

การจัดของไหลตัดชิ้นงานชนิดเกิดอิมัลชันในน้ำจากน้ำหล่อเย็นโดยการดูดซับบนดินฟอก-โคโตะซาน

นางสาวนิตยา เนาวนัต



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF WATER EMULSIFIABLE CUTTING FLUID FROM COOLING WATER BY
ADSORPTION ON BLEACHING EARTH-CHITOSAN

Miss Nitiya Naowanat



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจัดของไหลตัดชิ้นงานชนิดเกิดอิมัลชันในน้ำจากน้ำ
หล่อเย็นโดยการดูดซับบนดินพอก-โคโตซาน

โดย

นางสาวนิตยา เนาวนัต

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐยานันท์ พงศ์สถาบตี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐยานันท์ พงศ์สถาบตี)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิณชีระนันท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรัตน์ ปัตร์ประกร)

นิตยา เนาวรัตน์ : การขจัดของไหลตัดชิ้นงานชนิดเกิดอิมัลชันในน้ำจากน้ำหล่อเย็นโดยการดูดซับบนดินฟอก-ไคโตซาน (REMOVAL OF WATER EMULSIFIABLE CUTTING FLUID FROM COOLING WATER BY ADSORPTION ON BLEACHING EARTH-CHITOSAN) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ, 108 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการขจัดของไหลตัดชิ้นงานชนิดเกิดอิมัลชันในน้ำจากน้ำหล่อเย็นโดยการดูดซับบนดินฟอก-ไคโตซาน (BEC) และเปรียบเทียบกับตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (CB) ซึ่งการทดลองนี้จะศึกษาการดูดซับแบบกะ โดยตัวแปรที่ศึกษาในการทดลอง คือ ค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 3 ถึง 10 ความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นในของไหลตัดชิ้นงานที่ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรถึงร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส ถึง 55 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวดูดซับตั้งแต่ 0.2 กรัม ถึง 1กรัม และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ตั้งแต่ 15 นาที ถึง 360 นาที จากการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับบนดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (BEC1:1) มีค่ามากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ซึ่งในงานวิจัยนี้ ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4,587 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นในของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับมีค่าประมาณ 310 นาที ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาค่ามุมสัมผัส พบว่าตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซาน มีความไม่ชอบน้ำสูง แบบจำลองสมดุลการดูดซับของตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับฟรอนดลิช ในขณะที่ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน จลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในขณะที่ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สอดคล้องกับแบบจำลองของปฏิกิริยาอาฟลามิ (Avrami)

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5572019723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: WATER EMULSIFIABLE CUTTING FLUID, ADSORBENT, ADSORPTION, COOLING WATER.

NITIYA NAOWANAT: REMOVAL OF WATER EMULSIFIABLE CUTTING FLUID FROM COOLING WATER BY ADSORPTION ON BLEACHING EARTH-CHITOSAN. ADVISOR: ASSOC. PROF. NATTAYA PONGSTABODEE, Ph.D., 108 pp.

The main purpose of this research was to study a removal of water emulsifiable cutting fluid from cooling water by adsorption on bleaching earth-chitosan (BEC), compared with chitosan bead (CB). The adsorption of cutting fluid on adsorbents were studied in a batch reactor. The factors investigated here were initial pH of cutting fluid from 3 to 10, initial cutting fluid content in the cooling water from 0.75% (w/v) to 4% (w/v), temperature from 30°C to 55°C, the adsorbent dosage from 0.2 g to 1 g, and contact-time from 15 min to 360 min. The cutting fluid adsorption capacity of adsorbent was reported in term of weight of adsorbed cutting fluid to weight of adsorbent (mg/g). From the experimental results, BEC has a greater adsorption capacity than that of CB. This result was found that 0.2 g BEC expressed higher adsorption capacity of 4,658 mg/g at initial pH 3 and 3 % (w/v) of the initial cutting fluid content in the cooling water at 30 °C. Contact time between cutting fluid and BEC was required at least 310 min. From the contact angle studies suggested that the BEC is high hydrophobic. For adsorption isotherm, the data was fitted well to the Freundlich isotherm for CB. Whereas the experimental data of BEC was correlated well with the Koble-Corrigan isotherm. The kinetic data were estimated by pseudo-first-order, pseudo-second-order and Avrami. For CB results were fitted well to a pseudo-second-order while BEC was fitted well to an Avrami kinetic.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐยานัน พงศ์สถาปติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้ออำนวยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker) สำหรับใช้ศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (RRI) ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท ไทยแม่คืออุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเรื่องเงินทุนในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เอส.วาย.เค. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ที่เอื้อเพื่อวัตถุดิบไคโตซาน และบริษัท ไทยฮาว์ทัน 1993 จำกัด ที่เอื้อเพื่อของไหลตัดชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาพฤกษศาสตร์ และหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ และเป็นกำลังใจเสมอมา อีกทั้งยังสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐาน	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ของไหลตัดชิ้นงาน (Cutting Fluids)	3
2.1.1 องค์ประกอบของของไหลตัดชิ้นงาน	3
2.1.2 ประเภทของของไหลตัดชิ้นงาน	8
2.1.3 การเสื่อมสภาพของของไหลตัดชิ้นงาน.....	9
2.1.4 การบำรุงรักษาของไหลตัดชิ้นงาน	11
2.1.5 ผลกระทบจากของไหลตัดชิ้นงาน.....	12
2.1.6 แนวทางแก้ปัญหา	12
2.2. กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	13
2.2.1 ประเภทของการดูดซับ.....	14

2.2.2 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent).....	15
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	20
2.2.4 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ.....	22
2.2.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic model of adsorption).....	26
2.2.6 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption).....	30
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.3 การเตรียมตัวดูดซับ.....	37
3.4 ขั้นตอนการทดลองและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	38
3.5 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ.....	41
3.7 การศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ.....	42
3.8 ศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	43
3.9 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
4.1 คุณลักษณะของตัวดูดซับ.....	44
4.2 ผลของตัวแปรต่อการขจัดของไหลตัดชิ้นงานด้วยวิธีการดูดซับแบบแบดซ์บน ตัวดูดซับต่างๆ.....	63
4.3 หมู่ฟังก์ชันเฉพาะของตัวดูดซับหลังการดูดซับ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR).....	78
4.4 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption).....	80
4.5 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ (Isotherm adsorption).....	81

