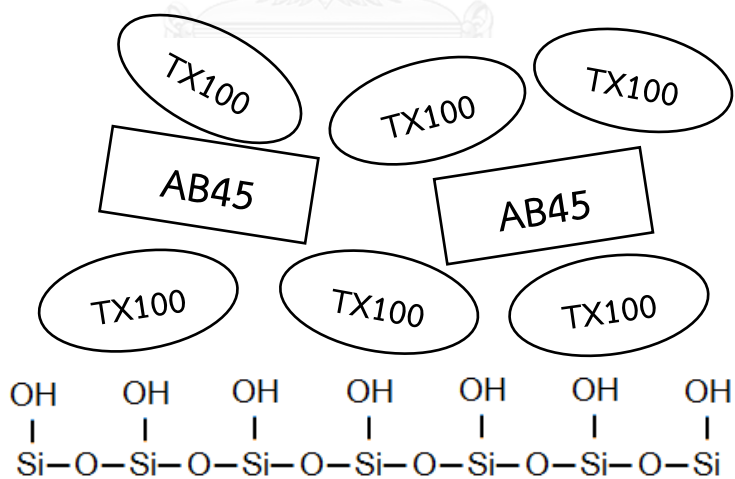
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง TX100 และ AB45 บนพื้นผิวของตัวดูดซับ Algi-A-HMS

4.3.2 การศึกษากระบวนการดูดซับ TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบที่ละเท

ผลการทดลองการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยพบว่าตัวดูดซับ Algi-HMS มีความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นมากกว่าการดูดซับ ในน้ำเสียมลสารเดี่ยวและยังพบว่ามี การดูดซับ AB45 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า TX100 ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวอาจเกิดอันตรกิริยากับ AB45 ในน้ำและทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายชั้นขึ้น ส่งผลให้ Algi-HMS สามารถดูดซับ TX100 ได้มากขึ้น ดังรูปที่ 4.23 นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับ Cu ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Navarro, 2014 ซึ่งพบว่าแอลจิเนตสามารถดูดซับโลหะหนักได้น้อยลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีเกลือ



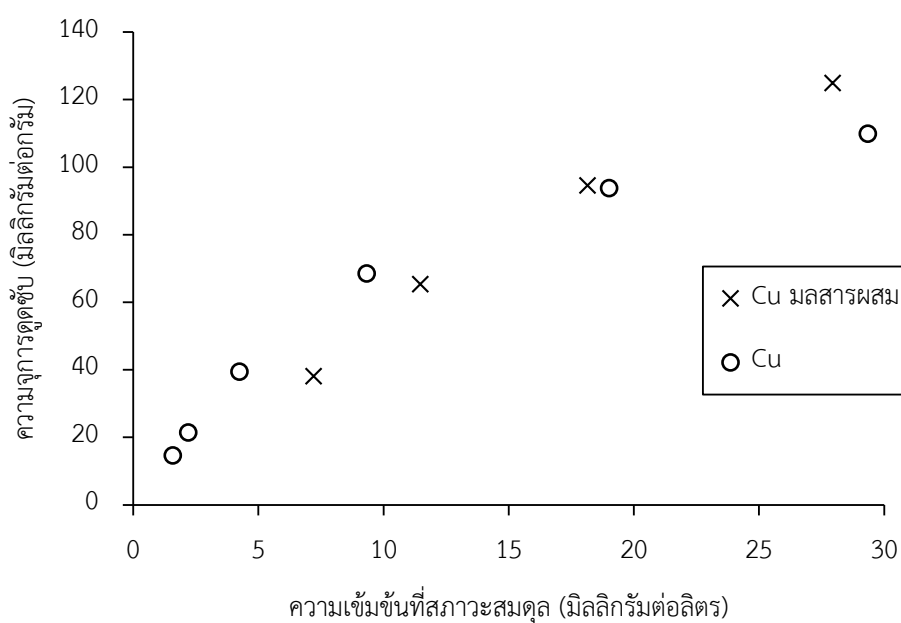
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมมูลการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวและมลสารผสม (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการเกิดอัตรกิริยาระหว่าง AB45 และ TX100 บนพื้นผิวของตัวดูดซับ Algi-HMS

4.3.3 การศึกษากระบวนการดูดซับ Cu ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบทีละเท

ผลการทดลองการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม แสดงดังรูปที่ 4.24 โดยพบว่าตัวดูดซับ Algi มีความจุการดูดซับเท่ากับการดูดซับในน้ำเสียมลสารเดี่ยวเนื่องจากพื้นผิวที่ใช้ในการดูดซับ Cu คือหมู่คาร์บอกซิลบนแอลจิเนต ซึ่งไม่ถึงจุด TX100 และ AB45 จึงไม่มีผลกระทบต่อ การดูดซับ Cu ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับ TX100 และ AB45 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับแบบ คัดเลือกที่สูงและยังเป็นการยืนยันว่าสามารถนำข้อมูลการดูดซับน้ำเสียมลสารเดี่ยวไปใช้ในการ ออกแบบระบบดูดซับน้ำเสียมลสารผสมได้

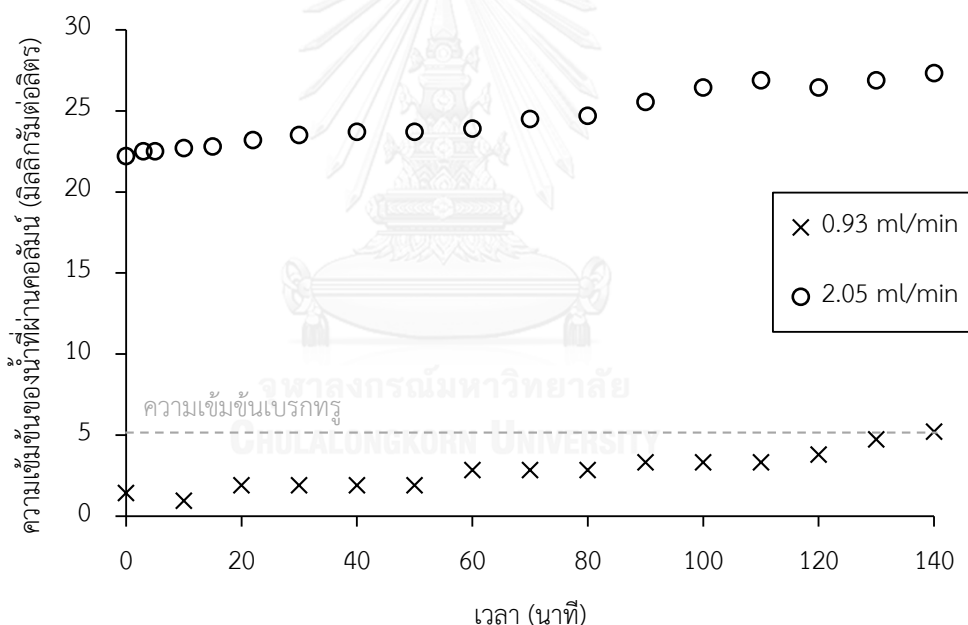


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสมดุลการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวและมลสารผสม (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.4 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยว

4.4.1 การศึกษากราฟเบรททอร์ที่อัตราการไหลต่างๆ

จากการศึกษากราฟเบรททอร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ TX100 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร และกำหนดความเข้มข้นเบรททอร์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.25 โดยอัตราการไหล 0.93 มิลลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลต่ำสุดที่ peristaltic pump สามารถทำได้ พบว่าได้ค่าเวลาเบรททอร์ 135 นาที และทำการทดลองด้วยอัตราการไหล 2.05 มิลลิตรต่อนาที พบว่าความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ดูดซับมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นเบรททอร์ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้อัตราการไหล 0.93 มิลลิตร ในการทดลองการดูดซับด้วยคอลัมน์ทั้งหมด



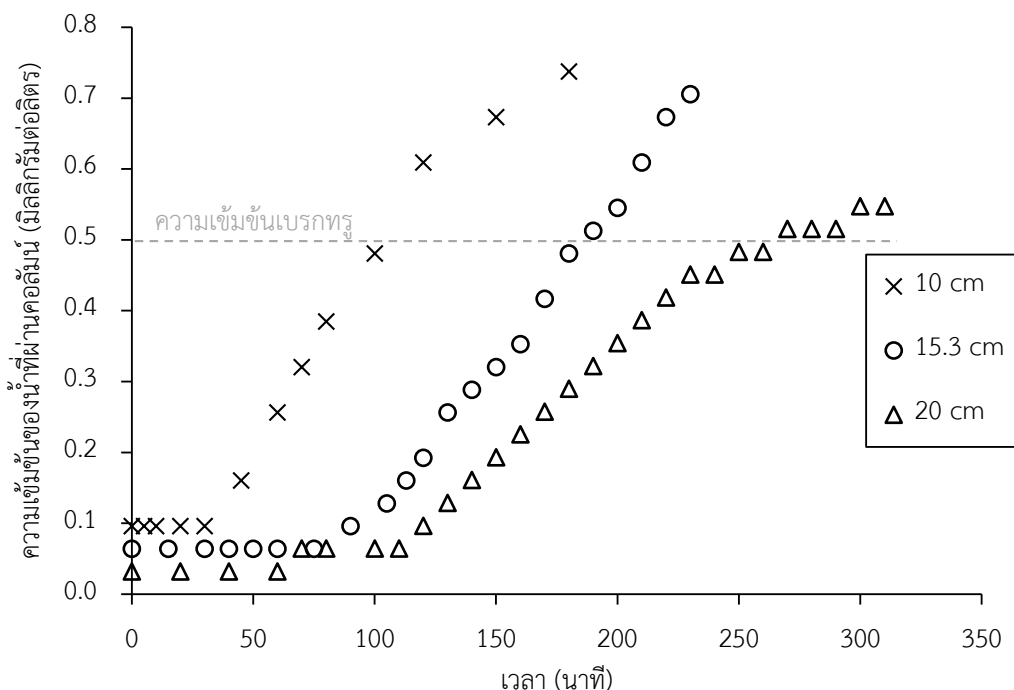
รูปที่ 4.25 ผลการทดลองการดูดซับ TX100 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ความยาว 10 เซนติเมตร ที่มีอัตราการไหล 0.93 และ 2.05 มิลลิตรต่อนาที (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.4.2 การศึกษากราฟเบรกทรูที่ความหนาของชั้นตัวดูดซับต่างๆ

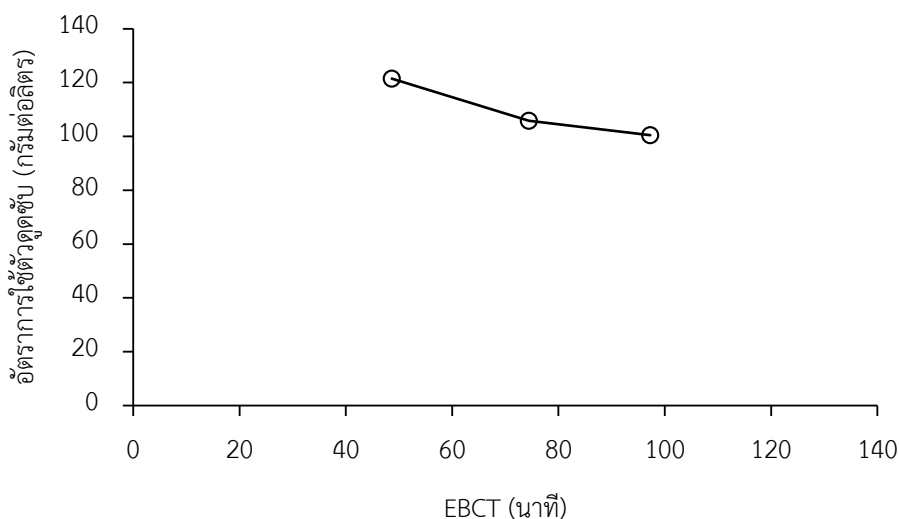
ทำการศึกษาการดูดซับในระบบคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยว AB45 และ TX100 ซึ่งควบคุมค่าพีเอช 5 โดยใช้ฟอสเฟตบัพเฟอร์ และ Cu ซึ่งควบคุมค่าพีเอช 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก

4.4.2.1 การศึกษาเบรกทรูการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS

จากการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ AB45 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-A-HMS ในระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 10 15.3 และ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดความเข้มข้นเบรกทรู 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบคอลัมน์เข้าสู่เบรกทรูหลังจากเดินระบบ 100 185 และ 265 นาที ตามลำดับ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.26 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับดังรูปที่ 4.27 และเมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทรูของโรมัสต์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ค่าคงที่ดังตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.26 ผลการทดลองการดูดซับ AB45 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-A-HMS ในระบบคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที ความยาว 10 15.3 และ 20 เซนติเมตร (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับ Algi-A-HMS ในการดูดซับ AB45 (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.14 ค่าคงสมการเบรกทรูของโร้มีสของการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

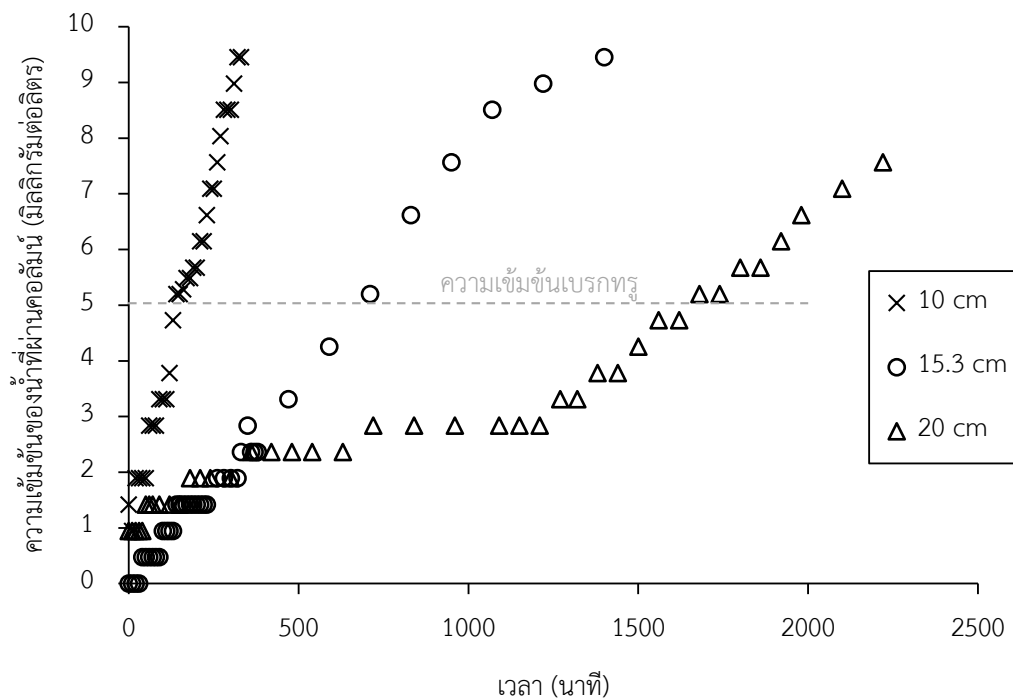
ความยาวคอลัมน์ (เซนติเมตร)	ค่าคงที่สมการเบรกทรูของโร้มีส		R ²
	k _{Th} (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม·นาท)	q (มิลลิกรัม/กรัม)	
10	0.705	0.628	0.914
15.3	0.655	0.485	0.9471
20	0.560	0.441	0.9308

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าความยาวของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการใช้ตัวดูดซับและค่าคงที่สมการของโร้มีสมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น และส่งผลให้คอลัมน์มีอายุการใช้งานที่มากขึ้น

