

การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางที่มีรูพรุน

นางสาวพัชรินทร์ ทองดอนเอ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

ADSORPTION OF CUTTING FLUID ONTO POROUS CROSSLINKED CHITOSAN BEAD

Miss Patcharin Thongdon-a

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางที่มีรูพรุน
โดย	นางสาวพัชรินทร์ ทองดอนเอ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุสัท)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรรัตน์ ปัตตประกร)

พัชรินทร์ ทองคอนเอ : การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางที่มีรูพรุน
(ADSORPTION OF CUTTING FLUID ONTO POROUS CROSSLINKED CHITOSAN
BEAD) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ, 109 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดไคโทซาน เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน โดยทำการทดลองแบบแบดจ์ และศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ คือ ความเป็นกรด-เบส ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงาน อุณหภูมิ และเวลาในการดูดซับ จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานสูงขึ้น และความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นได้ดีในภาวะกรด ซึ่งค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดไคโทซาน (CB) และเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) มีค่าเท่ากับ 4 และค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการดูดซับบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีค่าเท่ากับ 3 ไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์ โดยค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน (q_{max}) บนเม็ดไคโทซาน เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุนมีค่าเท่ากับ 223.5 1906.4 1254.1 และ 2997.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลของจลพลศาสตร์พบว่า การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบเทียมและเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เนื่องจากค่าเอนทัลปีมีค่าเป็นบวก นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์มีค่าเป็นลบแสดงว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง สำหรับลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET SEM FTIR และ Zeta potential

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ นิสิต.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2555.....

5272450123: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: ADSORPTION/CUTTING FLUIDS/CHITOSAN BEAD/POROUS CHITOSAN BEAD

PATCHARIN THONGDON-A: ADSORPTION OF CUTTING FLUID ONTO POROUS CROSSLINKED CHITOSAN BEAD. ADVISOR: ASSOC. PROF. NUTTAYA PONGSATHBODEE, Ph.D., 109 pp.

The purpose of this work is to study adsorption capacity of cutting fluid onto chitosan beads, porous chitosan beads, crosslinked chitosan beads and porous crosslinked chitosan beads. The effect of pH, adsorbent dosage, initial concentration of cutting fluid, temperature and contact time on adsorption capacity were investigated. From the experimental results, it was found that the adsorption capacity increased with initial cutting fluid concentration. Higher adsorption capacity was obtained when the operating condition was in an acidic. At acidic condition, more amount of amine groups in chitosan is protonated and lead to electrostatic interaction between negative charge of cutting fluids and the positive surface charge of adsorbents. The evaluated maximum monolayer adsorption capacities for chitosan beads, porous chitosan beads, crosslinked chitosan beads and porous crosslinked chitosan beads were 223.5, 1906.4, 1254.1 and 2997.9 mg/g, respectively. The equilibrium adsorption data were well described by the Langmuir isotherm model. The kinetic data fits to pseudo-second-order kinetic model and enthalpy (ΔH°), Gibbs free energy (ΔG°) from thermodynamic data elucidated that the adsorption is a spontaneous and endothermic process. The adsorbents were characterized by BET, SEM, FT-IR and Zeta potential.

Department:..... Chemical Technolgy Student's signature.....
 Field of Study:..... Chemical Technolgy Advisor's signature.....
 Academic Year:.....2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยมาโดยตลอด รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความรู้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่วิเคราะห์ผลการวิจัยและความช่วยเหลือแนะนำข้อมูลต่างๆเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ต้องกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ให้ความรัก ความเอาใจใส่ และสนับสนุนทั้งด้านกำลังใจและทุนทรัพย์เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ของไหลตัดชิ้นงาน (Cutting Fluids).....	4
2.2 องค์ประกอบของของไหลตัดชิ้นงาน.....	4
2.2.1 น้ำมันแร่.....	4
2.2.2 สารเติมแต่ง.....	5
2.3 ประเภทของของไหลตัดชิ้นงาน.....	7
2.3.1 น้ำมันโซ่ตรง (Straight oil).....	7
2.3.2 น้ำมันที่ละลายน้ำ (Soluble oil).....	7
2.3.3 น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetics oil).....	7
2.3.4 น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ (Semi-synthetics oil).....	8
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	8
2.4.1 ประเภทการดูดซับ.....	8
2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption).....	9
2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption).....	9

	หน้า
2.4.1.3 การดูดซับด้วยประจุ (Ionic Adsorption).....	9
2.4.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic adsorption).....	10
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	12
2.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ.....	12
2.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ.....	12
2.5.3 ความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนน้ำหรือสารละลาย.....	12
2.5.4 ค่าความเป็นกรด-เบส (pH).....	13
2.5.5 อุณหภูมิ.....	13
2.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium).....	13
2.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm).....	14
2.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ ฟรุนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm).....	16
2.7 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Kinetics).....	17
2.7.1 อันดับของปฏิกิริยา (Order of reaction).....	17
2.7.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic models of adsorption).....	24
2.8 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	25
2.9 ไคตินและไคโทซาน.....	26
2.9.1 ไคติน.....	27
2.9.2 ไคโทซาน.....	28
2.9.3 ประโยชน์ของไคตินและไคโทซาน.....	28
2.9.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของไคโทซาน โดยการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย หรือการเชื่อมขวาง.....	31
2.9.5 สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง.....	32
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	41
3.1 เครื่องมือและสารเคมี.....	41
3.1.1 เครื่องมือ.....	41
3.1.1 สารเคมี.....	41

	หน้า
3.2 การเตรียมตัวดูดซับ.....	42
3.2.1 เม็ดโคโทซาน.....	42
3.2.2 เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน.....	42
3.2.3 เม็ดโคโทซานมีรูพรุนและเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวาง ด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	43
3.3 วิธีทดสอบความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ.....	43
3.4 ตัวแปรที่ศึกษา.....	45
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	47
4.1 ลักษณะและสมบัติกายภาพของตัวดูดซับ.....	47
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโคโทซานและเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวาง ด้วยอีพิกลอโรไฮดรินก่อนการดูดซับ.....	48
4.3 สภาพละลายได้ (Solubility).....	52
4.4 ความเป็นกรด-เบสของของไหลตัดชิ้นงาน.....	53
4.5 ปริมาณตัวดูดซับ.....	56
4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับ.....	59
4.7 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับของ ไหลตัดชิ้นงาน.....	63
4.8 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	65
4.9 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงาน และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ.....	67
4.10 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน.....	71
4.10.1 ค่าการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion).....	72
4.11 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับ.....	75
4.12 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	77
4.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วย เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางกับเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุนที่ค่าความ เป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และ 4.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	80

	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก.....	90
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	102
ภาคผนวก ง.....	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและกายภาพ.....	10
2.2 รูปแบบของสมการอันดับจากการอินทิเกรต.....	22
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ.....	49
4.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับ.....	51
4.3 สภาพละลายได้ (Solubility).....	52
4.4 ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน.....	67
4.5 ค่าคงที่อัตราการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบ ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม.....	72
4.6 ค่าคงที่อัตราการแพร่ (k_p) ของเม็ดโคโทซาน เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน เม็ดโคโทซาน เชื่อมขวางและเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางที่มีรูพรุน.....	74
4.7 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน.....	77
4.8 ค่าความร้อนของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน.....	78
ง.1 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโคโทซาน (CB) และเม็ดโคโทซาน มีรูพรุน (pCB) ก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน.....	106
ง.2 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วย อิพิคลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุน (pECB) ก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน.....	107
ง.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานต่างๆ.....	108

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ.....	11
2.2 รูปแบบของกราฟสมการเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอมจากสมการ (2.3).....	15
2.3 รูปแบบของกราฟสมการเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอมจากสมการ (2.4).....	15
2.4 รูปแบบของกราฟสมการเส้นตรงของฟรุนดลิชไอโซเทอม.....	16
2.5 กราฟค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) จากสมการอาร์เรเนียส.....	23
2.6 แสดงโครงสร้างของไคติน.....	27
2.7 แสดงโครงสร้างของไคโทซาน.....	28
2.8 การเกิดโครงร่างตาข่ายระหว่างไคโทซานกับสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ.....	33
4.1 เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	47
4.2 เม็ดไคโทซานและเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน.....	48
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซานก่อนและหลังการเชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดริน.....	48
4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนการดูดซับ.....	50
4.5 ผลของความเป็นกรด-เบสต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ.....	54
4.6 ค่าศักย์ซีต้าของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานและตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดที่ภาวะความเป็นกรด-เบสต่างๆ.....	55
4.7 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน.....	58
4.8 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับ.....	58
4.9 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซานและเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน.....	61
4.10 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	62
4.11 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของเม็ดไคโทซานและเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน.....	63
4.12 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	64

รูปที่	หน้า
4.13 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานบนตัวคูดซับ.....	70
4.14 แสดงอัตราการแพร่ภายในอนุภาคของตัวคูดซับ.....	74
4.15 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการคูดซับ.....	76
4.16 ความสามารถในการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานของเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางกับ เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุนที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และ 4.....	79
ก.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโคโทซานที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับอพิคลอโรไฮดริน....	90
ก.2 Calibration Curve ของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง UV-Vis สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	92
ข.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมในการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานและเม็ดโคโทซานมีรูพรุน.....	94
ข.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมในการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคลอโรไฮดรินและเม็ดโคโทซานเชื่อมขวาง ด้วยอพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	94
ข.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมในการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานและเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน.....	95
ข.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมในการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคลอโรไฮดรินและเม็ดโคโทซาน เชื่อมขวางด้วยอพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	95
ข.5 อัตราการแพร่ภายในอนุภาคของของการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานและเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน.....	96
ข.6 อัตราการแพร่ภายในอนุภาคของของการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิคลอโรไฮดริน และเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวาง ด้วยอพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	96
ข.7 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน.....	97
ข.8 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวาง ด้วยอพิคลอโรไฮดริน และเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วย อพิคลอโรไฮดรินและมี รูพรุน.....	97

รูปที่	หน้า
ข.9 ฟรุณคลิซไอโซโทมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน และเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน.....	98
ข.10 ฟรุณคลิซไอโซโทมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวาง ด้วยอพิกลอโรไฮดรินและเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วย อพิกลอโรไฮดรินและ มีรูพรุน	98
ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/T$ กับ $\ln K_c$ ของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน บนเม็ดโคโทซานและเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน	99
ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/T$ กับ $\ln K_c$ ของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิกลอโรไฮดรินและเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวาง ด้วยอพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	99
ข.13 ความเป็นกรด-เบสต่อความสามารถการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานและเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน.....	100
ข.14 ความเป็นกรด-เบสต่อความสามารถการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิกลอโรไฮดรินและเม็ดโคโทซานที่ เชื่อมขวางด้วยอพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน.....	100
ข.15 ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของเม็ดโคโทซาน และเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน.....	101
ข.16 ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของเม็ดโคโทซานเชื่อมขวาง และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุน.....	101
ค.1 แสดงปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิกลอโรไฮดริน.....	102
ค.2 แสดงปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิกลอโรไฮดริน.....	103
ค.3 แสดงแลงเมียร์ไอโซโทมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิกลอโรไฮดริน.....	104
ค.4 แสดงฟรุณคลิซไอโซโทมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน ที่เชื่อมขวางด้วยอพิกลอโรไฮดริน.....	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ที่มีการขึ้นรูปโลหะ เช่น งานตัด เจาะกลึง และเจียร โลหะเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ มักต้องใช้ของไหลตัดชิ้นงานร่วมด้วยเสมอเพื่อระบายความร้อนและลดการเสียดสีที่เกิดขึ้นจากการตัดกลึงและช่วยในการหล่อลื่นวัสดุชิ้นงานกับเครื่องมือตัด เพื่อให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เครื่องมือตัดมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ช่วยทำให้ขอบหน้าของชิ้นงานโลหะที่ตัดมีความเรียบเนียน และช่วยพาเศษผงโลหะที่เกิดขึ้นจากการตัดให้หลุดออกจากผิวหน้าของชิ้นงานได้ง่ายขึ้น

ของไหลตัดชิ้นงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทโดยจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี และปริมาณของน้ำมันแร่หรือน้ำมันปิโตรเลียม [1] คือ น้ำมันโซ่ตรง (Straight Oil) น้ำมันที่ละลายน้ำ (Soluble Oil) น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Solution) น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ (Semisynthetic Solution) ของไหลตัดชิ้นงานที่นิยมใช้กันแพร่หลาย คือ ของไหลตัดชิ้นงานชนิดกึ่งสังเคราะห์ (Semi-synthetic) เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถใช้กับงานที่มีปริมาณความร้อนมากได้ ของไหลตัดชิ้นงานมีองค์ประกอบหลักได้แก่ น้ำมันแร่ สารเพิ่มคุณภาพ (Additives) เช่น สารป้องกันการกัดกร่อน สารป้องกันสนิม สารป้องกันการเกิดฟอง สารป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และหลังจากผ่านการใช้งานของไหลตัดชิ้นงานจะได้รับการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมในการทำงาน เช่น เศษโลหะ น้ำมัน น้ำยาทำความสะอาด เป็นต้น รวมถึงความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีจะทำให้สมบัติของสารเคมีในของไหลตัดชิ้นงานเปลี่ยนไปและสูญเสียประสิทธิภาพในการใช้งาน ซึ่งของไหลตัดชิ้นงานชนิดกึ่งสังเคราะห์การใช้งานต้องเจือจางด้วยน้ำก่อนการใช้งานจึงเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อของไหลตัดชิ้นงานไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไปและต้องมีการเปลี่ยนถ่ายของไหลตัดชิ้นงานใหม่ ส่วนของไหลตัดชิ้นงานที่สูญเสียประสิทธิภาพการใช้งานต้องถูกกำจัดทิ้งในที่สุด โดยกระบวนการบำบัดของไหลตัดชิ้นงานสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่การใช้ความร้อน [2] การใช้สารช่วยตกตะกอน (coagulation) [3] การแยกด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน [4] เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีที่กล่าวมาสามารถบำบัดของไหลตัดชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีข้อจำกัด คือ การใช้ความร้อนต้องทำที่อุณหภูมิสูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน การตกตะกอนพบปัญหาในเรื่องสารเคมีที่ต้องเติมลงไปและต้องกำจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้น การใช้เยื่อแผ่นเมมเบรนมีปัญหาในเรื่องการอุดตันของของไหลตัดชิ้นงานบนผิวเยื่อแผ่นเมมเบรน ในขณะที่การดูดซับ (Adsorption) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาบำบัดของไหลตัด

ชิ้นงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยวัสดุคูดซับที่งานวิจัยนี้สนใจ คือ ไคโทซาน เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) อย่างหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายเซลลูโลส ไคโทซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการดึงเอาหมู่แอซิติล (Acetyl Group) ของไคตินออกจากปฏิกิริยา Deacetylation มีองค์ประกอบสำคัญในรูปของ D-glucosamine และมีสมบัติละลายได้ในกรดอ่อน โดยไคโทซานเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในเปลือกนอกของสัตว์จำพวก กุ้ง ปู และแมลง และเป็นสารธรรมชาติที่มีลักษณะเฉพาะตัว คือ เป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยแหล่งที่ผลิตไคโทซานมากที่สุดมาจากากเหลือทิ้งของเปลือกกุ้งในอุตสาหกรรมแช่แข็ง [5] จึงเป็นการกำจัดของเหลือทิ้งและเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น ไคโทซานยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์และอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ด้านการแพทย์และเกษตรกรรม ด้านการเกษตร และในด้านการบำบัดน้ำเสีย ไคโทซานมีสมบัติความเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์และคีเลต เนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกได้มาก จึงสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักและจับกับของแข็งแขวนลอยได้ดี จึงมีการนำไคโทซานมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและไคโทซานยังสามารถขึ้นรูปเป็นลักษณะต่างๆ ได้ เช่น ขึ้นรูปเป็นเส้นใย แผ่นเยื่อบาง หรือขึ้นรูปเป็นเม็ดเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดไคโทซาน เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดริน เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน และเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน และศึกษาหาไอโซเทอมการคูดซับ เทอร์โมไดนามิกส์และจลนพลศาสตร์ของการคูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถในการคูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดไคโทซาน เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดริน และเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน พร้อมทั้งไอโซเทอม เทอร์โมไดนามิกส์ และจลนพลศาสตร์ของการคูดซับ

1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1. เตรียมตัวคูดซับเม็ดไคโทซาน เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดริน และเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

2. ศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่เตรียม เช่น ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด-เบส ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงาน เวลาในการดูดซับและอุณหภูมิ
3. หาไอโซเทอมของการดูดซับพร้อมทั้งเทอร์โมไดนามิกส์และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวดูดซับในรูปเม็ดโคโทซาน เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีไฮดริน และเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีไฮดรินและมีรูพรุนสำหรับดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน
2. ได้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่สังเคราะห์โดยเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีไฮดรินและมีรูพรุนสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้มากถึง 3 เท่า เมื่อเทียบกับน้ำหนัก 1 กรัมของตัวดูดซับ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของไหลตัดชิ้นงาน (Cutting Fluids) [1]

ของไหลตัดชิ้นงานเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะ เช่น งานเจาะ ตัดหรือกลึงโลหะ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในงานตัดกลึงโลหะ ช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ และรักษาชิ้นงานให้มีคุณภาพ หน้าที่หลักๆของของไหลตัดชิ้นงาน คือ เป็นสารช่วยระบายความร้อนเพื่อทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตชิ้นงานเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดจากกระบวนการตัดเฉือนโลหะ ช่วยนำเศษชิ้นส่วนโลหะออกจากชิ้นงาน ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ ชิ้นงานได้รูปร่างหรือขนาดถูกต้องตามแบบและป้องกันการสึกหรอของใบมีดตัด ของไหลตัดชิ้นงานที่ดีควรมีสมบัติในการถ่ายโอนความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ป้องกันการเกิดสนิม ป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และปราศจากสิ่งปนเปื้อนที่จะทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานขรุขระได้

2.2 องค์ประกอบของของไหลตัดชิ้นงาน [6]

Anderson และคณะ (2003) จัดแบ่งองค์ประกอบของของไหลตัดชิ้นงานออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำมันพื้นฐาน (Based oil) และสารเติมแต่ง (Additive) โดยน้ำมันพื้นฐานส่วนใหญ่มาจากน้ำมันแร่ สัตว์ สัตว์ทะเล พืช หรือสารเคมีสังเคราะห์ ส่วนสารเติมแต่งทำหน้าที่เพิ่มสมบัติบางประการให้กับของไหลตัดชิ้นงาน มีองค์ประกอบหลักๆ คือ สารอิมัลซิไฟเออร์และสารลดแรงตึงผิว สารป้องกันการเกิดสนิม สารเพิ่มเสถียรภาพ สารเพิ่มการหล่อลื่น สารต้านการเปลี่ยนแปลงของกรด-เบส สารป้องกันการเกิดฟอง และสารป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เป็นต้น

2.2.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่ได้จากกระบวนการกลั่นหรือการทำให้บริสุทธิ์ของน้ำมันดิบหรือน้ำมันที่ใช้แล้ว โดยน้ำมันดิบจะผ่านเข้าสู่กระบวนการกลั่นที่ความดันบรรยากาศเพื่อแยกเอาน้ำมันเชื้อเพลิงออกก่อน จากนั้นจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกลั่นภายใต้สภาพสุญญากาศได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่างๆ กัน โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในกระบวนการผลิตของไหลตัดชิ้นงานจะมีความหนืดอยู่ในช่วง 21-65 เซนติพอยส์ (cP) อุณหภูมิจุดเดือดประมาณ 270-485 องศาเซลเซียส จำนวนคาร์บอนอะตอมในหนึ่งโมเลกุล 15-34 ตัว และมีมวลโมเลกุลประมาณ 212-478

น้ำมันแร่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่แตกต่างกันมากมาย เช่น พาราฟินิก (Paraffinic) แนฟทาสิก (Naphthenic) แอโรแมติก (Aromatic) ไซโคลแอลเคน (Cycloalkane) และแอลเคน (Alkane) เป็นต้น โดยน้ำมันแร่จากน้ำมันดิบมีสมบัติและองค์ประกอบที่แตกต่างกันขึ้นกับแหล่งที่มา แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ น้ำมันแร่พาราฟินิก (Paraffinic mineral oil) และน้ำมันแร่แนฟทาสิก (Naphthenic mineral oil) น้ำมันแร่แนฟทาสิกมีสมบัติในการละลายสารเติมแต่ง และเข้ากันกับน้ำได้ดีกว่าน้ำมันแร่พาราฟินิก แต่น้ำมันแร่แนฟทาสิกมีปริมาณสารกลุ่มอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในปริมาณสูงกว่า จึงทำให้มีการใช้งานน้ำมันแร่แนฟทาสิกน้อยลง โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมาได้มีการพัฒนาให้มีวิธีการกำจัดสารก่อมะเร็งในกระบวนการผลิตน้ำมันแร่ คือกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ซึ่งเป็นกระบวนการเติมก๊าซไฮโดรเจนในภาวะอุณหภูมิสูงและมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำจัดสารกลุ่มซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และเปลี่ยนวงแหวนแอโรแมติกให้เป็นไซโคลแอลเคน

2.2.2 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งในของไหลตัดซึ่งงานมักเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ และมีสัดส่วนประมาณน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ถึง ร้อยละ 30 โดยปริมาตร [7] เช่น

2.2.2.1 สารอิมัลซิไฟเออร์ และสารลดแรงตึงผิว ทำหน้าที่กระจายอนุภาคน้ำมันในน้ำและลดแรงตึงผิวของของเหลว สารอิมัลซิไฟเออร์มีโครงสร้างประกอบด้วยด้านที่มีคุณสมบัติชอบน้ำมัน (Hydrophobic end) และด้านที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic end) ในการทำงานสารอิมัลซิไฟเออร์จะรวมตัวกับอนุภาคของน้ำมันและน้ำเป็นกลุ่มก้อนทรงกลม (Micelle) โดยหันปลายที่ชอบน้ำมันล้อมรอบอนุภาคน้ำมัน และหันปลายที่ชอบน้ำเข้าหาอนุภาคน้ำ สารอิมัลซิไฟเออร์แบ่งย่อยเป็น 2 ประเภทคือ 1) ไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ (Ionic emulsifier) ซึ่งจะแตกตัวในน้ำกลายเป็นประจุล้อมรอบอนุภาค ถ้าเป็นประจุบวกจะเรียกว่าสารนี้ว่า แคตไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ (Cationic emulsifier) แต่ถ้าเป็นประจุลบจะเรียกว่าสารนี้ว่า แอนไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ (Anionic emulsifier) และ 2) นอนไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ (Non-ionic emulsifier) ได้แก่ สารประกอบจำพวกอีทอกไซด์ (Ethoxylate) รวมตัวกับสารเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene oxide) กลายเป็นสารแอลคิลฟีโนล (Alkyl phenol) ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อแหล่งน้ำจึงไม่มีการใช้งานสารอิมัลซิไฟเออร์กลุ่มนี้มากนัก ส่วนใหญ่จะใช้สารกลุ่มแอนไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ อาทิเช่น โซเดียมโซฟ เอไมด์โซฟ กรดแนฟเทนิค บีโตรเลียมซัลโฟเนต เกลือซัลเฟต และเกลือเอมีนของ แอสเทอร์ฟอสฟอริก

2.2.2.2 สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors) ได้แก่ เกลือของกรดไขมันโซเดียม โมลิบเดต สารกลุ่มซัลโฟเนต เอมีน เอไมด์ บอเรต ซิลิเกต ฟอสเฟต และไนเตรต เป็นต้น สารป้องกันการกัดกร่อนจะสร้างฟิล์มบางๆบนผิวโลหะ ซึ่งประกอบด้วยสารมีขั้วของ

สารอินทรีย์และอนินทรีย์ออกไซด์ มีหน้าที่ป้องกันการฟุกร่อนของผิวโลหะจากปฏิกิริยาเคมีของกรดและสารเปอร์ออกไซด์

2.2.2.3 สารลดแรงเสียดทานและสารเพิ่มคุณสมบัติผิวเปียก (Friction reduction and Wettability agents) ได้แก่ น้ำมันจากพืชและสัตว์กรดไขมัน และแอลกอฮอล์ โครงสร้างโมเลกุลของสารนี้ ประกอบด้วยสารกลุ่มมีขั้วเล็กน้อย ทำหน้าที่จับยึดผิวโลหะ และกลุ่มไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ ซึ่งจะละลายอนุภาคน้ำมันสร้างเป็นชั้นบางปกป้องผิวโลหะ

2.2.2.4 สารฆ่าเชื้อโรค (Biocides) ส่วนใหญ่เป็นสารกลุ่มอินทรีย์แฮโล (Halo organics) ทำหน้าที่ควบคุมและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในของไหลตัดชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ที่ถูกควบคุมเหล่านี้จะสร้างความต้านทาน และยากต่อการควบคุมในระยะยาว ดังนั้นการเลือกใช้สารฆ่าเชื้อโรค จึงควรสลับสับเปลี่ยนชนิดเพื่อป้องกันการดื้อยาของจุลินทรีย์ และเลือกใช้ชนิดที่สามารถฆ่าเชื้อโรคในของไหลตัดชิ้นงานได้ทั้งหมด

2.2.2.5 สารรักษาความเป็นกรด-เบส (Alkaline reserve) ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเอทานอลาไมด์ ทำหน้าที่ควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสของของไหลตัดชิ้นงานให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งค่าพีเอชของของไหลตัดชิ้นงานโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 8.5 ถึง 9.0 [7] การรักษาความเป็นกรด-เบสนี้เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียซึ่งชอบสภาวะสิ่งแวดล้อมที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลาง ป้องกันการเกิดสนิม รักษาความเสถียรของอิมัลชันและป้องกันการฟุกร่อนของโลหะ

2.2.2.6 สารเพิ่มเสถียรภาพ (Coupling agent หรือ Stabilizers หรือ Solubilizers) ได้แก่ สารจำพวกแอลกอฮอล์ และไกลคอล สารกลุ่มนี้จะทำหน้าที่สร้างความเสถียรแบบถาวรให้แก่อิมัลชัน โดยการเพิ่มความสามารถในการละลายในน้ำมันเพื่อป้องกันการแยกตัวของสารเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ

2.2.2.7 สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamer) ได้แก่ สารประกอบจำพวกซิลิกอนของไหลตัดชิ้นงานที่มีสารลดแรงตึงผิวในปริมาณสูง จะเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาเรื่องฟอง ดังนั้นในของไหลตัดชิ้นงานจึงต้องมีสารทำหน้าที่ป้องกันการเกิดฟอง

2.2.2.8 สารลดความกระด้าง (Complexing agent) ได้แก่ ผลิตผลจากเอทิลีนไดแอมมีนเทตระอะซีติก (Ethylene Diamine Tetraacetic, EDTA) ทำหน้าที่ลดความแรงของสารประกอบที่ทำให้เกิดความกระด้าง เช่น เกลือแคลเซียม และแมกนีเซียม ไอออนของโลหะ เป็นต้น นอกจากนี้จะทำหน้าที่ลดความแรงของไอออน และลดความกระด้างของของเหลวแล้ว ยังช่วยรักษาความเสถียรให้แก่อิมัลชัน และยืดอายุการใช้งานของของไหลตัดชิ้นงานด้วย

2.2.2.9 สารเติมแต่งอื่นๆ เช่น สารเพิ่มดัชนีความหนืด (Viscosity index improver)

สารเพิ่มน้ำมัน (Oiliness agents) สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) คีเลต (Chelating agents) สารต้านทานการเกิดละออง (Anti-mist agents) เป็นต้น

2.3 ประเภทของของไหลตัดชิ้นงาน [6, 7]

ของไหลตัดชิ้นงานแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.3.1 น้ำมันโซ่ตรง (Straight oil)

น้ำมันโซ่ตรงมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ 100 % ซึ่งอาจได้จากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันจากสัตว์หรือพืช แต่ที่ใช้กันทั่วไปคือน้ำมันปิโตรเลียม ของไหลตัดชิ้นงานกลุ่มนี้เป็นน้ำมันล้วนๆ ฉะนั้นจะไม่ละลายน้ำ บางครั้งอาจมีการใส่สารเติมแต่งเพื่อคุณสมบัติบางอย่าง เช่น สารป้องกันการสึกหรอ สารรับแรงกดสูง การเติมซัลเฟอร์เข้าไปเพื่อไม่ให้เกิดคราบบนผิวทองแดง เป็นต้น ข้อดีของน้ำมันโซ่ตรง คือ มีคุณสมบัติการหล่อลื่นสูงและมีสมบัติในการลดแรงกระแทกระหว่างชิ้นงานกับมีดตัด เหมาะกับงานตัดที่ใช้ความเร็วรอบต่ำหรืองานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น เครื่องตัดทำเกลียว เครื่องตัดทำแม่พิมพ์ (Wire Cutting Machine) เครื่องทำแม่พิมพ์ (EDM) มีอายุการใช้งานยาวนาน ข้อเสีย คือ คุณสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีนัก มีควันและละอองมากทำให้สภาพแวดล้อมการทำงานไม่ดี

2.3.2 น้ำมันที่ละลายน้ำ (Soluble oil)

น้ำมันชนิดผสมกับน้ำเป็นน้ำมันที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ ประกอบไปด้วยน้ำมันปิโตรเลียมในอัตราส่วนมากถึง 60–90 % ผสมกับสารอิมัลซิไฟเออร์จำพวกไพรมารีซัลโฟเนต (primarily sulfonates) และสารเติมแต่งอื่นๆ [8] โดยที่สารอิมัลซิไฟเออร์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญทำให้น้ำมันรวมตัวกับน้ำได้ดี และอยู่ในรูปของอิมัลชันในน้ำ (Oil-in-water emulsion) อิมัลชันของน้ำมันที่ละลายน้ำได้มีลักษณะคล้ายน้ำนมและไม่โปร่งแสง ข้อดีของน้ำมันที่ละลายน้ำได้ คือ มีคุณสมบัติในการระบายความร้อนที่ดีเนื่องจากมีน้ำเป็นส่วนผสม และให้การหล่อลื่นดีเยี่ยมเพราะมีน้ำมันในอัตราส่วนที่มาก จึงเหมาะกับงานเบาหรืองานปานกลาง ข้อเสียคือน้ำมันที่ละลายน้ำ (Soluble oil) เมื่อผสมกับน้ำกระด้างอาจเกิดเป็นตะกอน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นบนชิ้นส่วนของเครื่องจักรหรือตัวกรองได้ มีน้ำเป็นองค์ประกอบเป็นสาเหตุให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีส่งผลให้เกิดปัญหาหากลิ้นเหม็นและของไหลตัดชิ้นงานมีอายุการใช้งานสั้น นอกจากนี้การเติมสารป้องกันการเกิดสนิมที่ไม่มากพออาจทำให้เกิดสนิมบนชิ้นงานอีกด้วย

2.3.3 น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetics oil)

น้ำมันสังเคราะห์ไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันปิโตรเลียมเลย แต่ประกอบด้วยสารเคมีสังเคราะห์กลุ่มดีเทอร์เจ้นท์ (Detergents) และใส่สารเติมแต่ง การใช้งานต้องเจือจางด้วยน้ำก่อนการ

ใช้งานโดยผสมกับน้ำ 30 – 50 % มีลักษณะใสและโปร่งแสงเมื่อผสมกับน้ำ มีคุณสมบัติระบายความร้อนได้ดี สามารถใช้งานได้หลากหลายกว่าของไหลตัดชิ้นงานชนิดที่เป็นน้ำมันที่ละลายน้ำ (soluble oil) มีอายุการใช้งานยาวนานและป้องกันการเกิดสนิมและป้องกันการกัดกร่อน สามารถแยกตัวจากชิ้นงานและเศษโลหะได้ง่าย เศษโลหะเล็กๆจะตกตะกอนได้เร็ว และไม่รวมตัวกับน้ำมันอื่นๆในระบบ (tramp oils) ซึ่งทำให้ง่ายในการบำรุงรักษา ข้อเสียคือ มีสมบัติการหล่อลื่นต่ำ อาจทำให้เครื่องมือและอุปกรณ์มีอายุการใช้งานสั้น สารเคมีในสารเติมแต่งอาจเป็นอันตรายต่อผิวหนังได้ สารเติมแต่งในน้ำมันสังเคราะห์ประกอบด้วย เกลืออนินทรีย์เพื่อป้องกันการกัดกร่อน สารอินทรีย์ช่วยให้ละลายน้ำ และสารช่วยชะล้างเพื่อให้ผิวชิ้นงานเปียก

2.3.4 น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ (Semi-synthetic oil)