4.6 ศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงตัวแปรที่ใช้และช่วงที่ศึกษา	40
4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับ	53
4.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายการดูดซับ ไนโตรเจน.....	54
4.3 แสดงลักษณะความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับ	58
4.4 แสดงขนาดหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานที่ระดับความเป็นกรดต่างๆกัน	60
4.5 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานเริ่มต้น ต่างๆ.....	72
4.6 แสดงค่าทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ	80
4.7 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับ	84
4.8 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order).....	86
4.9 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order).....	87
4.10 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับปฏิกิริยาอาฟลามี่ (Avrami).....	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของสารลดแรงตึงผิว.....	5
2.2 การทำงานของสารลดแรงตึงผิวโดยส่วนที่ชอบน้ำ จะจับกับโมเลกุลของน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จะจับกับโมเลกุลของของไหลตัดชิ้นงาน.....	6
2.3 ขั้นตอนการดูดซับ ประกอบด้วย (ก) การแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ต้องการบำบัดไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับ (ข) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (ค) โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ.....	14
2.4 แสดงโครงสร้างของดินฟอก (Activated bleaching earth).....	17
2.5 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส.....	18
2.6 แสดงโครงสร้างของไคติน.....	18
2.7 แสดงโครงสร้างของไคโตซาน.....	19
2.8 แสดงการโปรโตเนตหมู่อะมิโนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$).....	19
2.9 แสดงความสัมพันธ์ความสามารถของการดูดซับในสารละลาย.....	21
2.10 แสดงการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของอนุภาค.....	22
4.1 ลักษณะกายภาพของตัวดูดซับสังเคราะห์ โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1.....	45
4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 (ง) ดินฟอก.....	48
4.3 แสดงโครงสร้างของตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซาน.....	49
4.4 แสดงโครงร่างผลึกของตัวดูดซับ โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1	

(ค) ตัวดูดซับดินฟอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1
 (ง) ดินฟอก (BE) (สัญลักษณ์ ● = แร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite);
 ■ = แร่ควอตซ์ (Quartz); ▲ = แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar))..... 51

4.5 แสดงลักษณะการแทรกตัวของโคลโตซานในชั้นชั้นซิลิกาออกไซด์ของดินฟอก..... 52

4.6 แสดงลักษณะสัญญาณของตัวดูดซับสังเคราะห์ก่อนการดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) ตัวดูดซับโคลโตซานชนิดเม็ด
 (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1
 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 56

4.7 แสดงลักษณะสัญญาณของตัวดูดซับสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) ตัวดูดซับโคลโตซานชนิดเม็ด
 (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1
 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 57

4.8 แสดงศักยภาพไฟฟ้าตัวดูดซับและของไหลตัดชิ้นงานในช่วงค่าความเป็นกรดต่างๆ..... 62

4.9 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่ค่าความกรดต่างๆ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 1 กรัม และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที 65

4.10 แสดงความสามารถในการดูดซับ (เส้นทึบ) และร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงาน (เส้นประ) บนตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 1 กรัม และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที..... 67

4.11 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที..... 69

4.12 แสดงร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ

- 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที 70
- 4.13 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานต่างๆ เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.2 กรัม และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที..... 73
- 4.14 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 2 ชนิด ที่เวลาการดูดซับ 360 นาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที 75
- 4.15 แสดงความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ 3 ชนิด (ตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด (CB) ตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (BEC1:1) และตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 (BEC5:1)) ที่เวลาการดูดซับ 360 นาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที 77
- 4.16 แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดย (ก) ของไหลตัดชิ้นงาน
 (ข) ก่อนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด
 (ค) หลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด
 (ง) ก่อนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 1 ต่อ 1
 (จ) หลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากแนวโน้มการเติบโตของอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะ พบว่าปริมาณการส่งออกเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 26.25 ต่อปี จึงเป็นนัยสำคัญว่าความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้นสำหรับการใช้น้ำหล่อเย็นในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะเพื่อการระบายความร้อนระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือ และยังลดการเสียดสีระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานกับเครื่องมือในขั้นตอนการเจาะ กลึง ตัด หรือเจียร น้ำหล่อเย็นเหล่านี้จะมีอายุการใช้งานจำกัดซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 3 – 6 เดือน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ในการใช้งานและปริมาณความร้อนที่ได้รับ การเปลี่ยนถ่ายน้ำหล่อเย็นที่เสื่อมคุณภาพ จำเป็นต้องใช้น้ำหล่อเย็นใหม่ทดแทนน้ำหล่อเย็นเก่าทั้งระบบ จึงเป็นเหตุที่น้ำหล่อเย็นจำนวนมากรอการขจัด

น้ำหล่อเย็นเป็นอิมัลชันเสถียรของน้ำมันของไหลตัดชิ้นงานในน้ำ เนื่องจากของไหลตัดชิ้นงานมักมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบ จึงมีความเสถียรและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขนาดอนุภาคน้ำมันของน้ำมันหล่อเย็นมีขนาดเล็กมาก และมีน้ำมันแร่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ซึ่งทำให้บำบัดได้ยากด้วยกระบวนการบำบัดทั่วไป งานวิจัยบางงานวิจัยศึกษาการขจัดของไหลตัดชิ้นงานออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ของไหลตัดชิ้นงานร่วมกับการรวมอนุภาคของไหลตัดชิ้นงาน ซึ่งก่อให้เกิดกากตะกอนจำนวนมาก [2, 3] บางงานวิจัยใช้วิธีการแยกด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าซึ่งต้องใช้ต้นทุนสูง [4] บางงานวิจัยใช้วิธีการแยกด้วยเมมเบรน ซึ่งมักเกิดอุดตันของเมมเบรนได้ง่ายด้วยของไหลตัดชิ้นงาน [4] บางงานวิจัยใช้วิธีการดูดซับ [5] แต่มีข้อจำกัดของสภาพการดูดซับต้องอยู่ในช่วงความเป็นกรดต่ำไม่เกิน 3 และไม่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิที่มากกว่า 30 องศาเซลเซียส

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการขจัดอิมัลชันของไหลตัดชิ้นงานในน้ำออกจากน้ำหล่อเย็นด้วยวิธีการดูดซับบนตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซาน เพื่อสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้ในช่วงการทำงานที่มีข้อจำกัดน้อยลง เช่น อุณหภูมิการดูดซับที่มากกว่า 30 องศาเซลเซียส

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อขจัดของไหลตัดชิ้นงานชนิดเกิดอิมัลชันในน้ำจากน้ำหล่อเย็นด้วยวิธีการดูดซับบนดินพอก-ไคโตซาน