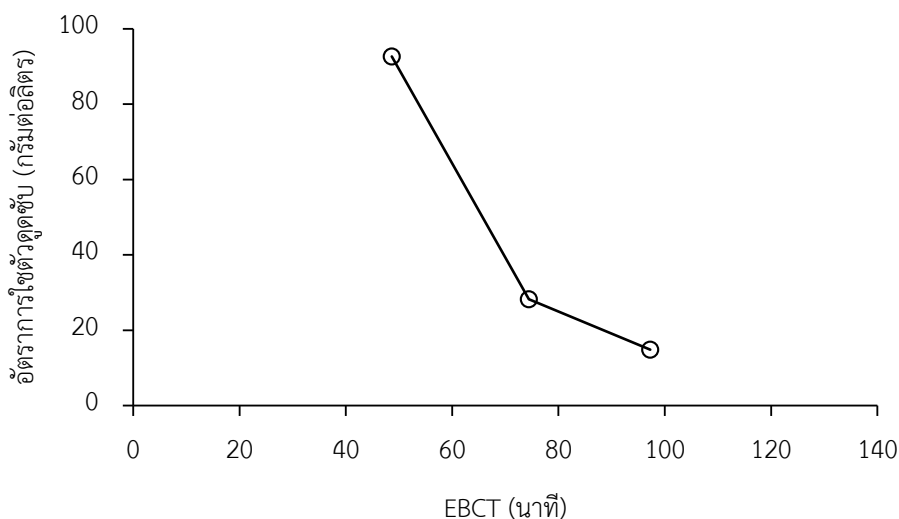
4.4.2.2 การศึกษาเบรกทรูการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS

จากการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ TX100 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 10 15.3 และ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดความเข้มข้นเบรกทรู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบคอลัมน์

เข้าสู่เบรกทรูหลังจากเดินระบบ 135 682 และ 1678 นาที ตามลำดับ โดยผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับดังรูปที่ 4.29 และเมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทรูของโรมัสโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ค่าคงที่ดังตารางที่ 4.15



รูปที่ 4.28 ผลการทดลองการดูดซับ TX100 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที ความยาว 10 15.3 และ 20 เซนติเมตร (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับ Algi-HMS ในการดูดซับ TX100 (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.15 ค่าคงสมการเบรททรูของโร้มีสของการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

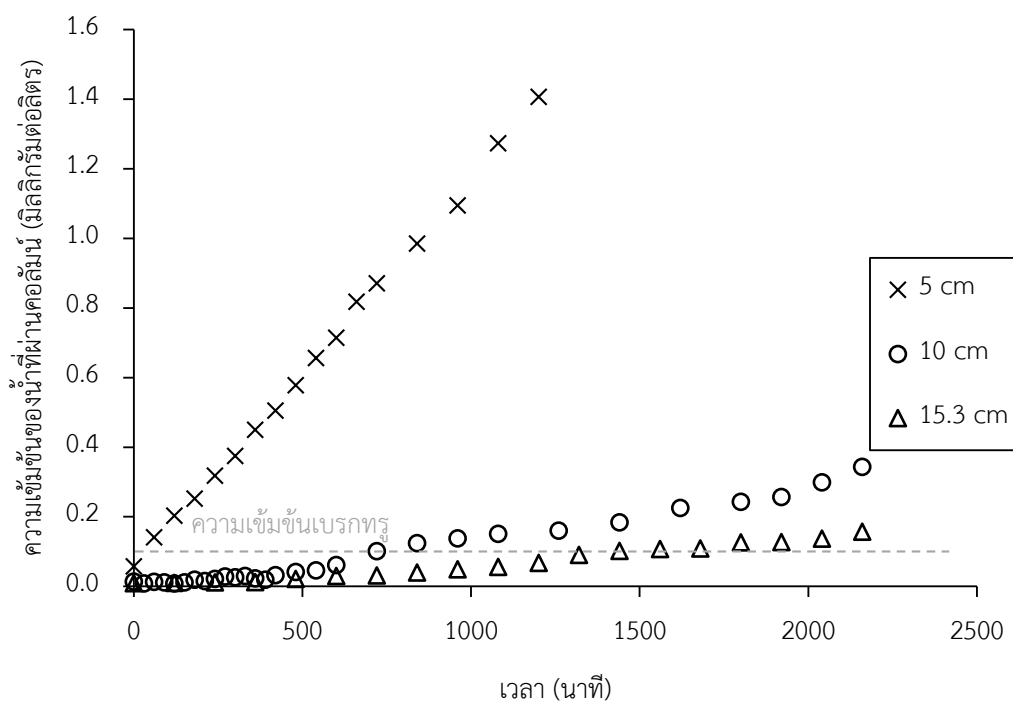
ความยาวคอลัมน์ (เซนติเมตร)	ค่าคงที่สมการเบรททรูของโร้มีส		R ²
	k _{Th} (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม·นาท)	q (มิลลิกรัม/กรัม)	
10	0.030	12.675	0.9191
15.3	0.012	24.022	0.8311
20	0.004	50.748	0.9276

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าความยาวของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการใช้ตัวดูดซับมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่าคงที่สมการของโร้มีสมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น และส่งผลให้คอลัมน์มีอายุการใช้งานที่มากขึ้น

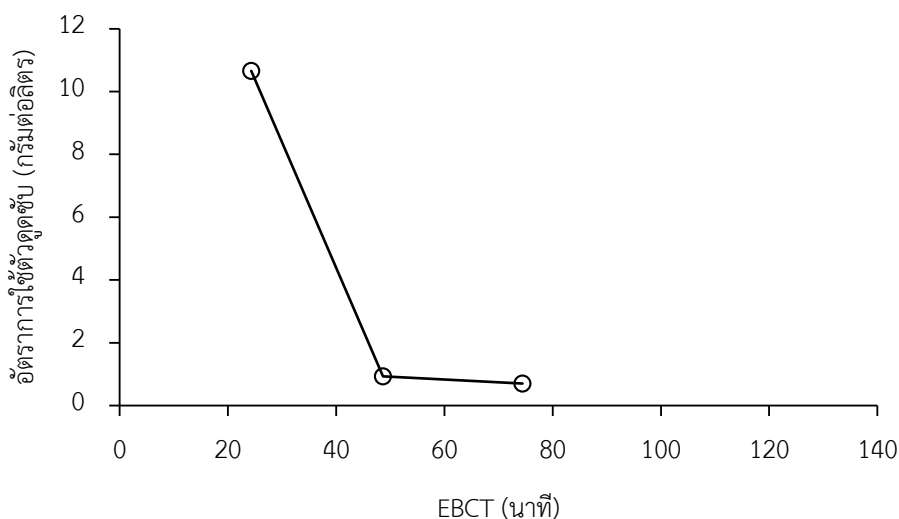
4.4.2.3 การศึกษาเบรททรูการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi

จากการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ที่มีความยาว 5 10 และ 15.3 เซนติเมตร โดยกำหนด

ความเข้มข้นเบรคทรู 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบคอลัมน์ เข้าสู่เบรคทรูหลังจากเดินระบบ 31 720 และ 1440 นาที ตามลำดับ โดยผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.30 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง EBCT กับอัตราการใช้ตัวดูดซับดังรูปที่ 4.31 และเมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการเบรคทรูของโรมัสโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ค่าคงที่ดังตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.30 ผลการทดลองการดูดซับ Cu ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ Algi ในระบบคอลัมน์ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที ความยาว 5 10 และ 15.3 เซนติเมตร (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ EBCT กับอัตราการกำจัดตัวดูดซับ Algi ในการดูดซับ Cu (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.16 ค่าคงสมการเบรกทรูของโรมัสของการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

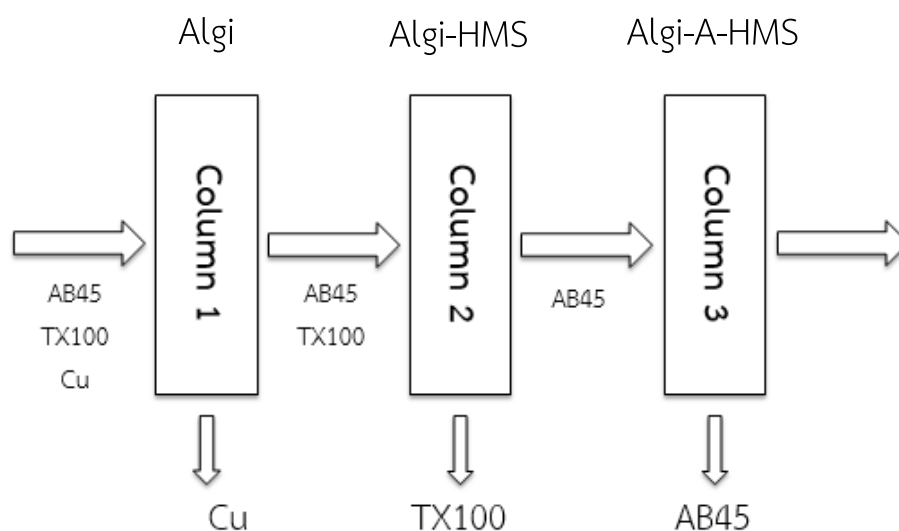
ความยาวคอลัมน์ (เซนติเมตร)	ค่าคงที่สมการเบรกทรูของโรมัส		R ²
	k _{Th} (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม·นาที)	q (มิลลิกรัม/กรัม)	
5	0.230	54.684	0.8589
10	0.170	57.800	0.8915
15.3	0.140	48.802	0.9509

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าความยาวของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการกำจัดตัวดูดซับมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่าคงที่สมการของโรมัสมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น และส่งผลให้คอลัมน์มีอายุการใช้งานที่มากขึ้น

4.5 การศึกษากระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม

4.5.1 การจัดลำดับคอลัมน์ตัวดูดซับ

จากผลการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า Algi มีคุณสมบัติในการดูดซับแบบคัดเลือกสูงที่สุด เนื่องจากสามารถดูดซับ Cu ได้เพียงอย่างเดียว ในลำดับถัดมาคือ Algi-HMS ซึ่งสามารถดูดซับ Cu และ TX100 ได้ และลำดับสุดท้ายคือ Algi-A-HMS ซึ่งสามารถดูดซับ Cu และ AB45 ได้ โดยสามารถดูดซับ TX100 ได้น้อยมากๆ ดังนั้นในการจัดลำดับคอลัมน์ตัวดูดซับเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมที่ประกอบด้วย AB45 TX100 และ Cu จึงเลือกใช้ดูดซับ Algi เป็นคอลัมน์แรก Algi-HMS เป็นคอลัมน์ที่สอง และ Algi-A-HMS เป็นคอลัมน์สุดท้าย ดังรูปที่ 4.32



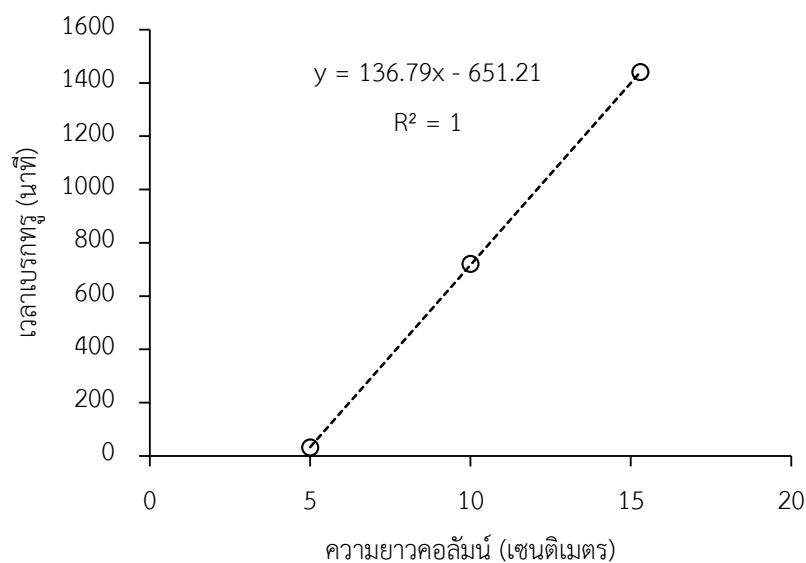
รูปที่ 4.32 การจัดลำดับคอลัมน์ตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม

4.5.2 การออกแบบระบบคอลัมน์

ทำการออกแบบระบบคอลัมน์เพื่อบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมของ AB45 TX100 และ Cu ความเข้มข้น 20 200 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งควบคุมค่าพีเอช 5 โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก ควบคุมอัตราการไหล 0.93 มิลลิตรต่อนาที และกำหนดให้ทุกคอลัมน์มีเวลาเบรกทูลเท่ากันคือ 420 นาที โดยใช้สมการเบรกทูลของโบฮาร์ทและอดัมส์

4.5.2.1 การออกแบบคอลัมน์ Algi

จากผลการทดลองการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ในระบบคอลัมน์สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทูลได้ดังรูปที่ 4.33 โดยเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทูลของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้ค่าคงที่ของสมการตามตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทูลในการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ในระบบคอลัมน์ (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

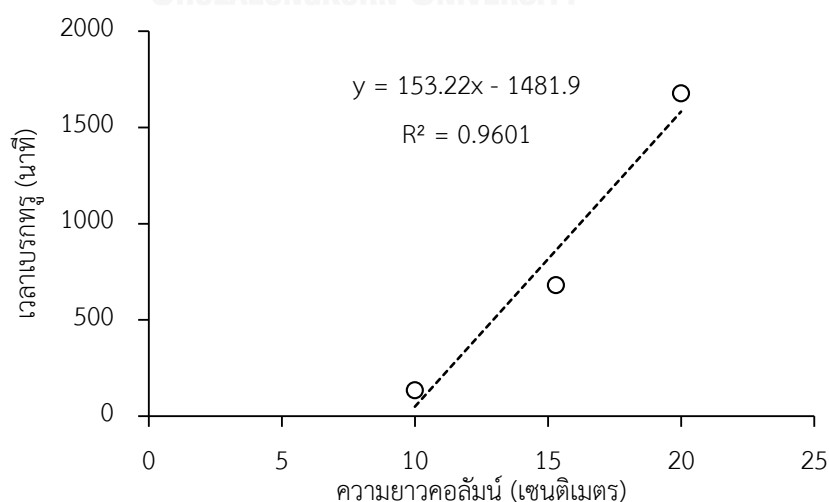
ตารางที่ 4.17 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

พารามิเตอร์			ค่าคงที่			R ²
C ₀ (มก./ล.)	C _B (มก./ล.)	V (ชม./นาท)	k (มล./มก.·นาท)	N ₀ (มก./มล.)	D ₀ (ชม.)	
10.0	0.1	0.206	0.000706	281.21	4.76	1.0000

จากการคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์ โดยกำหนดเวลาเบรกทรู 420 นาที ได้ความยาวคอลัมน์ 7.83 เซนติเมตร แต่เนื่องจากชิ้นส่วนที่ใช้ในการประกอบคอลัมน์มีความยาว 3 5 10 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีปะเก็นซิลิโคนหนา 0.3 มิลลิเมตรเป็นตัวเชื่อมชิ้นส่วนคอลัมน์ จึงเลือกใช้ความยาวคอลัมน์ 8.3 เซนติเมตร และเมื่อคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้เวลาเบรกทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบ 484 นาที

4.5.2.2 การออกแบบคอลัมน์ Algi-HMS

จากผลการทดลองการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทรูได้ดังรูปที่ 4.34 โดยเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้ค่าคงที่ของสมการตามตารางที่ 4.18



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทรูในการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