น้ำมันกึ่งสังเคราะห์เป็นลักษณะผสมระหว่างน้ำมันละลายน้ำกับน้ำมันสังเคราะห์ ประกอบด้วยน้ำมันปิโตรเลียมเพียง 2-30% สารอิมัลซิไฟเออร์ สารเคมีสังเคราะห์ และน้ำมันกึ่งสังเคราะห์มีลักษณะต่างแตกต่างกันออกไปตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบแสง แต่น้ำมันกึ่งสังเคราะห์มีสารอิมัลซิไฟเออร์ผสมอยู่ปริมาณมากจึงทำให้อนุภาคของน้ำมันมีขนาดเล็ก ฉะนั้นอิมัลชันน้ำมันกึ่งสังเคราะห์จึงค่อนข้างโปร่งแสงและขุ่นบ้างเพียงเล็กน้อย อนุภาคของน้ำมันไวในการตอบสนองต่อความร้อนมาก เมื่ออิมัลชันน้ำมันกึ่งสังเคราะห์มีความร้อนสูง โมเลกุลของน้ำมันที่กระจายตัวอยู่ในแนวโน้มที่จะแยกตัวออกจากน้ำมาเกาะอยู่ล้อมรอบมีดตัด (cutting tools) ทำให้เพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ดี และเมื่ออุณหภูมิของส่วนผสมนี้เย็นลง โมเลกุลของน้ำมันจะสามารถกระจายตัวเป็นปกติได้อีกครั้ง น้ำมันกึ่งสังเคราะห์มีข้อดีคือ สามารถใช้งานได้กับงานทุกประเภท เหมาะกับงานความเร็วรอบและอัตราการป้อนสูง มีคุณสมบัติการหล่อลื่นปานกลางและหล่อเย็นที่ดี มีคุณสมบัติการเปียก (wetting properties) มากกว่าน้ำที่ละลายน้ำได้ทำให้มีความหนืดต่ำ มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าน้ำมันที่ละลายน้ำ เกิดควันและละอองน้อยกว่าน้ำมันโซ่ตรง ดังนั้นน้ำมันประเภทนี้จึงมีปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้น

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สหรือของเหลวเกิดการสะสมบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็งหรือของเหลว แล้วเกิดเป็นชั้น โมเลกุลหรืออะตอมของตัวถูกดูดซับ โดยโมเลกุลหรือสารที่เกิดการดูดซับขึ้นเรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือสารที่ถูกดูดซับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) การดูดซับจะขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับ รวมถึงคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ

2.4.1 ประเภทการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) [10]

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับด้วยแรงที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) และไม่มีแตกของพันธะ ดังนั้นจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับมาถึงผิวหน้าตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของสารนั้นก็ตามปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิปกติ โครงสร้างผิวของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงการดูดซับเกิดที่ไม่มีบริเวณความจำเพาะ คือ โมเลกุลของสารสามารถเกิดการดูดซับที่ตำแหน่งใดๆ ของผิวตัวดูดซับได้ การดูดซับจึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) โดยโมเลกุลของตัวดูดซับสามารถดึงดูดให้ตัวถูกดูดซับเข้าไปยึดเกาะเกิดเป็นชั้นของตัวถูกดูดซับที่ติดอยู่กับชั้นของตัวถูกดูดซับก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย การดูดซับเกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนๆ เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงไฟฟ้าสถิตย์ จึงไม่มีการถ่ายเทหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวตัวดูดซับเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) การดูดซับแบบนี้เป็นกระบวนการแบบผันกลับ

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption) [11]

การดูดซับทางเคมีเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้ต้องการพลังงานกระตุ้น ให้ปฏิกิริยาเคมีทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม แล้วสร้างหรือจัดเรียงอะตอมชิ้นใหม่ พันธะที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรง และการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น เนื่องจากต้องแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน นั่นคือการดูดซับแบบเคมีจะไม่เกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับแบบกายภาพ การดูดซับแบบเคมีจึงเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) โดยการดูดซับทางเคมีจะหยุดลงเมื่อ active site ที่ผิวตัวดูดซับหมดลง การดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดการคายซับเพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้

2.4.1.3 การดูดซับด้วยประจุ (Ionic Adsorption) [12]

เป็นการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่มีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุตัวถูกดูดซับกับประจุตัวดูดซับ ด้วยแรงของประจุที่ตรงกันข้าม (Electrical

Attraction) หรือเกิดเนื่องจากการแทนที่ของประจุที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับด้วยไอออนของตัวถูกดูดซับ โดยไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดูดติดได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำๆ และไอออนที่มีขนาดเล็ก ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพได้ถูกแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและกายภาพ [11, 12]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. แรงยึดเหนี่ยวโมเลกุล	อ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์	แข็งแรง เช่น พันธะโคเวเลนต์
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ที่อุณหภูมิต่ำ	ที่อุณหภูมิสูง
3. ความร้อนของการดูดซับ	ประมาณ 5 - 40 kJ/mol	สูงประมาณ 40 - 800 kJ/mol
4. ความจำเพาะเจาะจง	ไม่จำเพาะ	มีความจำเพาะสูง
	ไม่ขึ้นกับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ	ขึ้นกับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ
5. การผันกลับของปฏิกิริยา	ย้อนกลับ	ไม่ย้อนกลับ
6. พลังงานกระตุ้น	ไม่ใช่	ใช่
7. อัตราเร็วการดูดซับ	เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว	เกิดขึ้นอย่างช้าๆ
8. ลักษณะของการดูดซับ	ชั้นเดียวและหลายชั้น	ชั้นเดียว

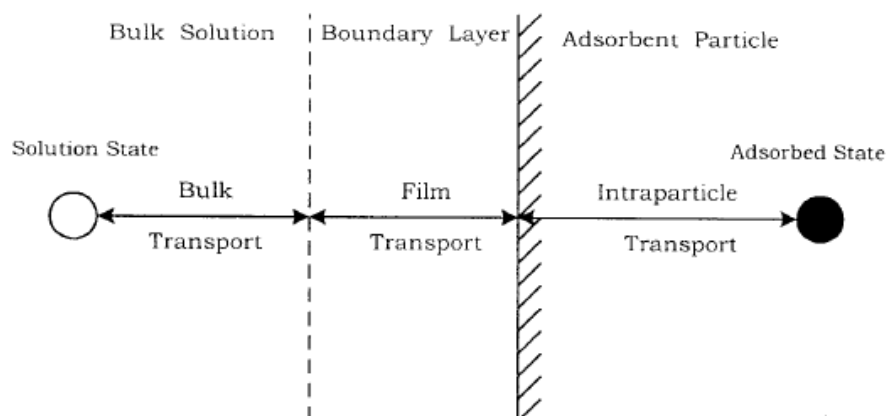
2.4.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic adsorption)

ลักษณะการดูดซับหรือการส่งถ่ายมวลสารที่อยู่ภายในสารละลายไปยังพื้นผิวของของแข็ง ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ [14, 15]

1. ขั้นที่หนึ่งเป็นขั้นตอนการขนส่งอนุภาค (bulk transport) โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ใกล้กับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นชั้นของเหลวบางๆ หรือมีผิวสัมผัสน้ำห่อหุ้มตัวดูดซับ
2. ขั้นที่สองเป็นการขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกผ่านเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ ระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านตัวถูกดูดซับหรือขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของน้ำใน Bulk Solution โดยอัตราการไหลและความปั่นป่วนสูงจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มบางๆ นี้จะสั้นลง

3. ขั้นที่สามเป็นขั้นตอนขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (pore diffusion) โดยตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในช่องว่างของตัวดูดซับซึ่งการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับอาจเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการแพร่ของตัวถูกดูดซับผ่านสารละลายในรูพรุนตัวดูดซับ (Pore Diffusion) หรือเกิดโดยกระบวนการแพร่ผ่านไปตามพื้นผิวของตัวดูดซับ (Surface Diffusion)
4. ขั้นตอนที่สี่การดูดติดผิว (Adsorption) จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมาถึงผิวของตัวดูดซับ (active site) และเกิดการสร้างพันธะของกระบวนการดูดซับ (Adsorption Bond) ระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites บนพื้นผิวตัวดูดซับ ในขั้นตอนนี้กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วถ้าการดูดซับเป็นการดูดซับแบบกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าการดูดซับเป็นการดูดซับแบบเคมี (Chemical Adsorption) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางธรรมชาติของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ และการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับจะใช้เวลาช้ากว่าการดูดซับแบบกายภาพ

ขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining step) จะเป็นขั้นควบคุมอัตราเร็วของกระบวนการดูดซับทั้งหมดจากจลนพลศาสตร์การดูดซับ ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับมีการเกิดเป็นขั้นตอนย่อยๆ 4 ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วและช้าต่างกัน โดยขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining step)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ [16]

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กพื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นและมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับขนาดใหญ่ แต่ถ้าตัวดูดซับนั้นมีรูพรุนอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของตัวดูดซับ คือตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ภายในรูพรุนและการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงตัวดูดซับเล็กน้อย โดยปกติโมเลกุลตัวถูกดูดซับขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในรูพรุนก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกดูดตามเข้าไป

2.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ ความสามารถในการละลาย น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสัมพันธ์กับการละลาย คือ ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวทำละลายมีค่ามาก จึงทำให้ตัวถูกดูดซับถูกแยกออกจากสารละลายไปดูดติดบนผิวของตัวดูดซับได้ยากประสิทธิภาพในการดูดซับจึงลดลง ส่วนตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดติดบนผิวตัวดูดซับได้ดีกว่า

น้ำหนักและขนาดของโมเลกุลมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือถ้าเป็นการดูดซับบนตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน ตัวถูกดูดซับที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีความยาวของสายโซ่มากจะทำให้ตัวถูกดูดซับมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์จะลดลงจึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับของตัวดูดซับที่มีรูพรุนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะสามารถถูกดูดเข้าไปในโพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับได้ดีกว่า

2.5.3 ความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนน้ำหรือสารละลาย

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบในการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore Diffusion) ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของสารละลายซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากเพราะระบบไม่ถูกรบกวน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปยังผิวตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าสารละลายมีความปั่นป่วนสูง ทำให้ไม่อาจสะสมตัวเกิดเป็นชั้นฟิล์มหนาได้ เป็นผลให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปหาตัว

ดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ

2.5.4 ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

ค่าความเป็นกรด-เบสมีผลต่อการแตกตัวของไอออน โดยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ความเป็นกรด-เบสต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูงๆ ซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับและประจุบนผิวตัวดูดซับ แต่ผลของการแตกตัวเป็นไอออนจะไม่ขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับหรือตัวถูกละลาย เช่น ถ้าตัวดูดซับเป็นไคโทซานเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำๆ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของไคโทซานจะสามารถรับ โปรตอนจากสารละลายได้ง่ายและอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) มีผลทำให้ประจุที่ผิวตัวดูดซับเป็นประจุบวก และสามารถดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่มีประจุลบได้ดี

2.5.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ ขึ้นอยู่กับว่ากระบวนการดูดซับในระบบเป็นการดูดซับประเภทใด คือ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งสร้างพันธะเคมีให้เกิดเร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งตัวดูดซับ (active site) ได้มากขึ้น

2.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) [17]

การดูดซับของของแข็งในสารละลาย (liquid-solid adsorption) จะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของตัวถูกดูดซับหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของแข็งหรือผิวตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากสารละลายไปติดติดบนผิวของตัวดูดซับทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ผิวหน้าตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ และการเกิดการดูดซับและการคายซับมีจำนวนเท่าๆ กัน ณ เวลาเดียวกัน อัตราของการดูดซับและการคายซับจะเข้าสู่ภาวะคงที่ (adsorption state) ซึ่งเรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ การแสดงปริมาณตัวถูกดูดซับหรือตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ ณ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่นิยมใช้กันมากได้แก่

2.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมการของแลงเมียร์เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวหรือเป็นการดูดซับทางเคมี มีสมมติฐานดังนี้ [18]

1. ตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนพื้นผิวที่แน่นอนของตัวดูดซับหรือมีตำแหน่ง active site ของตัวดูดซับที่แน่นอน
2. แต่ละตำแหน่งของตัวดูดซับจะรับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเท่านั้นหรือกล่าวได้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวเพียงชั้นเดียว (monolayer) ที่สม่ำเสมอ
3. การสร้างพันธะของทุกโมเลกุลของสารถูกดูดซับต่อบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับพลังงานเท่ากัน นอกจากนี้เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกันหรือไม่สามารถเกิดการดูดซับข้ามไปยังโมเลกุลอื่นได้

ความสัมพันธ์ที่สมดุลของการดูดซับสามารถเขียนสมการการดูดซับของแลงเมียร์ได้ดังสมการ (2.1)

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

เมื่อ q_e = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m = ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_A = ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์

แบบจำลองของไอโซเทอมแลงเมียร์สามารถบอกลักษณะของการดูดซับได้ด้วยการพิจารณาจากค่าคงที่ของแลงเมียร์ที่เรียกว่าค่าคงที่การแยกตัว (R_L) แสดงดังสมการ (2.2) ถ้าค่า $R_L > 1$ แสดงถึงการดูดซับไม่ดี $R_L = 1$ แสดงถึงการดูดซับคงที่ $0 < R_L < 1$ แสดงถึงการดูดซับดี และ $R_L = 0$ แสดงถึงปฏิกิริยาย้อนกลับ [19]

$$R_L = \frac{1}{1 + K_A C_0} \quad (2.2)$$

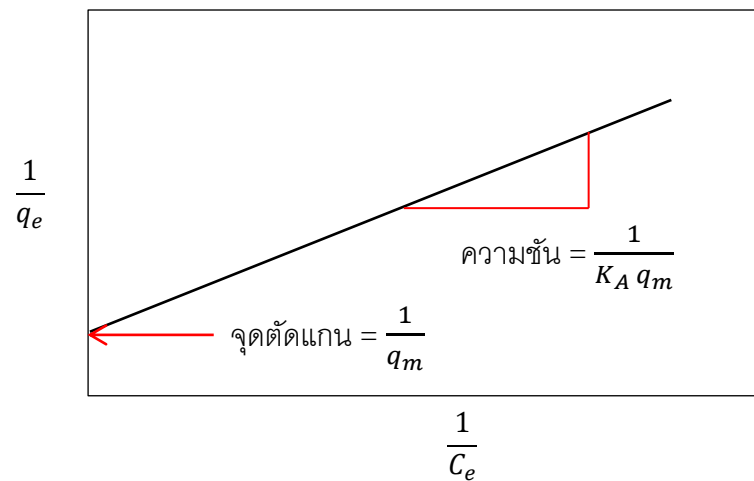
เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า q_m และ K_A ได้ด้วยกราฟ จึงสามารถจัดรูปแบบสมการได้เป็นสมการ

(2.3) หรือ (2.4)

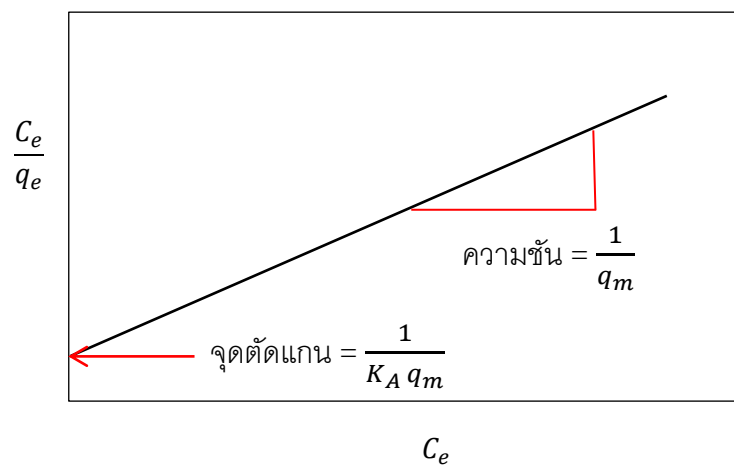
$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_A q_m} \right) \left(\frac{1}{C_e} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \left(\frac{1}{K_A q_m} \right) \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.3) และ (2.4) สามารถเขียนกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 รูปแบบของกราฟสมการเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอมจากสมการ (2.3)



รูปที่ 2.3 รูปแบบของกราฟสมการเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอมจากสมการ (2.4)

2.6.2 สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich's adsorption isotherm) สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช อธิบายการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวแบบไม่สม่ำเสมอ หรือพื้นผิวของการดูดซับมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากัน เป็นไปอย่างกระจายตัว เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเกิดพันธะต่อกันและเกิดการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัด [19] ความสัมพันธ์ที่สมดุลของการดูดซับเป็นดังสมการที่ (2.5)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.5)$$

สามารถเขียนสมการฟรอนด์ลิชในรูปสมการเชิงเส้นตรงแสดงดังสมการ (2.6)

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.6)$$

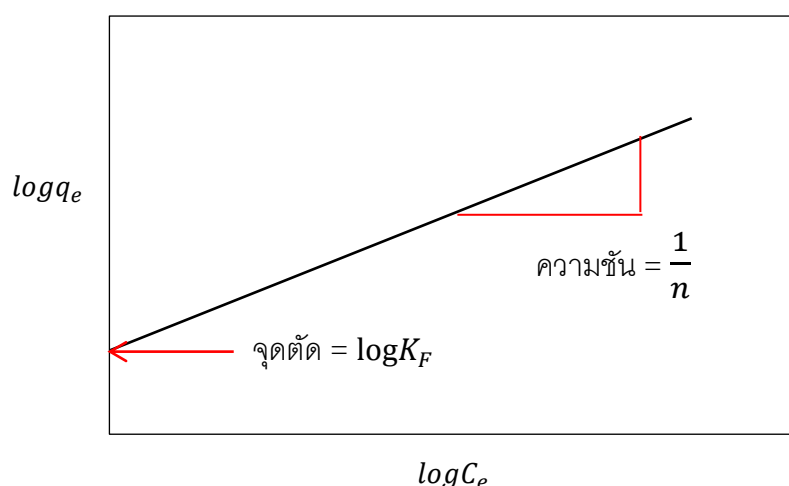
เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F = ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

$1/n$ = ค่าคงที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวการดูดซับ

เพื่อให้คำนวณหาค่าคงที่ K_F และ $1/n$ ได้ด้วยกราฟ จึงสามารถเขียนกราฟของฟรอนด์ลิชตามสมการ (2.6) ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบของกราฟสมการเส้นตรงของฟรอนด์ลิชไอโซเทอม

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับฟรุนดลิช (สมการที่ 2.6) ค่าคงที่ K_F และ $1/n$ คำนวณได้จากจุดตัดแกนและความชันของกราฟ ตามลำดับ จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ เมื่อค่า $1/n = 1$ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับมีพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันมาก (heterogenous) $1/n > 1$ อธิบายพื้นผิวของการดูดซับมีปริมาณมากสำหรับใช้ในการดูดซับ และ $1/n < 1$ หรือกราฟมีความชันต่ำมาก อธิบายพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดสำหรับการดูดซับหรือแสดงว่าตัวดูดซับมีลักษณะพื้นผิวการดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันน้อย (homogenous) จากสมการของฟรุนดลิชจะสังเกตได้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นการดูดซับหลายชั้น (multilayer) ตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย [20]

2.7 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Kinetics) [23]

อัตราของปฏิกิริยา (Rate of Chemical Reaction) คือ อัตราที่สารตั้งต้น (Reactant) ทำปฏิกิริยาไปหรืออัตราที่ผลิตภัณฑ์ (Product) เกิดขึ้น การศึกษาจลนศาสตร์เคมีมีกระบวนการลดลงของความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา โดยรูปแบบทั่วไปของการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาหาได้จากการพิจารณาอันดับของปฏิกิริยาเคมี

2.7.1 อันดับของปฏิกิริยา (Order of reaction)

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสาร โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาคือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารต่อหนึ่งหน่วยเวลา สามารถแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์เรียกว่าสมการอัตราเร็วหรือกฎของอัตราเร็ว (rate law) ได้ดังนี้

$$\text{กฎของอัตราเร็ว (Rate law)} = k [C]^n$$

โดย C = ความเข้มข้นของสาร

k = ค่าคงที่อัตราเร็ว (rate constant) ณ อุณหภูมิหนึ่ง

n = อันดับของปฏิกิริยา (order of reaction)

$$\text{ถ้า } n = 0 \text{ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate)} = k [C]^0 = k$$

อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero Order)

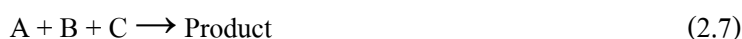
$$\text{ถ้า } n = 1 \text{ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate)} = k [C]^1$$

อัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรตามความเข้มข้นของสาร ($[C]^1$) เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First Order)

$$\text{ถ้า } n = 2 \text{ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate)} = k [C]^2$$

อัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรตามกำลังสองของความเข้มข้น ($[C]^2$) เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง (Second Order)

สำหรับในกรณีที่ปฏิกิริยาเกิดจากสารตั้งต้นมากกว่า 1 ชนิด ค่า n ที่แสดงถึงอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) ในจะหมายถึงอันดับรวมของปฏิกิริยา (overall order of reaction) ที่เทียบกับสารตั้งต้นแต่ละตัวเช่น

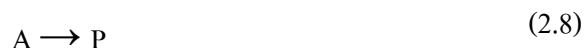


$$\text{กฎของอัตราเร็ว (Rate law)} = k [A]^x [B]^y [C]^z$$

โดย x y และ z คืออันดับของปฏิกิริยาของสาร A B และ C ตามลำดับ อันดับของปฏิกิริยานี้ (n) จึงเกิดจากการรวมกันของ x y และ z หรือ $n = x + y + z$ อันดับของปฏิกิริยาที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารสามารถแสดงได้ในรูปของสมการที่เกิดจากการอินทิเกรตกฎของอัตราเร็ว (Rate law) ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก) ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero Order Reaction) [22]

ปฏิกิริยาที่เป็นอันดับศูนย์เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับสารที่ทำปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไปและจะหยุดปฏิกิริยาทันทีเมื่อสารตั้งต้นกลายเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดโดยสมบูรณ์



เมื่อ A เป็นสารตั้งต้นและ P เป็นผลิตภัณฑ์

สามารถเขียนเป็นสมการดังสมการที่ (2.9)

$$-\frac{d[A]}{dt} = k \quad (2.9)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.9) ได้เป็นสมการที่ (2.10)

$$[A] = -kt + C \quad (2.10)$$

เมื่อ $t = t_0$ ความเข้มข้นของ A คือ $[A]_0$ ดังนั้นจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับศูนย์สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$[A] = [A]_0 - k(t - t_0) \quad (2.11)$$

เขียนกราฟความเข้มข้นของ A ($[A]$) กับเวลา t จะได้กราฟเส้นตรงให้ค่าความชันลงที่เท่ากับ $-k$

ข) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First Order Reaction) [22]

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งความเข้มข้นของสาร A ที่ลดลงต่อเวลาสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.12)

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A] \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) เมื่ออินทิเกรตจะได้สมการที่ (2.13)

$$\ln[A] = -kt + C \quad (2.13)$$

ค่าคงที่การอินทิเกรต C สามารถหาได้จากค่าเริ่มต้นเมื่อ $t = t_0$, $[A] = [A]_0$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.13) ได้สมการที่ (2.14)

$$C = \ln[A]_0 \quad (2.14)$$

แทนสมการที่ (2.14) ในสมการที่ (2.13) ได้สมการที่ (2.15)

$$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = k(t - t_0) \quad (2.15)$$

เมื่อพลอตค่า $\ln [A]/[A]_0$ กับเวลา จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็นค่า $-k$ และสมการที่ (2.15) สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.16)

$$[A] = [A]_0 \exp[-k(t - t_0)] \quad (2.16)$$

สมการนี้มีความหมาย คือ ความเข้มข้นของสาร A ลดลงเป็นไปแบบกราฟเอ็กโปเนนเชียลตามเวลาที่ทำปฏิกิริยา

ค) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo First Order Reaction) [22]
ในกรณีที่สารตั้งต้น A และ B ทำปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ P ดังปฏิกิริยา (2.17)



ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A มีปริมาณมากกว่าความเข้มข้นของสาร B มากๆ อัตราการทำปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณ B และกฎอัตราปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.18)

$$v = -\frac{d[B]}{dt} = k'[B] \text{ เมื่อ } k' = k[A] \quad (2.18)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.18) ได้สมการที่ (2.19)

$$\ln[B] = -k't + C \quad (2.19)$$

ที่เวลา $t = t_0$ ค่าความเข้มข้น B คือ $[B]_0$ ดังนั้นค่า C ในสมการที่ (2.19) จะหาได้จาก

$$C = \ln[B]_0 + k't_0 \quad (2.20)$$

แทนค่า C ลงในสมการที่ (2.19) จะได้

$$\ln[B] = \ln[B]_0 - k'(t - t_0) \text{ หรือ } [B] = [B]_0 \exp[-k'(t - t_0)] \quad (2.21)$$

ง) ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second Order Reaction) [22]

อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองมีสารตั้งต้น 2 ชนิดทำปฏิกิริยากันตามสัดส่วนโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลมาจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด สำหรับรูปแบบปฏิกิริยาโดยทั่วไปที่เกิดปฏิกิริยา A และ B แสดงดังสมการต่อไปนี้



อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.23)

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A][B] \quad (2.23)$$

ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นทั้งสองเข้าทำปฏิกิริยาเท่ากันสมการที่ (2.23) สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (2.24)

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (2.24)$$

ทำการแยกค่าตัวแปรและอินทิเกรตได้สมการที่ (2.25)

$$\frac{1}{[A]} = kt + C \quad (2.25)$$

ให้ $[A] = [A]_0$ ที่ $t = t_0$ ค่าคงที่ของการอินทิเกรตกลายเป็น $1/[A]_0$ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองได้สมการ (2.26)

$$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = k(t - t_0) \quad (2.26)$$

สร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $1/[A]$ กับเวลา (t) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็นค่า k

ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นทั้งสองเข้าทำปฏิกิริยาแตกต่างกันถ้า $[A]_0$ และ $[B]_0$ เป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร A และสาร B จากสมการที่ (2.27) จะได้

$$-\frac{d[A]}{dt} = \frac{dx}{dt} = k([A]_0 - x)([B]_0 - x) \quad (2.27)$$

เมื่อ $[A]_0 - x = [A]$, $[B]_0 - x = [B]$ และ x คือการลดลงของความเข้มข้นของสารตั้งต้น A และ B

$$\frac{1}{[B]_0 - [A]_0} \left[\frac{1}{[A]_0 - x} - \frac{1}{[B]_0 - x} \right] dx = kdt \quad (2.28)$$

อินทิเกรตสมการ (2.28)

$$\frac{1}{[B]_0 - [A]_0} \ln \frac{[A]_0 - x}{[B]_0 - x} = kt + C \quad (2.29)$$

เมื่อ C คือค่าคงที่ของการอินทิเกรตจากเงื่อนไข $x = 0$ เมื่อ $t = 0$ ค่า C สามารถหาได้จาก

$$C = \frac{1}{[B]_0 - [A]_0} \ln \frac{[A]_0}{[B]_0} \quad (2.30)$$

แทนค่า C ลงในสมการที่ (2.29) จะได้

$$\ln \frac{[A]_0 - x}{[B]_0 - x} = kt([B]_0 - [A]_0) + \ln \frac{[A]_0}{[B]_0} \quad (2.31)$$

$$\ln \frac{[A]}{[B]} = kt([B]_0 - [A]_0) + \ln \frac{[A]_0}{[B]_0} \quad (2.32)$$

สร้างกราฟเส้นตรงจากสมการที่ (2.32) $\ln [A]/[B]$ กับเวลา (t)

$$\ln \frac{[B]_0[A]}{[A]_0[B]} = kt([B]_0 - [A]_0) \quad (2.33)$$

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาหาอันดับของปฏิกิริยาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นได้ด้วยการนำข้อมูลการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการอันดับดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 2.2 แล้วหาอันดับของปฏิกิริยาด้วยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของข้อมูลการทดลองกับรูปแบบของสมการอันดับด้วยค่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 จากสมการการสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการอันดับ

ตารางที่ 2.2 รูปแบบของสมการอันดับจากการอินทิเกรต [21]

อันดับของปฏิกิริยา	อัตราของปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา	กราฟเส้นตรงพลอตระหว่าง	ความชัน	หน่วยของอัตรา
0	$k[A]_0 = k$	$[A] = -kt + [A]_0$	$[A]$ vs t	-k	conc/time
1	$k[A]$	$\ln[A] = -kt + \ln[A]_0$	$\ln[A]$ vs t	-k	1/time
2	$k[A]^2$	$1/[A] = kt + 1/[A]_0$	$1/[A]$ vs t	k	1/conc.time

จากค่าคงที่อัตราเร็ว ($k = \text{rate constant}$) ตามสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมี (สมการที่ 2.34) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) คือ ถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมากหรืออุณหภูมิจนของระบบต่ำค่าคงที่อัตราเร็ว (k) จะน้อยอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็น้อยตามไปด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราเร็ว (k) กับค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และอุณหภูมิ สามารถแสดงอยู่ในรูปสมการที่เรียกว่า สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) [23]

$$\text{กฎของอัตราเร็ว (rate law)} \quad k = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^n \quad (2.34)$$

$$\text{สมการอาร์เรเนียส} \quad k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.35)$$

ใส่ \ln ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \left[\frac{1}{T} \right] \quad (2.36)$$

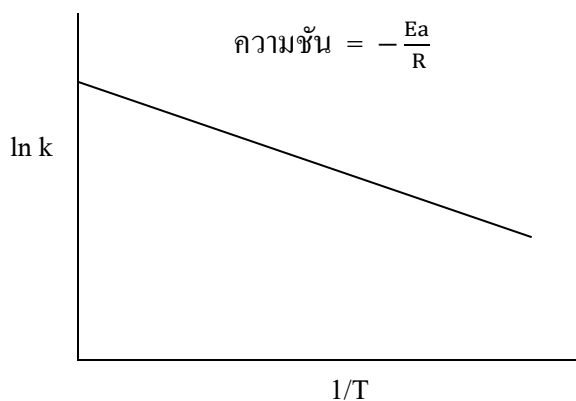
เมื่อ $k =$ ค่าคงที่อัตราเร็ว

$R =$ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

$T =$ อุณหภูมิสัมบูรณ์

$A =$ อาร์เรเนียสแฟกเตอร์ (ความถี่ของการชนกันของโมเลกุล)

เมื่อหาค่า k ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-\frac{E_a}{R}$ ซึ่งสามารถหาค่า E_a ได้ และจุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ $\ln A$ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) จากสมการอาร์เรเนียส [22]

2.7.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic models of adsorption)

ในการศึกษากระบวนการดูดซับจำเป็นต้องศึกษาหาอัตราของการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในระบบและเพื่อให้ทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ แบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบคือแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมจะเลือกพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงของผลการทดลอง ขั้นตอนในการหากลไกของการดูดซับสามารถหาได้จากสมการของ Lagergren [24] ซึ่งเป็นกลไกอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และหาได้จากสมการของ Ho [25] ซึ่งเป็นกลไกอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) แสดงดังสมการต่อไปนี้

ก) สมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยปฏิกิริยา Pseudo-first order สมการเชิงอนุพันธ์แสดงไว้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.37)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของไหลตัดชิ้นงานที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/g)
 q_t คือ ปริมาณของไหลตัดชิ้นงานที่ถูกดูดซับที่เวลา t (mg/g)
 k_1 คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของสมการ Pseudo-first order (1/min)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.37 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t = 0; q = q_0$ และ $t = t; q = q_t$ จะได้

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = k_1 t \quad (2.38)$$

หรือ

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2.39)$$

สมการที่ 2.38 และ 2.39 สามารถจัดรูปใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงดังนี้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2.40)$$

หรือ

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.41)$$

ข) สมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.42)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่ที่สมดุลของสมการ Pseudo-Second Order (g/mg*min)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.42 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t = 0; q_t = 0$ และ $t = t; q_t = q_t$ จะได้

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.43)$$

สมการที่ 2.43 สามารถจัดรูปใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.44)$$

ค่าคงที่ k_2 , q_e และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_e และ t

2.8 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ [26]

อุณหพลศาสตร์เป็นการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานและการเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานความร้อนกับพลังงานรูปอื่นเนื่องมาจากสสารเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี เพื่อใช้ในการทำนายทิศทางของการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในกระบวนการดูดซับจำเป็นต้องศึกษาอุณหพลศาสตร์ของระบบเพื่อช่วยให้ทำนายกระบวนการดูดซับนั้นจะเกิดขึ้นได้หรือไม่เองในทิศทางใด กระบวนการที่เกิดขึ้นเองได้ (spontaneous process) จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบและเพื่อความสะดวกในการทำนายทิศทางของปฏิกิริยา จึงกำหนดฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เพื่อใช้หาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบจากความสัมพันธ์ คือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.45)$$

พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์สำหรับกระบวนการดูดซับ ได้แก่การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) การคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระของกิบส์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.46 2.47 2.48 และ 2.49

$$K_c = \frac{q_e}{C_e} \quad (2.46)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (2.47)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.48)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{2.303R} - \frac{\Delta H^\circ}{2.303RT} \quad (2.49)$$