1.3 สมมติฐาน

น้ำมันหล่อเย็นซึ่งเป็นอิมัลชันเสถียรของน้ำมันในน้ำ สามารถจัดด้วยวิธีการดูดซับบนตัวดูดซับดินพอก-โคลโตซาน ในช่วงอุณหภูมิกว้าง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ตัวดูดซับดินพอก-โคลโตซานในสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน
2. วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน โดยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน การหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวดูดซับ
3. ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการจัดของไหลตัดชิ้นงานด้วยวิธีการดูดซับบนตัวดูดซับที่สังเคราะห์
4. วิเคราะห์ความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงานก่อนและหลังการดูดซับ โดยใช้เทคนิคทางยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี
5. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับและแบบจำลองจลนพลศาสตร์
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง วิจัยและสรุปผลการทดลอง พร้อมเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถจัดของไหลตัดชิ้นงานชนิดอิมัลชันเสถียรน้ำมันในน้ำจากน้ำหล่อเย็นด้วยวิธีการดูดซับบนตัวดูดซับดินพอก-โคลโตซาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ รายละเอียดต่างๆ ของไหลตัดชิ้นงาน อาทิ องค์ประกอบและประเภทของไหลตัดชิ้นงาน การเสื่อมสภาพของไหลตัดชิ้นงาน การบำรุงรักษาของไหลตัดชิ้นงาน ผลกระทบจากของไหลตัดชิ้นงาน เป็นต้น รายละเอียดต่างๆของการดูดซับ อาทิ ประเภทการดูดซับ ตัวดูดซับ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ เป็นต้น แบบจำลองสมดุลการดูดซับ แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ ในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของไหลตัดชิ้นงาน (Cutting Fluids)

ของไหลตัดชิ้นงานถูกใช้งานเพื่อการหล่อลื่นและระบายความร้อนพร้อมทั้งลดการเสียดสีระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือในขณะทำการตัด เจียร กลึง หรือเจาะ [1] โดยหน้าที่หลักของของไหลตัดชิ้นงาน คือจะช่วยถ่ายโอนความร้อนบริเวณใบมีดและผิวหน้าชิ้นงาน เนื่องจากความร้อนจะทำให้ใบมีดเสียความแข็งหรืออ่อนตัว และช่วยไม่ให้เกิดสะสมความร้อนที่บริเวณสัมผัสนี้มากเกินไปจนกระทั่งเกิดไฟไหม้ มีควัน หรือเกิดประกายไฟ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการผลิตชิ้นงานเป็นไปได้ช้าลง รวดเร็ว ขนาดและคุณภาพชิ้นงานได้ตามที่ต้องการ ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับใบมีด ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด กลึง ลดการสึกหรอของใบมีดและป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการหลอมติดของเศษโลหะบริเวณปลายใบมีด (Build up edge) ช่วยให้ขอบหน้าของโลหะที่ตัดมีความเรียบเนียน นอกจากนี้ยังช่วยชะล้างเศษโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตัดให้หลุดออกไปได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยป้องกันสนิมให้แก่ผิวชิ้นงาน [4, 6]

2.1.1 องค์ประกอบของของไหลตัดชิ้นงาน

ของไหลตัดชิ้นงานจะประกอบด้วยน้ำมันพื้นฐานและสารเติมแต่ง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้ [1]

2.1.1.1 น้ำมันพื้นฐาน (Base oil)

น้ำมันพื้นฐานมี 3 ประเภท คือ น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมน้ำมันแร่ เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก ส่วนน้ำมันชนิดอื่นจะใช้ตามงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ

ก. น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ (Vegetable or animal oils)

น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ จะเป็นที่นิยมมากในยุคก่อนๆ เนื่องจากน้ำมันชนิดนี้สามารถหาได้จากธรรมชาติ แต่ข้อเสียของน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์จะไม่เสถียร ดังนั้นจึงเกิดเสถียรภาพได้ง่าย จำเป็นต้องผ่านขบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต ดังนั้นน้ำมันชนิดนี้จึงมีราคาค่อนข้างสูง ตัวอย่างน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันปาล์ม ตัวอย่างน้ำมันสัตว์ ได้แก่ น้ำมันหมู และน้ำมันปลา ซึ่งปัจจุบันน้ำมันชนิดนี้มีการนำมาเป็นน้ำมันพื้นฐานน้อยมาก

ข. น้ำมันแร่ (Mineral oils)

น้ำมันแร่เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดี อีกทั้งยังราคาถูก ซึ่งได้จากกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ เพื่อแยกเอาน้ำมันชนิดใสและชนิดข้นออกมา ส่วนที่เหลือนี้เป็นกาก จะนำไปผลิตเป็นยางมะตอย ส่วนชนิดน้ำมันและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมา นั้น จะขึ้นกับชนิดของน้ำมันดิบ น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ จะมีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผ่านขบวนการต่างๆ เพื่อขจัดสิ่งที่ไม่ต้องการในน้ำมันออก โดยน้ำมันแร่ที่นำมาใช้ผลิตของไหลตัดชิ้นงานจะแบ่งตามความหนืด ซึ่งสามารถแบ่งความหนืดได้ 3 ประเภท คือความหนืดสูง กลาง และต่ำ น้ำมันแร่ที่มีความหนืดสูงได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบประเภทพาราฟินิก (Paraffinic) น้ำมันชนิดนี้จะมีสารกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic) สูงในปริมาณที่มาก ส่งผลให้เสี่ยงต่อก่อเกิดมะเร็ง ดังนั้นน้ำมันพาราฟินิกจึงไม่นิยมต่อการใช้งาน ในปี ค.ศ. 1950 ได้มีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันแร่ โดยเพิ่มกระบวนการไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) เป็นวิธีการขจัดสารกลุ่มอะโรมาติกซึ่งเป็นก่อมะเร็งโดยกระบวนการนี้จะเติมก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงและมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อขจัดซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และอะโรมาติกเป็นไซโคลแอลเคน (Cycloalkane) ส่วนน้ำมันแร่ที่มีความหนืดปานกลางและต่ำ ได้มาจากการกลั่นประเภท แนฟทาติก (Naphthenic) ซึ่งน้ำมันแนฟทาติกมีสมบัติในการละลายสารเติมแต่ง อีกทั้งยังเข้ากับน้ำได้ดีกว่าน้ำมันพาราฟินิก [7]

ค. น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oils)

น้ำมันสังเคราะห์ถูกผลิตขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งสารตั้งต้นในการนำมาผลิตคือน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งน้ำมันชนิดนี้มีหลายชนิดขึ้นกับการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นจึงนำมาใช้เฉพาะงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น ความหนืดสูง งานในอุณหภูมิสูงมากๆ หรืออุณหภูมิต่ำมากๆ งานต้องการจุดระเหยต่ำ เป็นต้น โดยน้ำมันสังเคราะห์ที่นำมาใช้ ได้แก่ Polyalphaolefins (PAO), Estes (Diester และ Complex Ester), Polyglycols, Silicone, Halogenated Hydrocarbon และ Polyphenyl Ethers