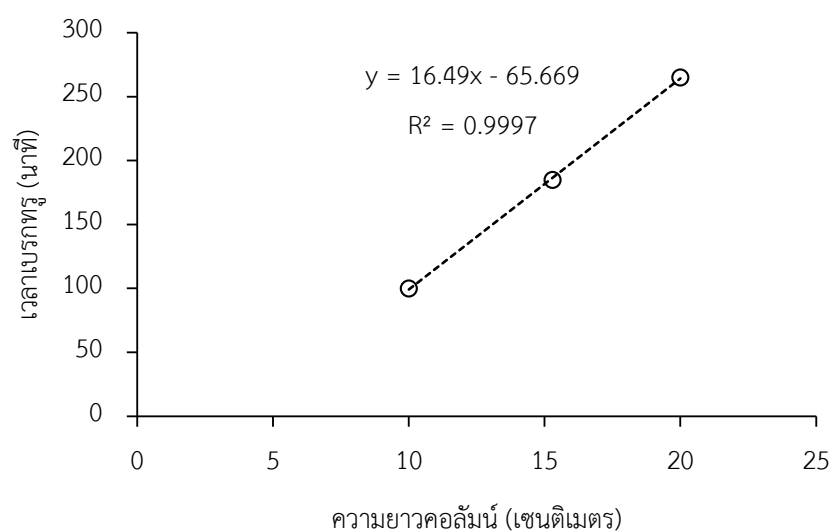
ตารางที่ 4.18 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

พารามิเตอร์			ค่าคงที่			R ²
C ₀ (มก./ล.)	C _B (มก./ล.)	V (ชม./นาท)	k (มล./มก.·นาท)	N ₀ (มก./มล.)	D ₀ (ชม.)	
200.0	5.0	0.206	1.24 × 10 ⁻⁵	6299.64	9.67	0.9601

จากการคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์ โดยกำหนดเวลาเบรกทรู 420 นาที ได้ความยาวคอลัมน์ 12.4 เซนติเมตร แต่เนื่องจากชิ้นส่วนที่ใช้ในการประกอบคอลัมน์มีความยาว 3 5 10 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีปะเก็นซิลิโคนหนา 0.3 มิลลิเมตรเป็นตัวเชื่อมชิ้นส่วนคอลัมน์ จึงเลือกใช้ความยาวคอลัมน์ 13.3 เซนติเมตร และเมื่อคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้เวลาเบรกทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบ 556 นาที

4.5.2.3 การออกแบบคอลัมน์ Algi-A-HMS

จากผลการทดลองการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi ในระบบคอลัมน์สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทรูได้ดังรูปที่ 4.35 โดยเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้ค่าคงที่ของสมการตามตารางที่ 4.19



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความยาวคอลัมน์และเวลาเบรกทรูในการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS ในระบบคอลัมน์ (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.19 พารามิเตอร์และค่าคงที่จากสมการของโบฮาร์ทและอดัมส์ในการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

พารามิเตอร์			ค่าคงที่			R ²
C ₀ (มก./ล.)	C _B (มก./ล.)	V (ชม./นาทึ)	k (มล./มก.·นาทึ)	N ₀ (มก./มล.)	D ₀ (ชม.)	
20.0	0.5	0.206	0.002789	67.80	3.98	0.9997

จากการคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์ โดยกำหนดเวลาเบรกทรู 420 นาที ได้ความยาวคอลัมน์ 29.5 เซนติเมตร แต่เนื่องจากชิ้นส่วนที่ใช้ในการประกอบคอลัมน์มีความยาว 3 5 10 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีปะเก็นซิลิโคนหนา 0.3 มิลลิเมตรเป็นตัวเชื่อมชิ้นส่วนคอลัมน์ จึงเลือกใช้ความยาวคอลัมน์ 30.3 เซนติเมตร และเมื่อคำนวณโดยใช้สมการเบรกทรูของโบฮาร์ทและอดัมส์จะได้เวลาเบรกทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบ 434 นาที

4.5.3 การศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกของมลสารผสมในระบบคอลัมน์

ทำการศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมซึ่งประกอบด้วย TX100 AB45 และ Cu ความเข้มข้น 200 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยควบคุมพีเอช 5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไนตริก ในสภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ระบบคอลัมน์ที่ได้ทำการออกแบบให้มีเวลาเบรกทิว 420 นาที โดยมีลำดับของตัวดูดซับเป็น Algi Algi-HMS และ Algi-A-HMS ตามลำดับ

4.5.3.1 การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้ Algi

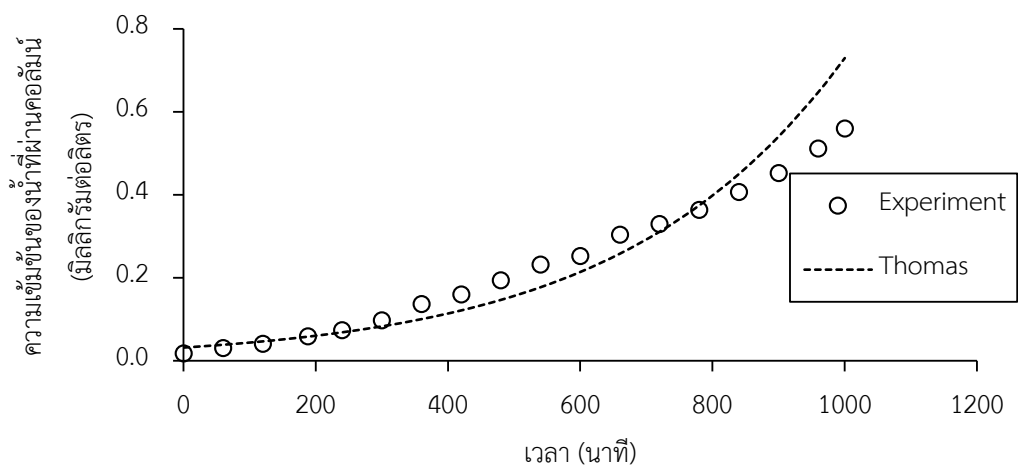
จากการศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi พบว่าสามารถดูดซับ Cu ได้ดีและใช้เวลาในการเข้าสู่เบรกทิว 303 นาที ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยใช้ข้อมูลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยว ซึ่งมีสมมติฐานว่าอาจเกิดจาก TX100 หรือ AB45 ไปขัดขวางการเข้าถึงพื้นที่ผิวดูดซับของ Cu ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองการดูดซับ Cu ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบที่ละเท เนื่องจากน้ำเสียในระบบคอลัมน์นั้นมีความเร็วการไหลต่ำส่งผลให้ชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคมีความหนา ซึ่งแตกต่างจากระบบที่ละเทที่มีการกวนผสมด้วยความเร็วทำให้มลสารเข้าถึงพื้นที่ดูดซับได้ง่ายกว่าทำให้ไม่ถูกขัดขวางโดยมลสารอื่นๆในน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของ TX100 และ AB45 ลดลงในช่วงแรก ซึ่งเป็นผลมาจากการเจือจางของน้ำเสียสังเคราะห์โดยน้ำที่อยู่ภายในและบนผิวของ Algi ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.36 และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทิวของโรมส์ได้ค่าคงที่ดังตารางที่ 4.20

CHULALONGKORN UNIVERSITY

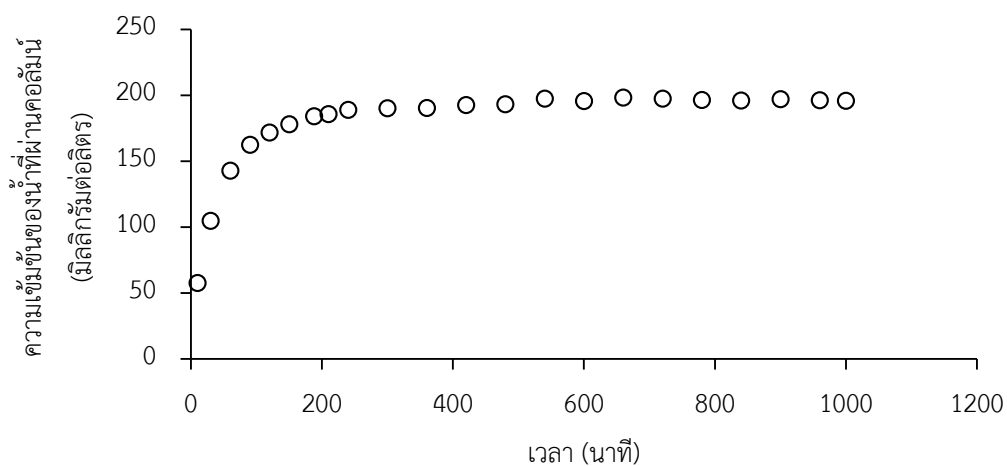
ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่สมการเบรกทิวของโรมส์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

มลสาร	ค่าคงที่สมการเบรกทิวของโรมส์		
	k_{Th} (มิลลิกรัม/มิลลิกรัม·นาที)	q (มิลลิกรัม/กรัม)	R^2
Cu	0.316	31.615	0.9455
TX100	-	-	-
AB45	-	-	-

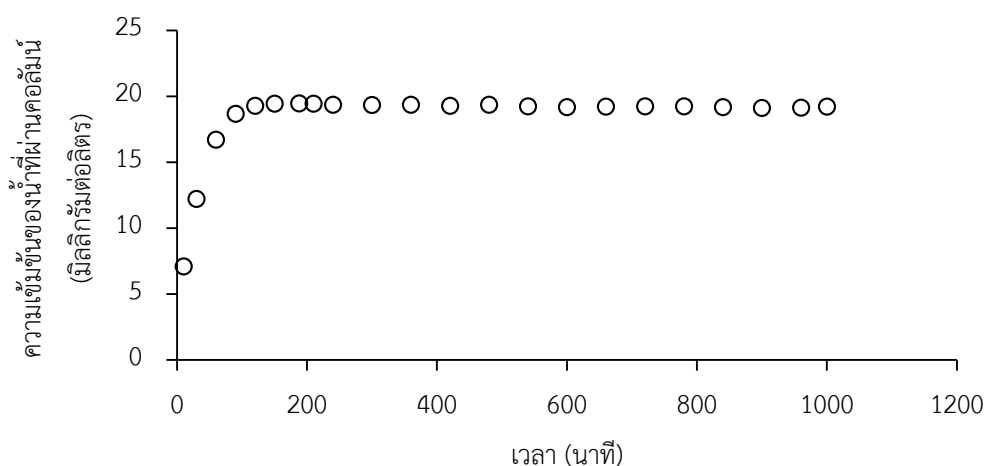
ก) Cu ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



ข) TX100 ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร



ค) AB45 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.36 ผลการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้ Algi ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.5.3.2 การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้

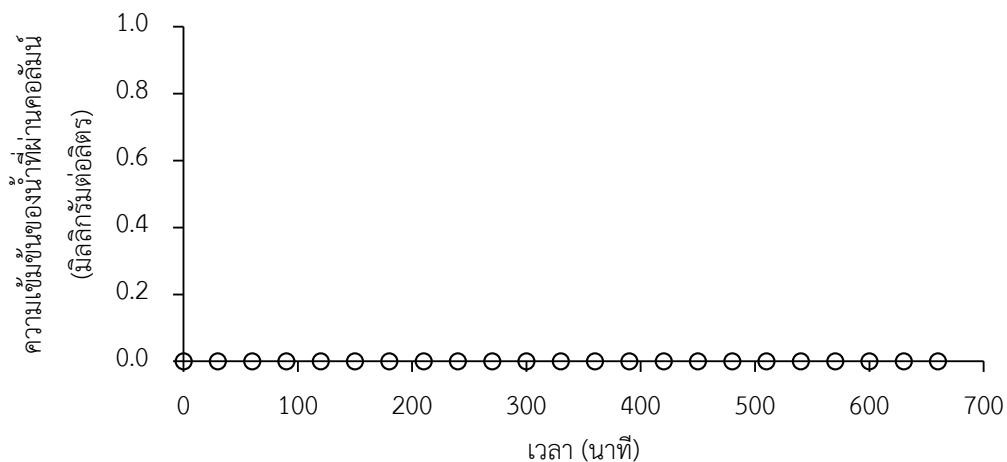
Algi-HMS

จากการศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-HMS เป็นตัวดูดซับ และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำตัวอย่าง ที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์แรกซึ่งประกอบด้วย TX100 AB45 และ Cu ความเข้มข้น 200 20 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าคอลัมน์ Algi-HMS ที่ออกแบบสามารถดูดซับ TX100 ได้ดีและใช้เวลาในการเข้าสู่เบรกทรู 617 นาที ซึ่งมากกว่าเวลาที่ได้ออกแบบเอาไว้ ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า TX100 ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของ Algi-HMS อาจเกิดอันตรกริยากับ AB45 ในน้ำและทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายขั้นขึ้น ส่งผลให้ Algi-HMS สามารถดูดซับ TX100 ได้มากขึ้น สอดคล้องกับการทดลองการดูดซับ TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบที่ละเท และยังพบว่าความเข้มข้นของ AB45 ลดลงในช่วงแรก ซึ่งเป็นผลมาจากการเจือจางของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยน้ำที่ใช้ในการเตรียมระบบคอลัมน์ก่อนใช้งาน นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการดูดซับ Cu ที่เหลืออยู่จากคอลัมน์แรกจนหมด ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.37 และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทรูของโรมัสจะได้ค่าคงที่ดังตารางที่ 4.21

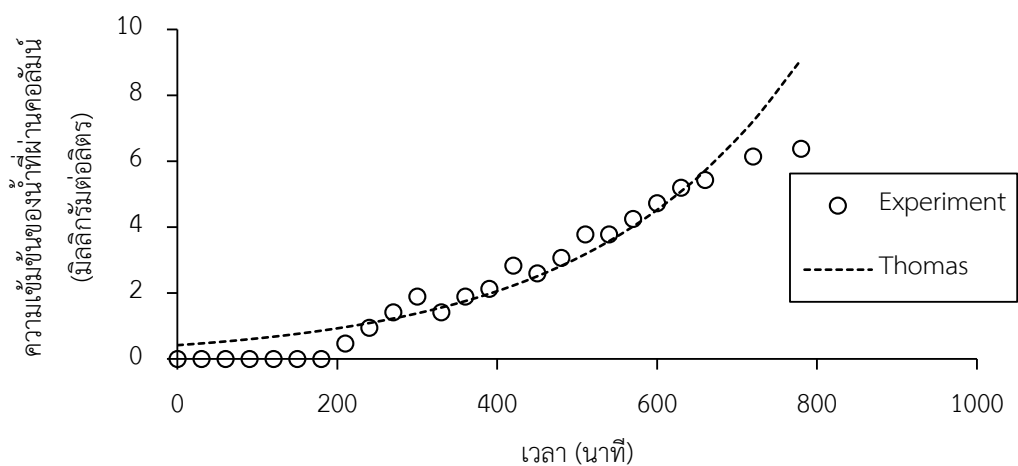
ตารางที่ 4.21 ค่าคงสมการเบรกทรูของโรมัสของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-HMS

มลสาร	ค่าคงที่สมการเบรกทรูของโรมัส		
	k_{Th} (มิลลิเมตร/มิลลิกรัม·นาที)	q (มิลลิกรัม/กรัม)	R^2
Cu	-	-	-
TX100	0.020	18.188	0.8896
AB45	-	-	-