เมื่อ	K_c	คือ	ค่าคงที่สมดุล
	q_e	คือ	ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน)
	T	คือ	อุณหภูมิ (เคลวิน)

โดยค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดของสมการเส้นตรง โดยการพลอตกราฟระหว่างค่า $\ln K_c$ (แกน Y) กับค่า $1/T$ (แกน X)

2.9 ไคตินและไคโทซาน [28, 29]

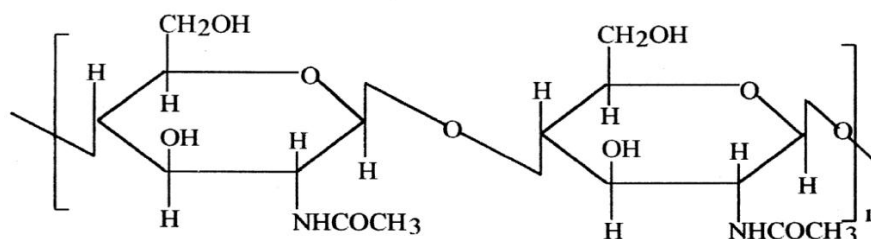
ไคติน (Chitin) และไคโทซาน (Chitosan) เป็นสารพอลิเมอร์จากธรรมชาติ มีปริมาณมากเป็นที่สองของโลกรองจากเซลลูโลส ไคโทซานและเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่สกัดได้จากเปลือกและกระดองของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น เปลือกกุ้ง กระดองปู หอย ปลาหมึก เปลือกแมลง และพบในผนังเซลล์ของเห็ด รา และสาหร่ายบางชนิด ไคตินและไคโทซานเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์

เช่นเดียวกับแป้งและเซลลูโลส ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสมีชื่อว่า N-acetyl glucosamine ที่มีในโตรเจนอยู่ในโครงสร้างทำให้โครงสร้างมีคุณสมบัติโดดเด่นและหลากหลายสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และไคโทซานเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม จึงเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่มีศักยภาพที่จะพัฒนาต่อในหลายด้าน ทั้งในปัจจุบันและอนาคต

โครงสร้างทางเคมีของไคตินคล้ายคลึงกับเซลลูโลส เป็นสายพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคส เป็นองค์ประกอบหลัก ไคตินที่เกิดในธรรมชาติมีโครงสร้างของผลึกที่แข็งแรงมีการจัดเรียงตัวได้ 3 แบบ คือ การจัดเรียงตัวแบบแอลฟาพบในเปลือกกุ้งและปู จัดเรียงตัวแบบบีต้าพบในแกนปลาหมึก และการจัดเรียงตัวแบบแกมมาพบในเห็ดบางจำพวก ซึ่งจะให้ความแข็งแรงต่างกันออกไปด้วย โดยธรรมชาติไคตินไม่ละลายในน้ำและละลายได้ยากในกรดอินทรีย์ ส่วนไคโทซานสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ ส่วนไคโทซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก สารละลายไคโทซานมีลักษณะขุ่นเหนียวและใส และยืดหยุ่นได้ จึงสามารถขึ้นรูปได้เป็นแบบต่างๆ ได้ง่าย เช่น เส้นใย ทำเป็นแผ่นหรือเยื่อต่างๆ หรือขึ้นรูปเป็นเม็ด เป็นต้น

2.9.1 ไคติน (Poly (1, 4-2 acetamido-2-deoxy-B-D-glucosamine))

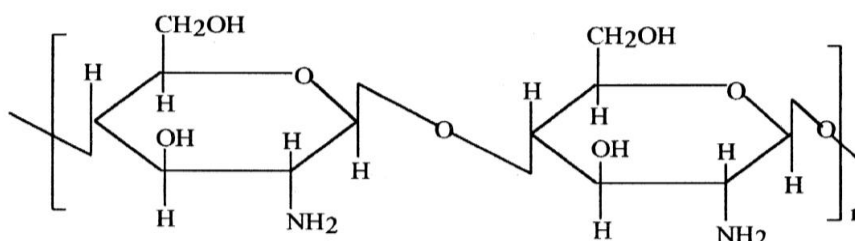
ไคตินมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $(C_8H_{13}NO_3)_n$ ประกอบด้วย C 47.29% H 6.45% N 6.89% และ O 39.37% เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลยาวที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส แตกต่างกันตรงคาร์บอนตำแหน่งที่สองมีหมู่อะเซตามิโด (-NH-CO-CH₃) มาเกาะแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ไคตินเป็นองค์ประกอบที่พบได้ในเปลือกของสัตว์ เช่น กุ้ง ปู หมึก แมลง และผนังเซลล์ของพวกรา ยีสต์ หรือจุลินทรีย์บางชนิด ไคตินเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่ไม่มีประจุ (Non electrolytic polymer) ทำให้ไคตินไม่ละลายในน้ำ สารละลายเบส แอลกอฮอล์หรือตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป ไคตินสามารถดัดแปรโดยวิธีทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานให้มากขึ้นคือการเตรียมเป็นไคโทซาน โครงสร้างของไคตินแสดงดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของไคติน [30]

2.9.2 ไคโทซาน (Poly (1, 4-2 amino-2-deoxy-B-D-glucosamine))

ไคโทซานเกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของไคตินด้วยเบสเข้มข้น ทำให้โครงสร้างของไคตินเปลี่ยนแปลงไปโดยการลดลงของ N-acetyl glucosamine ทำให้เกิด glucosamine เพิ่มขึ้นในปริมาณเท่ากัน หมู่อะเซตามิโดจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปหมู่อะมิโน (-NH₂) ที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 ไคโทซานละลายได้ดีในตัวทำละลายกรดอินทรีย์ เช่น กรดแอสติก กรดฟอร์มิก กรดแลคติก เป็นต้น และละลายได้น้อยในกรดอนินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ ซึ่งการละลายของไคโทซานในตัวทำละลายกรดอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับระดับการกำจัดหมู่อะซีทิล (%DD) สายพอลิเมอร์ของไคโทซานจะแสดงประจุบวกเนื่องจากเกิดการโปรโตเนตหมู่อะมิโนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน (-NH₃⁺) ไคโทซานยังมีสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) สามารถดูดซับกับสารอินทรีย์และไอออนของโลหะ [30] นอกจากนี้ไคโทซานยังเป็น coagulating agent มีสมบัติในการรวบรวมตะกอนและสารแขวนลอย [31] จึงเป็นเหตุผลสำคัญให้มีการใช้ประโยชน์จากไคโทซานสูงกว่าไคติน โดยโครงสร้างของไคโทซานแสดงดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของไคโทซาน [30]

2.9.3 ประโยชน์ของไคตินและไคโทซาน

ปัจจุบันมีการนำไคตินและไคโทซานมาประยุกต์ในด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น

1. ด้านอาหาร

ไคโทซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิด มีกลไกยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยประจุบวกของไคโทซานสามารถจับกับประจุลบบนผนังเซลล์ของจุลินทรีย์บางชนิดได้ ทำให้ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความเสียหาย และไม่สามารถควบคุมการผ่านเข้าออกของสารได้ จึงเกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารต่างๆภายในเซลล์ ทำจุลินทรีย์ตายลงให้เซลล์ในที่สุด [33] มีการใช้ไคตินและไคโทซานเป็นสารเติมในอาหารและยา โดยใช้เป็นสารเพิ่มความข้นเหนียว เป็นสารกันบูดและสารปรุงแต่งช่วยรักษากลิ่น รส มีการผสมไคโทซานในผลิตภัณฑ์จำพวกแป้ง เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว มั๊กกะโรนี บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เป็นต้น เพื่อเป็นสารเสริมใยอาหารธรรมชาติ เป็น

สารเพิ่มความเหนียวแน่นในผลิตภัณฑ์แปรรูปเนื้อสัตว์ เช่น ลูกชิ้น ไส้กรอก หรือผสมในน้ำสลัด เพื่อทำให้ครีมและอิมัลชัน (emulsion) คงตัว รวมถึงใช้เป็นสารเคลือบผัก ผลไม้ เพื่อรักษาความสด และยืดอายุของผลิตภัณฑ์ หรือผลิตโคโทซานในรูปแบบบรรจุอาหารที่สามารถรับประทานได้ (edible film)

2. ด้านอาหารเสริม

ซึ่งในปัจจุบันโคโทซานถูกนำมาผลิตในรูปอาหารเสริมเพื่อลดคอเลสเตอรอล ไขมันในเส้นเลือดและเพื่อการควบคุมน้ำหนัก โดยประจุบวกของโคโทซานมีสมบัติในการดักจับกับกรดไขมันอิสระและคอเลสเตอรอลที่มีประจุลบ [34] ร่างกายจึงไม่สามารถดูดซึมไปใช้งานได้หรือใช้ได้น้อยลง และโคโทซานเป็นสารพวกเดียวกับคาร์โบไฮเดรตให้เส้นใยอาหาร ไม่ละลายน้ำ ไม่ให้พลังงานและไม่ย่อยในกระเพาะอาหาร จึงมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย ช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อโรกระบบทางเดินอาหาร เช่น โรคมะเร็งลำไส้ ท้องผูก ไขมันอุดตันในเส้น

3. ด้านการแพทย์

โคตินและโคโทซานเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากร่างกาย เนื่องจากโคตินโคโทซานเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติสามารถเข้าได้กับร่างกายมนุษย์ ไม่มีผลข้างเคียงที่เป็นอันตราย อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ ส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียในลำไส้ ช่วยลดสารพิษและยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นอันตราย จากผลการศึกษาในต่างประเทศพบว่าโคตินและโคโทซานสามารถย่อยสลายได้ภายในสิ่งมีชีวิต เนื่องจากมีเอนไซม์หลายชนิดสามารถย่อยสลายได้ โคโทซานยังมีประโยชน์ช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อโรกระบบทางเดินอาหาร เช่น มะเร็งลำไส้ ไขมันอุดตันในเส้นเลือด เนื่องจากโคโทซานเป็นเส้นใยอาหารที่ได้จากสัตว์ เป็นสารคาร์โบไฮเดรตที่ไม่มีรสหวาน ไม่ละลายน้ำ ไม่ย่อยในกระเพาะอาหารของมนุษย์จึงมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายและสามารถเลือกจับกับกรดไขมันได้

นอกจากนี้โคตินและโคโทซานสามารถนำมาทำให้อยู่ในรูปของเส้นใยบางแต่มีความแข็งแรงสามารถนำมาทำแผ่นพลาสติกปิดแผล สามารถป้องกันการติดเชื้อของแผล และใช้ทำผิวหนังเทียมสำหรับแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก โดยสามารถกระตุ้นให้มีการสร้างเซลล์ใหม่และพบว่าไม่มีการแพ้ หรือการอักเสบของบาดแผล [35] ใช้ทำไหมเย็บแผลได้โดยไม่จำเป็นต้องตัดทิ้งเมื่อแผลหายแล้วเนื่องจากไหมสามารถสลายตัวเองอย่างช้าๆ อย่างไม่มีปฏิกิริยาต่อต้านจากร่างกาย สำหรับงานด้านดวงตาโคตินและโคโทซานสามารถนำมาผลิตคอนแทกเลนส์ เนื่องจากมีคุณสมบัติยอมให้ออกซิเจนผ่านเข้าออกได้ และไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ ใช้ทำแคปซูลบรรจุยาเป็นตัวขนส่งยา และเป็นตัวควบคุมการปล่อยยาในร่างกาย [36] ใช้เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของเลือด ใช้เป็น

ตัวจับและตกตะกอนเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว ใช้ผลิตภัณฑ์เทียม เช่นผนังไต ซึ่งไคโทซานสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของร่างกายมากกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์

4. ด้านการเกษตร

ประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม มีการใช้ไคโทซานเป็นอาหารเสริมให้พืชช่วยกระตุ้นการเจริญรากพืช ใช้กระตุ้นการดูดซับธาตุอาหารพืช ใช้เคลือบป้องกันเมล็ดพันธุ์พืชเพื่อการเก็บรักษา ใช้เคลือบใบเพื่อป้องกันแมลงและควบคุมโรคที่เกิดจากแบคทีเรียและเชื้อรา ใช้ไคโทซานเป็นสารเคลือบผัก ผลไม้สดเพื่อชะลอเน่าเสียและช่วยยืดอายุการเก็บรักษาทำให้ผลผลิตมีคุณภาพสูงขึ้น [37] นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเสริมผสมในอาหารสัตว์ เช่น สุกร วัว เป็ด ไก่ เพื่อเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์ในระบบทางเดินอาหารและช่วยลดอัตราการตายเนื่องมาจากติดเชื้อแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหารได้ ใช้เป็นสารเสริมผสมในอาหารสัตว์น้ำเพื่อเสริมสร้างเนื้อเยื่อและเปลือกสำหรับสัตว์น้ำ เช่น กุ้ง ไคโทซานมีแงดีนด้านเป็นสารจากธรรมชาติที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและรา ช่วยลดการเกิดโรคในพืชได้ และยังช่วยลดความเสี่ยงของเกษตรกรและผู้บริโภค รวมถึงช่วยลดต้นทุนแทนการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มีการนำเข้ามาในแต่ละปีซึ่งมีมูลค่าสูง

5. ด้านการบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากไคโทซานมีสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ขั้วบวก (cationic polyelectrolyte) สามารถจับกับไอออนของสีย้อม เช่น สิริแอคทีฟ สีแอซิด หรือ สารดิสเพอร์ส (dispese) แวต (vat) และสีแนฟทอล (naphthol dye) เป็นต้น [30] และยังสามารถจับกับโปรตีนและไขมันที่แขวนลอยได้ดี จึงเหมาะสำหรับใช้บำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมอาหารซึ่งมีสารแขวนลอยสูง ไคโทซานมีหมู่อะมิโน ($-NH_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) แสดงสมบัติที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจึงสามารถสร้างพันธะทางเคมีกับไอออนของโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลากหลายชนิด เช่น ทองแดง ตะกั่ว ยูเรเนียม โครเมียม นิกเกิล แคลเซียม โคบอลต์ เหล็ก แมงกานีส แพลตินัม และวานาเดียม [38] จึงสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหนักได้

6. ด้านอุตสาหกรรม

ไคโทซานสามารถนำมาทำบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ หรือทำฟิล์มถนอมอาหาร โดยไคโทซานและอนุพันธ์ของไคโทซานสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มหรือเป็นแผ่นเยื่อต่างๆ ที่มีความเหนียว ยืดหยุ่นสูงและไม่ฉีกขาดง่าย มีลักษณะเด่นในการป้องกันการสูญเสียน้ำ และควบคุมการผ่านเข้าออกของอากาศได้ดี [39] นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์เคลือบบนผิวของอาหารเพื่อชะลอการเน่าเสียและถนอมอาหาร เช่น ผลไม้ เนื้อสัตว์ และเนยแข็ง เป็นต้น ใช้ในการย้อมสีผ้าให้ติดทนนาน หรือ

ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับเส้นใย ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษที่มีคุณภาพสูงมีสมบัติคงทนทางกายภาพ ไคโทซานถูกนำมาเป็นสารเสริมสร้างความเหนียวให้กับเส้นใยและเยื่อกระดาษ ให้มีความแข็งแรง ทนทานต่อการฉีกขาด หรือผลิตกระดาษซับที่ซับหมึกได้ดี ใช้เป็นสารตกตะกอน (fining agent) หรือใช้ทำเยื่อกรองเพื่อลดความขุ่นช่วยให้น้ำผลไม้ใส ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม [37]

7. ด้านความสวยงาม

ด้วยสมบัติที่ไม่ละลายน้ำและอุ้มความชื้นได้ดีของไคโทซาน ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ไคโทซานถูกนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความชื้นเหนียวในครีมเป็นส่วนผสมในโลชั่นเพื่อคงความชุ่มชื้นและความเนียนนุ่ม ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ดูแลเส้นผม โดยไคโทซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมไว้ช่วยเก็บกักความชุ่มชื้นทำให้เส้นผมคงสภาพนุ่ม นอกจากนี้มีการนำไคโทซานมาผลิตกระดาษซับมันเพื่อลดความมันบนใบหน้า และผสมลงในโพลีเมอร์สำหรับการรักษาความสะอาด รวมทั้งอุตสาหกรรมน้ำหอมมีการใช้ไคโทซานเป็นสารควบคุมการปลดปล่อยความหอม เพื่อให้ น้ำหอมมีกลิ่นหอมติดทนนาน

8. พัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

นำไคโทซานมาผลิตวัสดุเพื่อการบรรจุ เช่นนำมาผสมกับพลาสติกเพื่อช่วยให้ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ใช้ทำเป็นวัสดุห่อหุ้มอาหาร เช่น ฟิล์มถนอมอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นต้น

ความน่าสนใจของไคโทซานคือมีหมู่เอมีนและหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ภายในโครงสร้าง จึงสามารถสร้างอนุพันธ์ของไคโทซานได้หลากหลายโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไป ซึ่งทำให้ไคโทซานและอนุพันธ์ของไคโทซานสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่นในภาวะกรดไคโทซานสามารถจับกับสารประเภทพอลิแอนไอออนและเมื่อปรับค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นไคโทซานจะสามารถสร้างโครงสร้างเชิงซ้อนกับโลหะหนักหรือสารไอหีส เนื่องจากหมู่เอมีนของไคโทซานมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่ เชื่อว่าตำแหน่งอิเล็กตรอนคู่นี้เองสามารถสร้างพันธะโคออดิเนชันกับโลหะได้ และไคโทซานยังสามารถขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ เช่น เป็นเม็ด แผ่นฟิล์ม เป็นต้น จากสมบัติของไคโทซานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย แต่ไคโทซานสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิดและกรดอินทรีย์บางชนิด จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ต้องใช้ปฏิบัติการเชื่อมขวาง (Crosslinking) โดยใช้สารเคมีบางชนิดเพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและเคมีของไคโทซานเพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ดีขึ้น

2.9.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของไคโทซาน โดยการทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายหรือการเชื่อมขวาง (Crosslinking) [40]

การตัดแปรรูปโครงสร้างทางเคมีของโพลีเมอร์ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความเหมาะสมแก่การนำมาใช้งาน ซึ่งในบางกรณีโพลีเมอร์อาจมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เป็นไปตามต้องการ เช่น ความทนแรงดึง (Tensile Strength) ความยืดหยุ่น (Flexibility) ความเปราะ (Brittleness) และความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) เป็นต้น

ปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (Cross-linking) เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์จะมีสายโซ่เชื่อมโยกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไอออนิก เกิดโครงร่างตาข่ายสามมิติ (Three-Dimension Network) ซึ่งการเกิดการเชื่อมขวางจะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางด้านความร้อน

พอลิเมอร์ปกติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะเกิดการหลอมเหลวและไหลได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ในทางตรงกันข้ามพอลิเมอร์ที่ผ่านการเชื่อมขวาง จะไม่สามารถเกิดการหลอมเหลวได้และสูญเสียสมบัติการไหลตัวได้ เนื่องจากสายโซ่โพลีเมอร์ถูกจำกัดการเคลื่อนไหวจากโครงร่างตาข่ายและเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงๆ พอลิเมอร์จะไม่หลอมแต่จะสลายตัวแทน

2. สมบัติทางเคมี

พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายจะเกิดการละลายได้ในตัวทำละลายที่เหมาะสม เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์และตัวทำละลายสามารถผสมกันได้ดีเป็นอย่างดี โดยแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์มีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ แต่สำหรับพอลิเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางจะไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายแต่จะเกิดการพองตัว เนื่องจากตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้ ทำให้ตัวทำละลายไม่เข้าไปเกิดผลกระทบต่อพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ ทั้งนี้ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย (Cross-linking Density) จะมีผลต่อการยอมรับเอาปริมาณตัวทำละลาย กล่าวคือ ถ้าพอลิเมอร์เกิดโครงร่างตาข่ายน้อย จะทำให้ตัวทำละลายสามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ทำให้เกิดการพองตัวได้มาก แต่พอลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่ายอย่างแท้จริงตัวทำละลายจะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างได้และไม่เกิดการพองตัวเลย

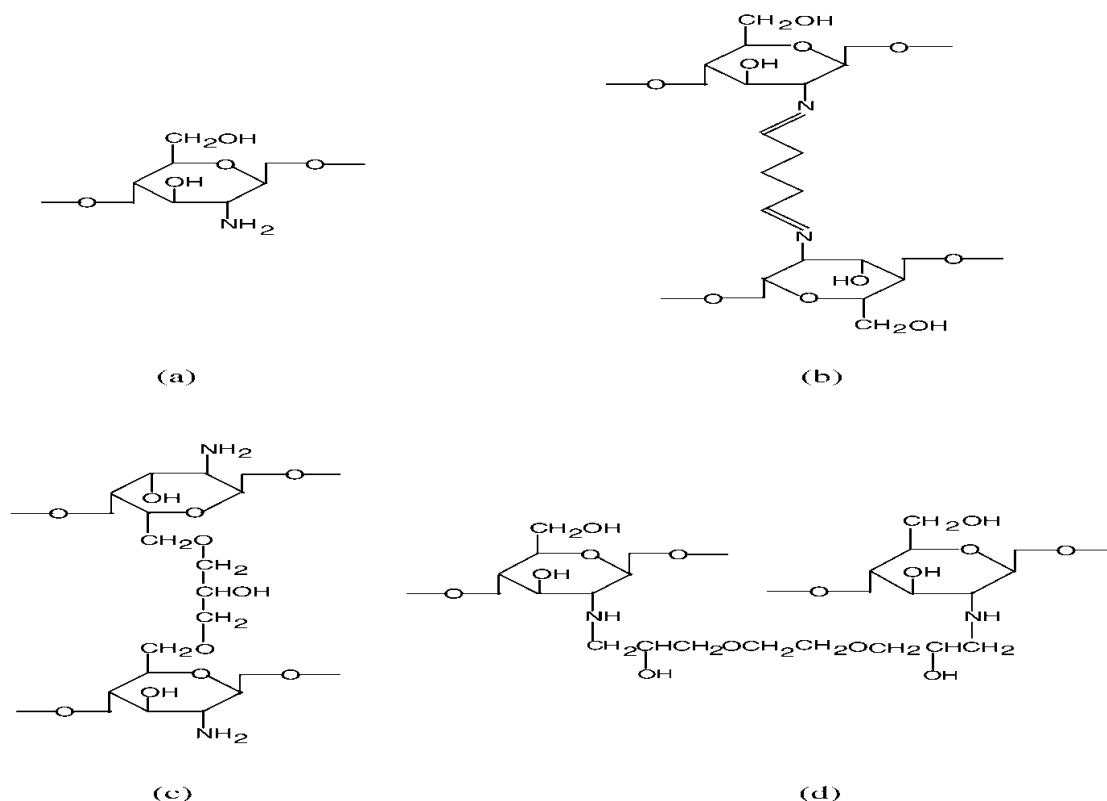
3. สมบัติทางกล

พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายหรือเกิดน้อยจะทำให้วัสดุนั้นมีสมบัติคล้ายยาง (Elastomer) คือมีความอ่อนนุ่ม (Soft) และยืดหยุ่น (Flexible) แต่สำหรับพอลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่ายมาก จะทำให้พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง (Rigid) และเปราะ (Brittle) เนื่องจากพอลิเมอร์มีโครงร่างตาข่ายสามมิติของพันธะโควาเลนต์ ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่โพลีเมอร์ไม่เป็นไปอย่างอิสระเพราะสายโซ่ถูกจำกัด

2.9.5 สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Cross-linking agent) [40]

1. สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ไกลออกซอล (Glyoxal) Succinaldehyde 1,10-decanedial Trichlorotriazine อีพิกโลโรไฮดริน (Epichlorohydrin) เบนโซควิโนน (Benzoquinone) และ บิสอีพอกซิแรน (Bisepoxiranes) ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กนี้จะเกิดภายในโครงสร้างของไคโทซาน โดยโมเลกุลเหล่านี้สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างของไคโทซานได้ดี ตัวอย่างโครงสร้างของไคโทซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยสารเคมีแสดงในรูปที่ 2.8

2. สารเชื่อมขวางที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่อัลดีไฮด์มากกว่า 1 หมู่ (Polyaldehyde) เช่น Dextran dialdehyde, Starch dialdehyde, Dialdehyde of Carageenan และ Dialdehyde of Alginate สารประกอบเหล่านี้เป็น Oxidized Polysaccharide Polyaldehyde ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารโมเลกุลขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของไคโทซาน สารเหล่านี้จะมีสายโซ่โมเลกุลยาว ทำให้ไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปยังภายในโครงสร้างของไคโทซานได้



รูปที่ 2.8 การเกิดโครงร่างตาข่ายระหว่างไคโทซานกับสารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ (a) ไคโทซาน (b) ไคโทซานที่เกิดโครงร่างตาข่ายกับกลูตารัลดีไฮด์ (c) ไคโทซานที่เกิดโครงร่างตาข่ายกับอีพิกโลโรไฮดริน (d) ไคโทซานที่เกิดโครงร่างตาข่ายกับเอทิลีนไกลคอลไดไกลซิควีเทอร์ [41]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Portela และคณะ [2] ศึกษาการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานโดยกระบวนการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง (Thermaloxidation process) โดยกระบวนการออกซิเดชันในอากาศเปียก (Wet Air Oxidation WAO) และกระบวนการออกซิเดชันในน้ำภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Wet Air Oxidation, SWAO) เป็นกระบวนการทำลายของเสียจำพวกสารอินทรีย์ในระบบปิดโดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบให้ออกซิเจน ทั้งสองวิธีนี้สามารถนำมากำจัดอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่การดำเนินงานต้องทำที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียส ขึ้นไป จึงเป็นข้อเสียสำคัญในเชิงพาณิชย์ งานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการออกซิเดชันโดยใช้อนุมูลอิสระ (free radical) เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การทดลองจะทำในระบบการไหลแบบต่อเนื่อง (continuous flow system) ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่สามารถแตกตัวเป็น OH^\cdot ได้ดีเมื่อโดนความร้อน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งให้ออกซิเจนและอนุมูลอิสระ (free radical) ในกระบวนการออกซิเดชัน จากผลการทดลองพบว่าอินทรีย์วัตถุในอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายขึ้น และสามารถลดค่า TOC (Total Organic Carbon) ได้มากถึงร้อยละ 90 ใช้เวลาในการดำเนินการ 10 วินาที ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นการทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำด้วยการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาคำยอนุมูลอิสระ จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งเสริม (promoters) มีผลทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการออกซิเดชันสูงขึ้น

Rios และคณะ [3] ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของของไหลตัดชิ้นงานชนิดที่ละลายน้ำได้ ด้วยเกลืออนินทรีย์ ของไหลตัดชิ้นงานชนิดที่ละลายน้ำได้ (soluble oil) จะมีลักษณะเป็นอิมัลชันหรือคอลลอยด์ งานวิจัยนี้ใช้เกลืออนินทรีย์ของแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) เป็นตัวดูดซับอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานซึ่งสารทั้งสองชนิดมีสมบัติเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ภาวะในการทดลองคือ ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 5 ถึง 40 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 20 ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยศึกษาอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานจาก 3 ยี่ห้อการค้า ให้สัญลักษณ์ของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน 3 ชนิด คืออิมัลชัน A B และ C จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารอิเล็กโทรไลต์ $CaCl_2$ และ $AlCl_3$ ลงในอิมัลชันทำให้อนุภาคของไหลตัดชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นทันที เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์จะทำให้อนุภาคอิมัลชันซึ่งมักมีประจุลบให้มีประจุเป็นกลาง (Neutralization) โดยสารอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่สะเทินประจุบนผิวของไหลตัดชิ้นงานที่แขวนลอยอยู่ในน้ำให้เป็นกลางโดยการดูดซับประจุและทำปฏิกิริยากับประจุบนผิวของไหลตัดชิ้นงาน ส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของไหลตัดชิ้นงานอ่อนลงและรวมตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิด

เป็นตะกอน ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ง่ายด้วยน้ำหนักร้อน โดยเสถียรภาพของอิมัลชันจะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตหรือการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลอิมัลชันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่มีความแข็งแรงมากอันเนื่องมาจากค่าประจุทางไฟฟ้า (Zeta potential) ที่ล้อมรอบผิวอิมัลชันของไหลตัดชั้นงาน ปัจจัยสำคัญในการควบคุมแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตและเสถียรภาพของอิมัลชันด้วยคังนั้นการเติมสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถให้ประจุตรงกันข้ามกับประจุของอิมัลชันทำให้เกิดการดูดติดผิวได้ โดยมีผลในการลดประจุทางไฟฟ้าที่ล้อมรอบผิวอิมัลชันหรือเป็นการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันนั่นเอง ประสิทธิภาพการทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของไหลตัดชั้นงานด้วย CaCl_2 และ AlCl_3 ในงานวิจัยนี้วัดผลได้โดยการวัดค่าความขุ่น พบว่าเสถียรภาพของอิมัลชัน A และ B ถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 10 กรัมต่อลิตร ในขณะที่อิมัลชัน C เสถียรภาพของอิมัลชันของไหลตัดชั้นงานจะถูกทำลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 40 กรัมต่อลิตร คังนั้นอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันของไหลตัดชั้นงานจะขึ้นอยู่กับชนิดและรูปแบบของไหลตัดชั้นงาน

Hasan และคณะ [13] ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินผสมกับถั่วของปาล์มน้ำมัน ไคโทซานเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่มีประจุบวกจึงทำให้สามารถดูดซับกับสีที่มีประจุลบได้ดี และการนำไคโทซานมาทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับและยังทำให้ไคโทซานทนต่อภาวะกรด-เบสและสารเคมีบางชนิดได้ดีขึ้นอีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ใช้อิพิคลอโรไฮดรินมาเพิ่มประสิทธิภาพให้กับไคโทซานจากการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-เบสมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ที่ภาวะกรดปริมาณสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางมีค่าสูงกว่าในภาวะเบส เนื่องจากในภาวะกรดหมู่อะมิโนของไคโทซานจะสามารถรับโปรตอนได้ง่ายและอยู่ในรูปของ NH_3^+ ซึ่งทำให้แรงดึงดูดค่าทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic) ระหว่างประจุบวกบนไคโทซานกับประจุลบของสีรีแอกทีฟมีค่ามากขึ้นความสามารถในการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น และการเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น และพบว่าช่วงความเข้มข้นของสารละลายสีเริ่มต้นต่ำๆ (50 – 200 มิลลิกรัม) สมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งสมดุลของการดูดซับจะเกิดขึ้นเร็วกว่าการดูดซับที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายสีเริ่มต้นสูงๆ (300 – 500 มิลลิกรัม) ซึ่งใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่เวลา 24 ชั่วโมง และผลของการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของสีรีแอกทีฟจะสามารถเคลื่อนที่ได้เพิ่มมากขึ้นจากเฟสของเหลวไปยังผิวหน้าตัวดูดซับจึงทำให้การดูดซับเกิดได้มากขึ้น และการดูดซับสีรีแอกทีฟบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางผสมกับถั่วปาล์มน้ำมันสามารถอธิบายได้ด้วย

แบบจำลองของเรดลิก เพเทอร์สัน จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบเทียม (pseudo-second order) และเอนทัลปีมีค่าเป็นบวก บ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับนี้เป็นแบบดูดความร้อน และค่าพลังงานเสรีของกิบส์มีค่าเป็นลบแสดงว่าการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นได้เอง

Wan Ngah และคณะ [18] ศึกษาการดูดซับกรดฮิวมิกด้วยเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดริน (chitosan-ECH beads) เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ปริมาณเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดริน 0.05 กรัม ค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 2-10 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการดูดซับ 1 ชั่วโมง และอัตราเร็วในการกววน 300 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าที่ความเป็นกรด-เบสต่ำ (3-6) หมู่อะมิโนของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินจะถูกโปรโตเนตให้อยู่ในรูปของ NH_3^+ จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของหมู่อะมิโนกับหมู่ RCOO^- ของกรดฮิวมิกได้ดี โดยความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินเกิดขึ้นสูงสุดที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6 เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิล (RCOOH) ของกรดฮิวมิกจะแตกตัวและอยู่ในรูป RCOO^- ในช่วงค่าความเป็นกรด-เบส 4-6 และกระบวนการดูดซับของกรดฮิวมิกบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินจะเกิดขึ้นเมื่อกรดฮิวมิกแตกตัวอยู่ในสภาพของ RCOO^- ที่สมบูรณ์แล้ว ในขณะที่ความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 6 หมู่อะมิโนของตัวดูดซับจะเกิดการหลุดออกของโปรตรอน (deprotonate) และส่งผลทำให้โมเลกุลไคโทซานไม่สามารถอยู่ในสภาพของ NH_3^+ จึงทำให้แรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของตัวดูดซับกับประจุลบของกรดฮิวมิก (RCOO^-) มีแรงอ่อนลง ประสิทธิภาพของการดูดซับจึงมีค่าลดลง โดยความสามารถในการดูดซับกรดฮิวมิกด้วยเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินสูงสุด (q_{max}) ที่คำนวณได้จากสมการแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 44.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 50 นาที และความสามารถในการคายซับ (desorption) ของกรดฮิวมิกด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ มีค่าร้อยละ 61.2 ใช้เวลาในการคายซับนาน 180 นาที แสดงให้เห็นว่าการดึงกรดฮิวมิกออกจากเม็ดไคโทซานไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์จึงยังมีกรดฮิวมิกตกค้างบนผิวของตัวดูดซับ ส่วนไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและจากการศึกษาอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินก่อนและหลังการดูดซับกรดฮิวมิก ไม่พบการเลื่อนของเลขคลื่น (shift wavenumber) และไม่ปรากฏพีคใหม่เกิดขึ้นในสเปกตรัมเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินหลังการดูดซับกรดฮิวมิกแล้ว แสดงว่าการดูดซับกรดฮิวมิกบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินไม่เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับกับกรดฮิวมิก ดังนั้นลักษณะการดูดซับนี้จึงเป็นการดูดซับทางกายภาพ