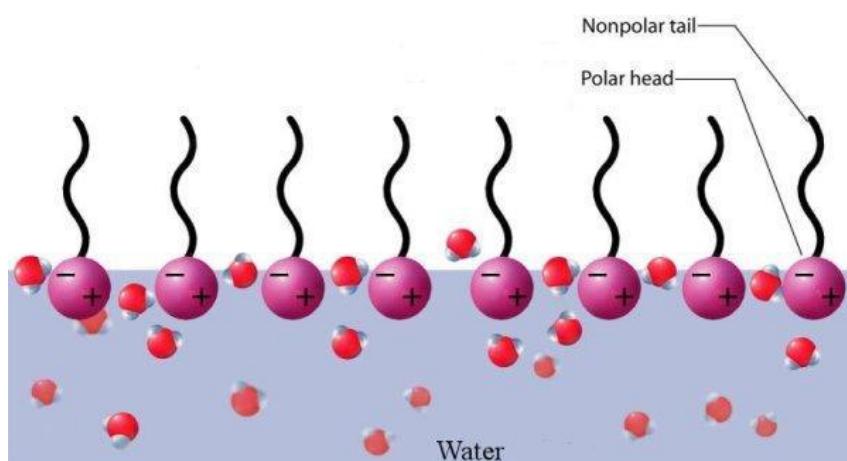
2.1.1.2 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ความมีขั้ว (Polarity) และความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility) โดยจะมีสัดส่วนน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ถึง ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก [8] เช่น

ก. สารอิมัลซิไฟเออร์ และสารลดแรงตึงผิว (Emulsifiers and surfactants)

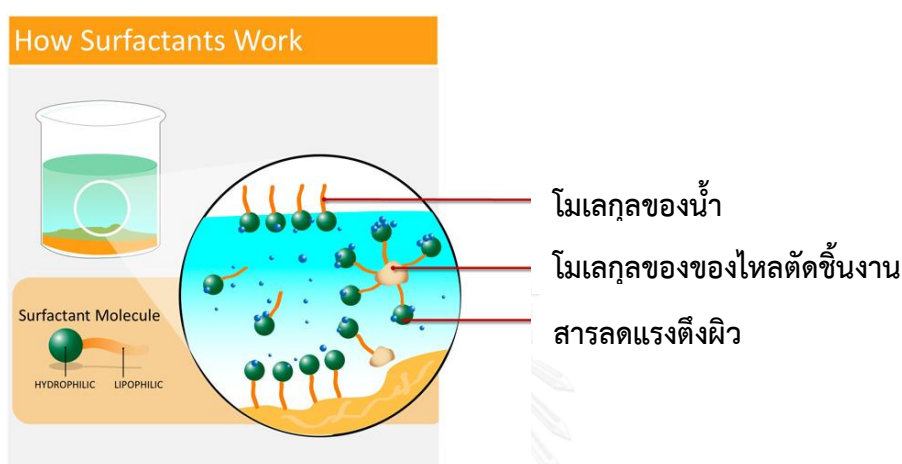
สารอิมัลซิไฟเออร์ และสารลดแรงตึงผิว เป็นสารประกอบที่ทำให้แรงตึงผิวของของไหลตัดชิ้นงานลดลง ช่วยให้การกระจายตัวของของไหลตัดชิ้นงานได้ดีขึ้น และช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างของไหลตัดชิ้นงานกับน้ำ โดยสารลดแรงตึงผิวจัดเป็นสารพวก Amphiphilic molecules ซึ่งภายในโมเลกุลจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีขั้ว (Hydrophilic head group) จะมีคุณสมบัติชอบน้ำ และส่วนไม่มีขั้ว (Hydrophobic tail) จะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ สามารถละลายได้ดีในสารไม่มีขั้ว (Non-polar) และสารประเภทไฮโดรคาร์บอน โดยหลักการทำงานของสารชนิดนี้ มีรายละเอียดดังนี้

1. การลดแรงตึงผิวของน้ำ โมเลกุลของน้ำจะมีแรงดึงดูดต่อกันสูงมาก เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไป ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะถูกผลักออกไป ทำให้โมเลกุลส่วนที่มีขั้วเกิดการเรียงกันอยู่บนผิวน้ำ ดังรูปที่ 2.1 ส่งผลให้แรงตึงผิวของน้ำลดลง ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปสัมผัสกับโมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานได้ง่ายขึ้น [9]



รูปที่ 2.1 การทำงานของสารลดแรงตึงผิว [9]

2. การเกิดอิมัลชัน เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไป จะทำให้ในของไหลตัดชั้นงานกระจายตัวเป็นหยดเล็กๆ และโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปล้อมรอบหยดของไหลตัดชั้นงาน โดยจะหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหาของไหลตัดชั้นงาน เรียกการรวมตัวแบบนี้ว่าไมเซลล์ (Micelle) ส่งผลให้หยดของไหลตัดชั้นงานเกิดการแขวงลอยอยู่ในน้ำ ไม่สามารถกลับมารวมตัวกันได้ อีก ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทำงานของสารลดแรงตึงผิวโดยส่วนที่ชอบน้ำ จะจับกับโมเลกุลของน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จะจับกับโมเลกุลของของไหลตัดชั้นงาน [9]

สารลดแรงตึงผิวจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามคุณสมบัติของประจุไฟฟ้า ได้แก่ แอนไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ (Anionic emulsifier) แคตไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ (Cationic emulsifier) นอนไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์ (Non-ionic emulsifier) แอมโฟเทอริกอิมัลซิไฟเออร์ (Amphoteric emulsifier)

ข. สารทนต่อแรงกด (Extreme pressure agent)

สารทนต่อแรงกด มีคุณสมบัติช่วยหล่อลื่นบริเวณผิวหน้าของโลหะ ซึ่งจะทำให้โลหะสามารถรับแรงกดได้มากขึ้น ตัวอย่างสารทนแรงกด ได้แก่ สารประกอบซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส และคลอรีน เป็นต้น

ค. สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)

สารป้องกันการกัดกร่อน มีหน้าที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของผิวโลหะจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารจำพวกกรด สารเปอร์ออกไซด์ และความชื้น ตัวอย่างสารประเภทนี้ได้แก่ โซเดียมโมดิเบตเตด เกลือของกรดไขมัน สารกลุ่มซัลโฟเนต เอมีน เอไมด์ ไนเตรต เป็นต้น โดยสาร