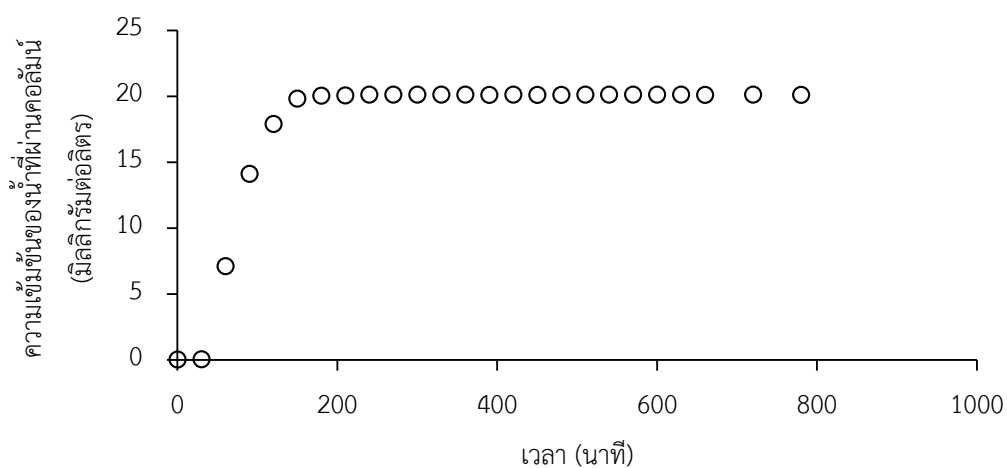
ก) Cu ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร



ข) TX100 ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร



ค) AB45 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.37 ผลการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้ Algi-HMS ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

4.5.3.3 การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้

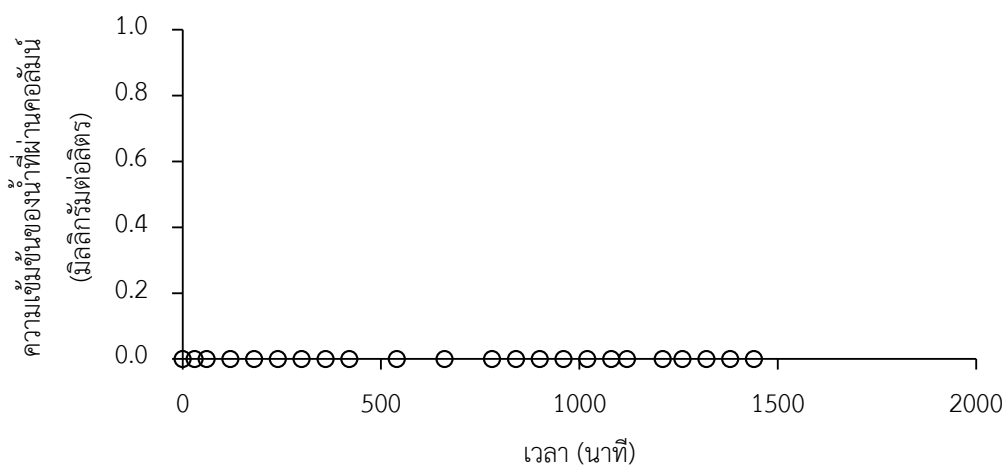
Algi-A-HMS

จากการศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-A-HMS เป็นตัวดูดซับ และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำตัวอย่าง ที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ที่สองซึ่งประกอบด้วย TX100 และ AB45 ความเข้มข้น 2.5 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าคอลัมน์ Algi-A-HMS ที่ออกแบบสามารถดูดซับ AB45 ได้ดี และใช้เวลาในการเข้าสู่เบรกทรู 1113 นาที ซึ่งมากกว่าเวลาที่ได้ออกแบบเอาไว้ ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า AB45 ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของ Algi-A-HMS อาจเกิดอันตรกริยากับ TX100 ในน้ำ และทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายขั้นขึ้น ส่งผลให้ Algi-A-HMS สามารถดูดซับ AB45 ได้มากขึ้น สอดคล้องกับการทดลองการดูดซับ AB45 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบที่ละเท และยังพบว่าสามารถดูดซับ TX100 ที่ความเข้มข้นต่ำๆได้ในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.38 และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการเบรกทรูของโรมส์จะได้ค่าคงที่ดังตารางที่ 4.22

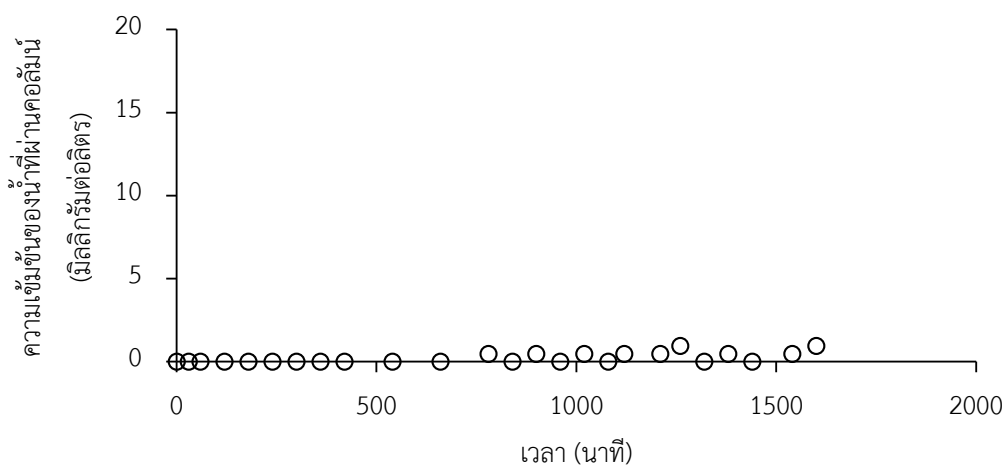
ตารางที่ 4.22 ค่าคงที่สมการเบรกทรูของโรมส์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-A-HMS (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

มลสาร	ค่าคงที่สมการเบรกทรูของโรมส์		
	k_{Th} (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม·นาที)	q (มิลลิกรัม/กรัม)	R^2
Cu	-	-	-
TX100	-	-	-
AB45	0.230	0.940	0.9913

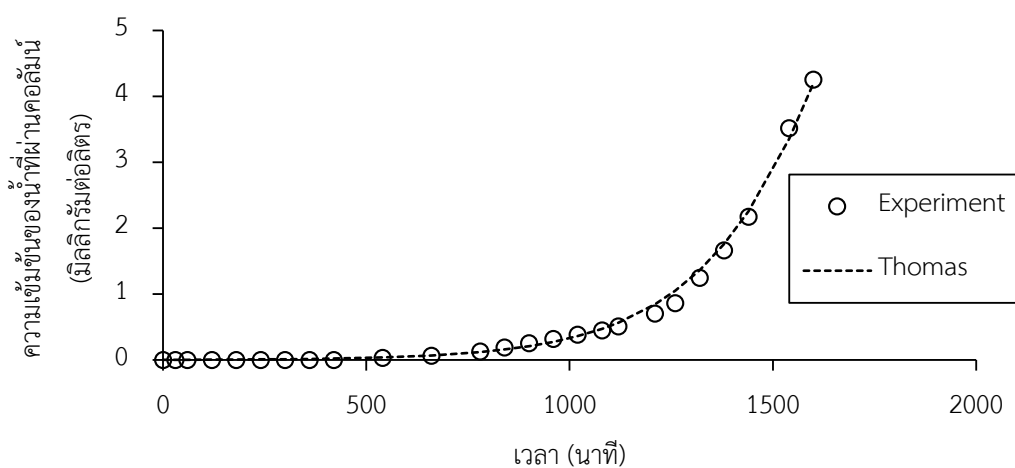
ก) Cu ความเข้มข้นเริ่มต้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร



ข) TX100 ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ค) AB45 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

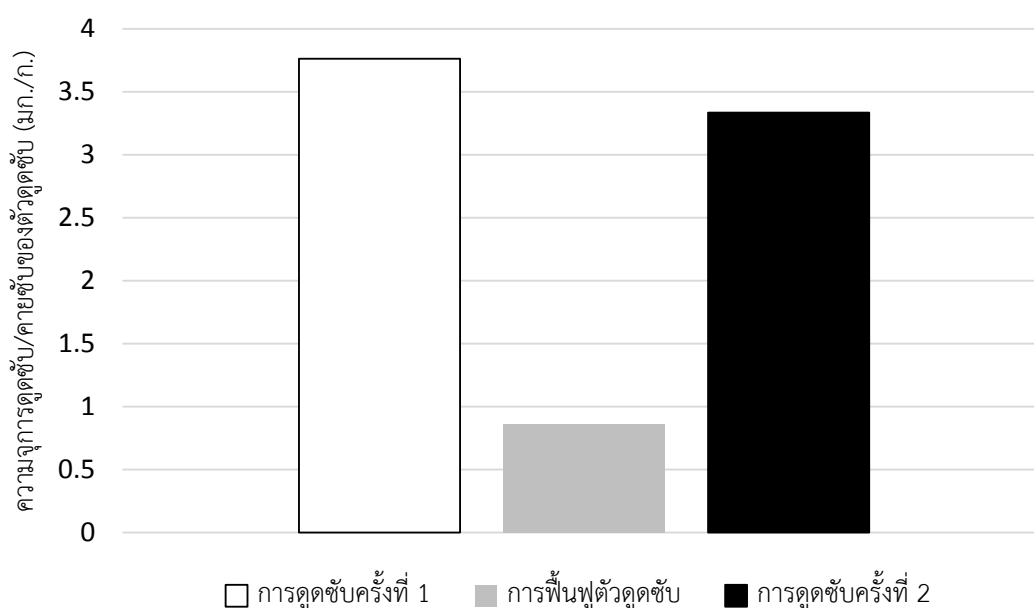


รูปที่ 4.38 ผลการทดลองการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบคอลัมน์โดยใช้ Algi-A-HMS ที่มีอัตราการไหล 0.93 มิลลิลิตรต่อนาที (ควบคุมพีเอช 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

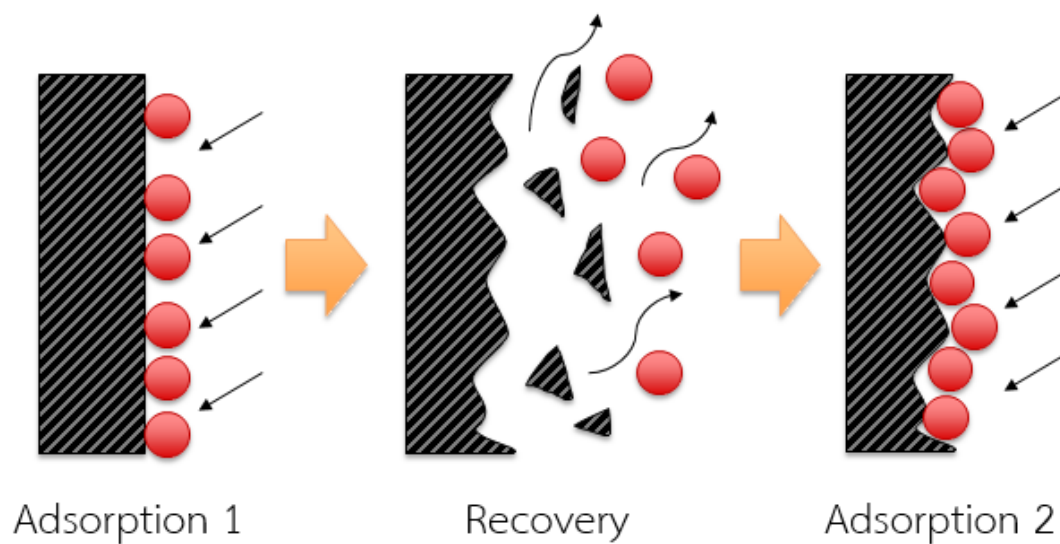
4.6 การศึกษากระบวนการฟื้นฟูตัวดูดซับ

4.6.1 การฟื้นฟู Algi-A-HMS ในการดูดซับ AB45

จากการทดลองฟื้นฟูตัวดูดซับ Algi-A-HMS โดยนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ AB45 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมค่าพีเอช 5 โดยใช้ฟอสเฟตบัพเฟอร์ ในระบบที่ละเท แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.39 พบว่าการดูดซับในรอบแรกสามารถดูดซับได้ 3.76 มิลลิกรัมต่อกรัม หลังจากฟื้นฟูตัวดูดซับโดยใช้สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำในอัตราส่วน 1:1 พบว่ามีการคายซับเกิดขึ้น 0.86 มิลลิกรัมต่อกรัม และได้นำตัวดูดซับไปทำการทดลองดูดซับ AB45 ที่ สภาวะและความเข้มข้นเดียวกันพบว่าการดูดซับในรอบที่สองสามารถดูดซับได้ 3.33 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือดูดซับได้ลดลงจากการดูดซับในรอบแรก 11.40 % โดยพบว่าปริมาณการคายซับที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการดูดซับในครั้งที่สอง จึงมีความเป็นไปได้ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับอาจเกิดการพังทลายลงใน กระบวนการฟื้นฟู ส่งผลให้มลสารสามารถเข้าถึงพื้นผิวที่ยังไม่เกิดการดูดซับขึ้นได้ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.39 ผลการทดลองการฟื้นฟู Algi-A-HMS จากการดูดซับ AB45

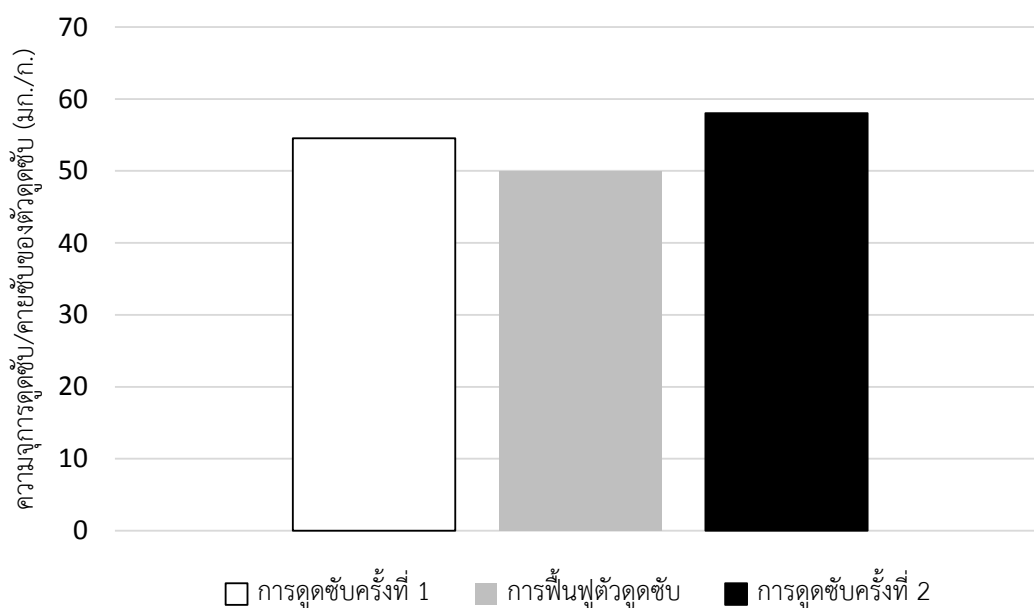


รูปที่ 4.40 ภาพตัวอย่างสมมติฐานการพังทลายของพื้นผิวตัวดูดซับในกระบวนการฟื้นฟูตัวดูดซับ