Pinotti และ Zaritzky [32] ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันที่อยู่ในรูปของอิมัลชัน โดยใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีกลุ่มอนุภาคสามารถแตกตัวให้ประจุบวกได้มาก จึงนิยมใช้เป็นสารสร้างตะกอนและตกตะกอนสารจำพวกคอลลอยด์ ซึ่งสารพอลิอิเล็กโทรไลต์มีทั้งที่มาจากธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น โดยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มาจากธรรมชาติ เช่น ไคโทซานมีสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ขั้วบวก (cationic polyelectrolyte) เนื่องจากไคโทซานมีหมู่อะมิโนอิสระ ($-NH_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 แสดงประจุบวก ไคโทซานจึงสามารถจับกับสารที่มีประจุลบได้ จึงสามารถนำมาทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันในน้ำมันได้ในงานวิจัยนี้ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันจากสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิด คือ ไคโทซาน พอลิอะคริลาไมด์และอะลูมินัมซัลเฟต (Al_2SO_4) โดยอิมัลชันที่ใช้ศึกษาเกิดจากการผสมน้ำมันเข้มน้ำ 5 กรัมต่อลิตร กับโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มน้ำ 0.001 โมลต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าไคโทซานสามารถทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานได้ทันทีหลังจากเติมไคโทซานลงในอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน และพบว่าอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานหลังการทำลายเสถียรภาพด้วยไคโทซานจะมีค่าความขุ่นต่ำกว่า 50 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) เมื่อใช้ไคโทซานปริมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และอิมัลชันหลังถูกทำลายเสถียรภาพด้วยพอลิอะคริลาไมด์มีค่าความขุ่นประมาณ 60 NTU เมื่อใช้ปริมาณพอลิอะคริลาไมด์ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร และอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานเมื่อผ่านการทำลายเสถียรภาพด้วยอะลูมินัมซัลเฟตมีความขุ่นเท่ากับ 180 และ 160 NTU ใช้ปริมาณอะลูมินัมซัลเฟต 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และการเพิ่มเวลาในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานด้วยอะลูมินัมซัลเฟตมากขึ้นเป็น 4 ชั่วโมง ค่าความขุ่นของอิมัลชันจะมีค่าลดน้อยลงเป็น 110 และ 45 NTU ตามลำดับ ในขณะที่การเพิ่มเวลาในการทำลายเสถียรภาพอิมัลชันด้วยไคโทซานและพอลิอะคริลาไมด์ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่นของอิมัลชัน และผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่มีผลต่อความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันด้วยอะลูมินัมซัลเฟต (Al_2SO_4) มากกว่าไคโทซานและพอลิอะคริลาไมด์ โดยค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอิมัลชันด้วยอะลูมินัมซัลเฟตมีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันได้ดีที่สุด

Solisio และคณะ [42] ศึกษาการดูดซับน้ำมันหล่อลื่นชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble oils) และน้ำมันชนิดที่ละลายน้ำ (soluble oils) ด้วยตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ MgO.CaO กับ MgO.CaO ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ โดโลไมต์ (Dolomite) โดยตัวดูดซับ MgO.CaO ได้มาจากการสลายตัวทางความร้อนของโดโลไมต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1800 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบเป็นสารประกอบคาร์บอนเนตหรือหินปูน ในงานวิจัยนี้ศึกษาอิมัลชันในอัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำ

(O/W) 0.02 ถึง 0.08 ทำการทดลองด้วยเครื่อง Jar Test ด้วยอัตราเร็วในการกวน 140 รอบต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 10 กรัม ปริมาตรของอิมัลชัน 25 มิลลิลิตร จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับพบว่า MgO.CaO มีพื้นที่ผิวมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 18.27 ตารางเมตรต่อกรัม และพบว่าความสามารถในการกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำด้วย MgO.CaO มีค่าผลได้ของการกำจัด (COD removal yield) เท่ากับ 0.60 และผลได้ของการกำจัด (COD removal yield) น้ำมันที่ไม่ละลาย มีค่าเท่ากับ 0.40 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำ (O/W) 0.02 และผลได้ของการกำจัดน้ำมันทั้งสองชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการดูดซับด้วย MgO.CaO ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยผลได้ของการกำจัด (COD removal yield) น้ำมันที่ไม่ละลายน้ำมีค่าเพิ่มจาก 0.40 เป็น 0.44 และผลได้ของการกำจัดของน้ำมันที่ละลายน้ำมีค่าเพิ่มจาก 0.60 เป็น 0.95 ที่ผลเป็นเช่นนี้เนื่องจากการดูดซับอิมัลชันบน MgO.CaO และ โคลโลไมด์ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวตัวดูดซับ MgO.CaO ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) อะตอมออกซิเจนบน MgO.CaO จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของคลอรีน ซึ่งมีผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับอิมัลชันทำให้ความสามารถในการดูดซับอิมัลชันมีค่าเพิ่มขึ้น

Ahmad และคณะ [43] ศึกษาการดูดซับน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน (palm oil mill effluent) ด้วยไคโทซานแบบเกล็ดและไคโทซานแบบผง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไคโทซานเป็นวัสดุดูดซับน้ำมันเหลือจากกระบวนการสกัดปาล์ม เนื่องจากไคโทซานเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ มีสมบัติโดดเด่นหลายประการ คือ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีสมบัติในการดูดซับและการรวบรวมตะกอน นอกจากนี้ไคโทซานยังเป็นสารพอลิอิเล็กโตรไลต์จากธรรมชาติ เนื่องจากไคโทซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเป็นประจุบวกสามารถดูดซับน้ำมันและทำลายเสถียรภาพประจุลบของคอลลอยด์ในอิมัลชันและน้ำมันได้ รวมทั้งสามารถดูดจับกับไอออนลบของเสียได้ดี งานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน ปริมาณตัวดูดซับ ช่วงเวลาในการดูดซับ และค่าความเป็นกรด-เบส จากผลการทดลองพบว่าไคโทซานแบบผงมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันได้ดีกว่าไคโทซานแบบเกล็ด โดยไคโทซานแบบผงมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันได้ร้อยละ 80 เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ในขณะที่การดูดซับด้วยไคโทซานแบบเกล็ดความสามารถในการดูดซับน้ำมันมีค่าร้อยละ 80 เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.8 กรัม ไคโทซานสามารถดูดซับน้ำมันได้ดีถึงแม้จะใช้ตัวดูดซับจำนวนน้อย ทั้งนี้เนื่องจากไคโทซานมีความหนาแน่นของประจุบวกมาก ดังนั้นไคโทซานปริมาณน้อยจึงให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงและพบว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับสูงขึ้น โดยปริมาณไคโทซานแบบผง 0.5 กรัม มีความสามารถในการดูดซับสูงถึงร้อยละ 99 เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน 2 กรัมต่อลิตร ใช้อัตราความเร็ว

ในการกววน 100 รอบต่อนาที และเวลาในการดูดซับ 60 นาที ผลของความเป็นกรด-เบสที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำมันบนโคโทซานจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในภาวะกรด เนื่องจากการเกิดแรงดึงระหว่างหมู่อะมิโนของโคโทซานกับน้ำมันปาล์มได้มาก ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4.5 โคโทซานแบบผงและโคโทซานแบบเกล็ดสามารถดูดซับน้ำมันปาล์มได้มากกว่าร้อยละ 80 ในขณะที่ความเป็นกรด-เบสอยู่ในภาวะเบสความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูงๆจะเกิดปฏิกิริยา saponification ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการดูดซับน้ำมันปาล์มมีค่าลดลง ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันปาล์มด้วยโคโทซานแบบผงคือ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 15 นาที นอกจากนี้ผลจากภาพถ่าย SEM ยังพบว่าพื้นผิวของโคโทซานแบบผงมีลักษณะความเป็นรูพรุนมากกว่าโคโทซานแบบเกล็ดและมีจำนวนรูพรุนกระจายตัวอยู่แบบไม่สม่ำเสมอ ส่วนโคโทซานแบบเกล็ดมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและไม่เรียบตลอดทั้งพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมันด้วยโคโทซานแบบผงและแบบเกล็ดสามารถอธิบายลักษณะการดูดซับได้ด้วยแบบจำลองฟรอนคลิช ไอโซเทอมและจลพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order)

Hu และคณะ [44] ศึกษาการแยกของไหลตัดชิ้นงานที่อยู่ในรูปอิมัลชันด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันซึ่งเป็นกระบวนการแยกสารด้วยเมมเบรน งานวิจัยนี้ศึกษาแผ่นเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเอเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone) และพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) พบว่าเมมเบรนที่ทำจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าเพอมีเอตฟลักซ์ (permeate flux) คือชนิดของเมมเบรน ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้น ความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure) อุณหภูมิขณะป้อนสารเข้า ในการทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของอิมัลชันความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และความเข้มข้นของอิมัลชันร้อยละ 5 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure) และอุณหภูมิป้อนสารเข้าทำให้ค่าเพอมีเอตฟลักซ์ (permeate flux) ของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้ชั้นเจลและชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP) อัดตัวแน่นขึ้น ในขณะที่ความดันต่ำการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันจะไม่ชัดเจน โดยเฉพาะที่ความดันต่ำกว่า 2 บาร์ ค่าฟลักซ์จะถูกควบคุมด้วยชั้นของการเกิดเป็นเจล (gel layer) ซึ่งการเกิดขึ้นเจลและการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่ตัวถูกละลายถูกกักโดยเยื่อเมมเบรนเกิดการสะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าแผ่นเมมเบรน จึงทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง และการดำเนินการแยกด้วยเมมเบรนตลอดระยะเวลายาวนานส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกลดลงและแผ่นเมมเบรนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และผลการวิเคราะห์

องค์ประกอบสารหลังผ่านการแยกด้วยแผ่นเมมเบรนโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรเมตรี พบแถบการดูดกลืนของหมู่แอลเคน ($-\text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในของไหลตัดชั้นงาน ปรากฏที่ความยาวคลื่น 2954 2854 และ 1464 cm^{-1} ส่วนประสิทธิภาพการนำกลับ (recovery) ของเมมเบรนมีค่ามากกว่าร้อยละ 98 แสดงว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสามารถแยกของไหลตัดชั้นงานออกจากอิมัลชันได้ดี โดยการนำกลับของเมมเบรนสามารถทำได้ด้วยการล้างด้วยสารละลายไมเซลล์ (micellar solution) ที่มีองค์ประกอบของสารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) เพนทานอลและน้ำ

Chiou และ คณะ [45] ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟ (RR 189) โดยเม็ดไลโทซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน พบว่าเม็ดไลโทซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินมีความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟสูงกว่าเม็ดไลโทซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ขนาดของตัวดูดซับ ความเป็นกรด-เบส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ อุณหภูมิ และอัตราส่วนของสารเชื่อมขวางต่อไลโทซาน พบว่าตัวดูดซับขนาดเล็ก (2.3-2.5 มิลลิเมตร) มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับขนาดใหญ่ (3.5-3.8 มิลลิเมตร) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟและความเป็นกรด-เบสต่างมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟ โดยพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟทำให้ความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยเม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินสูงขึ้น และการดูดซับสีรีแอกทีฟสามารถเกิดขึ้นได้ดีในภาวะกรด เนื่องจากหมู่อะมิโนของไลโทซานจะถูกโปรโตเนตด้วยโปรตรอน (H^+) ให้อยู่ในรูป NH_3^+ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น active site ของตัวดูดซับเพื่อจับกับประจุลบของสีรีแอกทีฟ ส่วนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราส่วนของสารเชื่อมขวางต่อตัวดูดซับไลโทซานมีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีรีแอกทีฟ ลักษณะของการดูดซับอธิบายด้วยแลงเมียร์ไอโซเทอม และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) มีค่าเท่ากับ 1936 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 อัตราส่วนของสารเชื่อมขวางต่อไลโทซานมีค่าเท่ากับ 0.2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือ	
3.1.1.1 เครื่องกวน (Magnetic stirrer) รุ่น SLR บริษัท Scientific promotion CO. LTD	3.1.1.2 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Horiba รุ่น F-22
3.1.1.3 เครื่องชั่งละเอียด	3.1.1.4 เครื่องเขย่า ยี่ห้อ PNP รุ่น OS3
3.1.1.5 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ GFL รุ่น 1083	3.1.1.6 เครื่อง Bomb calorimeter ยี่ห้อ PARR รุ่น 6200
3.1.1.7 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530	3.1.1.8 เครื่อง Zetasizer
3.1.1.9 เครื่อง Surface area and porosity analyzer	3.1.1.10 เครื่อง Contact Angle Meter (Tantec)
3.1.1.11 เครื่อง Fourier Transform IR Spectrometer (FT-IR) ยี่ห้อ Thermo รุ่น 470 FT-IR	3.1.1.12 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ Micromertic รุ่น ASAP 2020
3.1.1.13 เครื่องปั๊ม (Peristaltic Pump) Masterflex รุ่น 77200-60	3.1.1.14 เครื่องแก้ว
3.1.2 สารเคมี	
3.1.2.1 ไคโทซานชนิดผงจากบริษัท Seafresh Industry Public Company Limited	3.1.2.2 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl) ของบริษัท Merck
3.1.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) ของบริษัท Merck	3.1.2.4 อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin, ECH) ของบริษัท Merck
3.1.2.5 กรดแอซีติก (Acetic Acid)	

3.2 การเตรียมตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ชนิด ได้แก่ เม็ดไลโทซาน (CB) เม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดไลโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) ซึ่งแต่ละชนิดมีวิธีเตรียมดังนี้

3.2.1 เม็ดไลโทซาน (ประยุกต์ใช้ตามวิธีของ Wan Ngah และคณะ [19])

3.2.1.1 ชั่งไลโทซานหนัก 2 กรัม ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายกรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.2.1.2. ทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) โดยใช้ความเร็วรอบ 120 ต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายสีเหลืองใสที่มีความหนืด

3.2.1.3 นำสารละลายที่ได้มากรองผ่านผ้าขาวบางและตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศอยู่ในสารละลายไลโทซาน

3.2.1.4 ทำการขึ้นรูปเม็ดไลโทซาน โดยปั๊มสารละลายไลโทซานด้วยเครื่องปั๊มของไหล (Peristaltic Pump) ผ่านเข็มฉีดยาเพื่อหยดลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร หยดสารละลายไลโทซานจะกลายเป็นเม็ดไลโทซานหลังจาก 12 ชั่วโมง จึงทำการตักแยกเม็ดไลโทซานออกจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2.1.5 นำเม็ดไลโทซานที่ได้ล้างด้วยน้ำปราศจากประจุจนกว่าค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลาง

3.2.1.6 ทำการเก็บเม็ดไลโทซานในน้ำปราศจากประจุที่บรรจุในภาชนะปิดเพื่อการทดสอบต่อไป

3.2.2 เม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดริน (ประยุกต์ใช้ตามวิธีของ Hasan และคณะ [13])

3.2.2.1 ชั่งเม็ดไลโทซานที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.2.1 หนัก 50 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.2.2.2 เติมสารละลายอิพิกลอโรไฮดรินเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวน โดยใช้ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที พร้อมกับให้ความร้อนอุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.2.2.3 แยกเม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินแล้วทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุจนกระทั่งมีค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลาง

3.2.2.4 ทำการเก็บเม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินในน้ำปราศจากประจุที่บรรจุในภาชนะปิด เพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.2.3 เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุนและเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินและมีรูพรุน

3.2.3.1 นำเม็ดโคโทซานที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.2.1 และขั้นตอนที่ 3.2.2 หนัก 100 กรัม ใส่ภาชนะแล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิประมาณ 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้เม็ดโคโทซานมีลักษณะแข็งและใส

3.2.3.2 นำโคโทซานที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.3.1 ทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส นานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับโคโทซานที่มีลักษณะแข็ง เบาและมีสีขาว

3.3 วิธีทดสอบความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ

งานวิจัยนี้หาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดที่เตรียมขึ้น โดยทำการทดลองแบบเบตซ์และทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำและมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 เตรียมอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานในน้ำปราศจากประจุที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.1 0.5 1 2 และ 3 โดยปริมาตร

3.3.2 ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรด-เบสตามต้องการ

3.3.3 ชั่งตัวดูดซับที่ต้องการศึกษาหนัก 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่กำหนด แล้วทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส

3.3.4 เก็บตัวอย่างอิมัลชันที่ผ่านการดูดซับแล้วเมื่อเวลาผ่านไปตามที่กำหนดปริมาตร 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดหาความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานที่เหลือโดยเครื่องสเปกโทโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร

3.3.5 คำนวณหาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานต่อน้ำหนักตัวดูดซับ ณ เวลาต่างๆ (q_t) ดังสมการ (3.1)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{g} \quad (3.1)$$

เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงาน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

C_t = ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานหลังการดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

V = ปริมาตรของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน (มิลลิลิตร)

g = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

3.3.6 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากขั้นตอนที่ 3.3.1 ถึง 3.3.5 จะทำให้ทราบเวลาที่ใช้เพื่อให้การดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ ทำการทดลองโดยทำการชั่งตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดที่ปริมาณต่างๆกัน คือ 0.5 1 1.5 และ 2 กรัม ใส่ลงในอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 นำไปกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วและเก็บตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร เพื่อวัดหาความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานที่ภาวะสมดุล (q_e) แล้วนำผลการคำนวณที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C/q_e กับ C_e สำหรับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และ $\log q_e$ กับ $\log C_e$ สำหรับฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม

3.3.7 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับทำการทดลองโดยใช้อิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.1 0.5 1.0 2.0 และ 3.0 โดยปริมาตร สำหรับตัวแปรอื่นๆกำหนดให้คงที่คือ ปริมาณตัวดูดซับแต่ละชนิดจำนวน 1 กรัม ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส กวนด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างครั้งละ 3 มิลลิลิตร เพื่อวัดหาความเข้มข้นอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานที่ผ่านการดูดซับที่เวลาต่างๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุลได้แก่ 5 10 15 20 30 60 90 120 150 180 240 และ 360 นาที

3.3.8 การศึกษาอุณหภูมิพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษอุณหภูมิพลศาสตร์การดูดซับทำการทดลองโดยใช้อิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ใช้ตัวดูดซับแต่ละชนิดจำนวน 1 กรัม ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ทำการกวนด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างกันคือ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และทำการเก็บตัวอย่างครั้งละ 3 มิลลิลิตร เพื่อวัดหาความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานที่เหลือโดยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร ณ เวลาต่างๆ จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล

3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

การศึกษาผลของตัวแปรนั้นๆ ต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับได้แก่

3.4.1 ปริมาณของตัวดูดซับ

ทำการทดสอบผลของปริมาณตัวดูดซับ 4 ชนิด คือ เม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 - 2 กรัม

3.4.2 ค่าความเป็นกรด-เบส

การศึกษาความเป็นกรด-เบสที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน ทำการศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 3 - 9 โดยปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงาน

ความเข้มข้นเริ่มต้นของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานทำการศึกษาในช่วงร้อยละ 0.1 - 3.0 โดยปริมาตร

3.4.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ

การศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างกันคือ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

3.4.5 เวลาที่ใช้ในการดูดซับ

เวลาที่ใช้ในการดูดซับทำการทดลองที่เวลา 5 10 15 20 30 60 90 120 150 180 240 และ 360 นาที

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ

3.5.1 การศึกษาประจุบนผิวอนุภาคโดยเครื่อง Zetasizer การทดสอบทำการวิเคราะห์หาค่าศักย์ซีต้าและค่า PZC (Point of Zero Charge) ของตัวดูดซับโดยนำตัวดูดซับ 1 กรัม ผสมในน้ำปราศจากประจุจากนั้นปรับค่า pH ตั้งแต่ 2-10 โดยใช้สารละลาย HCl และ NaOH แล้วนำไปวัดค่าศักย์ซีต้า

3.5.2 การศึกษาหมู่ลักษณะฟังก์ชันเฉพาะด้วยวิธีฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) โดยเตรียมตัวดูดซับแห้งทั้ง 4 ชนิด ประมาณ 0.5 กรัม มาบดผสมกับ KBr แล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นใสเพื่อใส่ sample holder จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด และหมู่ฟังก์ชันของไหลตัดชิ้นงานและความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน

3.5.3 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยเครื่อง BET Surface Area Analyzer ด้วยวิธี Brunauer - Emmet - Teller (BET) เพื่อวัดหาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ

3.5.4 การศึกษาภาพถ่ายขยายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างพื้นผิวและรูพรุนของตัวดูดซับที่กำลังขยายต่างๆและเพื่อให้เห็นความแตกต่างตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับของไพลัดชันงาน

3.5.5 การศึกษามุมสัมผัส (Contact angle) การหาค่ามุมสัมผัสโดยเครื่อง Contact Angle Meter เพื่อหาค่ามุมสัมผัสระหว่างผิวน้ำกับผิวของตัวดูดซับ

3.5.6 การศึกษาค่าความร้อน (Heating Value) เพื่อหาค่าความร้อนของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดก่อนและหลังการดูดซับของไพลัดชันงาน โดยเครื่อง Bomb Calorimeter เพื่อทดสอบหาค่าความร้อนที่เปลี่ยนไปหลังการดูดซับของไพลัดชันงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะและสมบัติกายภาพของตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับของไหลตัดชั้นงานบนตัวดูดซับ 4 ชนิด คือ เม็ดไคโทซาน (CB) เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และ เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) โดยตัวดูดซับที่เตรียมได้มีลักษณะดังต่อไปนี้

ไคโทซานที่ขึ้นรูปเป็นเม็ด (bead) มีลักษณะกลม สีขาวขุ่น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2 – 3 มิลลิเมตร เม็ดไคโทซานที่ได้จะถูกแบ่งออก และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอีพิกลอโรไฮดริน เพื่อทำการเชื่อมขวางเป็นเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน จึงมีลักษณะภายนอก เช่นเดียวกับเม็ดไคโทซานแต่มีความแข็งมากกว่าเม็ดไคโทซาน ส่วนเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุนและเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน เตรียมด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) ต่างมีลักษณะเหมือนกันเมื่อพิจารณาจากภายนอก กล่าวคือ มีสีขาว โปร่งเบา และมีความแข็ง ส่วนขนาดของเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุนและเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2 - 3 มิลลิเมตร ซึ่งตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดแสดงดังในรูปที่ 4.1 และ 4.2



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

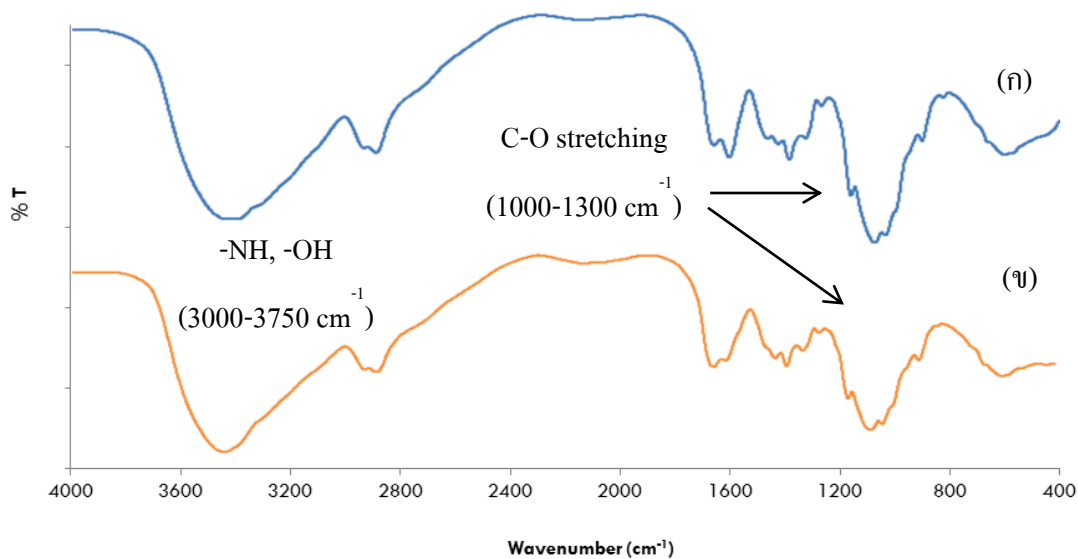


(ค)

(ง)

รูปที่ 4.2 (ค) เม็ดโพลียูรีเทน และ (ง) เม็ดโพลียูรีเทนที่มีรูพรุน

4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโพลียูรีเทนและเม็ดโพลียูรีเทนที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลียูรีเทนก่อนการดูดซับ



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโพลียูรีเทนก่อนและหลังการเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลียูรีเทน (ค) เม็ดโพลียูรีเทน และ (ง) เม็ดโพลียูรีเทนที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลียูรีเทน

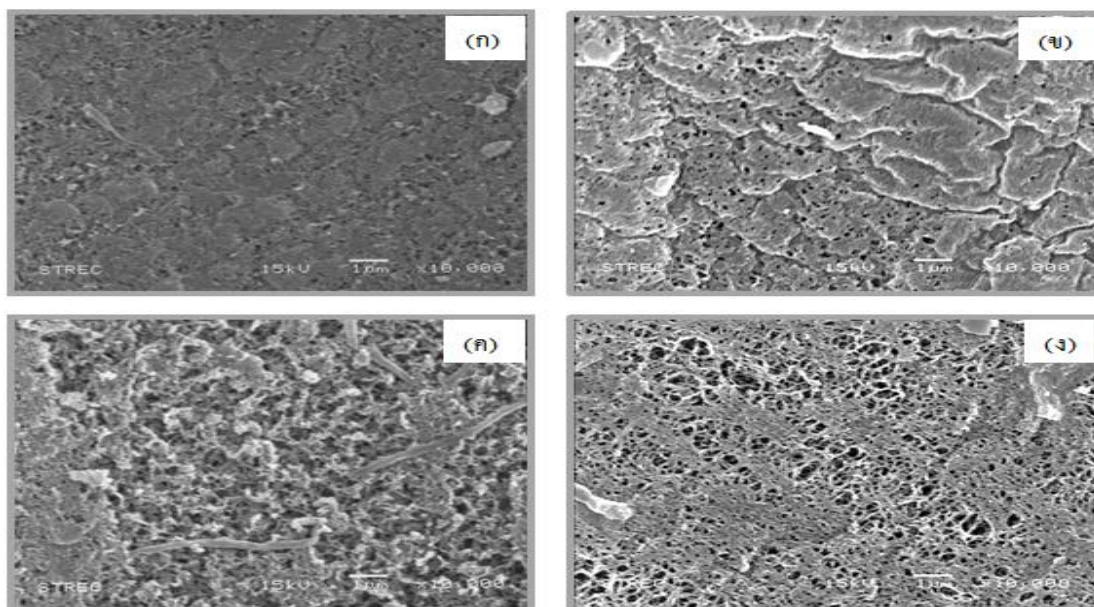
หมู่ฟังก์ชันของเม็ดโพลียูรีเทนที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลียูรีเทน (ECB) ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) พบว่าเมื่อเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายอีพ็อกซีโพลียูรีเทนลงไปทำปฏิกิริยากับเม็ดโพลียูรีเทนแล้วได้เป็นเม็ดโพลียูรีเทนเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลียูรีเทนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเม็ดโพลียูรีเทน

ซานแตกต่างไปจากเดิม จากอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดริน (ECB) แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลง ณ ตำแหน่งของหมู่ C-O ปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ C-O ในช่วงเลขคลื่นประมาณ $1000 - 1300 \text{ cm}^{-1}$ แถบสเปกตรัมมีความเข้มลดลง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงไว้กันระหว่างสายพอลิเมอร์ของไคโทซานด้วยสารอิพิคลอโรไฮดริน [41] ซึ่งสายพอลิเมอร์ของไคโทซานจะเชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไฮออนิก แสดงว่าการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของไคโทซานหลังผ่านปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย

สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด ถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface Area) เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ของตัวดูดซับทั้งสี่ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

ชนิดตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตร รูพรุน (cc/g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางรู พรุน (\AA)
เม็ดไคโทซาน (CB)	4.41	0.0051	49.83
เม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB)	11.65	0.0210	72.15
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวาง (ECB)	5.17	0.0052	40.07
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุน (pECB)	10.78	0.0181	67.09



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนการดูดซับ: (ก) เม็ดไคโทซาน (ข) เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (ค) เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ(ง) เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน เมื่อใช้ตัวดูดซับชนิดละ 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 360 นาที

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนตัวดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าเม็ดไคโทซาน (CB) กับเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) ใกล้เคียงกัน และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) มีรูพรุนขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเม็ดไคโทซาน (CB) เป็นผลมาจากการเติมอีพิกลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายไปทำปฏิกิริยากับสายพอลิเมอร์ของไคโทซาน จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุนของเม็ดไคโทซาน ทำให้เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) ที่เตรียมได้มีรูพรุนเล็กลงและมีโครงสร้างความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) พบว่ามีพื้นที่ผิวและรูพรุนเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวดูดซับทั้งสองถูกเตรียมด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) ซึ่งทำให้น้ำภายในตัวดูดซับหายไปและเกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุนขึ้นแทนที่ จึงทำให้ตัวดูดซับทั้งสองมีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากขึ้น โดยเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 11.65 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) ปริมาตรรูพรุน 0.0210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (cc/g) และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 72.15 อังสตรอม (Å) ส่วนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเท่ากับ 10.78 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) ปริมาตรรูพรุน 0.0181 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (cc/g) และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 67.09 อังสตรอม (\AA) และผลดังกล่าวสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM แสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงพื้นผิวเม็ดไคโทซาน (CB) กับเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) ก่อนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน มีลักษณะพื้นผิวขรุขระ ไม่เรียบ และมีความเป็นรูพรุนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวของเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) ซึ่งลักษณะพื้นผิวตัวดูดซับทั้งสองมีความเป็นรูพรุนมาก เป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) จึงทำให้ตัวดูดซับทั้งสองมีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับ

ชนิดตัวดูดซับ	Hydrophobic Index	Contact angle (θ)
เม็ดไคโทซาน (CB)	1.18	47.1
เม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB)	2.46	57.4
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวาง (ECB)	2.27	54.2
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุน (pECB)	5.38	78.9

ผลการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าเม็ดไคโทซานเมื่อผ่านปฏิกิริยาการเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินทำให้ค่าความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Index) เพิ่มขึ้น โดยเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีค่าความไม่ชอบน้ำสูงสุดในตัวดูดซับทั้งหมดที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 5.38 แสดงว่าปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำของตัวดูดซับได้มากขึ้น และส่งผลทำให้ค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ของน้ำบนผิวตัวดูดซับมีค่ามากที่สุดด้วย มีค่ามุมสัมผัส (θ) เท่ากับ 78.9 แสดงว่าผิวของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นหรือผิวของตัวดูดซับมีความเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน จึงสามารถจับกับของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันได้ดี

4.3 สภาพละลายได้ (Solubility)

การทดสอบความสามารถในการละลาย เมื่อนำผงไคโทซาน เม็ดไคโทซาน และเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินใส่ลงในสารละลายดังตารางที่ 4.3 พบว่าตัวดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายในสารละลายแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 สภาพละลายได้ของเม็ดไคโทซานเปรียบเทียบกับเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดริน (จำนวนเครื่องหมาย + หมายถึงการละลายได้ในระดับต่างๆ กัน เครื่องหมาย - หมายถึงไม่ละลาย)

ชนิดตัวดูดซับ	2% CH ₃ COOH	1 M HCl	1 M NaOH	50% Ethanol	DI water
ผงไคโทซาน	ละลาย (++++)	ละลาย (+++)	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)
เม็ดไคโทซาน	ละลาย (+++)	ละลาย (++)	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)
เม็ดไคโทซานเชื่อม ขวาง	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)	ไม่ละลาย (-)