เหล่านี้จะสร้างเยื่อบางๆปกคลุมบริเวณพื้นผิวของโลหะ เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าโลหะ

ง. สารฆ่าเชื้อโรค (Biocides)

สารฆ่าเชื้อโรค จะช่วยยับยั้งและควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เชื้อรา และยีสต์ ในของไหลตัดชิ้นงาน โดยส่วนใหญ่สารประเภทนี้จะอยู่ในกลุ่มอินทรีย์แฮโล (Halo organics) เนื่องจากสารเหล่านี้ยากต่อการควบคุมระยะยาว ดังนั้นจึงควรที่จะเลือกชนิดที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ทั้งหมด และควรสับเปลี่ยนชนิดเพื่อป้องกันการดื้อยาของเชื้อโรค

จ. สารลดแรงเสียดทานและสารเพิ่มคุณสมบัติเปียก (Friction reduction and Wettability agents)

สารลดแรงเสียดทานและสารเพิ่มคุณสมบัติเปียก มีโครงสร้างของสารประเภทนี้ จะประกอบด้วย กลุ่มสารมีขั้ว ซึ่งจะทำหน้าที่จับยึดผิวโลหะ และกลุ่มไฮโดรคาร์บอน จะละลายโมเลกุลของของไหลตัดชิ้นงานสร้างเป็นเยื่อบางจับบริเวณผิวหน้าโลหะ

ฉ. สารควบคุมความเป็นกรดด่าง (Alkaline reserve)

สารควบคุมความเป็นกรดด่าง มีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์รักษาสภาพความเป็นกรดด่างของของไหลตัดชิ้นงานให้คงที่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วง 8.5 ถึง 9 อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ตัวอย่างสารประเภทนี้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) และเอทานอลามีน (Ethanalamines)

ช. สารเพิ่มความเสถียร (Coupling agent หรือ Stabilizers หรือ Solubilizers)

สารเพิ่มความเสถียร มีหน้าที่สร้างความเสถียรแบบถาวรให้แก่อิมัลชันในของไหลตัดชิ้นงาน โดยการเพิ่มสามารถในการกระจายของของไหลตัดชิ้นงาน เพื่อป้องกันการแยกตัวของสารเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ

ซ. สารเติมแต่งอื่นๆ (Other additive)

สารเติมแต่งอื่นๆ เช่น สารเพิ่มดัชนีความหนืด (Viscosity index improver) สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) สารคีเลต (Chelating agents) สารต้านการเกิดละออง (Anti-mist agent) เป็นต้น

2.1.2 ประเภทของของไหลตัดชิ้นงาน

ของไหลตัดชิ้นงานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ น้ำมันแร่ น้ำมันละลายน้ำ น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยที่น้ำมันตัดชิ้นงานส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้งานได้เลย ยกเว้นน้ำมันแร่ที่จะต้องผสมน้ำก่อนนำไปใช้งาน และแต่ละประเภทของของไหลตัดชิ้นงานจะมีสารเติมแต่ง (Additive) ช่วยลดแรงตึงผิว สารฆ่าเชื้อโรค (Biocides) ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สารทนทานต่อแรงกด (extreme pressure agents) เพิ่มความทนทานต่อแรงกด สารต้านอนุมูลอิสระ (anti-oxidants) และสารต้านการกัดกร่อน (corrosion inhibitors) เป็นองค์ประกอบ โดยสารเหล่านี้จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของของไหลตัดชิ้นงาน [10]

2.1.2.1 น้ำมันล้วน (Straight Oil)

น้ำมันล้วนนี้ส่วนใหญ่ทำมาจากน้ำมันแร่ (ปิโตรเลียม) หรือน้ำมันพืช โดยที่จะมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้มาจากการกลั่น โดยการกลั่นจะมี 2 แบบ คือ การกลั่นแบบใช้ตัวทำละลาย (Solvent Refining Process) โดยที่จุดเด่นของน้ำมันประเภทนี้คือ มีราคาถูกและไม่มีไข (Wax) สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากน้ำมันประเภทนี้มีสารไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัวอยู่เป็นจำนวนมากจึงทำให้อายุการใช้งานของน้ำมันค่อนข้างสั้น การกลั่นแบบไฮโดรทรีต (Hydrotreated Process) เป็นกระบวนการกลั่นที่ช่วยลดสารก่อให้เกิดมะเร็งที่อยู่ในน้ำมันดิบที่เรียกว่า Polynuclear aromatic hydrocarbons [PAHs] ซึ่งน้ำมันประเภทนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในทวีปอเมริกา และยุโรป เนื่องจากน้ำมันที่ได้จากการกลั่นแบบไฮโดรทรีตนี้สามารถต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี (Oxidation Resistance) ทนทานความร้อนได้สูงขึ้น ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น [7] ลักษณะของน้ำมันล้วนจะหนืด เนื่องจากเป็นน้ำมันล้วนไม่มีส่วนผสมของน้ำ อาจมีการเติมสารคลอรีนและกำมะถันเพื่อป้องกันการเกิดคราบบนพื้นผิวทองแดงโดยน้ำมันประเภทนี้จะนิยมใช้สำหรับหล่อลื่นมากกว่าระบายความร้อน ช่วยลดแรงกระแทกระหว่างชิ้นงานได้ดี เหมาะสำหรับการตัดที่ใช้ความเร็วรอบต่ำ เนื่องจากน้ำมันประเภทนี้ระบายความร้อนได้ไม่ทันัก มักมีควันออกมาจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกันอัคคีภัยในภายในกระบวนการผลิต

2.1.2.2 น้ำมันละลายน้ำ (Soluble oil)

น้ำมันละลายน้ำ หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า น้ำมันชนิดอิมัลชันในน้ำ ซึ่งจะประกอบด้วยน้ำมันพื้นฐานจากการกลั่นร้อยละ 60-90 โดยจะผสมด้วยสารลดแรงตึงผิว (Emulsifier) เพื่อช่วยกระจายน้ำมันในน้ำ ซึ่งจะอยู่ในรูปอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in water emulsion) จะมี