4.6.2 การฟื้นฟู Algi-HMS ในการดูดซับ TX100

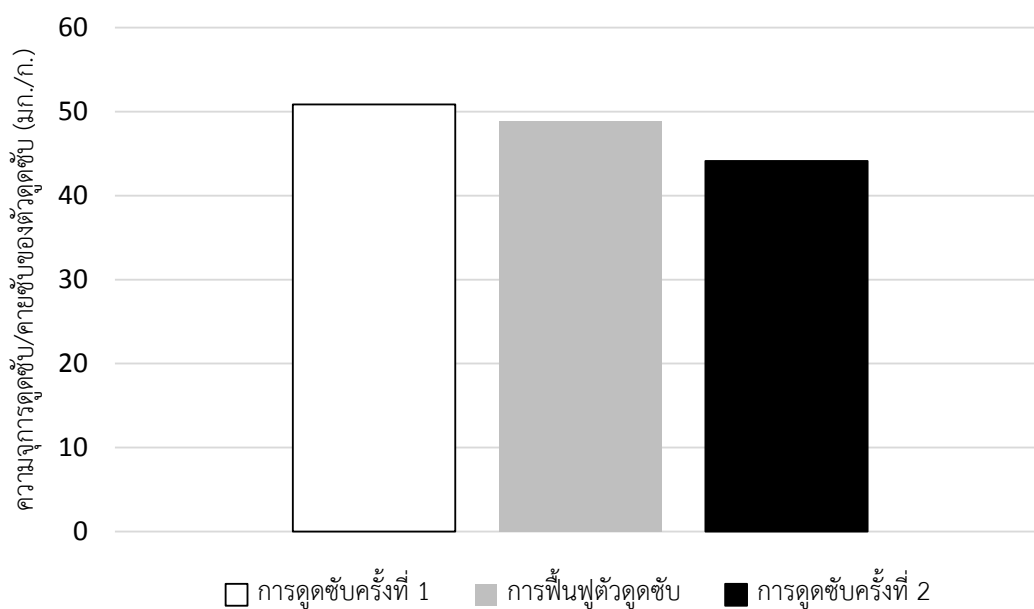
จากการทดลองฟื้นฟูตัวดูดซับ Algi-HMS โดยนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ TX100 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมค่าพีเอช 5 โดยใช้ฟอสเฟตบัพเฟอร์ ในระบบที่ละเท แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.41 พบว่าการดูดซับในรอบแรกสามารถดูดซับได้ 54.12 มิลลิกรัมต่อกรัม และหลังจากฟื้นฟูตัวดูดซับโดยใช้สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำใน อัตราส่วน 1:1 พบว่ามีการคายซับเกิดขึ้น 49.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ได้นำตัวดูดซับไปทำการทดลองดูดซับ TX100 ที่สภาวะและความเข้มข้นเดียวกันพบว่าการดูดซับในรอบที่สองสามารถดูดซับได้ 58.01 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือดูดซับได้เพิ่มขึ้นจากการดูดซับในรอบแรก 7.19 % โดยพบว่าปริมาณการคายซับที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการดูดซับในครั้งที่สอง จึงมีความเป็นไปได้ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับอาจเกิดการพังทลายลงในกระบวนการฟื้นฟู ส่งผลให้มลสารสามารถเข้าถึงพื้นผิวที่ยังไม่เกิดการดูดซับขึ้นได้



รูปที่ 4.41 ผลการทดลองการฟื้นฟู Algi-HMS จากการดูดซับ TX100

4.6.3 การฟื้นฟู Algi ในการดูดซับ Cu

จากการทดลองฟื้นฟูตัวดูดซับ Algi โดยนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมค่าพีเอช 5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการปรับค่าพีเอชในระบบที่ละเท แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.42 พบว่าการดูดซับในรอบแรก สามารถดูดซับได้ 50.851 มิลลิกรัมต่อกรัม และหลังจากฟื้นฟูตัวดูดซับโดยใช้สารละลายผสมของ เอทานอลและน้ำในอัตราส่วน 1:1 ได้นำตัวดูดซับไปทำการทดลองดูดซับ Cu ที่สภาวะและความเข้มข้นเดียวกันพบว่าการดูดซับในรอบที่สองสามารถดูดซับได้ 44.136 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือดูดซับได้ลดลงจากเดิม 13.20 % เมื่อเทียบกับการดูดซับในรอบแรก



รูปที่ 4.42 ผลการทดลองการฟื้นฟู Algi จากการดูดซับ Cu

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์เฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกต (HMS) และปรับปรุงพื้นผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโน (A-HMS) และทำการขึ้นรูปเป็นเม็ดโดยใช้แอลจินตเป็นตัวดูดซับเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตชนิดเม็ด (Algi-HMS) ตัวดูดซับเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการต่อติดหมู่อะมิโนชนิดเม็ด (Algi-A-HMS) และตัวดูดซับแอลจินตชนิดเม็ด (Algi) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ TX-100® (TX100) สีย้อมชนิดมีประจุแอสิดบลู 45 (AB45) และทองแดง (Cu) ศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบที่ละลาย ศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวในระบบคอลัมน์ ศึกษาการออกแบบระบบคอลัมน์ในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม และศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ

5.1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดย XRD พบว่า HMS และ A-HMS มีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม โดยกระบวนการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนทำให้โครงสร้างผลึกของ A-HMS เกิดการพังทลายลงบางส่วน และได้ทำการยืนยันผลการต่อติดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนด้วย FT-IR และการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน พบว่าหมู่ฟังก์ชันอะมิโนได้ถูกต่อติดลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับจริง

5.1.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100 พบว่าเกิดการดูดซับขึ้นบน Algi-HMS โดยใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 พบว่าเกิดการดูดซับขึ้นบน Algi-A-HMS โดยใช้เวลาประมาณ 9 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ และจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu พบว่า Algi สามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดย Algi-HMS และ Algi-A-HMS สามารถดูดซับได้ช้ากว่า โดยใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยผลการทดลองจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งหมดเข้ากันได้กับสมการจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เหมือน

5.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ TX100 พบว่า Algi-HMS สามารถดูดซับ TX100 ได้ดีที่สุด โดยมีความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมของแลงก์เมียร์ โดยคำนวณค่าความจุการดูดซับสูงสุดได้ 89.027 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ AB45 พบว่ามีเพียง Algi-A-HMS เท่านั้นที่สามารถดูดซับ AB45 ได้ โดยมีความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมแบบเส้นตรง โดยมีความจุการดูดซับสูงสุดจากการทดลอง 21.816 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ Cu พบว่า Algi สามารถดูดซับ Cu ได้มากที่สุด โดยผลการทดลองมีความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมของฟรุนด์ลิชและแบบเส้นตรง โดยมีความจุการดูดซับสูงสุดจากการทดลอง 113.326 มิลลิกรัมต่อกรัม โดย Algi-HMS และ Algi-A-HMS สามารถดูดซับ Cu ได้สูงสุด 14.079 และ 32.725 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีความเข้ากันได้กับสมการไอโซเทอมทุกชนิดยกเว้นไอโซเทอมแบบเส้นตรง

5.1.4 การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบทีละเท

จากการศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมในระบบทีละเท พบว่าการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS และการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมมีการดูดซับเพิ่มขึ้นจากการดูดซับในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยว เนื่องจาก AB45 และ TX100 อาจเกิดอันตรกิริยาต่อกันทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายขั้นขึ้น ในขณะที่การดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ยังมีค่าการดูดซับเท่าเดิมมลสารอื่นๆไม่มีการแย่งชิงพื้นที่ผิวในการดูดซับ และไม่เกิดอันตรกิริยาต่อมลสารอื่นๆ

5.1.5 การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวในระบบคอลัมน์

จากการศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวในระบบคอลัมน์พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดความยาวของคอลัมน์ตัวดูดซับจะทำให้ระยะเวลาในการเข้าสู่เบรกทรูเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงและกราฟเบรกทรูที่ได้สามารถเข้ากันได้กับสมการเบรกทรูของโรมัส

5.1.6 การศึกษาการออกแบบระบบคอลัมน์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม

จากการศึกษาการออกแบบระบบคอลัมน์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม พบว่าการใช้ข้อมูลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวในการออกแบบด้วยสมการเบรกทรู

ของโบฮาร์ทและอดัมส์สามารถทำได้ แต่อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ถ้าหากมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เช่น การมีอยู่ของมลสารอื่นๆที่มีอันตรกิริยาต่อมลสารที่ต้องการบำบัด เป็นต้น

5.1.7 การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ

จากการศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับพบว่าสามารถฟื้นฟู Algi-HMS ที่ดูดซับ TX100 และ Algi-A-HMS ที่ดูดซับ AB45 ได้โดยใช้สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำสัดส่วน 1:1 แต่กระบวนการฟื้นฟูอาจทำให้เกิดการพังทลายของพื้นผิวตัวดูดซับทำให้มลสารเข้าถึงพื้นผิวที่ยังไม่เกิดการดูดซับขึ้นได้ และสามารถฟื้นฟู Algi ที่ดูดซับ Cu ได้ โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1% โดยประสิทธิภาพหลังการฟื้นฟูตัวดูดซับจะลดลงเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการดูดซับแบบคัดเลือกของสีย้อมชนิดมีประจุ โลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิว โดยเฮกซะโกนอลเมโซพอร์สซิลิเกตที่มีการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวในแอลจีเนตชนิดเม็ด มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของมลสารในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสม
2. ศึกษาผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างแอซิดบลู 45 และ TX-100® ที่มีต่อกระบวนการดูดซับ
3. ศึกษาความคงตัวของตัวดูดซับแอลจีเนตในสารละลายชนิดต่างๆ เช่น แอลกอฮอล์
4. ศึกษาการประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับซิลิกาที่มีการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันชนิดอื่นๆที่มีการขึ้นรูปโดยใช้แอลจีเนต

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. 2545. การจัดทำแนวทางการออกแบบวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงระบบบำบัด น้ำเสีย
อุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานโดยระบบไม่ใช้ออกซิเจน: ข้อเสนอแนะ
แนวทางการออกแบบ เล่ม 1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร: สถาบันพัฒนา
เทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ.
- กาวิ ศรีกุลกิจ. 2544. หลักการย้อมสีสิ่งทอ. คัลเลอร์เวย์ 33: 14-17.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. นนทบุรี: (ม.ป.พ.).
- ฉมนรี สุขเกษม. 2556. ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวต่อการดูดซับ 17แอลฟา-เมธิลเทสโทสเตอโรน
โดยตัวกลางดูดซับซิลิเกตดัดแปร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนพร คำขจร. 2552. การกำจัดสีย้อมและสารลดแรงตึงผิวด้วยเศษแก้วเคลือบแมงกานีสออกไซด์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นริศรา โพธิ์มูล. 2545. การลดปริมาณตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่โดยใช้ถ่านกัมมันต์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. 2554. การพัฒนาสีย้อมผ้า และผ้าที่ต้านทานแบคทีเรีย [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: [http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&
id=1427&Itemid=176](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=1427&Itemid=176) [10 มีนาคม 2556]
- วิสาขา ภูจินดา. 2548. การใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย. วารสารการจัดการ
สิ่งแวดล้อม. 1(1): 1-15.
- ศูนย์วิชาการและเทคโนโลยีสิ่งทอพื้นบ้าน. 2556. สารช่วยย้อม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www.ist.cmu.ac.th/cotton/naturalColor_Assistance.php?subnav=3 [10
มีนาคม 2556]
- สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2545. ปัญหามลพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://teenet.tei.or.th/Knowledge/weave2.html> [10 มีนาคม 2556]

ภาษาอังกฤษ

- Anbia, M., and Salehi, S. 2012. Removal of acid dyes from aqueous media by adsorption onto amino-functionalized nanoporous silica SBA-3. Dyes and Pigments. 94: 1-9.
- Atia, A. A., Donia, A. M., and Al-amrani, W. A. 2009. Adsorption/desorption behavior of acid orange 10 on magnetic silica modified with amine groups. Chemical Engineering Journal. 150: 55-62.
- Börnack, H., and Schmidt, T. C. 2006. Amines. In T. Reemtsma & M. Jekel (eds.), Organic pollutants in the water cycle. Properties, occurrence, analysis and environmental relevance of polar compounds, pp. 181-208. Germany: Wiley-VCH.
- Carmen, Z., and Daniela, S. 2012. Textile organic dyes – characteristics, polluting effects and separation/elimination procedures from industrial effluents – a critical overview. In (eds.), Organic Pollutants Ten Years After the Stockholm Convention – Environmental and Analytical Update, pp. 55-86.
- Carrado, K. A. 2000. Synthetic organo- and polymer-clays: Preparation, characterization, and materials applications. Applied Clay Science. 17: 1-23.
- Chowdhury, Z. Z., Zain, S. M., Rashid, A. K., Rafique, R. F., and Khalid, K. 2013. Breakthrough curve analysis for column dynamics sorption of Mn(II) ion from wastewater by using mangostana garcinia peel-based granular-activated carbon. Journal of Chemistry. 2013: Article ID 959761.
- Clarke, E. A., and Anliker, R. 1980. Organic dyes and pigments. Handbook of Environmental Chemistry. 3(A): 181-215.
- Cooney, O. D. 1999. Adsorption Design for Wastewater Treatment. Florida: CRC Press.
- Cooper, P. 1995. Color in Dyehouse Effluent. West Yorkshire, United Kingdom: Society of Dyers and Colourists.
- Decottignies, M., Phalippou, J., and Zarzycki, J. 1978. Synthesis of glasses by hot-pressing of gels. Journal of Materials Science. 13: 2605-2615.
- Donia, A. M., Atia, A. A., Al-amrani, W. A., and El-Nahas, A. M. 2009. Effect of structural properties of acid dyes on their adsorption behavior from aqueous solutions by amine modified silica. Journal of Hazardous Materials. 161: 1544-1550.

- European Water Association. 2005. Efficient use of water in the textile finishing industry. Belgium: Official Publication of the European Water Association.
- Faust, S. D., and Aly, O. M. 1987. Adsorption Processes for Water Treatment. MA: Butterworths.
- Gaikwad, G. W., and Misal, S. A. 2010. Sorption studies of methylene blue on silica gel. International Journal of Chemical Engineering and Applications. 1(4): 342-345.
- Kennish, M. J. 1992. Ecology of Estuaries: Anthropogenic Effects. FL: CRC Press.
- Klaassen, C. D. 2007. Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 7th. New York: McGraw-Hill.
- Machida, M., Fotoohi, B., Amamo, Y., Ohba, T., Kanoh, H., and Mercier, L. 2012. Cadmium(II) adsorption using functional mesoporous silica and activated carbon. Journal of Hazardous Materials. 221-222: 220-227.
- McKay, G. 1996. Use of Adsorbents for the Removal of Pollutants from Wastewater. Florida: CRC Press.
- Metcalf, and Eddy. 2004. Wastewater Engineering – Treatment and Reuse. New York: McGraw-Hill.
- Muresanu, M., Reiss, A., Stefanescu, I., David, E., Parvulescu, V., Renard, G., and Hulea, V. 2008. Modified SBA-15 mesoporous silica for heavy metal ions remediation. Chemosphere. 73(9): 1499-504.
- Navarro, A. E., Musaev, H., Serrano, K., and Masud, M. E. 2014. Adsorption kinetics of cobalt (II) ions onto alginate beads from aqueous solutions. Earth Science & Climatic Change. 5(8): 223.
- Paisanjit, W. 2008. Selective Adsorption of Mixed Pollutants on Mesoporous Silicate. Master's Thesis Science Program in Environmental Management, Graduated School, Chulalongkorn University.
- Parfitt, G. D., and Rochester, C. H. 1983. Adsorption from solution at the solid/liquid interface. London: Academic Press.
- Punyapalukul, P., Suksomboon, K., Prarat, P., and Khaodhiar, S. 2013. Effect of surface functional groups and porous structures on adsorption and recovery of perfluorinated compounds by inorganic porous silicas. Separation Science and Technology. 48: 775-788.