จากตารางการทดสอบสภาพละลายได้ พบว่าผงไคโทซานและเม็ดไคโทซานละลายได้ดีในสารละลายกรดแอสติกเข้มข้นร้อยละ 2 และละลายได้น้อยลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ แต่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีสภาพเป็นเบส ในขณะที่เม็ดไคโทซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินมีความสามารถทนต่อสมบัติการละลายในสารละลายกรดแอสติกและกรดไฮโดรคลอริกได้ดีกว่าไคโทซานแบบผงและเม็ดไคโทซาน เนื่องจากเม็ดไคโทซานเมื่อผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารอิพิกลอโรไฮดรินในปฏิบัติการเชื่อมขวาง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของไคโทซานด้วยพันธะเคมีระหว่างสายพอลิเมอร์ของไคโทซานเกิดโครงสร้างเป็นร่างแหขึ้นภายในตัวดูดซับ จึงทำให้ตัวดูดซับมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากกว่าไคโทซานแบบผงและเม็ดไคโทซาน กล่าวคือ เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิกลอโรไฮดรินจะไม่ละลายในตัวทำละลายแต่จะเกิดการพองตัว เนื่องจากโมเลกุลของตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้

จึงไม่เกิดผลกระทบต่อพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ [40] ดังนั้นเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินจะสามารถทนต่อสมบัติทางเคมีได้ดีกว่าโคโทซานแบบผงและเม็ดโคโทซาน

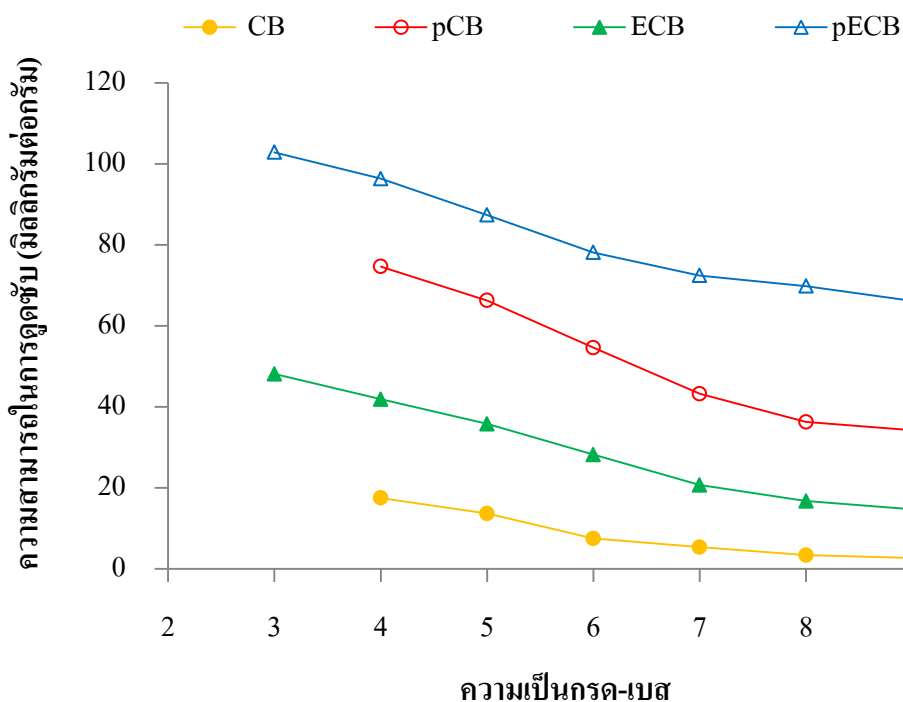
4.4 ความเป็นกรด-เบสของของไหลตัดชิ้นงาน

ความเป็นกรด-เบสของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับแต่ละชนิด ทำการศึกษาความเป็นกรด-เบสตั้งแต่ 3 ถึง 9 เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม อัตราเร็วในการกววน 120 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับนาน 360 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5

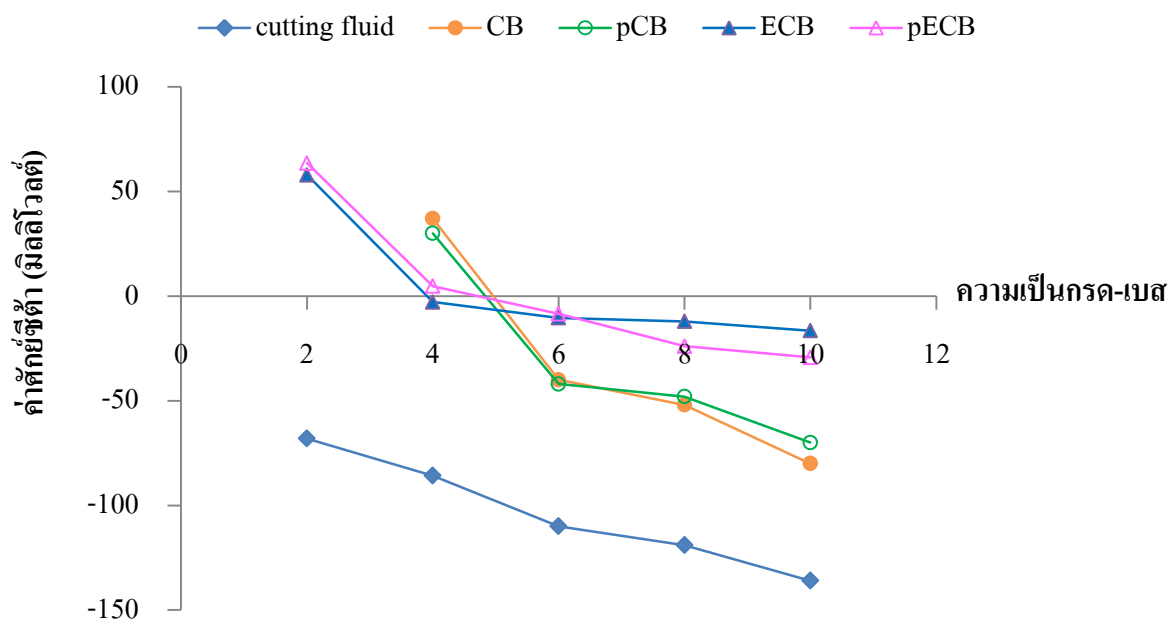
จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสในอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดต่างมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานอยู่ในสภาพความเป็นกรด เนื่องจากที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ จะมีโปรตอน (H^+) ที่แตกตัวมาจากกรดจำนวนมากเข้าไปจับกับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของโคโทซานและอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ทำให้บนผิวของตัวดูดซับแสดงค่าเป็นประจุบวกได้มาก [13] จึงทำให้เกิดความแตกต่างของประจุทางไฟฟ้าหรือค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) บนผิวตัวดูดซับกับประจุของไหลตัดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีทางประจุไฟฟ้าเป็นบวกมีค่าเท่ากับ +57.9 และ +63.6 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และเม็ดโคโทซาน (CB) และเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) ศักย์ซีต้าของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับ 30.5 และ 37.9 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่อิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานศักย์ซีต้ามีค่าเท่ากับ -68.1 มิลลิโวลต์ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของศักย์ซีต้าระหว่างประจุบนผิวตัวดูดซับกับประจุของไหลตัดชิ้นงาน จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุบวกบนผิวตัวดูดซับที่กระทำต่อประจุลบของของไหลตัดชิ้นงาน ประสิทธิภาพของการดูดซับจึงสูงขึ้นและเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นจาก 4 ถึง 9 ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดต่างมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการหลุดออกของโปรตอน (deprotonation) [48] ของหมู่อะมิโนบนโคโทซานซึ่งในภาวะเบสนั้นจะมีหมู่ OH^- ที่แตกตัวมาจากเบสมากขึ้น และจะเข้าจับกับแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ของโคโทซานและอยู่ในรูปไม่มีประจุ ($-NH_2$) จึงทำให้แรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของโคโทซานกับประจุลบของไหลตัดชิ้นงานอ่อนลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง และเมื่อพิจารณาประจุทางไฟฟ้าในภาวะเบสพบว่าศักย์ซีต้าของเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่มีรู

พอรุน (pCB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีพอรุน (pECB) แสดงประจุทางไฟฟ้าเป็นลบมีค่าเท่ากับ -80.5 -70.2 -16.5 และ -29.3 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่ศักย์ไฟฟ้าของไหลตัดชิ้นงานมีค่าเท่ากับ -136.1 มิลลิโวลต์ เมื่อความเป็นกรด-เบสมีค่าเท่ากับ 9 แสดงให้เห็นว่าบนผิวตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีประจุเป็นลบ จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุบนผิวตัวดูดซับและประจุลบของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานจึงมีค่าลดลงในภาวะเบส

จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับเม็ดโคโทซาน (CB) และเม็ดโคโทซานที่มีพอรุน (pCB) ละลายในขณะที่ทำการทดลองที่ภาวะความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของเม็ดโคโทซาน (CB) และเม็ดโคโทซานที่มีพอรุน (pCB) คือความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 มีค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุดเท่ากับ 14.9 และ 72.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร และค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีพอรุน (pECB) คือที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 มีค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุดเท่ากับ 46.7 และ 96.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ผลของความเป็นกรด-เบสต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ



รูปที่ 4.6 ค่าศักย์ซีต้าของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานและตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดที่ภาวะความเป็นกรด-เบสต่างๆ

รูปที่ 4.6 แสดงค่าศักย์ซีต้าของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานและตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดที่ภาวะความเป็นกรด-เบสต่างๆ พบว่าประจุที่ผิวหน้าตัวดูดซับจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเป็นกรด-เบสของอิมัลชัน โดยค่าความเป็นกรด-เบสที่ทำให้เกิดสมดุลระหว่างประจุบวกและประจุลบ pH_{ZPC} (pH of zero point of the charge) ของเม็ดโคโทซาน (CB) และเม็ดโคโทซานมีรูพรุน (pCB) มีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 5.0 ส่วนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เกิดสมดุลระหว่างประจุบวกและประจุลบ (pH_{ZPC}) มีค่าประมาณ 4.0 และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) เกิดสมดุลระหว่างประจุบวกและประจุลบ (pH_{ZPC}) ที่ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 4.5 ส่วนศักย์ซีต้าของของไหลตัดชิ้นงานมีค่าประจุทางไฟฟ้าเป็นลบตั้งแต่ -68.1 ถึง -136 เมื่อความเป็นกรด-เบสของอิมัลชันอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 แสดงให้เห็นว่าประจุที่อยู่ล้อมรอบผิวของไหลตัดชิ้นงานเป็นประจุลบ ซึ่งสามารถอธิบายความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสและค่า pH_{ZPC} ของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด ได้ว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสในอิมัลชันมีค่าต่ำกว่า pH_{ZPC} (pH of zero point of the charge) ของตัวดูดซับ บนผิวตัวดูดซับจะแสดงประจุบวกและเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของอิมัลชันมีค่าสูงกว่า pH_{ZPC} ของตัวดูดซับ บนผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุลบ โดยในภาวะกรดตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดจะมีประจุบนผิวเป็นบวกจึงสามารถดึงดูดกับของไหลตัดชิ้นงานที่มีประจุลบได้ดี จากผลการทดลองการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน

(ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูปน (pECB) พบว่าการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นได้ดีที่ภาวะความเป็นกรด-เบสต่ำๆ ($\text{pH} < 5$) ส่วนเม็ดไคโทซาน (CB) และเม็ดไคโทซานมีรูปน (pCB) การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อความเป็นกรด-เบสมีค่าเท่ากับ 4 เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างประจุบวกของตัวดูดซับกับประจุลบของของไหลตัดชิ้นงานมีค่ามากที่สุด และความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มความเป็นกรด-เบสมากขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าสูงกว่า pH_{ZPC} ของตัวดูดซับ จึงทำให้เกิดแรงผลักกันระหว่างประจุบนผิวตัวดูดซับกับประจุลบของของไหลตัดชิ้นงาน ดังนั้นการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด สามารถเกิดขึ้นได้ดีในภาวะความเป็นกรด-เบสต่ำๆหรือที่ความเป็นกรด-เบสต่ำกว่าค่า pH_{ZPC} ของตัวดูดซับแต่ละชนิด

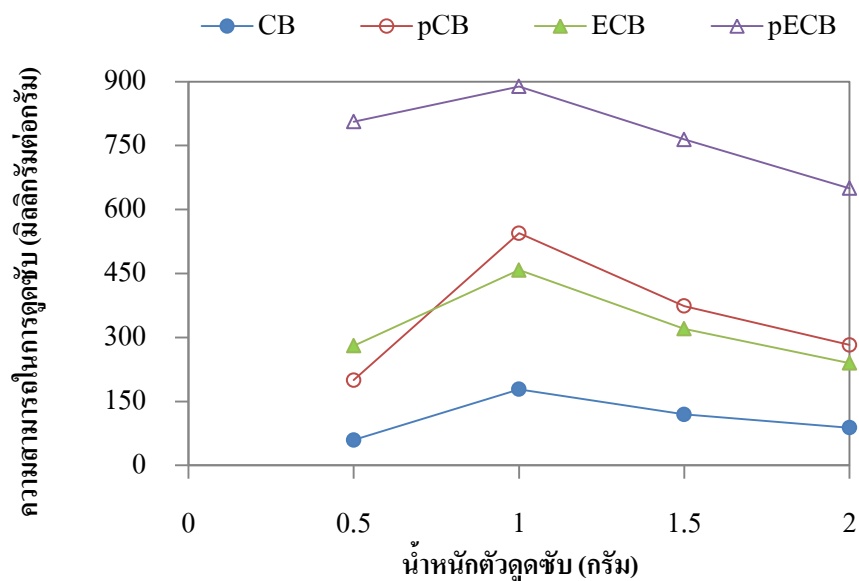
4.5 ปริมาณตัวดูดซับ

ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน เมื่อใช้ตัวดูดซับน้ำหนัก 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ของไหลตัดชิ้นงานปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และอัตราเร็วในการกวน 120 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 360 นาที ดังแสดงในรูป 4.7-4.8

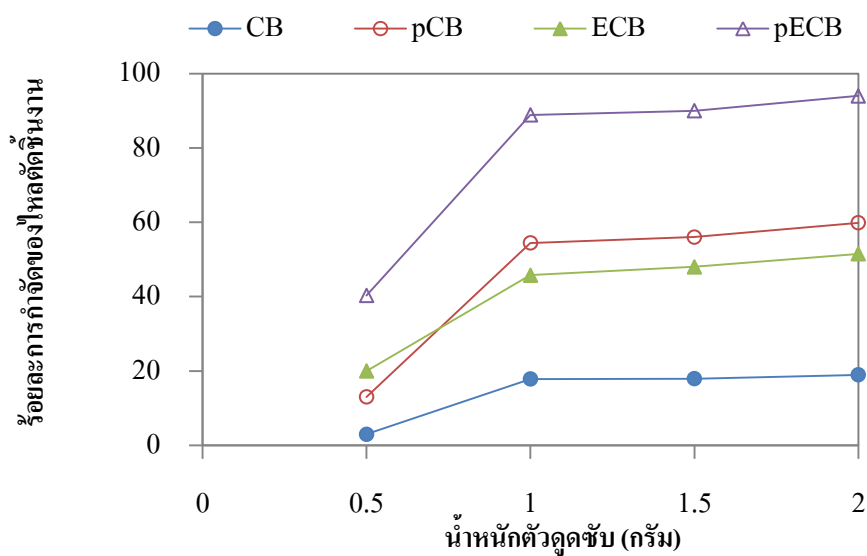
จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไหลตัดชิ้นงานที่ถูกดูดซับและร้อยละของไหลตัดชิ้นงานต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนตัวดูดซับจาก 0.5 กรัม เป็น 1.0 กรัม ทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานที่ภาวะสมดุล (q_e) มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับกระบวนการดูดซับหรือเป็นการเพิ่มตำแหน่งที่ทำหน้าที่จับกับของไหลตัดชิ้นงานให้มากขึ้นนั่นเอง อีกทั้งปริมาณตัวดูดซับที่มากขึ้นทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้รวดเร็วบนผิวตัวดูดซับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการดูดซับสูงขึ้น [49] โดยค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานที่ภาวะสมดุลของเม็ดไคโทซาน (CB) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 59.3 ไปเป็น 178.4 มิลลิกรัมต่อกรัม เม็ดไคโทซานมีรูปน (pCB) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 199.8 ไปเป็น 544.5 มิลลิกรัมต่อกรัม เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดริน (ECB) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 280.5 ไปเป็น 458.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูปน (pECB) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 806.2 ไปเป็น 888.6 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร และถึงแม้การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันมีค่ามากขึ้นแต่การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับก็ทำให้ค่าการดูดซับจำเพาะมีค่าลดลง จากผลการทดลองจึง

พบว่าการใช้จำนวนตัวดูดซับมากกว่า 1 กรัม ทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน (q_e) ของตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากมีปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันจึงทำให้น้ำหนักของไหลตัดชิ้นงานต่อน้ำหนักของตัวดูดซับมีค่าลดลง สังเกตได้จากประสิทธิภาพของการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 กรัม แสดงดังรูปที่ 4.8

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดกับปริมาณตัวดูดซับที่ใช้พบว่า การเพิ่มจำนวนตัวดูดซับทำให้ร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.5 กรัม ถึง 2 กรัม เม็ดโคโทซาน (CB) มีร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3 ถึง 19 เม็ดโคโทซานมีรูพรุน (pCB) มีร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12 ถึง 60 ส่วนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) มีร้อยละของการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 ถึง 52 และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 ถึง 94 แสดงว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้สามารถกำจัดของไหลตัดชิ้นงานออกจากอิมัลชันได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มจำนวนตัวดูดซับทำให้มีตำแหน่ง active site บนตัวดูดซับมากขึ้น ร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานจึงมีค่าเพิ่มขึ้นได้อีก แต่จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ใช้จาก 1 ถึง 2 กรัม ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 1 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานในการทดลองนี้เนื่องจากเป็นปริมาณตัวดูดซับที่ให้ค่าการดูดซับจำเพาะสูงสุด



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 360 นาที และอัตราเร็วในการกวาด 120 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 360 นาที และใช้อัตราเร็วในการกวาด 120 รอบต่อนาที

4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับ

การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมเพื่อยืนยันผลการเตรียมตัวดูดซับ และวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานแล้ว เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ปริมาณตัวดูดซับหนัก 1 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการกวาด 120 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 360 นาที

การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของไคโทซานแสดงดังรูปที่ 4.9 - 4.10 แถบการดูดกลืน (absorption band) ของหมู่ฟังก์ชันไคโทซานที่สำคัญ คือ จะปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่เอมีน (-NH) ซึ่งแถบกลืนการดูดกลืนปรากฏซ้อนทับกันอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3000 ถึง 3750 cm^{-1} แสดงถึงความเป็นพอลิเมอร์ของไคโทซาน [50, 51] และพิกหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของ Amide anion (CONHR) ในช่วงเลขคลื่น 1680 ถึง 1650 cm^{-1} และพิกหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของ Amine stretching (NH_2) ปรากฏที่เลขคลื่น 1574 cm^{-1} แถบกลืนการดูดกลืนของหมู่ C-O จะปรากฏในช่วงเลขคลื่น 1300 ถึง 1000 cm^{-1} [52] และพิกของ C-N stretching ของหมู่เอมีนที่ความยาวคลื่นประมาณ 890 cm^{-1} [47]

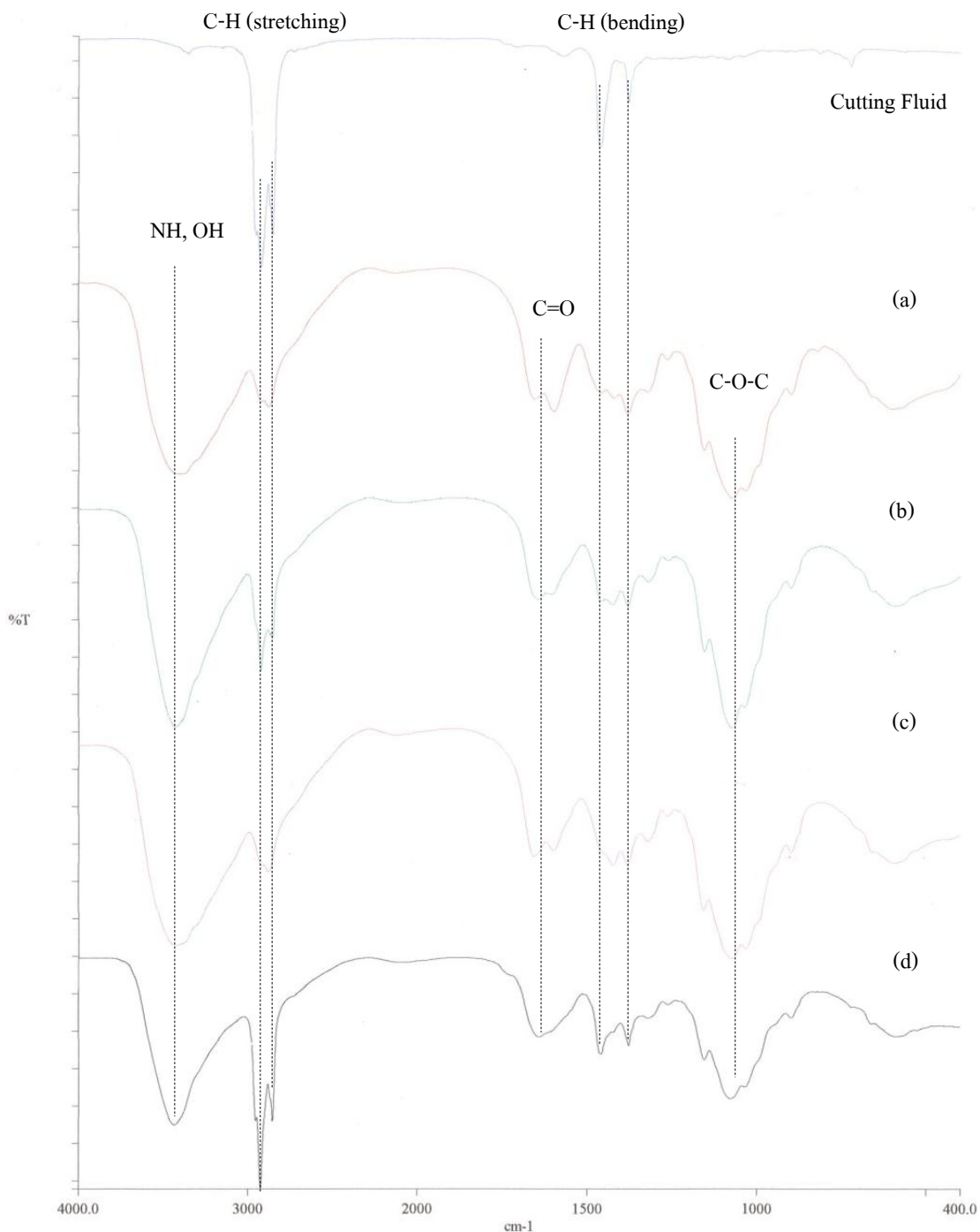
ในรูป 4.9 (a) แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซาน (CB) ก่อนการดูดซับ พบแถบการดูดกลืนของ primary amine (-NH_2) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ช่วงเลขคลื่น $3000 - 3750\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแถบการดูดกลืนของหมู่เอมีนและหมู่ไฮดรอกซิลจะเกิดซ้อนทับกันจึงปรากฏเห็นเป็นแถบการดูดกลืนในช่วงเลขคลื่นเดียวกัน พบพิกหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของ Amide anion และ Amine stretching ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ $1563 - 1656\text{ cm}^{-1}$ และพิก C-N stretching ของหมู่เอมีน ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ 890 cm^{-1} พิกของหมู่ C-O-C ใน Memberedring ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ $1074 - 1076\text{ cm}^{-1}$ และพิกของหมู่ C - O ของ Alcohol stretching ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ $1157 - 1159\text{ cm}^{-1}$

ในรูป 4.9 (c) แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) จะปรากฏแถบการดูดกลืนของ primary amine (-NH_2) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในช่วงเลขคลื่น $3000 - 3750\text{ cm}^{-1}$ พบแถบการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ปรากฏในช่วง $1575 - 1656\text{ cm}^{-1}$ และพิกของหมู่ C-O ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ $1031 - 1300\text{ cm}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของเม็ดไคโทซาน (CB) และเม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB) พบว่าตัวดูดซับทั้งสองปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของไคโทซานและมีลักษณะสเปกตรัมไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการเตรียมเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุนด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) ไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันบนเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อโครงสร้างทางเคมีของเม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB) แต่จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของตัวดูดซับมากกว่า คือมีผลทำ

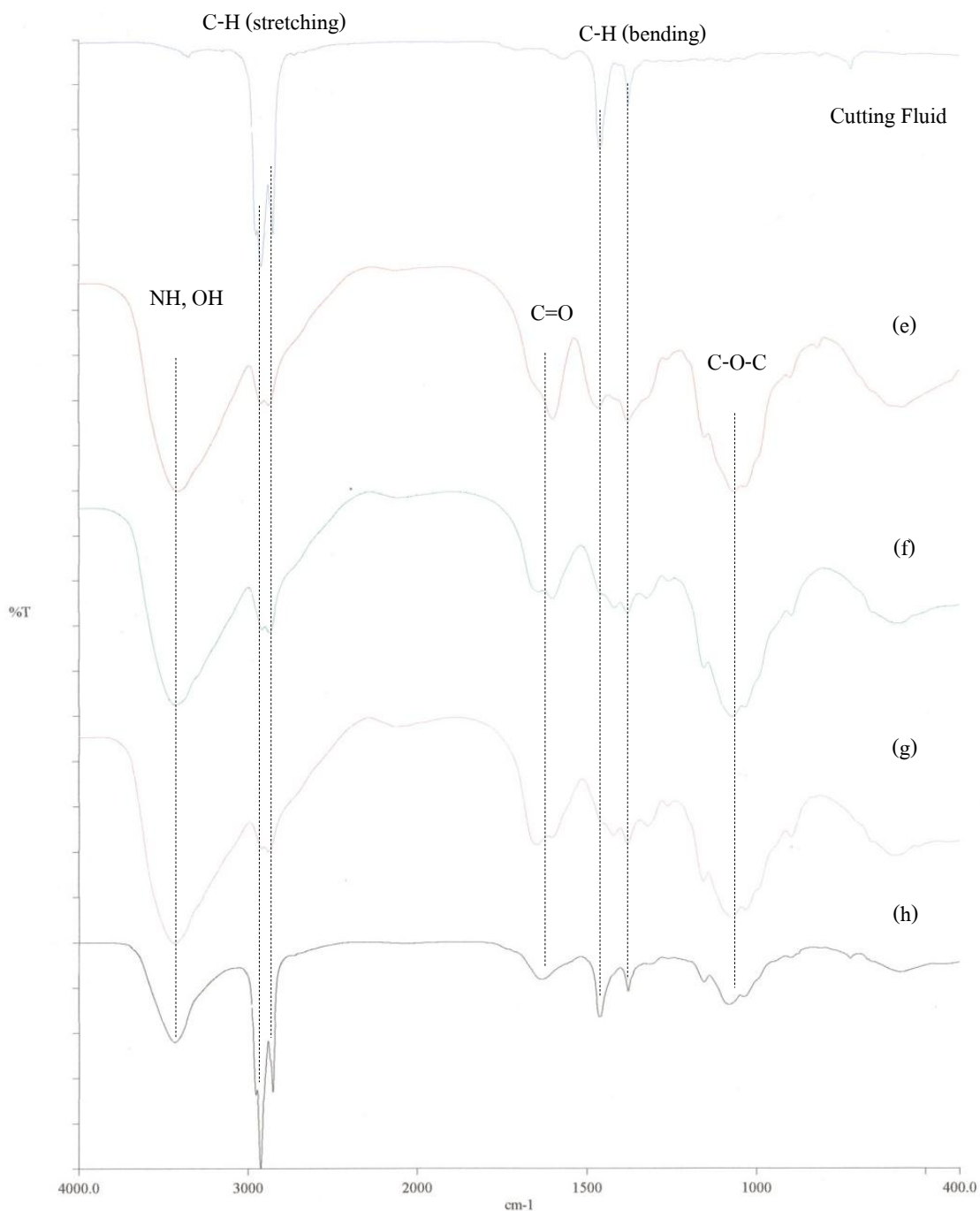
ให้พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.1

จากรูป 4.10 (e) และ 4.10 (g) แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดไคโทซานเชื่อมด้วยอพิคลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมด้วยอพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับทั้งสองปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคล้ายๆกัน คือพบแถบการดูดกลืนของ primary amine ($-NH_2$) และแถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ที่เลขคลื่นในช่วง $3312 - 3750 \text{ cm}^{-1}$ พีกหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) ของ Amide anion และ Amine stretching ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ $1574 - 1656 \text{ cm}^{-1}$ และพบพีกหมู่ C-N stretching ของหมู่เอมีนปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ 890 cm^{-1} จากผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของตัวดูดซับทั้งสองปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญเช่นเดียวกันกับที่พบในสเปกตรัมของไคโทซาน แต่พบว่าแถบการดูดกลืนของ C-O (stretching) มีความแตกต่างออกไป เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างอพิคลอโรไฮดริน ($-CH_2-CHOH-CH_2-$) กับหมู่ ($-CH_2OH$) ของไคโทซาน จึงทำให้สเปกตรัมของไคโทซานเกิดการเปลี่ยนแปลงตรงตำแหน่งหมู่ฟังก์ชัน C-O (stretching) พบว่าแถบการดูดกลืนของ C-O (stretching) ที่ปรากฏในช่วงเลขคลื่น $1000-1300 \text{ cm}^{-1}$ มีความเข้มลดลงกว่าสเปกตรัมของไคโทซานทั่วไป เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เกิดการเชื่อมโยงไว้กันระหว่างสายพอลิเมอร์ไคโทซาน ($-O-CH_2-CHOH-CH_2-O-$) [41]

ส่วนอินฟราเรดสเปกตรัมของไหลตัดชิ้นงานปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วยหมู่เมทิล (CH_3) และเมทิลีน (CH_2) จึงพบแถบสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นและการงอของพันธะ C-C และ C-H เป็นส่วนใหญ่ดังนี้ ผลการวิเคราะห์พีกของ C-H stretching ($-CH_2, CH_3$) ปรากฏแถบการดูดกลืน (absorption band) ที่ช่วงเลขคลื่น $2850 - 2965 \text{ cm}^{-1}$ พบแถบการดูดกลืนของ C-H bending (CH_3) ที่ $1365 - 1470 \text{ cm}^{-1}$ และพีกของหมู่ (CH_2)₄ (สายโซ่ตรงของหมู่ ethylene ที่ต่อกันมากกว่า 3 หมู่ขึ้นไป) ปรากฏที่เลขคลื่นใกล้ 720 cm^{-1} [53] และอินฟราเรดสเปกตรัมหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะปรากฏแถบการดูดกลืน (absorption band) ของ C-H stretching) และ C-H bending ที่เลขคลื่น $2854 - 2930 \text{ cm}^{-1}$ และที่เลขคลื่น $1378 - 1459 \text{ cm}^{-1}$ เป็นตำแหน่งซึ่งตรงกับหมู่แอลคิล ($-CH_2, -CH_3$) ที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของไหลตัดชิ้นงานพบว่ามีความเข้มของพีกมากขึ้น แสดงดังรูป 4.9 (b) – 4.10 (h) จึงสามารถยืนยันผลการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้งสองชนิดได้



รูปที่ 4.9 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโคโทซานและเม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน
(a)-(b): เม็ดโคโทซานก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน ตามลำดับ
(c)-(d): เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุนก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน ตามลำดับ