ลักษณะคล้ายน้ำมัน นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงาน และช่วยยืดอายุการใช้งานของน้ำมัน โดยทั่วไปน้ำมันละลายน้ำจะมีคุณสมบัติหล่อลื่นได้ดี เนื่องจากมีส่วนผสมของน้ำมันจำนวนมากและระบายความร้อนได้ดี เพราะมีการผสมน้ำบางส่วน อย่างไรก็ตาม น้ำมันละลายน้ำมีข้อเสียอยู่หลายประการ เนื่องจากน้ำมันชนิดนี้มีส่วนประกอบของน้ำจึงเป็นสาเหตุสำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้หากผสมกับน้ำกระด้างจะเกิดการตกตะกอน อีกทั้งถ้าเติมสารป้องกันสนิมไม่เพียงพอทำให้เกิดการกัดกร่อนเกิดเป็นสนิมได้ง่าย

2.1.2.3 น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ (Semisynthetic)

น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ประกอบด้วยน้ำมันพื้นฐานจากการกลั่นร้อยละ 2-30 ผสมกับน้ำร้อยละ 30-50 และสารเติมแต่ง น้ำมันชนิดนี้จะมีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิวจำนวนมาก ดังนั้นลักษณะของน้ำมันจะมีขนาดอนุภาคที่เล็ก โดยน้ำมันชนิดนี้จะมีคุณสมบัติหล่อลื่นปานกลาง แต่หล่อเย็นและระบายความร้อนได้ดี ทำให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำมันชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

2.1.2.4 น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic)

น้ำมันสังเคราะห์ หรือเรียกอีกอย่างว่าน้ำหล่อเย็นสังเคราะห์ น้ำมันสังเคราะห์ เริ่มเป็นที่รู้จักในปี ค.ศ. 1945 กลุ่มนี้จะไม่มีส่วนประกอบของน้ำมันพื้นฐานจากการกลั่นเลย แต่จะเป็นสารเคมีกลุ่มดีเทอร์เจนต์ (Detergent) และ สารเติมแต่ง อาทิ เอมีน (Amines) และไนไตร (Nitrites) ช่วยป้องกันการเกิดสนิม ฟอสเฟต (Phosphates) และ บอเรต (Borates) ช่วยให้น้ำกลายเป็นน้ำอ่อน สบู่ สารที่ทำให้เปียก (Wetting properties) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) กำมันถัน (Sulfur) คลอรีน (Chlorine) เติมน้ำให้เกิดการหล่อลื่น และสารฆ่าเชื้อโรค เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยน้ำมันชนิดนี้มีความเสถียรสูง และเข้ากับน้ำได้ดี ซึ่งในการนำมาใช้งาน จะต้องทำการเจือจางด้วยน้ำก่อน จากน้ำมันทั้ง 4 ประเภท น้ำมันสังเคราะห์มีความสะอาดมากที่สุด สามารถระบายความร้อนได้ดีที่สุด อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเกิดสนิมได้อย่างดีเยี่ยม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน อย่างไรก็ตามข้อเสียของน้ำมันชนิดนี้ จะเป็นอันตรายต่อผิวหนัง [1]

2.1.3 การเสื่อมสภาพของของไหลตัดชิ้นงาน

ของไหลตัดชิ้นงานแต่ละชนิดถูกผลิตมาให้มีคุณสมบัติให้เหมาะต่อการใช้งานในแต่ละประเภท โดยการนำน้ำมันพื้นฐานมาปรับปรุงคุณภาพ ให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น เพื่อให้ทนทานต่อแรงกด ต้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เป็นต้น และหลังจากผ่านการใช้งานไปในช่วง

ระยะเวลาหนึ่ง ของไหลตัดชิ้นงานจะเกิดการเสียสภาพจนกระทั่งไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีกต่อไป ซึ่งลักษณะของของไหลตัดชิ้นงานที่เสื่อมสภาพสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภท [11] ดังนี้

2.1.3.1 การเปลี่ยนสภาพของน้ำมันพื้นฐาน

ซึ่งการเปลี่ยนสภาพของน้ำมันพื้นฐาน เกิดจากมีการรวมตัวกันระหว่างน้ำมันกับออกซิเจน หรือที่เรียกว่า เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) โดยทั่วไปแล้วน้ำมันพื้นฐานจะเป็นน้ำมันแร่ ดังนั้นจะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเยอะ เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนจะกลายเป็นกรด ซึ่งจะเกิดการกัดกร่อนได้ นอกจากนี้ยังเกิดยางและเหนียว มีลักษณะคล้ายโคลน ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดการอุดตันได้ง่าย อีกทั้งความหนืดของของไหลตัดชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะเกิดได้เร็วขึ้น หากมีเศษโลหะอยู่ในของไหลตัดชิ้นงาน เศษโลหะเหล่านี้จะไปเป็นตัวช่วยเร่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ของไหลตัดชิ้นงานสูญเสียคุณสมบัติในการระบายความร้อน การหล่อลื่นและการป้องกันกัดกร่อน จากทั้งหมดสามารถสรุปดังนี้ ความหนืดของของไหลตัดชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงจากนั้นระบบเกิดการอุดตัน และเกิดการกัดกร่อนในที่สุด

2.1.3.2 สารเพิ่มคุณภาพในของไหลตัดชิ้นงานถูกใช้หมดไป หรือเสื่อมคุณภาพ

สารเพิ่มคุณภาพในของไหลตัดชิ้นงานนั้นมีหลายชนิด ซึ่งสารเหล่านี้จะช่วยให้คุณสมบัติของของไหลตัดชิ้นงานดีขึ้น และเหมาะต่อการใช้งานนั้นๆ และเมื่อเสื่อมคุณภาพหรือถูกใช้หมดไป จะทำให้ของไหลตัดชิ้นงานไม่สามารถทำงานได้อีกต่อไป

2.1.3.3 สารปนเปื้อนจากระบบและภายในเครื่องจักรกล

สารปนเปื้อนเหล่านี้จะทำให้ของไหลตัดชิ้นงานเปลี่ยนแปลงสภาพและเสื่อมคุณภาพในที่สุด เช่น เศษชิ้นส่วนโลหะ ซึ่งจะทำให้ความหนืดของของไหลตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย

2.1.3.4 สารปนเปื้อนจากภายนอกเข้าไปผสมกับของไหลตัดชิ้นงาน

เนื่องจากสารปนเปื้อนจากภายนอก จะส่งผลให้ของไหลตัดชิ้นงานเสื่อมคุณภาพ เช่น ฝุ่นผง ซึ่งมักจะอยู่บริเวณรอบเครื่องจักร ถ้าอุปกรณ์ป้องกันชำรุด อาจจะทำให้ฝุ่นผงเข้าไปภายในระบบได้ หรือหากขาดความระมัดระวังในการตรวจสอบระดับการเติมของไหลตัดชิ้นงาน