- Punyapalukul, P., and Takizawa, S. 2004. Effect of organic grafting modification of hexagonal mesoporous silicate on haloacetic acids removal. Environmental Engineering Forum. 44: 247-256.
- Punyapalukul, P., and Takizawa, S. 2006. Selective adsorption of nonionic surfactant on hexagonal mesoporous silicates (HMSs) in the presence of ionic dyes. Water Research. 40: 3177-3184.
- Roy, S., Brandyopadhyay, S., and Chakravorty, D. 1996. Sol-gel synthesis of colloidal silica using cyclohexane. Journal of Materials Science Letter. 15: 1872-1874.
- Shahbazi, A., Younesi, H., and Badiei, A. 2012. Batch and fixed-bed column adsorption of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution onto functionalized SBA-15 mesoporous silica. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 9999: 1-12.
- Sigma-Aldrich. 2006. Acid blue 45 Material Safety Data Sheet [MSDS] [Online]. Available from: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/210692>
- Sigma-Aldrich. 2006. Copper ICP standard solution Fluka, for ICP. Material Safety Data Sheet [MSDS] [Online]. Available from: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/x100>
- Sigma-Aldrich. 2012. Triton™ X-100. Material Safety Data Sheet [MSDS] [Online]. Available from: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/x100>
- Sing, K. S. W. 1982. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to determination of surface area and porosity. Pure & Appl. Chem. 54: 2201-2218.
- Smith, M. B., and March, J. 2007. March's Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms, and Structure. New York: John Wiley & Son.
- Soltani, R. D. C., Khorramabadi, G. S., Khataee, A. R., and Jorfi, S. 2014. Silica nanopowders/alginate composite for adsorption of lead (II) ions in aqueous solutions. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 45(3): 973-980.
- Štandeker, S., Veronovski, A., Novak, Z., and Knez, Ž. 2011. Silica aerogels modified with mercapto functional groups used for Cu(II) and Hg(II) removal from aqueous solutions. Desalination. 269: 223-230.
- Takizawa, S., and Punyapalukul, P. 2008. Adsorption of organic contaminants by mesoporous silicate. Water Resources Research Progress. 177-203.

- Trgo, M., Medvidovic, N. V., and Peric, J. 2011. Application of mathematical empirical models to dynamic removal of lead on natural zeolite clinoptilolite in fixed bed column. Indian Journal of Chemical Technology. 18: 123-131.
- Wang, L., Wang, Z., Zhao, J., Yuan, Z., Yang, H., and Zhao, M. 1999. Preparation of mesoporous silica by co-precipitation in the presence of non-ionic surfactant. Materials Chemistry and Physics. 59: 171-174.
- Wang, Z., Xue, M., Huang, K., and Liu, Z. 2011. Textile dyeing wastewater treatment. Advances in Treating Textile Effluent. InTech: 91-116.
- Xue, X., and Li, F. 2008. Removal of Cu(II) from aqueous solution by adsorption onto functionalized SBA-16 mesoporous silica. Microporous and Mesoporous Materials. 116: 116-122.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

การสร้างกราฟมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์ความเข้มข้น TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. Triton X-100[®], Laboratory Grade บริษัท Sigma-Aldrich
3. คิวเวต
4. ขวดวัดปริมาตร
5. ปิเปต

การเตรียมสารละลาย Stock solution ของ TX100

1. ชั่งน้ำหนัก TX-100[®] 2 กรัม
2. เจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
3. เก็บ Stock solution ในขวดสีชา

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน TX100

1. ปิเปตสารละลาย TX100 จาก Stock solution ตามปริมาณในตาราง ก.1 ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (ก.1)
2. เจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.1 ปริมาตรของ Stock solution ของ TX100 ที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาตรของ Stock solution ที่ใช้ (มิลลิลิตร)
0	0
100	2.5
200	5.0
300	7.5
400	10.0

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (\text{ก.1})$$

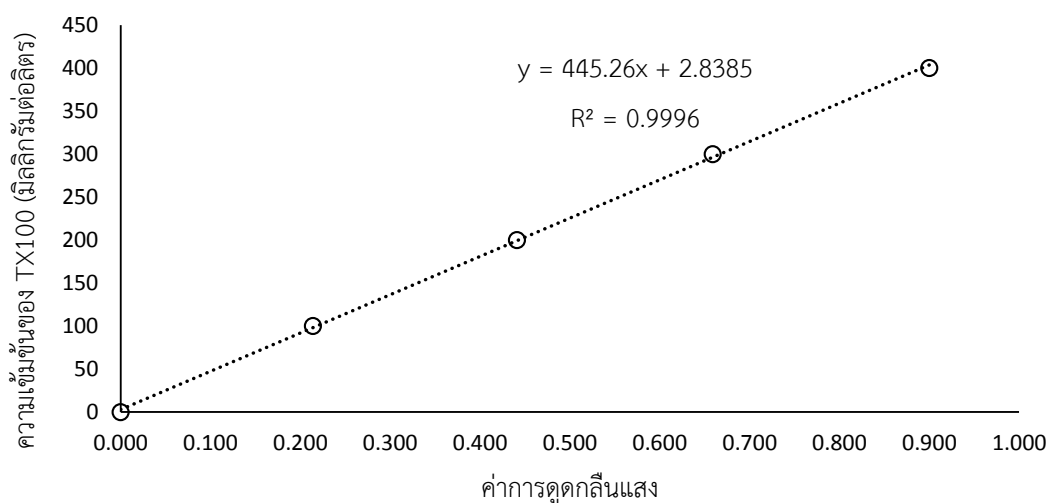
โดยที่ C_1 คือความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น C_2 คือความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ V_1 คือ ปริมาตรของสารตั้งต้นที่ใช้ และ V_2 คือปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

การสร้างกราฟมาตรฐาน TX100

1. นำสารละลายมาตรฐาน TX100 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่น เป็น Blank
2. สร้างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐาน TX100

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
100	0.214
200	0.441
300	0.659
400	0.900



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐาน TX100

การคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง TX100

1. นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank
2. นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาคำนวณด้วยสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน



การวิเคราะห์ความเข้มข้น AB45 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารเดี่ยวด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. Acid Blue 45, C.I. 63010 บริษัท Sigma-Aldrich
3. คิวเวต
4. ขวดวัดปริมาตร
5. ปิเปต

การเตรียมสารละลาย Stock solution ของ AB45

1. ชั่งน้ำหนัก Acid Blue 45 0.5 กรัม
2. เจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
3. เก็บ Stock solution ในขวดสีชา

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน AB45

1. ปิเปตสารละลาย AB45 จาก Stock solution ตามปริมาณในตาราง ก.2 ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (ก.1)
2. เจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.3 ปริมาตรของ Stock solution ของ AB45 ที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

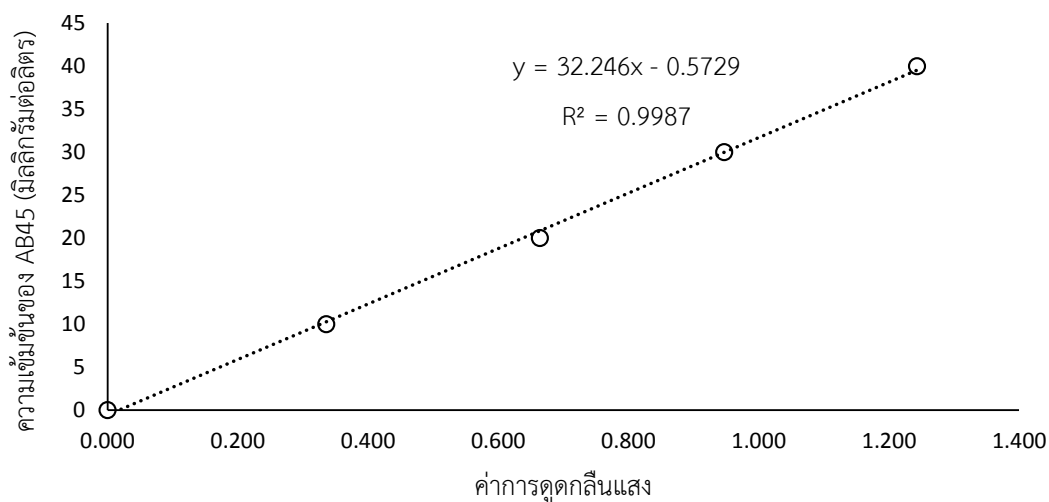
ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาตรของ Stock solution ที่ใช้ (มิลลิลิตร)
0	0
10	1
20	2
30	3
40	4

การสร้างกราฟมาตรฐาน AB45

1. นำสารละลายมาตรฐาน AB45 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank
2. สร้างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

ตารางที่ ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐาน AB45

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
10	0.336
20	0.644
30	0.947
40	1.243



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐาน AB45

การคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง AB45

1. นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank
2. นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาคำนวณด้วยสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน

การวิเคราะห์ความเข้มข้น TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมสารด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

อุปกรณ์และสารเคมี

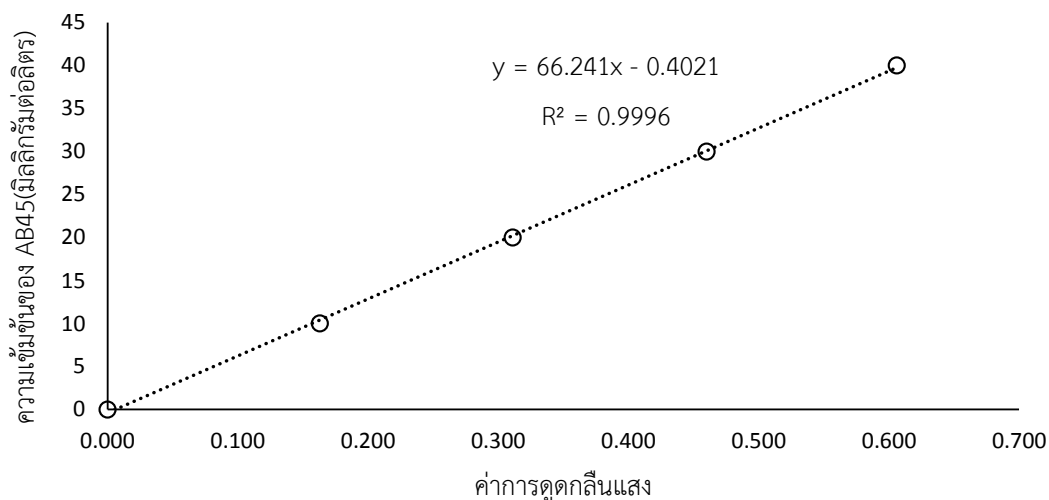
1. เครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. สารละลาย Stock solution ของ TX100
3. สารละลาย Stock solution ของ AB45
4. คิวเวต
5. ขวดวัดปริมาตร
6. ปิเปต

การวิเคราะห์ผลกระทบของ AB45 ต่อการคำนวณความเข้มข้นของ TX100

1. นำสารละลายมาตรฐาน AB45 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank
2. สร้างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

ตารางที่ ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐาน AB45

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
10	0.163
20	0.311
30	0.460
40	0.606



รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐาน AB45 ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

การคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

1. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของ AB45
2. นำความเข้มข้นของ AB45 ที่ได้มาคำนวณค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร โดยใช้สมการจากกราฟมาตรฐาน AB45 ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร
3. นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank
4. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตรที่วัดได้มาคำนวณด้วยสมการ (ก.2) เพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงจริงของ TX100

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้} - \text{ค่าการดูดกลืนแสงของ AB45} = \text{ค่าการดูดกลืนแสงจริงของ TX100} \quad (\text{ก.2})$$

5. นำค่าการดูดกลืนแสงจริงของ TX100 มาคำนวณด้วยสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานของ TX100



ภาคผนวก ข

การศึกษากระบวนการดูฉบับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-HMS			Algi-A-HMS			Algi		
เวลา (นาที)	Algi-HMS (ก.)	TX100 (มก./ล.)	เวลา (นาที)	Algi-A-HMS (ก.)	TX100 (มก./ล.)	เวลา (นาที)	Algi (ก.)	TX100 (มก./ล.)
0	-	200.013	0	-	194.746	0	-	192.074
3	0.1003	181.833	1.5	0.1000	191.689	3	0.0109	191.629
5	0.0998	166.694	3	0.0997	190.292	5	0.0103	191.183
10	0.1002	150.220	5	0.0992	189.402	10	0.0102	192.074
30	0.1003	137.307	8	0.1003	189.402	30	0.0125	192.074
60	0.1005	120.387	10	0.1010	189.848	60	0.0103	191.629
120	0.1001	86.547	60	0.0993	188.957			
240	0.1000	67.401	120	0.0998	186.731			
360	0.0999	57.605	190	0.1002	185.395			
480	0.0997	57.602	250	0.0998	186.731			
600	0.1006	48.700	380	0.0995	187.621			
			480	0.1005	185.840			

ตารางที่ ข.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-HMS			Algi-A-HMS			Algi		
เวลา (นาที)	Algi-HMS (ก.)	AB45 (มก./ล.)	เวลา (นาที)	Algi-A-HMS (ก.)	AB45 (มก./ล.)	เวลา (นาที)	Algi (ก.)	AB45 (มก./ล.)
0	-	19.451	0	-	19.645	0	-	19.968
10	0.2014	19.354	3	0.1008	18.580	3	0.0100	19.935
30	0.1990	19.322	5	0.1006	18.322	5	0.0100	19.903
60	0.2018	19.322	10	0.0995	16.902	10	0.0101	19.935
120	0.2004	19.354	30	0.1001	14.804	30	0.0114	19.935
1100	0.2003	19.354	60	0.0994	12.900	60	0.0096	19.903
			120	0.1010	9.996			
			240	0.0995	7.447			
			360	0.1006	5.866			
			540	0.1006	4.543			
			735	0.1001	4.413			
			960	0.1002	3.574			
			1140	0.0992	3.607			
			1270	0.1003	3.252			
			1440	0.1002	3.155			

ตารางที่ ข.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-HMS			Algi-A-HMS			Algi		
เวลา (นาที)	Algi-HMS (ก.)	Cu (มก./ล.)	เวลา (นาที)	Algi-A-HMS (ก.)	Cu (มก./ล.)	เวลา (นาที)	Algi (ก.)	Cu (มก./ล.)
0	-	10.523	0	-	10.650	0	-	10.826
3	0.0108	10.391	3.5	0.0104	10.372	3	0.0115	9.886
5	0.0107	10.356	5	0.0102	10.354	5	0.0118	9.285
8	0.0107	10.315	8	0.0103	10.330	9	0.0122	8.274
10	0.0108	10.173	10	0.0101	10.364	12.5	0.0120	7.913
30	0.0107	10.179	30	0.0099	10.134	30	0.0126	5.302
60	0.0108	10.026	120	0.0100	9.541	60	0.0124	3.454
120	0.0104	9.472	240	0.0100	9.318	120	0.0116	2.531
240	0.0104	9.124	360	0.0101	9.290	240	0.0110	1.637
360	0.0107	8.984	480	0.0104	9.049	360	0.0120	1.309
480	0.0103	8.927	750	0.0102	8.372	480	0.0111	1.317
600	0.0104	8.625	960	0.0102	8.036	600	0.0132	1.003
760	0.0105	8.324	1230	0.0104	7.875	740	0.0107	1.071
960	0.0109	8.329	1440	0.0106	7.700	960	0.0117	1.225
1280	0.0106	8.324				1200	0.0105	1.121
1440	0.0106	8.314				1440	0.0098	1.109