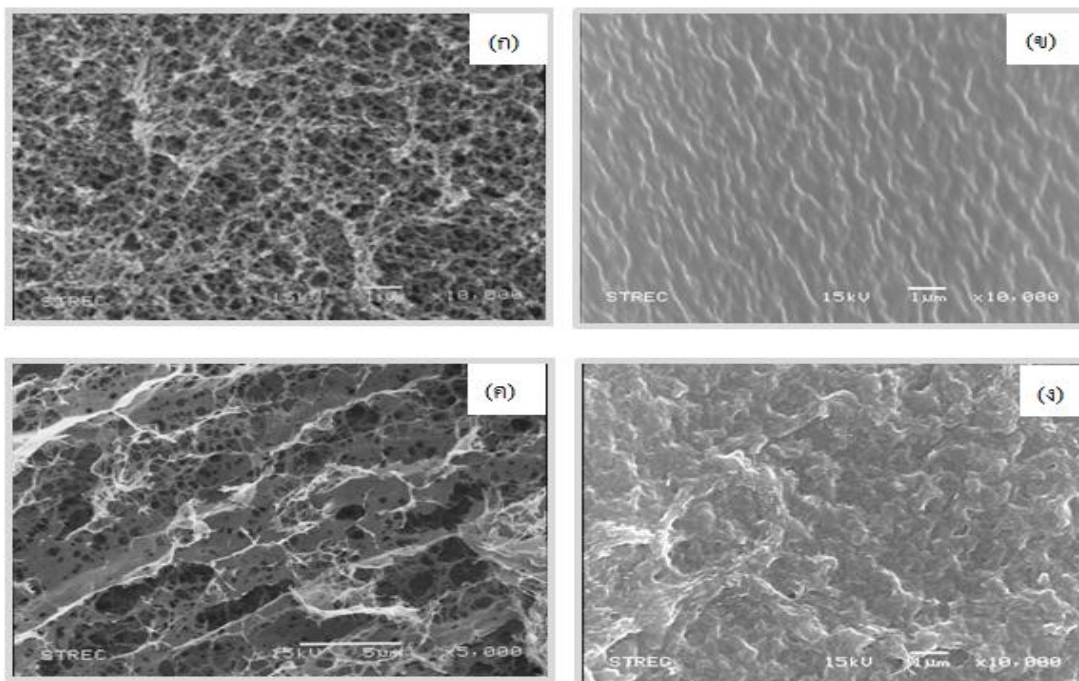


รูปที่ 4.10 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโลหะที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีเรซินและเม็ดโลหะที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีเรซินและมีรูพรุน

(e)-(f): เม็ดโลหะที่เชื่อมขวางก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน ตามลำดับ

(g)-(h): เม็ดโลหะที่เชื่อมขวางและมีรูพรุนก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน ตามลำดับ

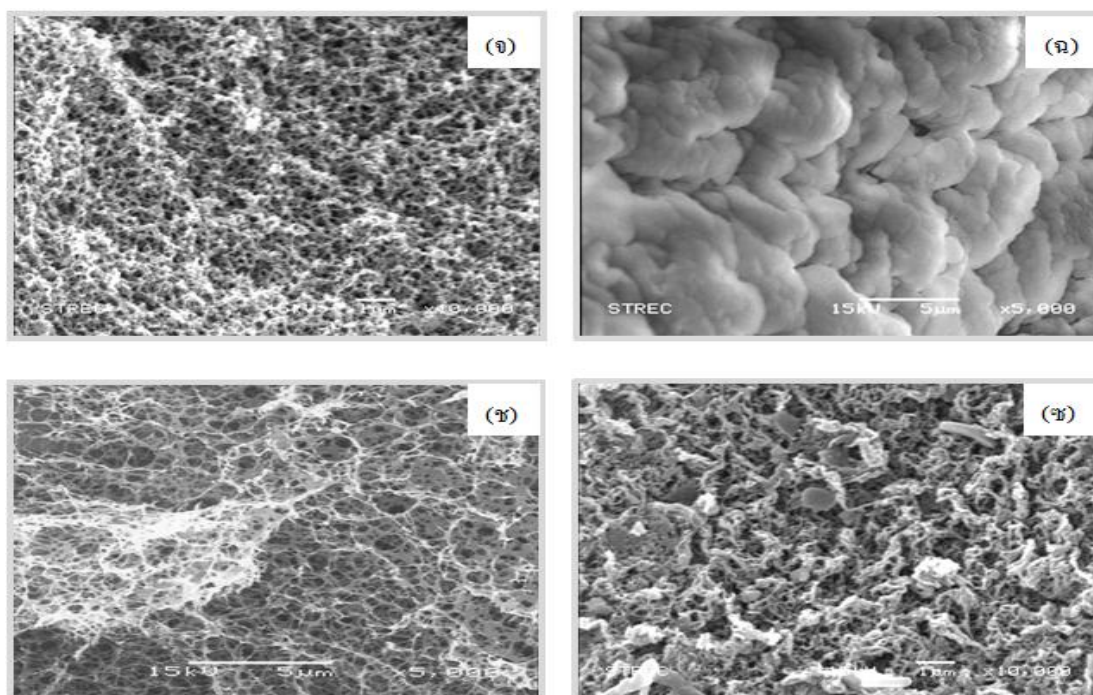
4.7 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของเม็ดไคโทซานและเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน; (ก) ภาพตัดขวางเม็ดไคโทซานก่อนการดูดซับ; (ข) พื้นผิวเม็ดไคโทซานหลังการดูดซับ; (ค) ภาพตัดขวางเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุนก่อนการดูดซับ; (ง) พื้นผิวเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุนหลังการดูดซับ เมื่อใช้ตัวดูดซับน้ำหนัก 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการดูดซับเป็นเวลา 360 นาที

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 5,000 เท่า เปรียบเทียบระหว่างเม็ดไคโทซาน (CB) กับเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) ก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน จากรูปที่ 4.11 (ก) แสดงภาพตัดขวางของเม็ดไคโทซาน (CB) ก่อนการดูดซับ จะเห็นว่าภายในของเม็ดไคโทซาน (CB) มีลักษณะโครงสร้างเป็นตาข่ายและรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ส่วนโครงสร้างภายในของเม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB) แสดงดังรูป 4.11 (ค) มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดไคโทซาน (CB) และพื้นผิวภายนอกของเม็ดไคโทซาน (CB) และเม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB) หลังผ่านการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานแสดงดังรูป 4.6 (ข) และ (ง) ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือ มีลักษณะนูนขึ้นและไม่ปรากฏรูพรุนบนพื้นผิวตัว

ดูดซับ เนื่องมาจากพื้นผิวตัวดูดซับถูกปกคลุมไปด้วยของไหลตัดชิ้นงานหลังเกิดกระบวนการดูดซับ



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน; (จ) ภาพตัดขวางของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินก่อนการดูดซับ; (ฉ) พื้นผิวเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินหลังการดูดซับ; (ช) ภาพตัดขวางเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุนก่อนการดูดซับ; (ซ) พื้นผิวเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุนหลังการดูดซับ เมื่อใช้ตัวดูดซับน้ำหนัก 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการดูดซับเป็นเวลา 360 นาที

รูปที่ 4.12 แสดงผลวิเคราะห์ทางกายภาพโดยวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 5,000 เท่า เปรียบเทียบระหว่างเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) ก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน จากรูปที่ 4.12 (จ) แสดงโครงสร้างภายในของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) ก่อนการดูดซับ พบลักษณะความเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากภายในตัวดูดซับ และโครงสร้างภายในของเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิ

คลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) แสดงดังรูป 4.12 (ข) พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดริน (ECB) เป็นผลมาจากการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) ในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ ซึ่งเกิดการระเหิดของน้ำออกไป และพื้นผิวตัวดูดซับทั้งสอง หลังจากผ่านการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานมีลักษณะพื้นผิวแตกต่างจากก่อนการดูดซับ คือ พื้นผิวของเม็ดไลโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดริน (ECB) พื้นผิวมีลักษณะบวมขึ้น แสดงในรูปที่ 4.12 (ค) และพื้นผิวหลังการดูดซับของเม็ดไลโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) แสดงในรูป 4.12 (ข) มีลักษณะพื้นผิวนูนขึ้นและปรากฏความเป็นรูพรุนลดลง เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับทั้งสองถูกปกคลุมไปด้วยของไหลตัดชิ้นงาน และจากผลการทดลองการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยเม็ดไลโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงกว่าตัวดูดซับทั้งหมดที่เตรียมได้ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดไลโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีปริมาณพื้นที่ผิวและรูพรุนมาก จึงง่ายต่อการที่ของไหลตัดชิ้นงานจะถูกดูดซับเข้าไปยังเม็ดไลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

4.8 ไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาหาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้งสองชนิดเพื่อใช้อธิบายกลไกการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานและประเมินความสามารถสูงสุดในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ในการทดลองนี้เลือกแบบจำลองแลงเมียร์ ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) และแบบจำลองฟรุนดลิช ไอโซเทอม (Freundlich Isotherm) มาทำนายลักษณะการเกิดการดูดซับ เมื่อใช้ตัวดูดซับแต่ละชนิดน้ำหนัก 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ปริมาตรของไหลตัดชิ้นงาน 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ใช้เวลาสำหรับการดูดซับนาน 6 ชั่วโมง และใช้อัตราเร็วในการกวน 120 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

ค่าคงที่ของแลงเมียร์ ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C/q_e กับ C_e (ดูในภาคผนวก ก) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ สำหรับฟรุนดลิช ไอโซเทอม (Freundlich Isotherm) จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด พบว่าค่า R^2 ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดที่ได้จากแลงเมียร์ ไอโซเทอมมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าที่ได้จากฟรุนดลิช ไอโซเทอม แสดงว่าการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้งสองชนิดสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองแลงเมียร์เหมาะสมกว่าการใช้แบบจำลองฟรุนดลิช ดังนั้นจึงสันนิษฐานการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้งสองชนิดนี้มี

ความสัมพันธ์ตามทฤษฎีของแลงเมียร์ อธิบายลักษณะการดูดซับของไหลตัดชั้นงานจะเกิดที่ผิวของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (mono layer) คือตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว เกิดการดูดซับบนผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่แน่นอนบนตำแหน่งดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกัน (homogeneous binding site) และตัวดูดซับมีพลังงานในการดูดซับเหมือนกัน โดยโมเลกุลของตัวดูดซับจะไม่สามารถเกิดการดูดซับข้ามพื้นผิวได้ สารที่ถูกดูดซับไว้จะไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกันหรือลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับแบบเคมีนั่นเอง [13] ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชั้นงานสูงสุด (q_m) ที่ได้จากสมการแลงเมียร์ของเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีค่าเท่ากับ 250 1906 1254 และ 2997 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชั้นงานที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) และค่า R_L เป็นค่าคงที่การแยกหรือแสดงถึงลักษณะของการดูดซับ โดยค่า R_L ที่สูงกว่า 1 แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี (Unfavorable) ค่า $R_L = 1$ แสดงถึงการดูดซับที่คงที่แบบเส้นตรง (Linear) และค่า $0 < R_L < 1$ แสดงถึงการดูดซับดี (Favorable) [18] ซึ่งผลการคำนวณค่า R_L จากสมการแลงเมียร์ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่า R_L อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 สามารถอธิบายการดูดซับของไหลตัดชั้นงานบนตัวดูดซับทั้งสองได้ว่าการดูดซับสามารถเกิดได้ดี

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

ชนิดของตัวดูดซับ	แลงเมียร์ไอโซเทอม				ฟรุนดลิชไอโซเทอม		
	$q_e = \frac{q_m K_A C_e}{1 + K_A C_e}$				$q_e = K_F C_e^{1/n}$		
	q_m (มก./ก.)	K_A (มล./มก.)	R_L	R^2	K_F (มก./ก.) ต่อ (มล./มก.)	n	R^2
CB	250.239	5.62×10^{-5}	0.372	0.9644	3.388	1.492	0.9477
pCB	1906.333	10.34×10^{-5}	0.244	0.9688	9.047	1.632	0.9456
ECB	1254.106	9.56×10^{-5}	0.259	0.9819	5.118	1.709	0.8996
pECB	2997.900	13.14×10^{-5}	0.204	0.9841	19.435	1.924	0.9774

4.9 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานและเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

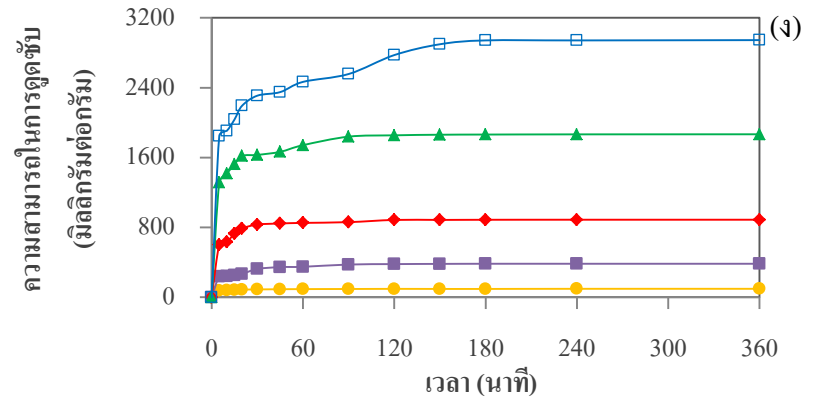
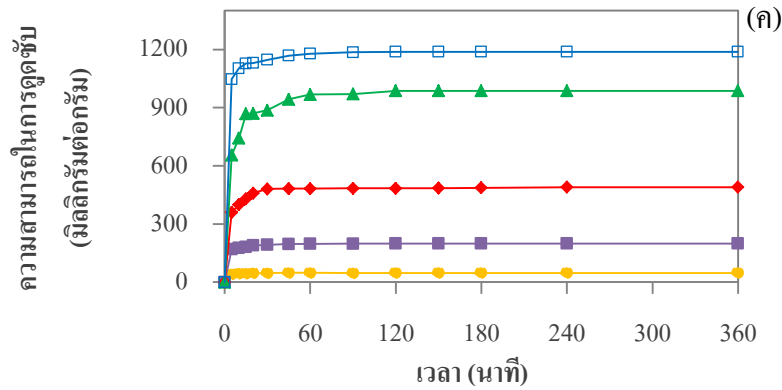
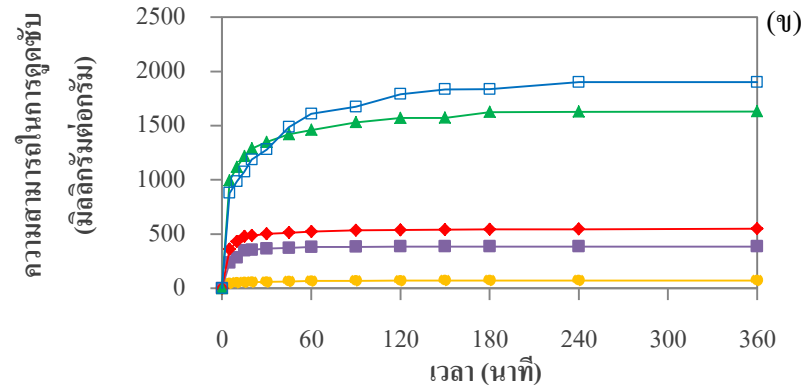
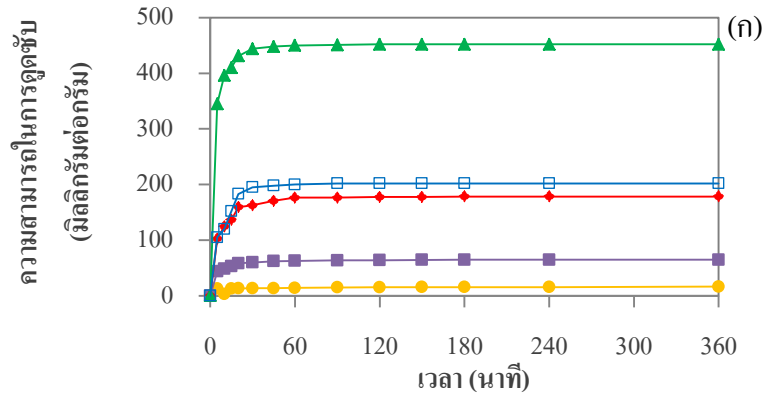
ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานและเวลาที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ โดยใช้ของไหลตัดชิ้นงานปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วงร้อยละ 0.1 – 3.0 โดยปริมาตร ณ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 จำนวนตัวดูดซับแต่ละชนิดหนัก 1 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการกวนเท่ากับ 120 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างของไหลตัดชิ้นงาน ณ เวลาต่างๆตามที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4.13

พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานจากร้อยละ 0.1 โดยปริมาตรเป็นร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานมีรูพรุน (pCB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่าง 2 เฟส คือความเข้มข้นที่ผิวหน้าตัวดูดซับกับความเข้มข้นในอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานทำให้เกิดแรงผลักดัน (Driving Force) ให้เกิดการถ่ายโอนมวล

สารได้มากขึ้นโดยโมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานจะสามารถเคลื่อนเข้าไปยังผิวตัวดูดซับได้มากขึ้น การเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานยังทำให้มีปริมาณของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มแรงดึงดูดในการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับให้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันจึงทำให้ปริมาณการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานมากกว่าร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของเม็ดโคโทซาน (CB) มีค่าลดลง เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานสูงๆจะทำให้พื้นผิวของเม็ดโคโทซานซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำหน้าที่เกิดการดูดซับและมีอยู่อย่างจำกัดนั้นถูกปกคลุมเต็มไปด้วยโมเลกุลของไหลตัดชิ้นงาน จึงทำให้ปริมาณการดูดซับจำเพาะบนเม็ดโคโทซานมีค่าลดลง [49] โดยค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานมีรูปูรอน (pCB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีโพรไคน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีโพรไคนและมีรูปูรอน (pECB) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1896 1188 และ 2941 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร และความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน (CB) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 452 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร และจากผลการทดลองพบว่าเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีโพรไคนและมีรูปูรอน (pECB) มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้สูงสุดในทุกช่วงของระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงาน ที่ผลเป็นเช่นนี้เพราะเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีโพรไคนและมีรูปูรอน (pECB) มีปริมาณพื้นที่ผิวมาก และมีรูปูรอนขนาดใหญ่ สังเกตได้จากภาพถ่าย SEM แสดงดังรูปที่ 4.12 และพื้นผิวของเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีโพรไคนและมีรูปูรอน (pECB) มีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากกว่าตัวดูดซับทั้งหมดที่เตรียมได้ ซึ่งค่าความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic index) และค่ามุมสัมผัสของน้ำบนผิวตัวดูดซับ (contact angle) แสดงดังตารางที่ 4.2 จึงสามารถดูดซับกับของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันได้มากที่สุดด้วย

โดยการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานที่ภาวะเหมาะสมจะทำให้ตัวดูดซับสามารถกำจัดของไหลตัดชิ้นงานได้เต็มที่ ดังนั้นการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับถือว่ามีความสำคัญ เพราะตัวดูดซับจะสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุลในระยะเวลาหนึ่ง เมื่อพ้นจุดสมดุลแล้วความสามารถในการดูดซับจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งการดูดซับที่ผิวตัวดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและจากการทดลองพบว่าตัวดูดซับโคโทซานสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากตำแหน่งที่ทำหน้าที่เป็น active sites บนผิวตัวดูดซับยังว่างอยู่ จากนั้นการดูดซับจะเริ่มช้าลงเพราะตำแหน่งที่จับเริ่มเหลือน้อยลง และเมื่อตำแหน่งที่ทำหน้าที่เป็น

active sites ทุกตำแหน่งจับกับของไหลตัดชิ้นงานได้เต็มจึงจะถึงจุดสมดุลของการดูดซับ และจากรูปที่ 4.13 ทำให้ทราบว่าเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดพบว่าอัตราการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก สังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีความชันมาก หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อการดูดซับเข้าสู่สมดุล และเมื่อยังคงเพิ่มระยะเวลาการดูดซับเพิ่มมากขึ้นอีกจนเกือบคงที่อัตราการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด จะมีค่าลดลงสังเกตจากความชันของกราฟที่ลดลง ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับมีค่าประมาณ 60 นาที สำหรับตัวดูดซับเม็ดโคโทซาน (CB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และมีค่าประมาณ 120 นาที สำหรับเม็ดโคโทซานมีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) และจากการทดลองพบว่าตัวดูดซับเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงกว่าตัวดูดซับ เม็ดโคโทซานมีรูพรุน (pCB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซาน (CB) ตามลำดับ ในทุกๆ ช่วงเวลาของการดูดซับ



รูปที่ 4.13 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชั้นงานบน (ก) CB (ข) pCB (ค) ECB และ(ง) pECB: ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ (●) 0.1 (■) 0.5 (◆) 1.0 (▲) 2.0 และ (□) 3.0 โดยปริมาตร เมื่อใช้ตัวดูดซับ 1 กรัม ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการกวน 120 รอบต่อนาที

4.10 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาและขึ้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาซึ่งเป็นขั้นการแพร่ภายในอนุภาค โดยการศึกษาหาอันดับของปฏิกิริยาจะพิจารณาจากสมการของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo Second-order) โดยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมแสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4.1)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของไหลตัดชิ้นที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ปริมาณของไหลตัดชิ้นที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_1 = อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)

สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมแสดงดังสมการที่ 4.2 สามารถใช้อธิบายได้ครอบคลุมทั้งหมดของการเกิดการดูดซับและใช้อธิบายได้ดีเมื่อการดูดซับเป็นการดูดซับเชิงเคมี ซึ่งการดูดซับจะเกิดจากแรงของวาเลนซ์ (valence forces) หรือเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างไอออนของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ [54, 56]

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.2)$$

เมื่อ k_2 = อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม นาที)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับเพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาจะพิจารณาจากค่า R^2 (Coefficient of determination) ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องของข้อมูลผลการทดลองกับรูปแบบสมการจลนพลศาสตร์หาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของสมการอันดับ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมแสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาค่า R^2 ที่ได้จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) พบว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order) และผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน ($q_{e, cal}$) จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo

Second-order) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานจากการทดลอง ($q_{e, exp}$) มากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order) ดังนั้นการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด จึงอธิบายการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo Second-order) สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับสี่และโลหะด้วยเม็ดโคโทซาน [13,55] การดูดซับเกิดจากแรงทางเคมี (chemisorption) ที่มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ [56] และใช้เป็นกลไกอธิบายขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่อัตราการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ชนิดของตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (%v/v)	$q_{e, exp}$ (มก./ก.)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
			$q_{e, cal}$ (มก./ก.)	k_1 ($\times 10^{-2}$) (นาที ⁻¹)	R^2	$q_{e, cal}$ (มก./ก.)	k_2 ($\times 10^{-3}$) (ก./มก. นาที)	R^2
CB	0.1	14.884	8.147	1.538	0.7576	16.639	6.050	0.9920
	3.0	202.634	61.944	0.109	0.8121	204.081	0.876	0.9996
pCB	0.1	72.770	30.0123	1.621	0.9644	73.529	2.579	0.9994
	3.0	1896.433	1235.95	0.034	0.9283	2000.000	0.040	0.9985
ECB	0.1	46.665	16.290	1.750	0.8850	47.847	4.082	0.9996
	3.0	1188.400	232.590	0.119	0.8169	1240.000	0.046	0.9995
pECB	0.1	96.1650	23.415	1.184	0.9174	98.039	3.710	0.9999
	3.0	2942.370	1496.73	0.025	0.8603	3030.333	0.008	0.9984

4.10.1 ค่าการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion)

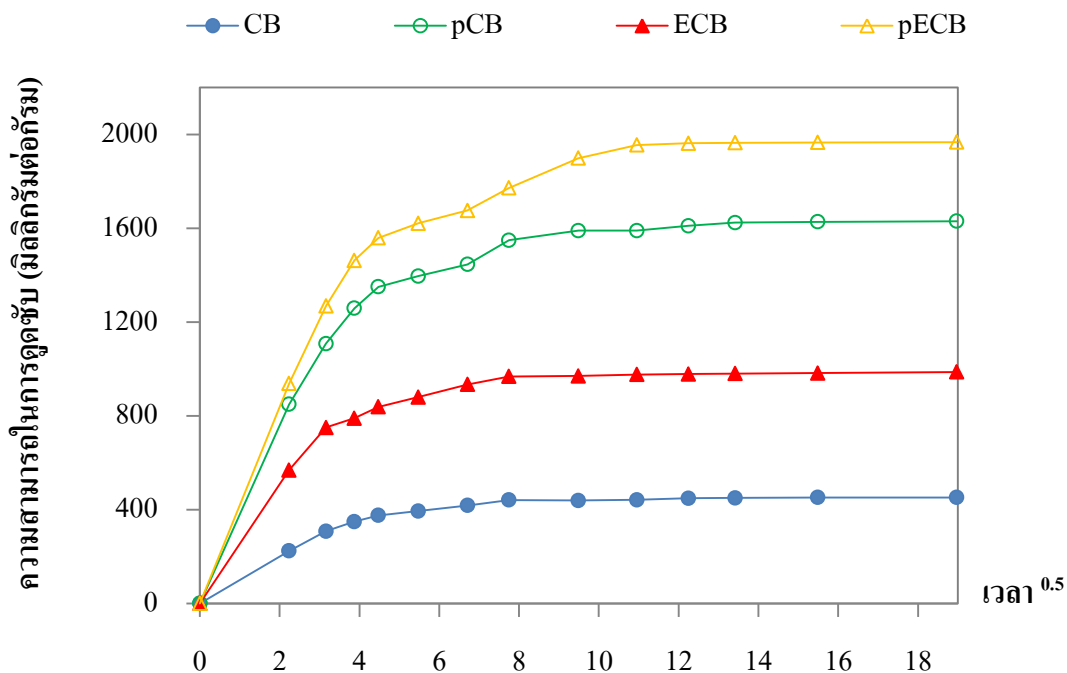
การทำนายขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ (rate limiting step) เป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการดูดซับ คือ เป็นขั้นควบคุมอัตราเร็วของกระบวนการดูดซับทั้งหมด ซึ่งอัตราเร็วของการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนต่อเนื่องกันคือ ได้แก่ 1) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นการเคลื่อนที่

ของตัวถูกดูดซับจากสารละลายไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ โดยโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด 2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ 3) การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนของตัวดูดซับและ 4) การเกิดการดูดซับ (adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับซึ่งเกิดขึ้นเร็วมากจึงทำให้ขั้นนี้ไม่ใช่ขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา [14, 57]

สมการ Intraparticle diffusion ใช้ในการศึกษากลไกการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับโคโทซาน ซึ่ง k_1 (มิลลิกรัมต่อกรัม - นาที^{0.5}) เป็นค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่ของไหลตัดชิ้นงานเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ [58] หาได้จากค่าความชัน (k_1) ที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ แสดงดังสมการที่ (4.3)

$$q_t = k_1 t^{0.5} \quad (4.3)$$

เมื่อพิจารณาผลของอัตราเร็วของการดูดซับที่แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นแบบ multi-linearity อธิบายกลไกการดูดซับเกิดขึ้นหลายขั้นตอนต่อเนื่องกัน คือ อัตราการแพร่ของไหลตัดชิ้นงานในช่วงแรก (k_{11}) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีปริมาณของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันอยู่มากทำให้การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นได้ง่ายเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบริเวณผิวภายนอกของตัวดูดซับ ซึ่งการแพร่ในขั้นนี้เรียกว่าเป็น bulk transport อัตราการแพร่ในช่วงที่สอง (k_{12}) พบว่าอัตราเร็วของการแพร่เริ่มช้าลงสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟมีค่าลดลง อธิบายถึงการดูดซับจะค่อยๆเกิดขึ้นเป็นการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากบริเวณผิวภายนอกตัวดูดซับที่แพร่ผ่านเข้ามาภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ทำนายลักษณะการแพร่ในขั้นนี้เป็นการแพร่ในชั้น film diffusion หรือ pore diffusion [58] และอัตราการแพร่ (k_{13}) ในช่วงที่สาม พบว่าอัตราการแพร่ค่อนข้างคงที่ อธิบายถึงการแพร่ของตัวถูกดูดซับเมื่อถึงสมดุลของการดูดซับ บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานภายในรูพรุนค่อนข้างสูงจึงทำให้จำกัดการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ จากค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ (k_1) แสดงดังตารางที่ 4.6 แสดงว่าขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับนี้ได้ คือ intraparticle diffusion ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากมีค่าอัตราการแพร่ในขั้นที่สอง (k_{12}) ช้ากว่าการแพร่ในขั้นที่หนึ่ง (k_{11}) ในขณะที่อัตราการแพร่ในขั้นตอนที่ 3 (k_{13}) เป็นการแพร่เมื่อเข้าสู่สมดุลของการดูดซับจึงไม่ใช่ขั้นตอนกำหนดอัตราของการดูดซับ



รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการแพร่ภายในอนุภาคของเม็ดไคโทซาน (CB) เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) เม็ดไคโทซานเชื่อมขวาง (ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางที่มีรูพรุน (pECB)

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่อัตราการแพร่ (k_p) ของเม็ดไคโทซาน เม็ดไคโทซานมีรูพรุน เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางและเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุน

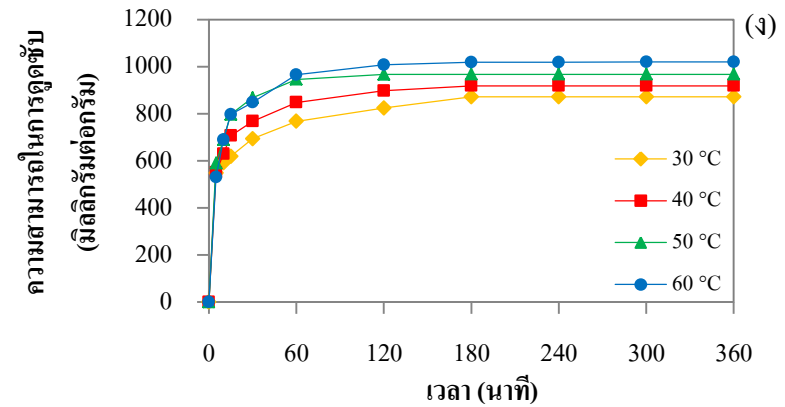
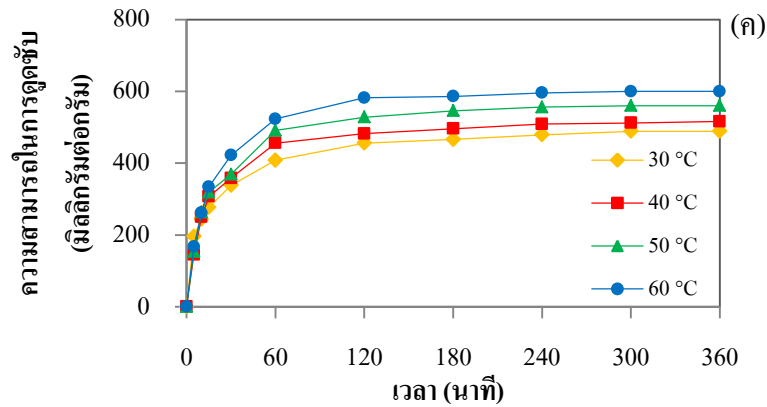
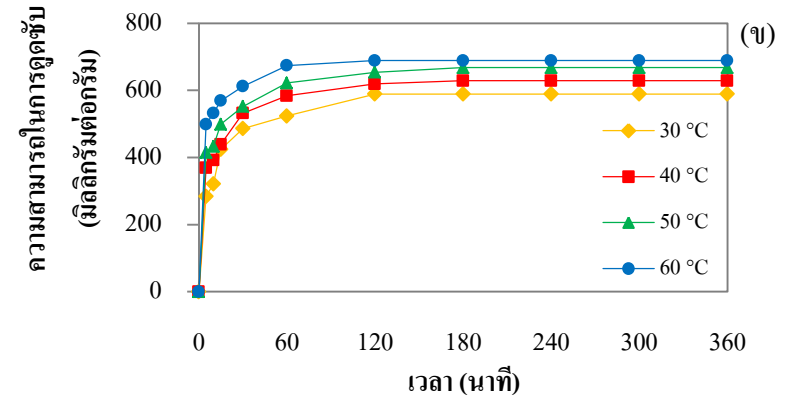
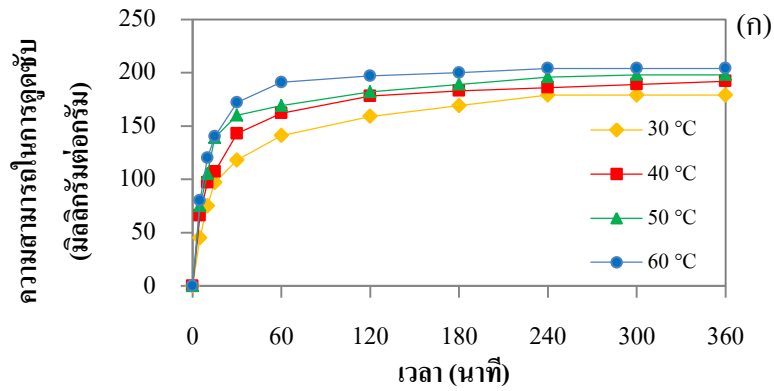
ชนิดของตัวดูดซับ	ค่าคงที่ของการแพร่ (มิลลิกรัมต่อกรัม - นาที ^{0.5})		
	k_{11}	k_{12}	k_{13}
เม็ดไคโทซาน (CB)	98.324	1.893	0.001
เม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB)	342.611	4.847	0.017
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวาง (ECB)	254.460	4.227	0.003
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุน (pECB)	407.148	4.818	0.012