ให้กับระบบ ผุ่นผงเหล่านี้ก็อาจจะเข้าไปได้เช่นกัน ซึ่งผุ่นผงเหล่านี้จะทำให้ความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งจะทำให้เกิดโคลนน้ำมันอีกด้วย

จากเหตุผลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า การเสื่อมสภาพของของไหลตัดชิ้นงาน โดยสองประเภทแรกจะเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นอัตราการเสื่อมสภาพจึงขึ้นอยู่กับ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ชนิดของสารนั้นๆ ณ สภาวะที่ทำงาน และตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนการเสื่อมสภาพ ของของไหลตัดชิ้นงานจากการปนเปื้อนจากสารภายในและภายนอกระบบเครื่องจักรกล จะขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณของสารปนเปื้อน

2.1.4 การบำรุงรักษาของไหลตัดชิ้นงาน

ของไหลตัดชิ้นงานเมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาานาน ทำให้ของไหลตัดชิ้นงานจะ เกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดความเสียหาย อีกทั้งยังส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง จำเป็นต้องเปลี่ยนของไหลตัดชิ้นงานใหม่ โดยที่ของไหลตัดชิ้นงานที่เสื่อมสภาพแล้วจะกลายเป็นของ เสียให้กับสิ่งแวดล้อม และเป็นการเพิ่มต้นทุนในการซื้อของไหลตัดชิ้นงานใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการลด ต้นทุนและลดของเสียจึงต้องมีการบำรุงรักษาของไหลตัดชิ้นงานเพื่อให้สามารถใช้ได้ในระยะเวลาที่ นานขึ้น

การบำรุงรักษาของไหลตัดชิ้นงานนั้น สิ่งแรกคือการเผื่อระวังและรักษาความสะอาด ในระบบ เช่น ตรวจสอบความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้น ควรทำอย่างน้อยสัปดาห์ละหนึ่งครั้ง เนื่องจากความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงานจะบอกปริมาณสารต่าง ๆ ในของไหลตัดชิ้นงาน หาก ของไหลตัดชิ้นงานมีความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย แต่ถ้าหากมีความเข้มข้นต่ำเกินไป จะส่งผลให้อายุการใช้งานของมีดตัดสั้นลง อีกทั้งยังเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม โดยทั่วไปแล้วการ ตรวจสอบความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงานสามารถทำได้ด้วยการไตเตรชัน (Titration Kits) และการใช้ refractometer จะมีความสะดวกและรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จะมีความแม่นยำน้อยกว่าการ ไตเตรชัน ในส่วนของตรวจสอบกลิ่นของของไหลตัดชิ้นงาน โดยส่วนใหญ่เกิดจากเชื้อโรคที่ผลิตของ เสียออกมา มักเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทำให้เกิดกลิ่นคล้ายไข่เน่า จำเป็นต้องยับยั้งการเจริญเติบโตของ เชื้อโรค ซึ่งสามารถทำได้โดย รักษาความสะอาดในการกระบวนการทำงาน แยกสิ่งสกปรกออกจาก ของไหลตัดชิ้นงาน เติมสารฆ่าเชื้อโรค และระวังค่าความเป็นกรดต่างของของไหลตัดชิ้นงาน เป็นต้น นอกจากนี้การแยก Tramp oil ออกจากของไหลตัดชิ้นงาน จะช่วยยืดอายุการใช้งานได้ ซึ่ง Tramp oil คือส่วนของน้ำมันหล่อลื่นที่ติดมากับของไหลตัดชิ้นงาน และจะลอยตัวอยู่ผิวของ ของไหลตัดชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้เชื้อโรคหรือแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนจึงเจริญเติบโตได้ดี อีกทั้งยัง ทำให้ของไหลตัดชิ้นงานมีสภาพเป็นกรด เกิดการกัดกร่อนขึ้นภายในระบบ จึงส่งผลให้คุณภาพของของ ไหลตัดชิ้นงานแยลงจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไปและการกลายเป็นขยะอันตรายในที่สุด [1]

2.1.5 ผลกระทบจากของไหลตัดชิ้นงาน

เนื่องจากของไหลตัดชิ้นงานจะมีส่วนผสมของสารเคมีหลายประเภท ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้ เช่น

2.1.5.1 ผลกระทบต่อผิวหนัง

ของไหลตัดชิ้นงานจะมีน้ำมันแร่ (Mineral oil), PAH, nitrosamine, chlorinated paraffin (ทำให้เกิดสาร dioxin) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง [5] จะทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้ นอกจากนี้ผู้ที่สัมผัสน้ำมันหล่อเย็นเป็นระยะเวลานาน จะทำให้ผิวหนังเกิดการอักเสบ เนื่องจากโมเลกุลของของไหลตัดชิ้นงานไปอุดตันรูขุมขน และเกิดสิ่ว ดังนั้นขณะใช้งานควรมีการป้องกันด้วยการสวมชุดปฏิบัติการและถุงมือ เป็นต้น

2.1.5.2 ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Irritation of respiratory tract)

เมื่อสูดดมไอระเหยเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคือง หายใจติดขัด (Breathing difficulty) และเกิดภาวะหลอดลมอักเสบ (Bronchitis) ได้ [9] นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดจากการสูดดมของไหลตัดชิ้นงาน จะก่อให้เกิดโรค Hypersensitivity pneumonitis (HP) [11] ได้ ซึ่งเป็นการสูดดมแบคทีเรียจากของไหลตัดชิ้นงานเข้าสู่ร่างกาย จะมีลักษณะอาการคล้ายกับโรคไข้หวัดใหญ่ (Flu-like symptoms) มีไข้หนาวสั่น ไอ จาม และหายใจลำบาก ดังนั้นขณะใช้งานควรมีการป้องกันด้วยการสวมหน้ากากและอุปกรณ์ปิดจมูก เป็นต้น

2.1.5.3 ผลกระทบต่อระบบนิเวศ

เนื่องจากของไหลตัดชิ้นงานมีส่วนประกอบของสารเคมีมากมาย และเมื่อผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งจะเสื่อมสภาพ จะมีส่วนผสมของเศษโลหะ เช่น ตะกั่ว เหล็ก และเงิน เป็นต้น ทำให้ของไหลตัดชิ้นงานกลายเป็นขยะอันตราย ซึ่งหากบำบัดไม่ดีจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศใกล้เคียง เนื่องจากสารเหล่านี้สามารถสะสมและถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารของสัตว์ที่สัมผัสหรือบริโภคเข้าไป อีกทั้งของไหลตัดชิ้นงานมีความเสถียรสูง จึงยากที่จะย่อยสลายได้เอง ดังนั้นเมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลานานจะเกิดการเน่าเหม็น และส่งผลกระทบต่อชุมชนใกล้เคียง