ตารางที่ ข.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-HMS			Algi-A-HMS			Algi		
Algi-HMS (ก.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	Algi-HMS (ก.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	Algi-HMS (ก.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)
0.1005	106.180	44.025	0.1008	50.202	55.379	0.0108	51.342	51.372
0.0998	199.906	106.139	0.0991	100.396	102.577	0.0107	98.600	98.569
0.0997	300.247	176.935	0.0999	200.199	200.979	0.0111	197.039	196.972
0.1006	399.867	265.987	0.1001	301.002	312.739	0.0113	305.924	306.061
			0.1003	401.204	411.142	0.0112	415.248	415.595
			0.0996	499.800	526.90952			

ตารางที่ ข.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-HMS			Algi-A-HMS			Algi		
Algi-HMS (ก.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	Algi-A-HMS (ก.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	Algi (ก.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)
0.1012	9.980	9.964	0.0997	5.019	1.251	0.0108	9.835	9.902
0.0997	19.999	19.935	0.1013	10.030	2.413	0.0104	19.486	19.486
0.0990	29.900	29.939	0.1014	20.085	5.801	0.0099	28.869	28.902
0.1010	40.002	39.943	0.0997	30.081	9.770	0.0106	38.419	38.453
			0.0997	40.052	14.062			
			0.0999	49.697	19.419			
			0.1003	60.176	24.873			
			0.0998	70.198	30.714			
			0.1000	80.218	36.587			

ตารางที่ ข.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi-HMS Algi-A-HMS และ Algi ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-HMS (น.)	Algi-HMS		Algi-A-HMS			Algi		
	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	Algi-A-HMS (น.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	Algi (น.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)
0.4000	20.046	2.809	0.5004	39.459	0.212	0.1294	39.459	1.581
0.2008	20.046	4.664	0.3001	39.459	0.251	0.0870	39.459	2.195
0.1512	20.046	6.046	0.1014	39.459	4.776	0.447	39.459	4.24
0.1001	20.046	8.092	0.0817	39.459	7.383	0.0220	39.459	9.33
0.0595	20.046	11.134	0.0416	39.459	18.417	0.0109	39.459	19.017
0.0398	20.046	13.063	0.0196	39.459	27.377	0.0046	39.459	29.35
0.0215	20.046	15.688	0.0118	39.459	31.736	0.0023	39.459	34.246
0.0109	20.046	17.843						
0.0507	39.793	25.517						

ตารางที่ ข.7 การศึกษาการดูดซับ TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-HMS ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-HMS (ก.)	TX100		AB45		Cu	
	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)
0.0996	66.956	15.982	16.592	0.340	-	-
0.1009	117.866	28.919	16.230	0.699	9.098	2.606
0.1005	225.966	62.580	16.784	0.721	9.353	2.841
0.1014	313.646	86.725	17.912	1.493	9.186	2.716
0.1022	415.768	116.107	17.686	1.292	8.844	2.520

ตารางที่ ๗.8 การศึกษาการดูดซับ AB45 ในน้ำเสียสังเคราะห์ผลสารผสมโดยใช้ Algi-A-HMS ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi-A-HMS (ก.)	TX100		AB45		Cu	
	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)
0.1017	212.293	196.682	8.795	1.128	8.925	0.403
0.1022	208.013	194.034	17.268	2.835	8.570	0.441
0.1002	247.365	222.779	26.320	4.381	9.186	0.642
0.1021	230.392	216.672	34.117	6.443	8.802	0.623

ตารางที่ ข.9 การศึกษาการดูดซับ Cu ในน้ำเสียสังเคราะห์ผลสารผสมโดยใช้ Algi ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Algi (ก.)	TX100		AB45		Cu	
	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)	C ₀ (มก./ล.)	C _e (มก./ล.)
0.0387	271.788	256.159	15.206	11.276	36.686	7.202
0.0193	271.788	273.532	15.206	11.759	36.686	11.464
0.0098	271.788	277.919	15.206	11.340	36.686	18.147
0.0035	271.788	283.299	15.206	11.114	36.686	27.945

ตารางที่ ข.10 การศึกษาการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ความยาว 10 และ 15.3 เซนติเมตร ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

10 เซนติเมตร (Algi-HMS 11.635 ก.)				15.3 เซนติเมตร (Algi-HMS 17.904 ก.)			
เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น (มก./ล.)
0	1.418	240	7.090	0	0.000	260	1.891
10	0.945	250	7.090	10	0.000	280	1.891
20	1.891	260	7.563	20	0.000	300	1.891
30	1.891	270	8.036	30	0.000	320	1.891
40	1.891	280	8.508	40	0.473	330	2.363
50	1.891	290	8.508	50	0.473	350	2.836
60	2.836	300	8.508	60	0.473	360	2.363
70	2.836	310	8.981	70	0.473	370	2.363
80	2.836	320	9.454	80	0.473	380	2.363
90	3.309	330	9.454	90	0.473	470	3.309
100	3.309			100	0.945	590	4.254
110	3.309			110	0.945	710	5.200
120	3.782			120	0.945	830	6.618
130	4.727			130	0.945	950	7.563
140	5.200			140	1.418	1070	8.508
150	5.200			150	1.418	1220	8.981
160	5.284			160	1.418	1400	9.454
170	5.487			170	1.418		
180	5.487			180	1.418		
190	5.672			190	1.418		
200	5.672			200	1.418		
210	6.145			210	1.418		
220	6.145			220	1.418		
230	6.618			230	1.418		

ตารางที่ ข.11 การศึกษาการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ความยาว 20 เซนติเมตร
ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

20 เซนติเมตร (Algi-HMS 23.101 ก.)			
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มก./ล.)
0	0.945	1150	2.836
10	0.945	1210	2.836
20	0.945	1270	3.309
30	0.945	1320	3.309
40	0.945	1380	3.782
50	1.418	1440	3.782
60	1.418	1500	4.254
70	1.418	1560	4.727
90	1.418	1620	4.727
120	1.418	1680	5.200
150	1.418	1740	5.200
180	1.891	1800	5.672
210	1.891	1860	5.672
240	1.891	1920	6.145
300	1.891	1980	6.618
360	2.363	2100	7.090
420	2.363	2220	7.563
480	2.363		
540	2.363		
630	2.363		
720	2.836		
840	2.836		
960	2.836		
1090	2.836		

ตารางที่ ข.12 การศึกษาการดูดซับ AB45 โดยใช้ Algi-A-HMS ในระบบคอลัมน์ความยาว 10 15.3 และ 20 เซนติเมตร ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

10 เซนติเมตร (Algi-A-HMS 11.297 ก.)		15.3 เซนติเมตร (Algi-A-HMS 18.200 ก.)		20 เซนติเมตร (Algi-A-HMS 24.760 ก.)			
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มก./ล.)
0	0.096	0	0.064	0	0.032	280	0.515
5	0.096	15	0.064	20	0.032	290	0.515
10	0.096	30	0.064	40	0.032	300	0.548
20	0.096	40	0.064	60	0.032	310	0.548
30	0.096	50	0.064	70	0.064		
45	0.160	60	0.064	80	0.064		
60	0.257	75	0.064	100	0.064		
70	0.321	90	0.096	110	0.064		
80	0.385	105	0.128	120	0.097		
100	0.481	113	0.160	130	0.129		
120	0.609	120	0.192	140	0.161		
150	0.673	130	0.257	150	0.193		
180	0.738	140	0.289	160	0.226		
		150	0.321	170	0.258		
		160	0.353	180	0.290		
		170	0.417	190	0.322		
		180	0.481	200	0.354		
		190	0.513	210	0.387		
		200	0.545	220	0.419		
		210	0.609	230	0.451		
		220	0.673	240	0.451		
		230	0.705	250	0.483		
				260	0.483		
				270	0.515		

ตารางที่ ข.13 การศึกษาการดูดซับ Cu โดยใช้ Algi ในระบบคอลัมน์ความยาว 5 10 และ 15.3 เซนติเมตร
ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

5 เซนติเมตร (Algi-HMS 0.307 ก.)		10 เซนติเมตร (Algi-HMS 0.623 ก.)				15.3 เซนติเมตร (Algi-HMS 0.937 ก.)	
เวลา (นาท.)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาท.)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาท.)	ความเข้มข้น (มก./ล.)	เวลา (นาท.)	ความเข้มข้น (มก./ล.)
0	0.057	0	0.014	1620	0.225	0	0.009
60	0.141	30	0.008	1800	0.243	120	0.010
120	0.203	60	0.013	1920	0.257	240	0.011
180	0.252	90	0.011	2040	0.299	360	0.012
240	0.318	120	0.008	2160	0.343	480	0.021
300	0.375	150	0.011			600	0.030
360	0.450	180	0.019			720	0.031
420	0.505	210	0.015			840	0.040
480	0.578	240	0.021			960	0.049
540	0.656	270	0.028			1080	0.056
600	0.714	300	0.026			1200	0.067
660	0.818	330	0.030			1320	0.090
720	0.871	360	0.023			1440	0.102
840	0.985	390	0.019			1560	0.107
960	1.095	420	0.032			1680	0.109
1080	1.273	480	0.041			1800	0.126
1200	1.407	540	0.046			1920	0.127
		600	0.061			2040	0.137
		720	0.101			2160	0.157
		840	0.124				
		960	0.138				
		1080	0.151				
		1260	0.160				
		1440	0.184				

ตารางที่ ข.14 การศึกษาการดูดซับ Cu ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมสารผสมโดยใช้ Algi 0.528 กรัม ในระบบคอลัมน์ความยาว 8.3 เซนติเมตร ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น TX100 (มก./ล.)	ความเข้มข้น AB45 (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cu (มก./ล.)
0	-	-	0.018
10	57.668	7.100	-
30	104.937	12.216	-
60	142.989	16.726	0.031
90	162.605	18.676	-
120	171.823	19.284	0.041
150	178.204	19.444	-
188	184.113	19.476	0.059
210	185.767	19.444	-
240	189.076	19.380	0.074
300	190.258	19.348	0.098
360	190.494	19.380	0.137
420	192.621	19.284	0.160
480	193.330	19.380	0.194
540	197.584	19.252	0.232
600	195.694	19.188	0.253
660	198.293	19.220	0.304
720	197.584	19.252	0.330
780	196.639	19.252	0.364
840	196.166	19.188	0.407
900	197.112	19.124	0.453
960	196.403	19.156	0.512
1000	195.930	19.220	0.560

ตารางที่ ข.15 การศึกษาการดูดซับ TX100 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-HMS 15.761 กรัม
ในระบบคอลัมน์ความยาว 13.3 เซนติเมตร ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น TX100 (มก./ล.)	ความเข้มข้น AB45 (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cu (มก./ล.)
0	0.000	0.032	0.000
30	0.000	0.064	0.000
60	0.000	7.132	0.000
90	0.000	14.135	0.000
120	0.000	17.909	0.000
150	0.000	19.828	0.000
180	0.000	20.051	0.000
210	0.473	20.083	0.000
240	0.945	20.147	0.000
270	1.418	20.147	0.000
300	1.891	20.147	0.000
330	1.418	20.147	0.000
360	1.891	20.147	0.000
390	2.127	20.115	0.000
420	2.836	20.147	0.000
450	2.600	20.115	0.000
480	3.072	20.115	0.000
510	3.782	20.147	0.000
540	3.782	20.147	0.000
570	4.254	20.147	0.000
600	4.727	20.147	0.000
630	5.200	20.147	0.000
660	5.436	20.115	0.000
720	6.145	20.147	0.000
780	6.381	20.115	0.000

ตารางที่ ข.16 การศึกษาการดูดซับ AB45 ในน้ำเสียสังเคราะห์มลสารผสมโดยใช้ Algi-A-HMS 37.345 กรัม ในระบบคอลัมน์ความยาว 30.3 เซนติเมตร ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น TX100 (มก./ล.)	ความเข้มข้น AB45 (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cu (มก./ล.)
0	0.000	0.000	0.000
30	0.000	0.000	0.000
60	0.000	0.000	0.000
120	0.000	0.000	0.000
180	0.000	0.000	0.000
240	0.000	0.000	0.000
300	0.000	0.000	0.000
360	0.000	0.000	0.000
420	0.000	0.000	0.000
540	0.000	0.032	0.000
660	0.000	0.064	0.000
780	0.473	0.128	0.000
840	0.000	0.192	0.000
900	0.473	0.256	0.000
960	0.000	0.320	0.000
1020	0.473	0.384	0.000
1080	0.000	0.448	0.000
1120	0.473	0.512	0.000
1210	0.473	0.704	0.000
1260	0.945	0.863	0.000
1320	0.000	1.247	0.000
1380	0.473	1.663	0.000
1440	0.000	2.175	0.000
1540	0.473	3.518	0.000
1600	0.945	4.253	0.000

ตารางที่ ข.17 การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ Algi-HMS จากการดูดซับ TX100 ในระบบที่ละเท

	Algi-HMS (ก.)	การดูดซับครั้งที่ 1		การคายซับ		ความจุการดูดซับครั้งที่ 2	
		C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)	C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)	C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)
ตัวอย่างที่ 1	0.1016	203.651	94.117	0.000	124.394	202.315	82.985
ตัวอย่างที่ 2	0.1000	203.651	94.562	0.000	123.059	202.315	85.212
ตัวอย่างที่ 3	0.1016	203.651	94.117	0.000	123.059	202.315	86.993

ตารางที่ ข.18 การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ Algi-A-HMS จากการดูดซับ AB45 ในระบบที่ละเท

	Algi-A-HMS (ก.)	การดูดซับครั้งที่ 1		การคายซับ		ความจุการดูดซับครั้งที่ 2	
		C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)	C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)	C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)
ตัวอย่างที่ 1	0.100	10.277	2.771	0.000	1.707	10.277	3.640
ตัวอย่างที่ 2	0.100	10.277	2.674	0.000	1.675	10.277	3.544
ตัวอย่างที่ 3	0.101	10.277	2.771	0.000	1.804	10.277	3.608

ตารางที่ ข.19 การศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ Algi จากการดูดซับ Cu ในระบบที่ละเท

	Algi (ก.)	การดูดซับครั้งที่ 1		การคายซับ		ความจุการดูดซับครั้งที่ 2	
		C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)	C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)	C_0 (มก./ล.)	C_e (มก./ล.)
ตัวอย่างที่ 1	0.009	9.858	1.357	0.000	8.090	9.800	2.662
ตัวอย่างที่ 2	0.008	9.858	1.413	0.000	8.170	9.800	2.383
ตัวอย่างที่ 3	0.008	9.858	1.406	0.000	8.158	9.800	2.325

ตารางที่ ข.20 การศึกษาการดูดซับ TX100 โดยใช้ Algi-HMS ในระบบคอลัมน์ความยาว 10 เซนติเมตร อัตราการไหล 0.93 และ 2.05 มิลลิลิตรต่อนาที ในสภาวะพีเอช 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น TX100 (มก./ล.)	ความเข้มข้น AB45 (มก./ล.)
0	22.203	1.418
3	22.511	-
5	22.511	-
10	22.742	0.945
15	22.898	-
20	-	1.891
22	23.214	-
30	23.532	1.891
40	23.791	1.891
50	23.791	1.891
60	23.983	2.836
70	24.545	2.836
80	24.720	2.836
90	25.554	3.309
100	26.447	3.309
110	26.447	3.309
120	26.447	3.782
130	27.337	4.727
140	27.337	5.200
150	-	5.200
160	-	5.284
170	-	5.487
180	-	5.487