4.11 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับ

การศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 1 โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อัตราเร็วในการกวนเท่ากับ 120 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากการดูดซับนี้เป็นการดูดซับทางเคมีเป็นไปตามสมมติฐานของแลงเมียร์ [18] การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยโมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานจะมีพลังงานจลน์มากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าไปยังผิวของตัวดูดซับและเกิดการดูดซับจึงมีมากขึ้นปฏิกิริยาการดูดซับจึงดำเนินไปข้างหน้าได้ดี เป็นผลให้ของไหลตัดชิ้นงานถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับได้มาก [60] ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานมีแนวโน้มเกิดได้ดีขึ้น และสอดคล้องกับค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปีของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดมีค่าเป็นบวกแสดงว่าการดูดซับนี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) [13] ในขณะที่การดูดซับที่อุณหภูมิต่ำการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากพลังงานจลน์ของไหลตัดชิ้นงานมีค่าน้อย โอกาสในการเกิดการดูดซับจึงลดลงและอาจจะต้องใช้เวลานานขึ้นที่จะทำให้โมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

ในขณะที่การดูดซับที่อุณหภูมิต่ำการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นได้น้อยลง เนื่องจากพลังงานจลน์ของไหลตัดชิ้นงานมีค่าน้อย โอกาสในการเกิดการดูดซับจึงลดลงและอาจจะต้องใช้เวลานานขึ้นที่จะทำให้โมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ และจากผลการทดลองพบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก หลังจากนั้นอัตราการของดูดซับจะเริ่มช้าลงและคงที่เนื่องจากเข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับ โดยการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นได้สูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส และหากพิจารณาความแตกต่างของชนิดตัวดูดซับในสถานะการทดลองที่เหมือนกันที่ความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิเดียวกันในช่วงอุณหภูมิ 30 - 60 องศาเซลเซียส พบว่าให้ผลในทำนองเดียวกันกับการศึกษาผลของความเป็นกรด-เบส กล่าวคือ เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอิพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุนสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับบน (ก) CB (ข) pCB (ค) ECB และ(ง) pECB: อุณหภูมิ 30 (◆) 40 (■) 50 (▲) และ 60 (●) องศาเซลเซียส เมื่อใช้ตัวดูดซับจำนวน 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 อัตราเร็วในการกวน 120 รอบต่อนาที

4.12 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

ในการทดลองนี้มีพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) การคำนวณหาค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ [59]

$$K_C = \frac{q_e}{C_e} \quad (4.4)$$

$$\log K_C = \frac{\Delta S^0}{2.303R} - \frac{\Delta H^0}{2.303RT} \quad (4.5)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.7 ค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วย อีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วย อีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

ชนิดของตัวดูดซับ	ΔH กิโลจูลต่อ โมล	ΔS จูลต่อ โมล – เคล วิน	ΔG กิโลจูลต่อโมล			
			303 เคลวิน	313 เคลวิน	323 เคลวิน	333 เคลวิน
CB	2.19	12.65	-1.63	-1.68	-1.90	-2.02
pCB	12.17	35.59	-1.40	-1.03	-0.68	-0.32
ECB	19.65	69.67	-1.30	-2.41	-2.89	-3.44
pECB	31.78	215.01	-32.13	-35.52	-37.75	-38.62

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีและการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของตัวดูดซับทั้งสี่มีค่าเท่ากับ 2.19 ถึง 31.77 กิโลจูลต่อโมล มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการให้พลังงานแก่ระบบจะทำให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดเป็นกระบวนการดูดความร้อนและ

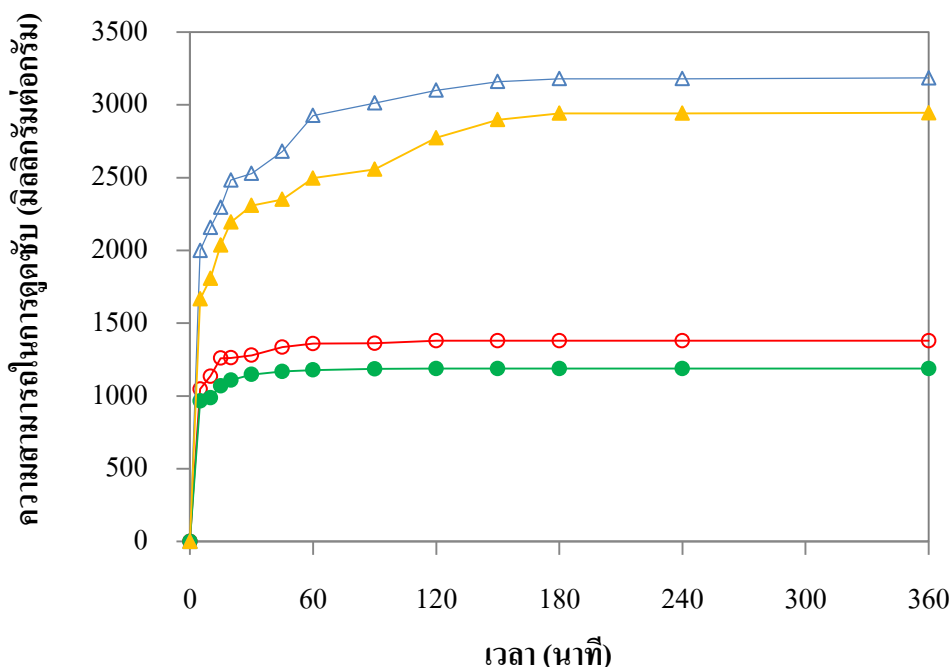
ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 12.65 ถึง 215.01 กิโลจูลต่อโมล-เคลวิน มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีความไม่เป็นระเบียบมากที่บริเวณผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว ระหว่างเกิดการดูดซับ และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์มีค่าเป็นลบ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 303 ถึง 333 เคลวิน แสดงว่ากระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองและมีแนวโน้มของการดูดซับเกิดได้ง่ายขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ [58]

ตารางที่ 4.8 ค่าความร้อนของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับของไพลด์คัทซีนงาน

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกรัม)	
	ก่อนการดูดซับของ ไพลด์คัทซีนงาน	หลังการดูดซับของ ไพลด์คัทซีนงาน
เม็ดไคโทซาน (CB)	24.25	29.84
เม็ดไคโทซานมีรูพรุน (pCB)	25.70	39.42
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวาง (ECB)	32.53	45.31
เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุน (pECB)	35.41	52.36

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าความร้อนของการเผาไหม้ของเม็ดไคโทซาน (CB) เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) เปรียบเทียบค่าความร้อนของการเผาไหม้ก่อนและหลังการดูดซับของไพลด์คัทซีนงาน พบว่าค่าความร้อนของการเผาไหม้หลังการดูดซับของไพลด์คัทซีนงานของตัวดูดซับทั้งสี่ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และมีรูพรุนมีค่าความร้อนหลังการดูดซับของไพลด์คัทซีนงานสูงสุด มีค่าเท่ากับ 52.36 กิโลจูลต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับของไพลด์คัทซีนงานบนตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด แสดงว่าเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุนสามารถนำมากำจัดของไพลด์คัทซีนงานออกจากอิมัลชันได้ดีที่สุด

4.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางกับเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุนที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และ 4



รูปที่ 4.16 ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางกับเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุนที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และ 4 ตามลำดับ: ● ECB (pH 4) ○ ECB (pH 3) ▲ pECB (pH 4) และ △ pECB (pH 3) เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 4. 16 พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางกับเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางและมีรูพรุนเกิดขึ้นสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ซึ่งหมู่อะมิโนของตัวดูดซับจะถูกโปรโตเนตให้มีประจุเป็นบวก (NH_3^+) ได้มากพอเหมาะสำหรับการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชัน จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนผิวตัวดูดซับกับประจุลบของของไหลตัดชิ้นงานได้มากที่สุด ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินและเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคโลโรไฮดรินและมีรูพรุนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1379 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 3185 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 3 โดยปริมาตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 4 ชนิด คือเม็ดไคโทซาน (CB) เม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดไคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน และศึกษาหาไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองนี้คือ ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด-เบส ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงาน เวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิของการดูดซับ

จากผลการทดลองพบว่า การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเมื่อความเป็นกรด-เบสอิทธิพลของไหลตัดชิ้นงานอยู่ในภาวะความเป็นกรด เนื่องจากหมู่อะมิโนของไคโทซานจะแสดงประจุบวกได้มากจึงทำให้เกิดแรงดึงดูดกับประจุลบของไหลตัดชิ้นงานได้ดี และผลของความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานต่อการดูดซับพบว่า การเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น โดยภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดไคโทซาน (CB) และเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) คือ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับมีค่าประมาณ 60 นาที สำหรับเม็ดไคโทซาน (CB) และมีค่าประมาณ 120 นาที สำหรับเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) คือ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับมีค่าประมาณ 60 นาที สำหรับเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และมีค่าประมาณ 120 นาที สำหรับเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

การศึกษาหาไอโซเทอร์มของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเป็นแบบแลงเมียร์ (Langmuir) อธิบายการดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) หรือเป็นการดูดซับทางเคมีความสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุด (q_{max}) ของเม็ดไคโทซาน (CB) และเม็ดไคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) เม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) และเม็ดไคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีค่าเท่ากับ 250 1906 1254 และ 2997 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และจลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับของไหล

ตัดชิ้นงานเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo Second-order) กลไกการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเกิดขึ้นสามขั้นตอน โดยขั้นกำหนดอัตราการดูดซับเกิดขึ้นในขั้นที่สอง และจากการศึกษาผลของอุณหภูมิพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีขึ้น สอดคล้องกับอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับพบว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมีค่าเป็นบวก แสดงว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และถึงแม้การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับโคโทซานจะเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แต่จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับ คือ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง เนื่องจากปริมาณของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส จึงไม่จำเป็นต้องใส่พลังงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการดูดซับหากนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

และในงานวิจัยนี้พบว่า เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB) มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุดเท่ากับ 3185 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.0 กรัม ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 3.0 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อสมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 120 นาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยตัวดูดซับโคโทซานควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติม คือ ชนิดของโคโทซานที่นำมาใช้เตรียมตัวดูดซับ เช่น เปลือกกุ้ง กระดองปู เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของชนิดโคโทซานมีความแตกต่างกันน่าจะมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ และโคโทซานที่มีร้อยละการกำจัดหมู่เอซีทิล (%DD) ของโคโทซานต่างกัน อาจจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานแตกต่างกัน

2. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเม็ดโคโทซานในขั้นตอนการขึ้นรูปเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เช่น ลดขนาดของเม็ดโคโทซาน เติมสารเคมีบางชนิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

3. ของเสียของไหลตัดชิ้นงานที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมจริงมักมีสิ่งปนเปื้อนหลายชนิด เช่น เศษโลหะ ฝุ่น และจุลินทรีย์เจือปนจึงควรศึกษาผลกระทบเหล่านี้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยตัวดูดซับโคโทซาน เนื่องจากตัวดูดซับที่เตรียมได้มีขนาดรูพรุนใหญ่ ดังนั้นเศษโลหะอาจหลุดเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับและขัดขวางการเกิดการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้

4. ตัวดูดซับโคโทซานเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากกากเหลือทิ้งของเปลือกกุ้ง เปลือกปู ในอุตสาหกรรมแช่แข็ง ซึ่งถือเป็นกากของเสียที่ต้องกำจัดทิ้งเมื่อนำมากำจัดของเสียของไหลตัด

ชิ้นงานจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมและได้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนต่อได้ โดยกระบวนการทั้งหมดนี้หากนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง จึงเปรียบเทียว่าเป็นกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Process)

รายการอ้างอิง

- [1] Childers, J.C. The Chemistry of Metalworking Fluids. New York: Marcel Dekker, 1994.
- [2] Portela, J.R., Lopez, J., Nobot, E., and Martinez de la Ossa, E. Elimination of Cutting Oil Waste by Promoted Hydrothermal Oxidation. Journal of Hazardous Material 88 (2001): 95-106.
- [3] Rios, G., Pazos, C., and Coca, J. Destabilization of cutting oil emulsion using inorganic salts as coagulants. Colloid and Surfaces A 138 (1998): 383-389.
- [4] Janknecht, P., Lopes, D., and Mendes, A.M. Removal of industrial cutting oil from oil emulsion by polymeric ultra and microfiltration membrane. Environmental Science and technology 38 (2004): 4878-4883.
- [5] สัมพันธ์ ศรีสุริยวงษ์ และคณะ. ในรายงานการประเมินความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตทางวิศวกรรมและทางเศรษฐกิจในการผลิตผลิตภัณฑ์จากของเหลือทิ้งเหลือใช้จากอุตสาหกรรมกุ้งแช่แข็ง. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2549.
- [6] ณิชานุกุล บุญวรโชติ. การศึกษาการนำน้ำมันหล่อเย็นที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.
- [7] Anderson. J.E., Kim, B.R., Mueller, S.A., and Lofton, T.V. composition and analysis of mineral oils and other organic compound in metalworking and hydraulic fluids. Critical review in environment Science and Technology 33 (2003): 73-109.
- [8] Foltz, G. Waste Minimization and Wastewater Treatment of Metalworking Fluids [online]. 1994. Available from: <http://infohouse.p2ric.org/ref/25/24577.pdf> [2012, Jun 19]
- [9] Johnson, D.L., and Philips, M.L. UV disinfection of soluble oil metalworking fluids. AIHA Journal 63 (Mar - Apr 2002): 178-183.
- [10] ภควรรณ ปานข่อยงาม. ประสิทธิภาพของโคโคซานบีคจากเปลือกสัตว์ทะเลในการดูดซับกลิ่นแอมโมเนีย และฟอร์มาลดีไฮด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2552.
- [11] เดชา นัฏศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- [12] Myer, D. Surfaces, Interfaces and Colloids: principle and application. 2nd ed New York: Wiley-VCH, 1999.
- [13] Hasan, M., Ahmad, A.L., and Hameed, B.H. Adsorption of reactive dye onto cross-linked chitosan/oil plum ash composite beads. Chemical Engineering Journal 136 (2008): 164-172.
- [14] Sanuel, D.F. and Osman, M.A. Adsorption Processes for Water Treatment. USA: Butterworths, 1987.
- [15] McKay, G., Blair, H.S., and Gardner, J. The Adsorption of Dyes in Chitin Intraparticle Diffusion Process. Journal of Applied Polymer Science 28 (1983): 1767-1778.
- [16] Eckenfelder, W.W., Jr. Application of Adsorption to wastewater Treatment USA: Enviro Press, Nashville, Tenn, 1981.
- [17] ชีรวิทย์ ทับทอง. การดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งที่ถูกตรึงเป็นเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2541.
- [18] Wan Ngah, W.S., Hanafiah, M.A.K.M., and Yong, S.S. Adsorption of humic acid from aqueous solutions on crosslinked chitosan-epichlorohydrin beads: Kinetics and isotherm studies Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 65 (2008): 18–24.
- [19] Wan Ngah, W.S., Kamari, A., and Koay, Y. J. Equilibrium and kinetics studies of adsorption of copper (II) on chitosan and chitosan/PVA beads. Journal of Biological macromolecules 34 (2004): 155-161.
- [20] Alkan, M., çelikçapa, S., Demirbaş, Ö., and Doğ an, M. Removal of reactive blue 221 and acid blue 62 anionic dyes from aqueous solutions by sepiolite. Dyes and Pigments 65 (2005): 251-259.
- [21] Rossman, B.J. Principles of Chemical Kinetics. USA: Wm.C. Brown Publishers, 1997.
- [22] Keusch, P. Chemical Kinetics - Rate Laws, Arrhenius Equation – Experiments [online]. 2003. Available form: http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat_Fak_IV/Organische_Chemie/Didaktik/Keusch/Kinetik.htm [2012, June 28]
- [23] ยุวัฒน์ ปรมีสนาภรณ์. การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัดแคดเมียม ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.

- [24] Lagergren, S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar* 24 (1898):1-39.
- [25] Ho, Y.S., and Chiang, C.C. Sorption Studies of Acid Dye by Mixed Sorbents. *Adsorption-Journal of The International Adsorption Society* 7 (2001): 139–147.
- [26] Chiou, M.S., and Li, H.Y. Adsorption behavior of reactive dye in aqueous solution on chemical cross-linked chitosan beads. *Chemosphere* 50 (2003): 1095–1105.
- [27] Seddon, J.M., and Gale, J.D. *Thermodynamics and Statistical Mechanics*. Wiley-Interscience, New York: The Royal Society of Chemistry, 2002.
- [28] ศรารุทธ แสงอุไร. การสกัดแยกพอลิเมอร์ชีวภาพจากคริสต์เตเซชันการเตรียมอนุพันธ์และการใช้ดูดซับสารเคมีบางชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2549.
- [29] Brine, C. J., Sandford, P. A. and Zikakis, J.P. *Advances in chitin and chitosan*. London, New York: Elsevier Applied Science, 1992.
- [30] Ravi Kumar, M.N.V. A review of chitin and chitosan applications. *Reactive & Functional Polymers* 46 (2000): 1–27.
- [31] Inoue, K., Alam, M. S., Yoshizuka, K., and Ishibashi, H. Adsorptive Separation of Rhodium(III) Using Fe(III)- Templated Oxine Type of Chemically Modified Chitosan, *Separation Science and Technology* 33 (1998): 655-666.
- [32] Pinotti, A., and zaritzky. N. Effect of aluminum sulfate and cationic polyelectrolytes on the destabilization of emulsified wastes. *Waste Management* 21 (2001): 535-542.
- [33] Vilcáez, J., and Watanabe, T. Inhibitory effect of gamma-irradiated chitosan on the growth of denitrifiers. *International Journal of Microbiology* 2009 (2009): 1-6
- [34] Bokura, H., and Kobayashi, S. Chitosan decreases total cholesterol in women: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *European Journal of Clinical Nutrition* 57 (2003): 721-5.
- [35] Dai, T., Tanaka, M., Huang, Y.Y., and Hamblin, M.R. Chitosan preparations for wounds and burns: antimicrobial and wound-healing effects. *Expert Rev Anti Infect Ther Journal* 9 (2011): 857-79.
- [36] Trapani, A., García-Fuentes, M., and Alonso, M.J. Novel drug nanocarriers combining

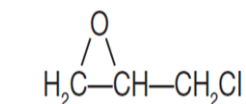
- hydrophilic cyclodextrins and chitosan. Nanotechnology 19 (2008): 1-10
- [37] Shahidi, F., Arachchi, J.K.V. and Jeon, Y-J. Food applications of chitin and chitosans. Trends in Food Science and Technology 10 (1999): 37-51.
- [38] Varma, A.J., Deshpande, S.V., and Kennedy, J.F. Metal complexation by chitosan and its derivatives: a review. Carbohydrate Polymers 55 (2004) 77–93.
- [39] Harish Prashanth, K. V. and Tharanathan, R. N. Chitin/chitosan: modification and their unlimited application potential – an overview. Trends in Food Science and Technology 18 (2007): 117-131.
- [40] รัตเกล้า ภูติวรรณ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2540.
- [41] Wan Ngah, W. S., Endud, C. S., and Mayanar, R. Removal of copper (II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads. React Funct Polym 50 (2002): 181–190.
- [42] Solisio, C., Lodi, A., Converti, A., and Del Borghi, M. Removal of exhausted oils by adsorption on mixed Ca and Mg oxides. Water Research 36 (2002): 899-904.
- [43] Ahmad, A. L., Sumathi, S. and Hameed, B.H. Adsorption of residue oil from palm oil mill effluent using powder and flake chitosan: equilibrium and kinetic studies. Water Research 39 (2005): 2483 – 2494.
- [44] Hu, X., Bekassy-Molnar, E., and Vatai, G. Study of ultrafiltration behavior of emulsified metalworking fluids. Desalination 149 (2002): 191-197.
- [45] Chiou, M.S., and Li, H. Y. Equilibrium and kinetic modeling of adsorption of reactive dye on cross-linked chitosan beads. Journal of Hazardous Materials 93 (2002): 233 – 248.
- [46] Kumar, Y.P., King, P. and Prasad, V.S.R.K. Removal of copper from aqueous solution using *Ulva fasciata* sp.—Amarine green algae. Journal of Hazardous Materials 137 (2006): 367–373.
- [47] Paluszkiwicz, C., Stodolak, E., Hasik, M., Blazewicz, M. FT-IR study of montmorillonite–chitosan nanocomposite materials. Spectrochimica Acta Part A

- 79 (2011): 784–788.
- [48] Ahmad, A.L., Ismail., Ibrahim, N., and Bhatia, S. Removal of suspended solids and residual oil from palm oil mill effluent. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 78 (2003): 971-978.
- [49] Kathikeyyan, G., Anbalagan, K., and Muthulakshmi Andal, N. Adsorption dynamics and equilibrium studies of Zn(II) onto chitosan. Journal Chemical Science 116 (2004): 119-127.
- [50] Palpandi, C., Shanmugam, V., and Shanmugam, A. Extraction of chitin and chitosan from shell and operculum of mangrove gastropod *Nerita (Dostia) crepidularia* Lamarck. International Journal of Medicine and Medical Sciences 1 (2009): 198-205.
- [51] Mano, J.F., Koniarova, D., and Reis, R.L. Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability. Journal of Materials Science: Materials in Medicine 14 (2003): 127–135.
- [52] Xu, Y., Kim, K., Hanna, M., and Nag, D. Chitosan-starch composite films: preparation and characterization. Industrial Crops and Products 21 (2005): 185–192.
- [53] Pavia, D.L., Lampman, G.M., and Kriz, G.S. Introduction to Spectroscopy. 3rd ed Orlando: Harcourt, Saunders College Publishing, 2001.
- [54] Lin, J.X., Zhan, S.L., Fang, M.H., Qian, X.Q., and Yang, H. Adsorption of basic dye from aqueous solution onto fly ash. Journal of Environmental Management 87 (2008):193-200.
- [55] Chen, A.H., Liu, S.C., and Chen, C.Y. Comparative adsorption of Cu(II), Zn(II), and Pb(II) ions in aqueous solution on the crosslinked chitosan with epichlorohydrin. Journal of Hazardous Materials 154 (2008): 184–191.
- [56] Septhum, C., Rattanaphani, S., Bremner, J.B., and Rattanaphani, V. An adsorption study of Al(III) ions onto chitosan. Journal of Hazardous Materials 148 (2007): 185-191.
- [57] Agarwal, G.L. Basic Chemical Kinetic. New Delhi: Tata McGraw Hill, 1990.
- [58] Feng, C.W., Ru, L.T., Ruey, S.J. Comparative adsorption of metal and dye on flake and

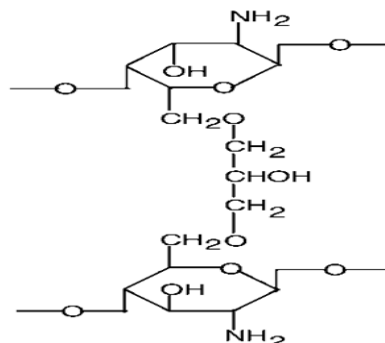
- bead-types of chitosans prepared from fishery wastes. Journal of Hazardous Materials 73 (2000): 63–75.
- [59] Wu, C.H. Adsorption of reactive dye onto carbon nanotubes: equilibrium, kinetics and thermodynamics. Journal of Hazardous Materials 144 (2007): 93–100.
- [60] Kushwaha, J.P., Srivastava, V.C. and Mall, I.D. Treatment of dairy wastewater by commercial activated carbon and bagasse fly ash: Parametric, kinetic and equilibrium modeling, disposal studies. Bioresource Technology 101(2010): 3473-3483.
- [61] ไคตินและไคโตแซนจากเปลือกกุ้งเพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม. วารสารเทคโนโลยี. 20 (เม.ย.-มิ.ย.2542): 13.
- [62] Byers, J.P. Metalworking fluids. New York: Marcel dekker, 1994.
- [63] Chang, R. Chemistry. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [64] Mac, G.J. Responsible Metal cutting Fluid Management. AAMA Metalworking fluids Symposium. (March 1996): 267-269.
- [65] Zheng, H., Du, Y., Yu, J., Huang, R., and Zhang, L. Preparation and Characterization of Chitosan/Poly(vinyl alcohol) Blend Fiber. Journal of Applied Polymer Science (2001):2558-2565.
- [66] Seddon, J.M., and Gale, J.D. Thermodynamics and Statistical Mechanics. Wiley-Interscience, New York: The Royal Society of Chemistry, 2002.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก



อีพิกลอโรไฮดริน



รูปที่ ก.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโคโทซานที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับอีพิกลอโรไฮดริน [41]

1. สมบัติของตัวดูดซับ

1.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับตัดชิ้นงาน โดยโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) เพื่อดูลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวและรูพรุนของตัวดูดซับ ที่กำลังขยายต่างๆ และเพื่อดูความแตกต่างตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์วางบนแท่นลักษณะกลม ฉาบตัวอย่างด้วยทอง
2. เลือกตำแหน่งที่ต้องการดูลักษณะพื้นผิวและเลือกกำลังขยายที่ต้องการ

1.2 Fourier Transform infrared (FT-IR) spectroscopy

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับก่อนและหลังทำการดูดซับ โดยเครื่อง FT-IR spectrophotometer รุ่น FT-IR 1760X

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมตัวดูดซับแห้งทั้ง 4 ชนิด ประมาณ 0.5 กรัมมาบดผสมกับ KBr แล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกลมใสเพื่อใส่ sample holder

2. วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันหลักของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดก่อนและหลังการดูดซับแสดงข้อมูลในรูป spectra

1.3 การวิเคราะห์ประจุบนผิวอนุภาคโดยเครื่อง Zetasizer

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวดูดซับ 1 กรัมผสมในน้ำปราศจากประจุจากประจุจากนั้นปรับค่า pH ตั้งแต่ 2-10 โดยใช้สารละลาย HCl และ NaOH
2. วัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) โดยเครื่อง Zetasizer

1.4 การวิเคราะห์หามุมสัมผัส (Contact angle) ของตัวดูดซับ

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมตัวอย่างให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มโดยการเคลือบลงบนแผ่นกระจกสไลด์
2. วัดค่ามุมสัมผัสโดยเครื่อง Contact Angle Meter เพื่อหาค่ามุมสัมผัสระหว่างผิวยุติกับผิวตัวดูดซับ

1.5 การหาสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Index)

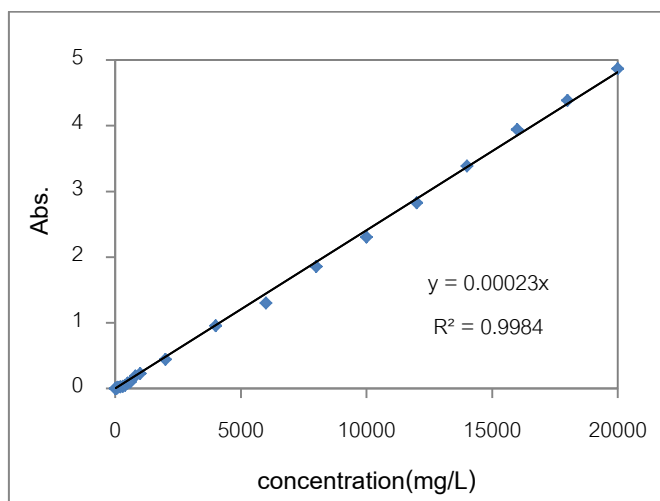
$$\text{Hydrophobic Index} = \frac{\text{ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน}}{\text{ความสามารถในการดูดซับน้ำ DI}}$$

2. อิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงาน โดยการวัดการดูดกลืนแสงใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530 โดยตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานจะถูกเปรียบเทียบกับของไหลตัดชิ้นงานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance กับค่าของไหลตัดชิ้นงานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนซึ่งจะใช้เป็น Calibration Curve ในการหาความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงานในอิมัลชันที่ต้องการวิเคราะห์

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานในน้ำปราศจากประจุที่ความเข้มข้น 10 ถึง 20000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานมาทำการวัดค่า Absorbance ด้วยเครื่อง UV-Vis สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร
3. นำของไหลตัดชิ้นงานหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไคโทซานมาวัดค่า Absorbance และนำค่า Absorbance ที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับ Calibration Curve ในการหาความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จะทราบค่าความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงานที่วิเคราะห์



รูปที่ ก.2 Calibration Curve ของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง UV-Vis สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3. ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน

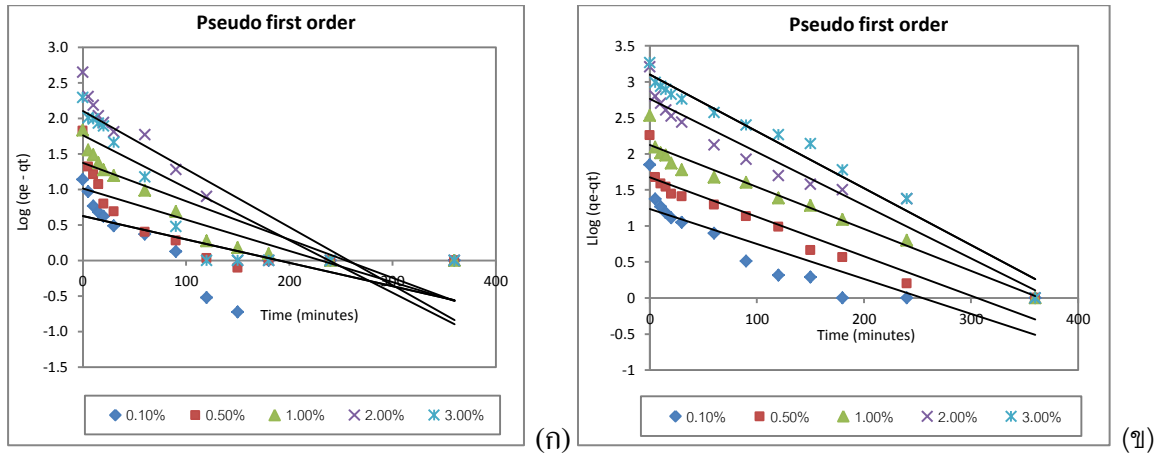
การคำนวณ

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{g}$$

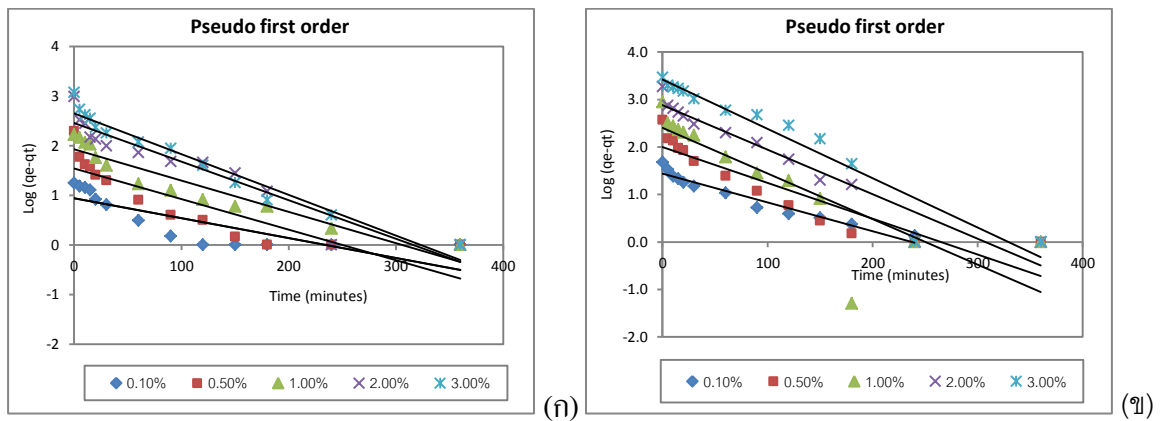
- เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงาน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
- C_t = ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานหลังการดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
- V = ปริมาตรของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงาน (มิลลิลิตร)
- g = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

ภาคผนวก ข

อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับของไหลตัดชั้นงาน

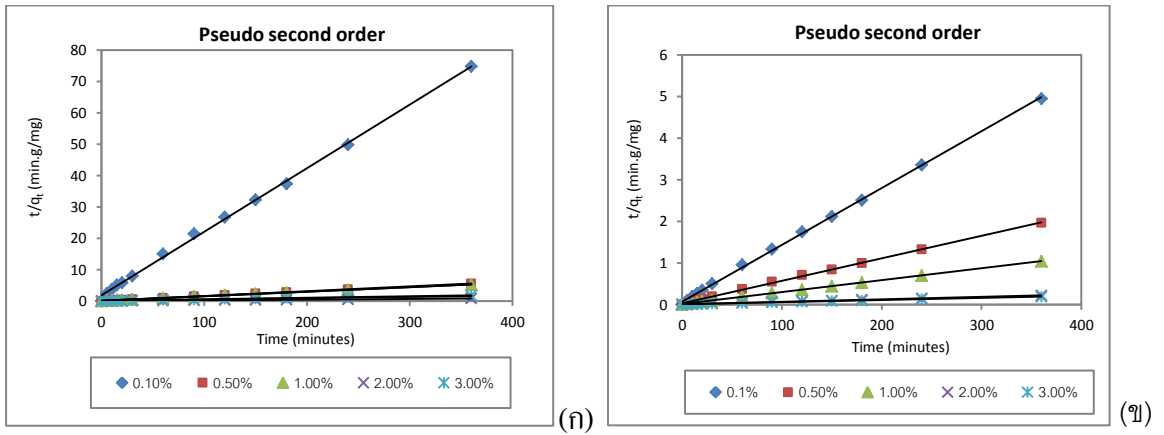


รูปที่ ข.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับของไหลตัดชั้นงานบน (ก) เม็ดโคลโทซาน และ (ข) เม็ดโคลโทซานที่มีรูพรุน