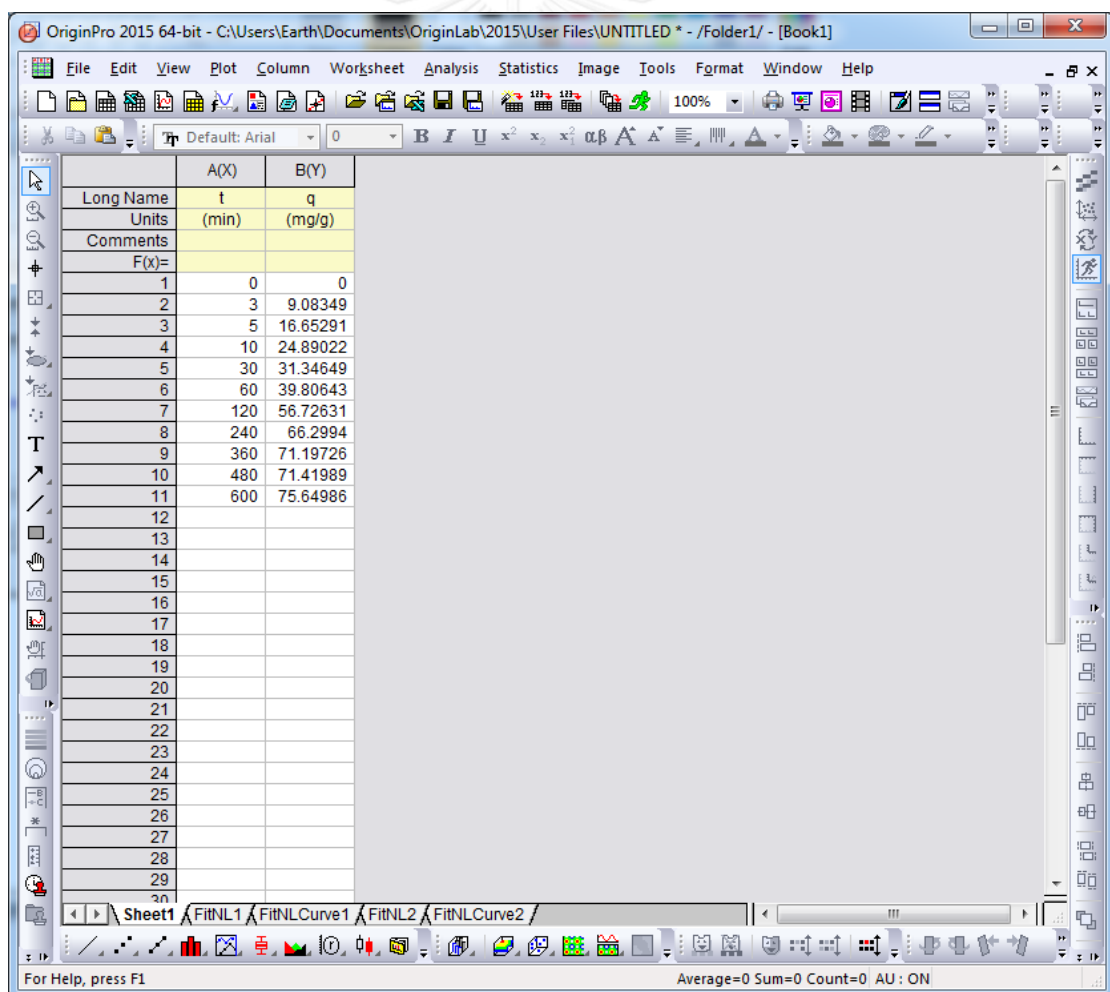
ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ความเข้ากันของผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

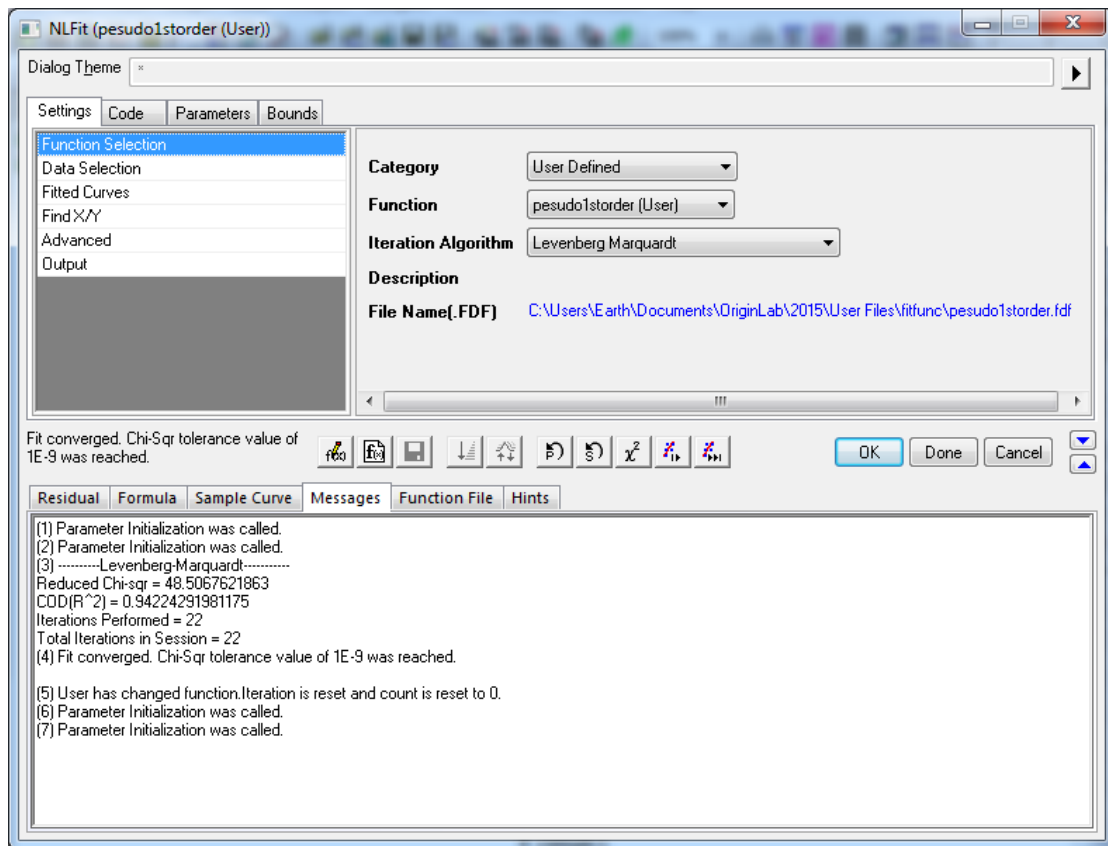
ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม OriginPro 2015

- 1) ทำการป้อนข้อมูลผลการทดลองลงในตารางหน้าแรกของโปรแกรม OriginPro 2015 ดังรูปที่ ค.1
- 2) เปิดหน้าต่างการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการโดยไปที่เมนู Analysis > Fitting > Nonlinear Curve fit > Open Dialog...
- 3) เลือกใช้งานสมการที่ต้องใช้จำนวนในช่อง Function และอัลกอริธึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ในช่อง Iteration Algorithm ดังรูปที่ ค.2
- 4) กด Fit until converged และกด OK
- 5) โปรแกรมทำการคำนวณและแสดงผลดังรูปที่ ค.3

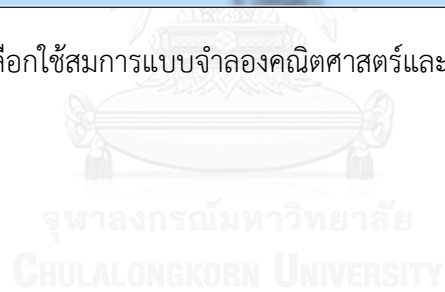


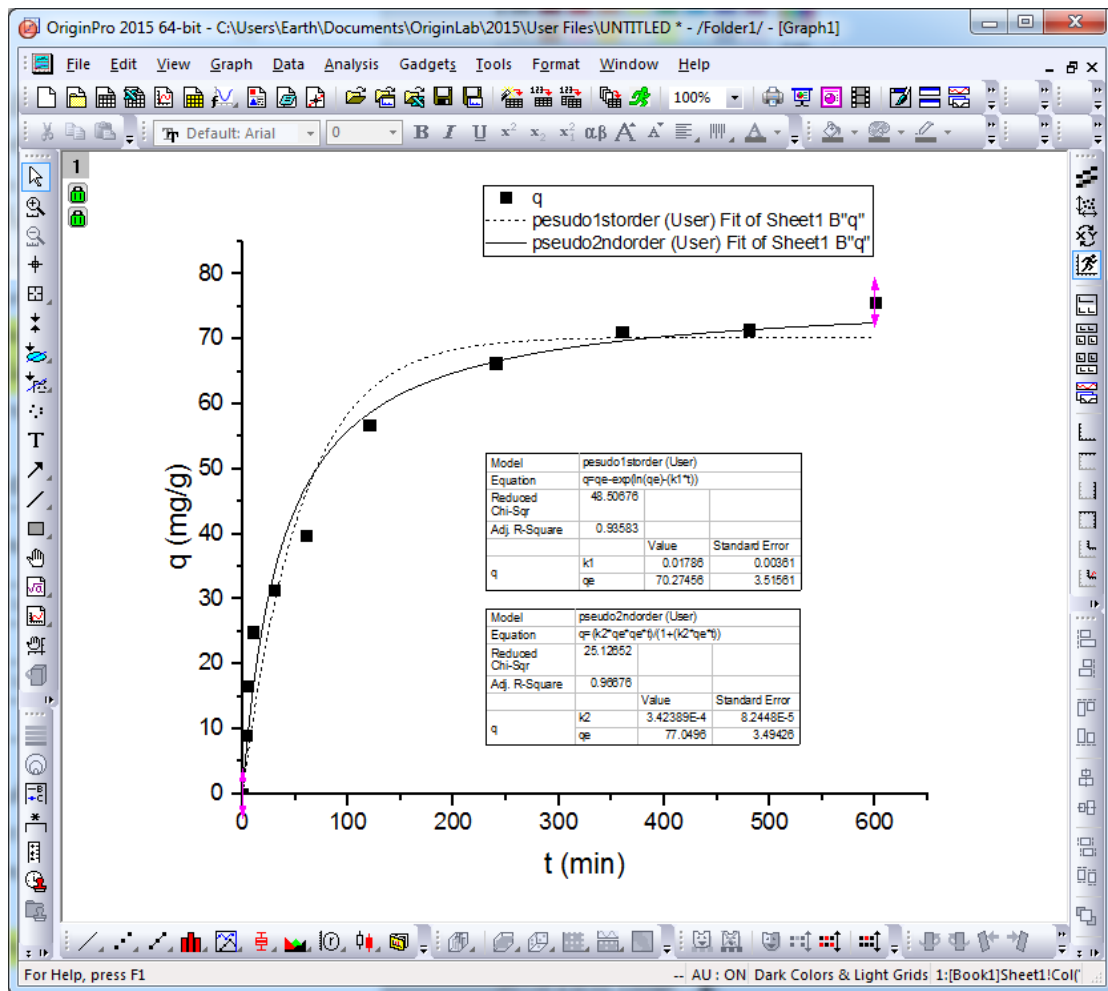
	A(X)	B(Y)
Long Name	t	q
Units	(min)	(mg/g)
Comments		
F(x)=		
1	0	0
2	3	9.08349
3	5	16.65291
4	10	24.89022
5	30	31.34649
6	60	39.80643
7	120	56.72631
8	240	66.2994
9	360	71.19726
10	480	71.41989
11	600	75.64986
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		

รูปที่ ค.1 การนำเข้าข้อมูลผลการทดลองเพื่อใช้ในการคำนวณ



รูปที่ ค.2 การเลือกใช้สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์และอัลกอริทึมในการคำนวณ





รูปที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้การถดถอยเชิงเส้น

การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการเบรกทรูของโธมัสกับผลการทดลองการดูดซับ AB45 ในระบบคอลัมน์ความยาว 15.3 เซนติเมตร

พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่คอลัมน์ $C_0 = 20$ มก./ล.

อัตราการไหลของสารละลาย $Q = 0.00093$ ล./นาที

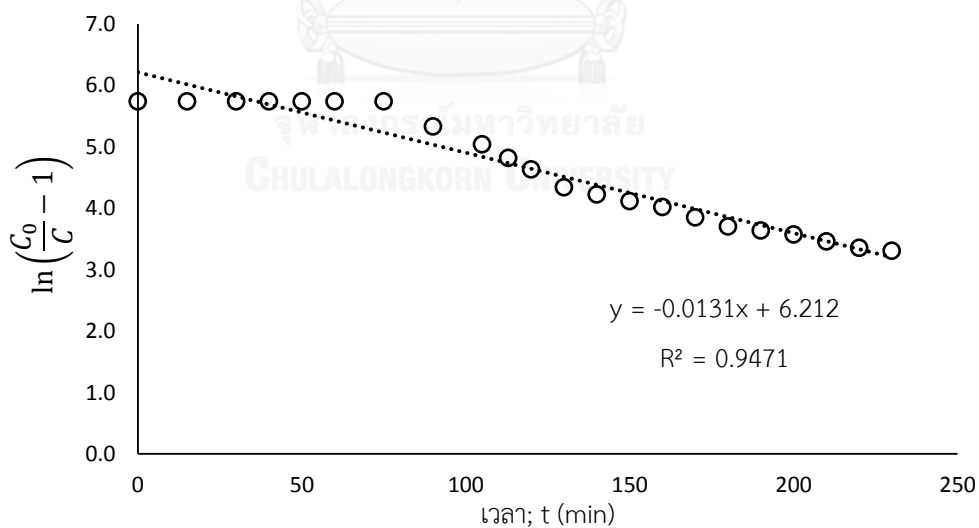
มวลของตัวดูดซับ $m = 18.2$ กรัม

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

1. นำผลการทดลองมาคำนวณดังตารางที่ ค.1
2. สร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของ t และ $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ ดังรูปที่ ค.4
3. วิเคราะห์ความเข้ากันได้ของสมการเบรกทรูของโธมัสกับผลการทดลองโดยใช้ค่า R^2
4. คำนวณค่าคงที่ของสมการเบรกทรูของโธมัสจากสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณผลการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

t (นาที)	C (มก./ล.)	$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$	t (นาที)	C (มก./ล.)	$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$
0	0.064	5.739	130	0.257	4.343
15	0.064	5.739	140	0.289	4.224
30	0.064	5.739	150	0.321	4.117
40	0.064	5.739	160	0.353	4.020
50	0.064	5.739	170	0.417	3.850
60	0.064	5.739	180	0.481	3.703
75	0.064	5.739	190	0.513	3.637
90	0.096	5.332	200	0.545	3.575
105	0.128	5.043	210	0.609	3.460
113	0.160	4.818	220	0.673	3.357
120	0.192	4.634	230	0.705	3.309



รูปที่ ค.4 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของ t และ $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$

การคำนวณค่าคงที่ของสมการเบรกทรูของโรมัส

ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของ t และ $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ จากการทดลองแสดงดังสมการ (ค.1)

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = 6.212 - 0.0131t \quad (\text{ค.1})$$

สามารถคำนวณค่าความจุการดูดซับ q ได้ดังนี้

$$k_{Th}C_0 = 0.0131$$

$$k_{Th} = \frac{0.0131}{C_0}$$

$$k_{Th} = \frac{0.0131}{20}$$

$$k_{Th} = 0.000655 \text{ ล./มก.}\cdot\text{นาที}$$

สามารถคำนวณค่าคงที่อัตราของโรมัส k_{Th} ได้ดังนี้

$$\frac{k_{Th}qm}{Q} = 6.212$$

$$q = \frac{6.212}{k_{Th}m} \times Q$$

$$q = \frac{6.212}{0.000655 \times 18.2} \times 0.00093$$

$$q = 0.485 \text{ มก./ก.}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีรวัฒน์ หาญอมรรุ่งเรือง สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 14 ณ โรงแรมโลตัสปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 27 - 29 พฤษภาคม 2558