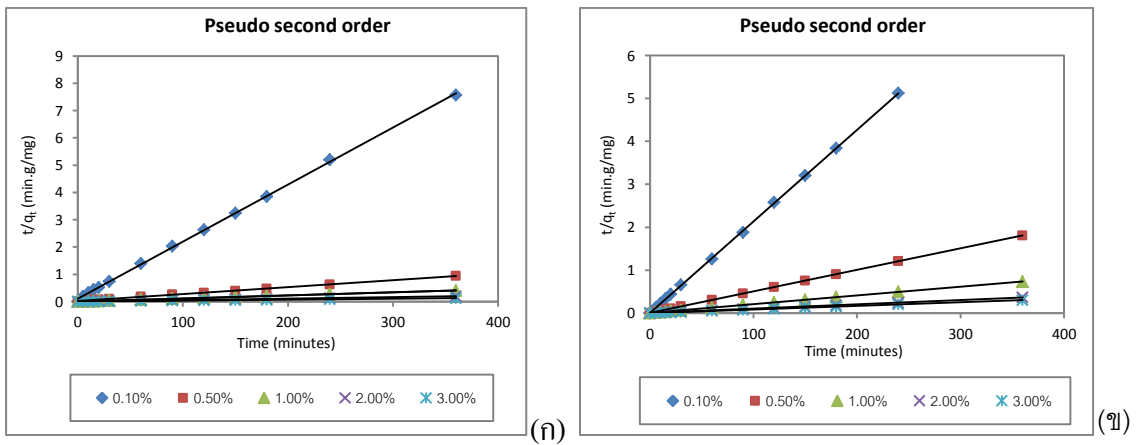


รูปที่ ข.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับของไหลตัดชั้นงานบน (ก) เม็ดโคลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และมีรูพรุน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน

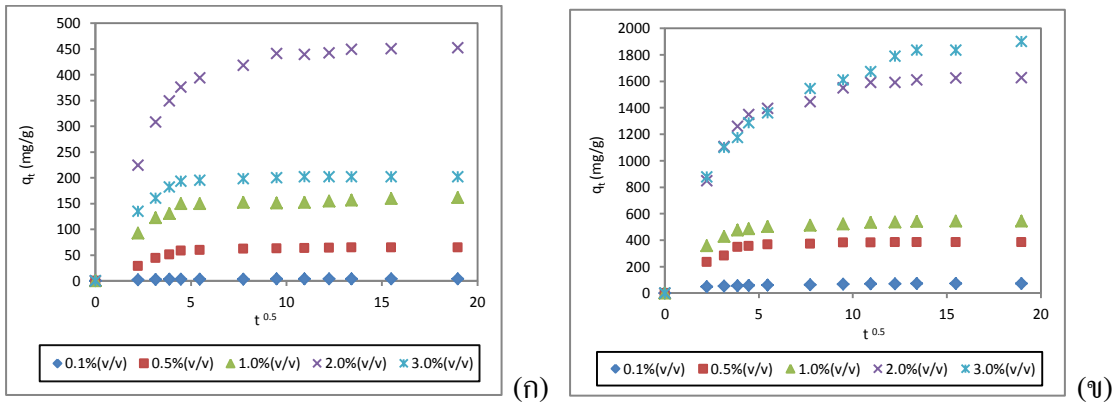


รูปที่ ข.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคลโทซาน และ (ข) เม็ดโคลโทซานที่มีรูพรุน

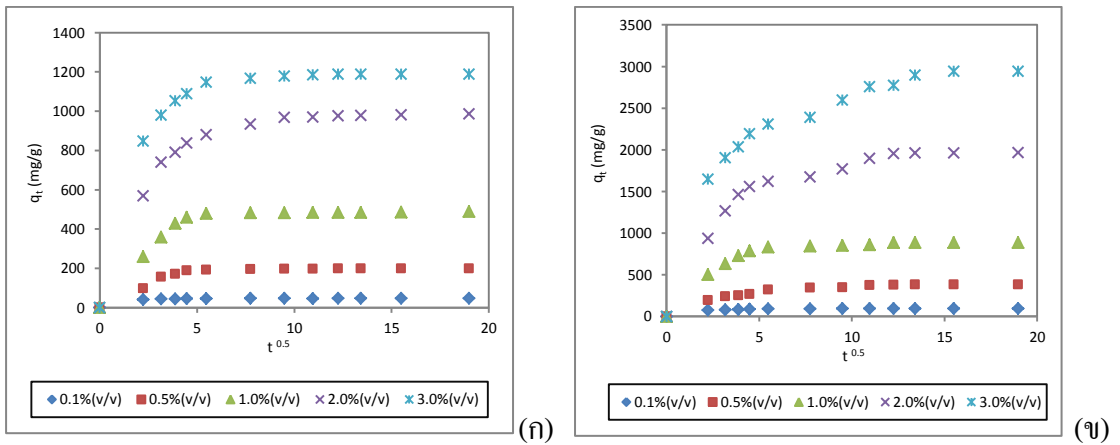


รูปที่ ข.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคลโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และมีรูพรุน

อัตราการแพร่ภายในอนุภาคของของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

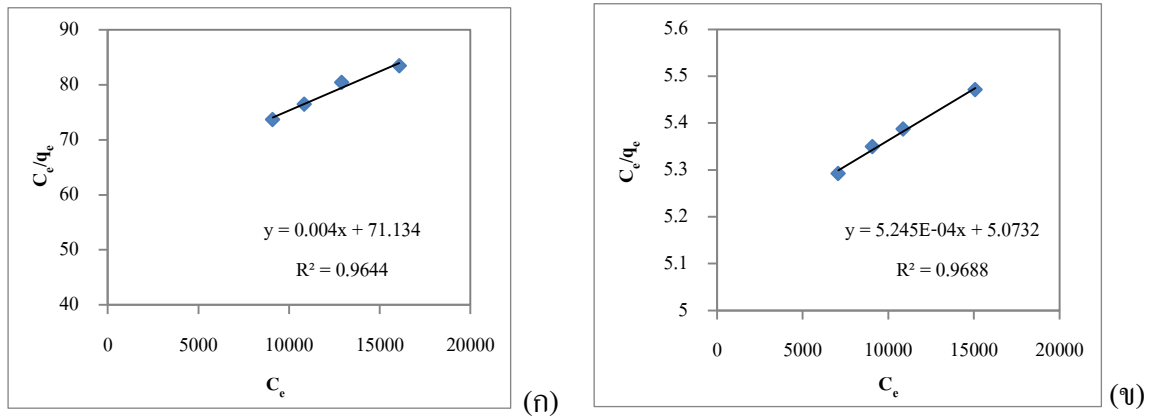


รูปที่ ข.5 อัตราการแพร่ภายในอนุภาคของของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซาน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน

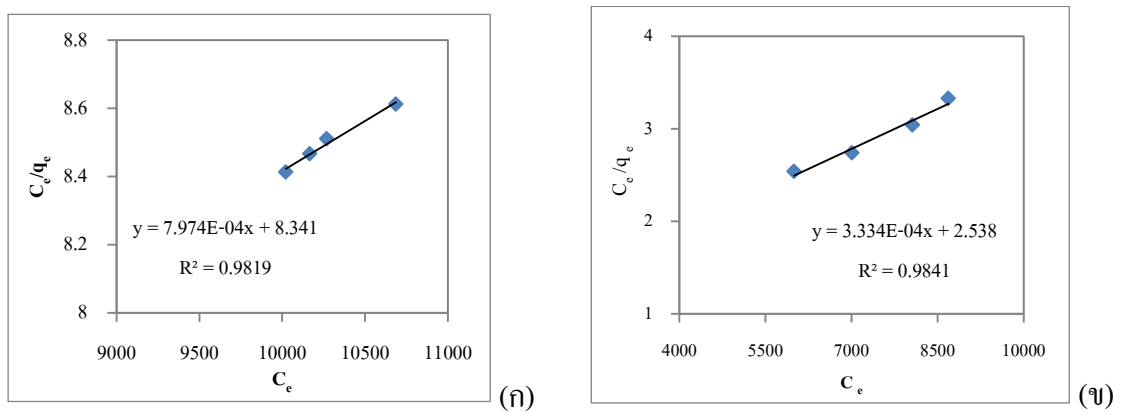


รูปที่ ข.6 อัตราการแพร่ภายในอนุภาคของของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

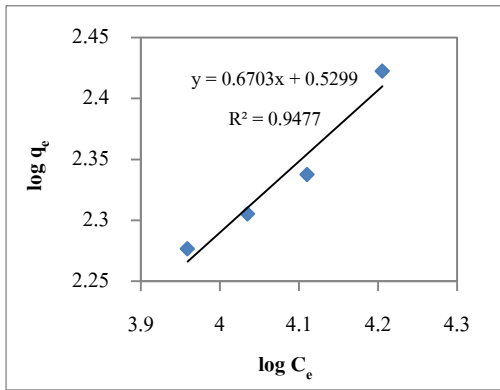


รูปที่ ข.7 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซาน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน

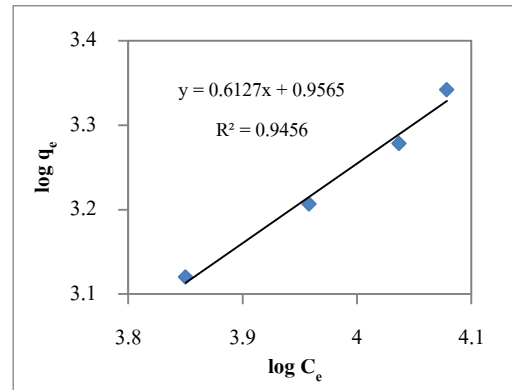


รูปที่ ข.8 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

ฟรอนคลิชไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

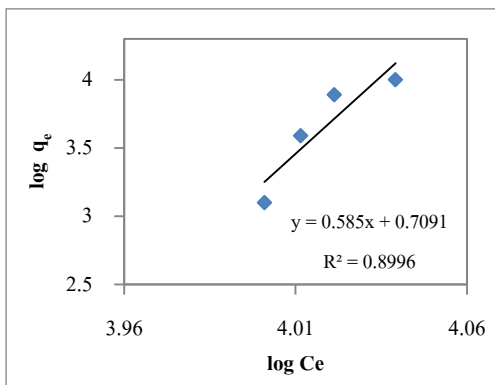


(ก)

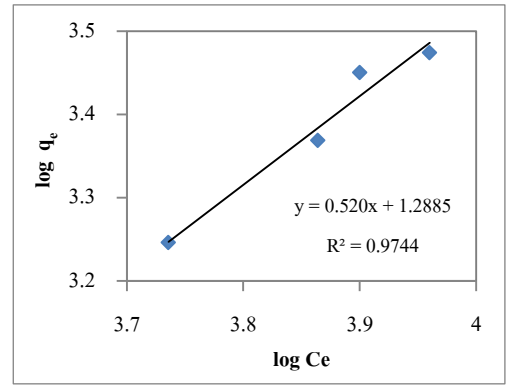


(ข)

รูปที่ ข.9 ฟรอนคลิชไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซาน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน



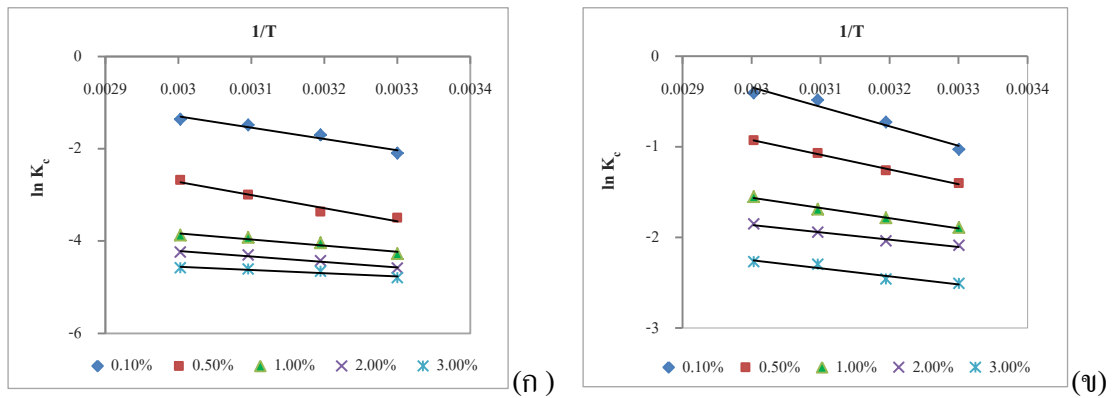
(ก)



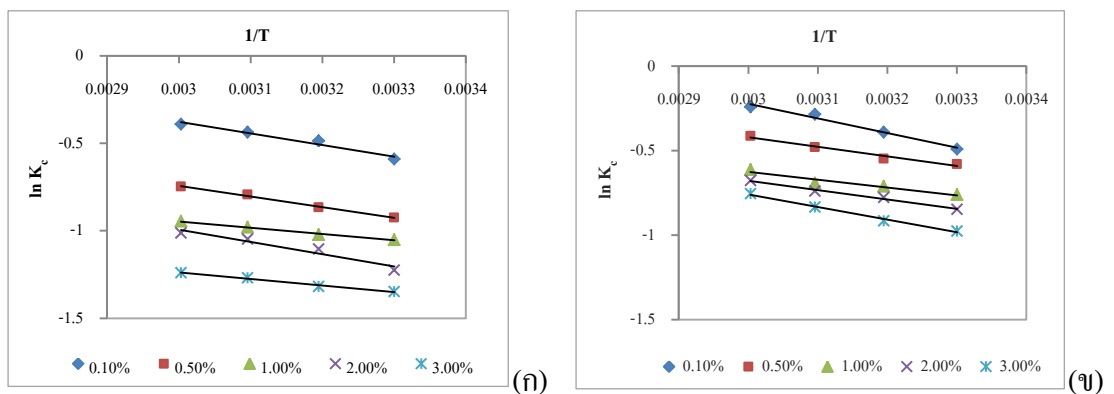
(ข)

รูปที่ ข.10 ฟรอนคลิชไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/T$ กับ $\ln K_c$ ของการดูดซับของไหลตัดชั้นงานบนเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

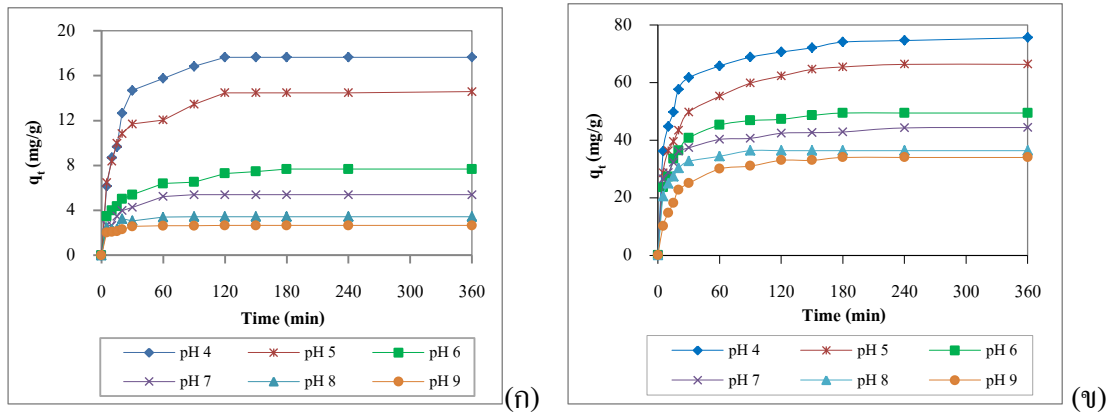


รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/T$ กับ $\ln K_c$ ของการดูดซับของไหลตัดชั้นงาน (ก) เม็ดโคโทซาน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน

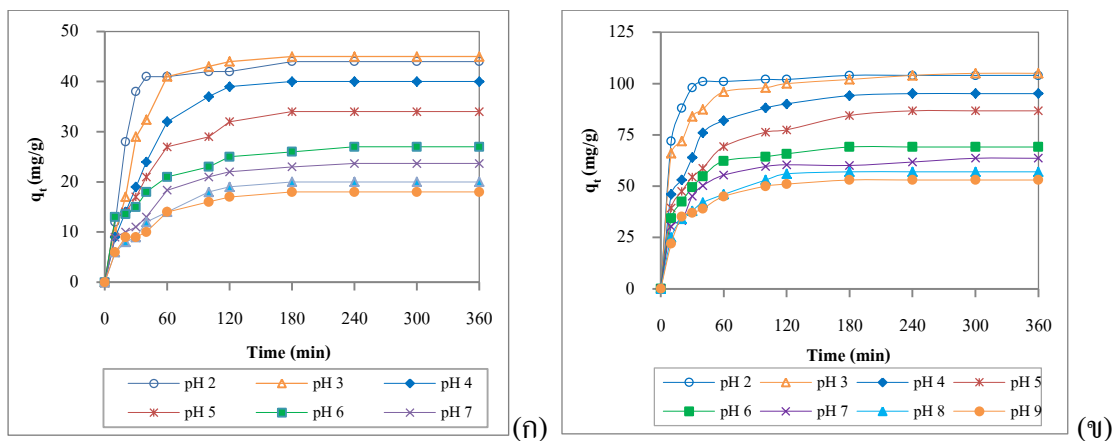


รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/T$ กับ $\ln K_c$ ของการดูดซับของไหลตัดชั้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

ความเป็นกรด-เบสของอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)

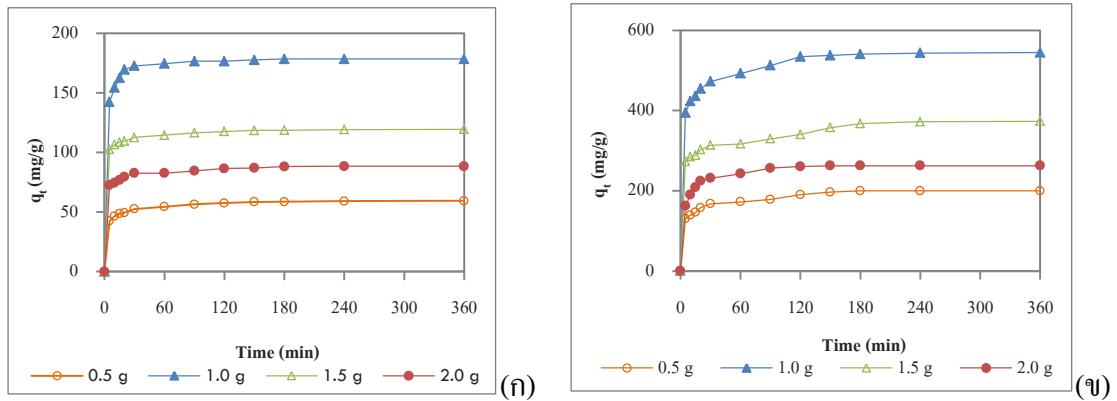


รูปที่ ข.13 ความเป็นกรด-เบสต่อความสามารถการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซาน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน

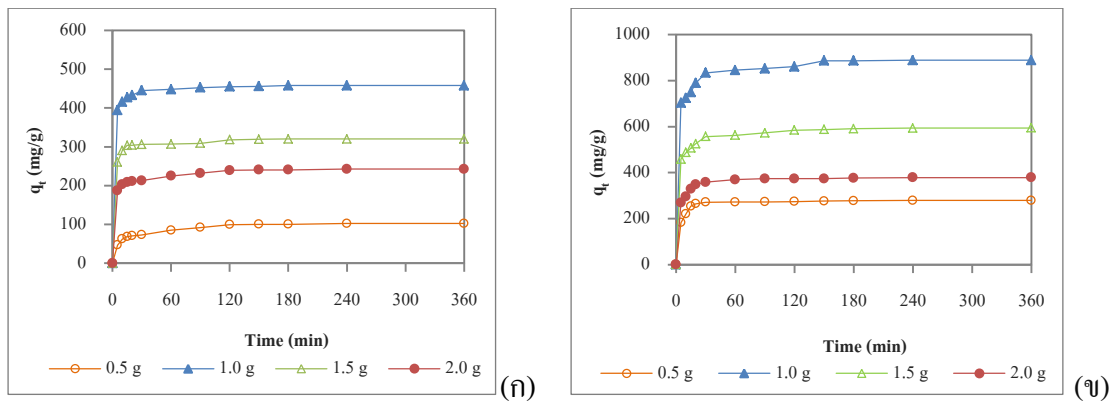


รูปที่ ข.14 ความเป็นกรด-เบสต่อความสามารถการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบน (ก) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยเม็ดโคโทซาน (CB) เม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิคลอโรไฮดริน (ECB) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB) และเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน (pECB)



รูปที่ ข.15 ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของ (ก) เม็ดโคโทซาน และ (ข) เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน

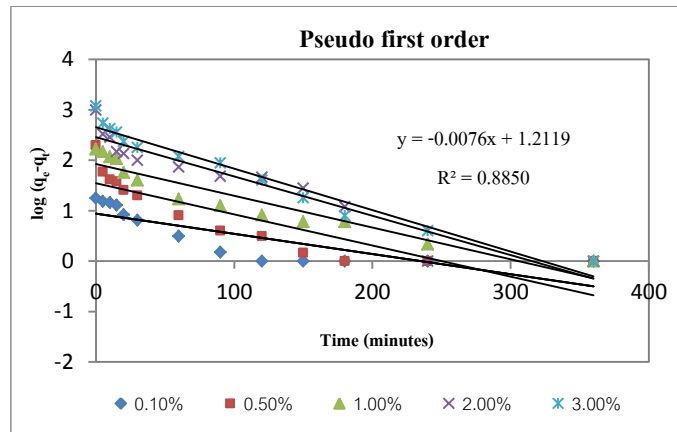


รูปที่ ข.16 ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของ (ก) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางด้วยอพิคลอโรไฮดริน และ (ข) เม็ดโคโทซานเชื่อมขวางอพิคลอโรไฮดรินและมีรูพรุน

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



จากรูป ค.1 แสดงปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพอกซีโพลีไฮดริน

จากสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม $\log(q_c - q_t) = \log q_c - (k_1 t / 2.303)$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_c - q_t)$ กับ t โดยให้ $\log(q_c - q_t)$ เป็นแกน y และ t เป็นแกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับ $-(k_1 / 2.303)$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_c$

จากกราฟ $y = -0.0076 + 1.2119$

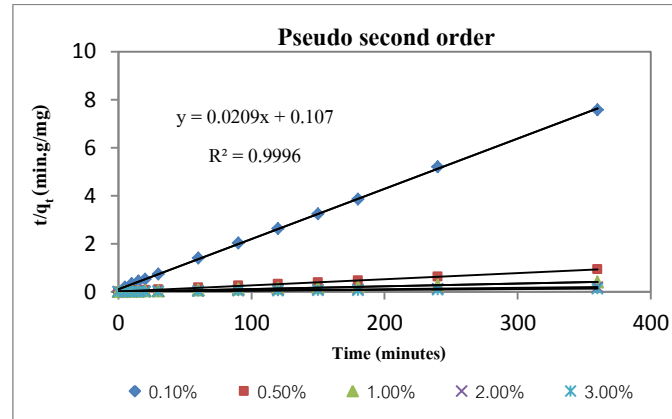
$$k_1 = - (2.303 \times (-0.0076))$$

$$k_1 = 1.75 \times 10^{-2}$$

$$q_c = 10^{1.2119}$$

$$q_c = 16.2892$$

ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม



จากรูป ค.2 แสดงปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพ็อกซีโพลีไฮดริน

จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม $t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t โดยให้ t/q_t เป็นแกน y และ t เป็นแกน x

จะได้ค่าความชันเท่ากับ $1/q_e$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/(k_2 q_e^2)$

จากกราฟ $y = 0.0209x + 0.107$

$$q_e = 1/0.0209$$

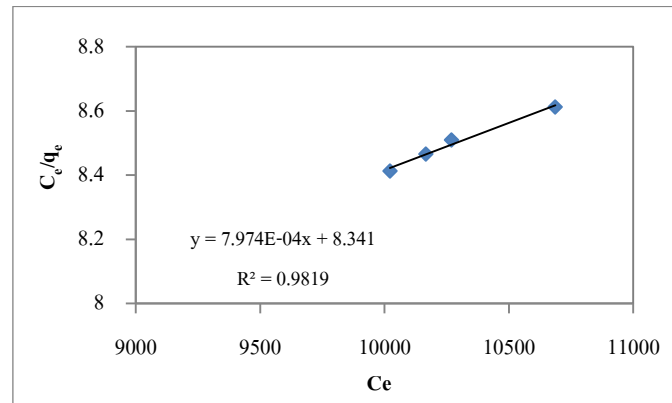
$$q_e = 47.8469$$

$$k_2 = 1/(k_2 q_e^2)$$

$$k_2 = 1/(244.978)$$

$$k_2 = 0.004082$$

แลงเมียร์ไอโซเทอม



จากรูป ค.3 แสดงแลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพอกซีโพลีเอสเตอร์ (ECB)

จากสมการของแลงเมียร์
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \left(\frac{1}{K_A q_m} \right)$$

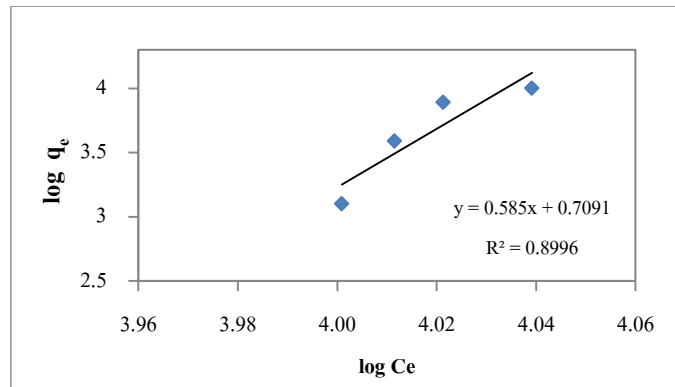
ความชันของเส้นตรงเท่ากับ
$$\frac{1}{q_m} = 7.97381 \times 10^{-4}$$

ดังนั้น
$$q_m = 1254.1056$$

จุดตัดแกนเท่ากับ
$$\frac{1}{K_A q_m} = 8.341$$

ดังนั้น
$$K_A = 9.56 \times 10^{-5}$$

ฟรอนคลิชไอโซเทอม



จากรูป ค.4 แสดงฟรอนคลิชไอโซเทอมของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานด้วยเม็ดโคโทซานที่เชื่อมขวางด้วยอีพอกซีโพลีไฮดริน

จากสมการของฟรอนคลิช $\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$

ความชันของเส้นตรงเท่ากับ $\frac{1}{n} = 0.585$

ดังนั้น $n = 1.71$

จุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F = 0.7091$

ดังนั้น $K_F = 5.118$

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโคโทซาน (CB) และเม็ดโคโทซานมีรูพรุน (pCB) ก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน

เม็ดโคโทซาน(CB) และ เม็ดโคโทซานที่มีรูพรุน (pCB)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	ช่วงสเปกตรัม (cm^{-1})
ก่อนการดูดซับของไหล ตัดชิ้นงาน	ν (-OH)	แอลกอฮอล์	3000-3750
	ν_s (-NH)	เอมีน	3000-3750
	ν_{as} (C-H)	เมทิล (CH_3)	2920
	ν_s (C-H)	เมทิลีน (CH_2)	2875
	ν (C=O)	เอไมด์ (secondary amide)	1656 -1651
	ν (C=O)	เอมีน (protonated amine)	1575
	δ (C-H)	เมทิลและเมทิลีน	1426, 1375
	ν_s (- CH_3)	เอไมด์ (tertiary amide)	1320.56
	C-N	เอมีน	890
	(C-O-C)	COH COC และ CH_2OH	1031-1300
ω (C-H)	โครงสร้างของแซคคาไรด์	830-915	
หลังการดูดซับของไหล ตัดชิ้นงาน	C-H (stretching)	เมทิล (- CH_3)	2925
	C-H (bending)	เมทิลีน (- CH_2)	2855
	(CH_2) ₄	เมทิลและเมทิลีน	1378-1459
		เอทิลีน	720

ν = การยืด (stretching vibration); ν_s = การยืดแบบสมมาตร (symmetric stretching vibration);
 ν_{as} = การยืดแบบสมมาตร (asymmetric stretching vibration); δ = การงอ (bending); ω = การงอนอกระนาบ (wagging)

ตารางที่ ๓.2 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดโกลโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกโลโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโกลโทซานเชื่อมขวางและมีูพรุน (pECB) ก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน

เม็ดโกลโทซานเชื่อมขวางด้วยอีพิกโลโรไฮดริน (ECB) และเม็ดโกลโทซานเชื่อมขวางและมีูพรุน (pECB)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ	ช่วงสเปกตรัม (cm ⁻¹)
ก่อนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน	v (-OH)	แอลกอฮอล์	3312-3750
	v _s (-NH)	เอมีน	3312-3750
	v _{as} (C-H)	เมทิล (CH ₃)	2920
	v _s (C-H)	เมทิลีน (CH ₂)	2875
	v (-C=O)	เอไมด์ (secondary amide)	1656
	v (-C=O)	เอมีน (protonated amine)	1574
	δ (C-H)	เมทิลและเมทิลีน	1426, 1375
	v _s (-CH ₃)	เอไมด์ (tertiary amide)	890
	C-N	เอมีน	1321-1323
	(C-O-C)	COH COC และ CH ₂ OH	1000-1300
หลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน	ω (C-H)	โครงสร้างของแซคคาไรด์	830-915
	C-H (stretching)	เมทิล (-CH ₃)	2925
	C-H (bending)	เมทิลีน (-CH ₂)	2854
	(CH ₂) ₄	เมทิลและเมทิลีน	1377-1462
		เอทิลีน	720

v = การยืด (stretching vibration); v_s = การยืดแบบสมมาตร (symmetric stretching vibration); v_{as} = การยืดแบบสมมาตร (asymmetric stretching vibration); δ = การงอ (bending); ω = การงอนอกระนาบ (wagging)

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นต่าง ๆ

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ความ เข้มข้น เริ่มต้น (%v/v)	$q_{e, \text{exp}}$ (มก./ก.)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
			$q_{e, \text{cal}}$ (มก./ก.)	k_1 ($\times 10^{-2}$) (นาที ⁻¹)	R^2	$q_{e, \text{cal}}$ (มก./ก.)	$k_2 (\times 10^{-3})$ (ก.ต่อ มก.นาที)	R^2
เม็ดไคโท ซาน (CB)	0.1	14.884	8.147	1.538	0.7576	16.639	6.050	0.9920
	0.5	64.654	21.082	1.235	0.6947	64.935	2.730	0.9999
	1.0	177.364	37.932	0.404	0.7765	181.818	1.856	0.9997
	2.0	456.181	296.560	0.134	0.8126	454.545	0.663	0.9990
	3.0	202.634	61.944	0.109	0.8121	204.081	0.8763	0.9996
เม็ดไคโท ซานที่มีรู พรุน (pCB)	0.1	72.770	30.0123	1.621	0.9644	73.529	2.579	0.9994
	0.5	384.355	100.832	1.451	0.8383	384.615	0.675	0.9993
	1.0	539.812	93.154	1.566	0.8007	555.556	0.448	0.9999
	2.0	1630.825	400.682	0.452	0.9072	1666.666	0.164	0.9998
	3.0	1896.433	1235.95	0.034	0.9283	2000.000	0.040	0.9985
เม็ดไคโท ซานเชื่อม ขวาง (ECB)	0.1	46.665	16.290	1.750	0.8850	47.847	4.082	0.9996
	0.5	182.081	48.686	2.073	0.8005	185.185	2.667	0.9990
	1.0	488.397	168.927	1.635	0.8025	489.455	1.117	0.9999
	2.0	986.790	96.811	0.286	0.8324	998.000	0.435	0.9999
	3.0	1188.400	232.590	0.119	0.8169	1240.000	0.046	0.9995
เม็ดไคโท ซานเชื่อม ขวางและมี รูพรุน (pECB)	0.1	96.1650	23.415	1.184	0.9174	98.039	3.710	0.9999
	0.5	390.000	100.832	1.142	0.8383	384.615	0.654	0.9993
	1.0	888.397	168.927	1.124	0.8025	909.091	0.371	0.9999
	2.0	1865.135	582.371	0.035	0.8371	1879.076	0.033	0.9993
	3.0	2942.370	1496.73	0.025	0.8603	3030.333	0.008	0.9984

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรินทร์ ทองคอนเอ เกิดเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พุทธศักราช 2529 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนมัธยมฐานบินกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ในปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2551 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552