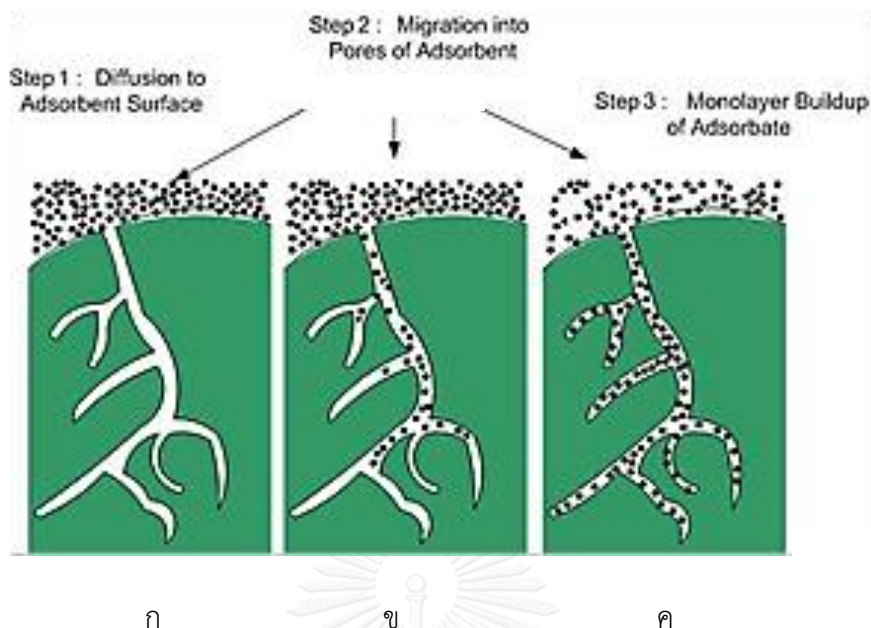
2.1.6 แนวทางแก้ปัญหา

การจัดการน้ำมันหล่อเย็นมีต้นทุนค่อนข้างสูง จากการวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการขจัดน้ำมันหล่อเย็นที่ผ่านการใช้งานแล้วหลายๆ วิธี เช่น การใช้วิธีการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันและการรวม

ตะกอน ก่อให้เกิดสลัดจ์จำนวนมาก [2, 3] การแยกด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า [4] การปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบสูง [4] การแยกด้วยเมมเบรนซึ่งต้นทุนสูงและอุดตันได้ง่าย [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการดูดซับบนตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานซึ่งมีต้นทุนต่ำและหาได้ในประเทศ

2.2. กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการเป็นการสะสมสารแขวนลอยขนาดเล็กกับบริเวณผิวสัมผัสของของแข็งหรือของเหลว โดยที่สารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของเหลวและแข็งที่มีบริเวณผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดซับเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่าง ๆ ซึ่งมี 3 สถานะ ได้แก่ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการดูดซับแบบระหว่างของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Interface) โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะถูกกำจัดออกจากสารละลายและไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลของสารถูกดูดซับจากสารละลายไปหาผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้แรงขับเคลื่อน (Driving force) ระหว่างการเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ยังเป็นปัจจัยความสำคัญต่อกระบวนการดูดซับ ซึ่งมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี [6] ขั้นตอนการดูดซับมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลตัวถูกดูดซับแพร่ไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับ (ดังแสดงในรูปที่ 2.3ก) ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (ดังแสดงในรูปที่ 2.3ข) ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ (ดังแสดงในรูปที่ 2.3ค)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการดูดซับ ประกอบด้วย [12] (ก) การแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ต้องการบำบัดไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับ (ข) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (ค) โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ

2.2.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [13] คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่มีผลจากแรงไฟฟ้าสถิต ระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ รวมถึงแรงระหว่างขั้ว การแพร่ และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงแบบอ่อน ลักษณะของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multi-layer adsorption) เนื่องจากโมเลกุลของตัวที่ถูกซับที่ไปยึดกับตัวดูดซับเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นขนาดของโมเลกุล ปริมาณและขนาดของรูพรุน จึงมีผลต่อการดูดซับ เมื่อตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ถูกดูดซับในชั้นแรกแล้วจะเกิดแรงเหนียววนำในการยึดเหนี่ยวโมเลกุลที่อยู่รอบข้าง โดยการดูดซับประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานในการสร้างพันธะ เพราะไม่มีการใช้พลังงานในการสลายพันธะของตัวถูกดูดซับหรือการสร้างพันธะของตัวดูดซับ ดังนั้นจึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการใส่พลังงานเข้าไปเพียงเล็กน้อย เพื่อให้โมเลกุลที่อยู่รอบตัวดูดซับนั้นหลุดออกมาจากลักษณะโครงสร้างเบื้องต้นของตัวดูดซับและความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนที่

แปรผันตามชนิดของแรงดึงดูดทำให้ทราบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงยึดเหนี่ยวหรือแรงดูดของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับจะเสถียรภาพ ในทางกลับกันประสิทธิภาพของตัวดูดซับจะสูงขึ้น ที่อุณหภูมิห้อง หรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

2.2.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

พันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางเคมีคือพันธะโควาเลนต์ หลักการคือการใช้ อิเล็กตรอนร่วมกันของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ซึ่งพันธะที่ได้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองจึงต้องใส่พลังงานให้แก่ระบบ ทำให้การดูดซับประเภทนี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ และการดูดซับชนิดนี้พันธะที่ได้มีความแข็งแรง จึงเป็นการดูดซับแบบผันกลับไม่ได้ และที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะมีความจำเพาะต่อตัวดูดซับทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลข้างเคียง ดังนั้นจึงทำให้เกิดการดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption) เช่น ปฏิกิริยาของ Hydrate metal ions กับ Hydroxide sites บนผิวของของโลหะออกไซด์ ดังสมการ 2.1 ต่อไปนี้



R คือ ไอออนของตัวถูกดูดซับ และ S คือ ไอออนของตัวดูดซับ

2.2.2 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent)

การแยกสารด้วยกระบวนการดูดซับ ตัวดูดซับจะต้องมีคุณสมบัติจำเพาะต่อการดูดซับสารนั้นๆ ซึ่งสมบัติสำคัญของตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับที่ต้องพิจารณา คือ ความสามารถในการดูดซับ อัตราการดูดซับ และประเภทของตัวดูดซับ ในกระบวนการดูดซับมีทั้งการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ซึ่งการดูดซับทางกายภาพ จะเป็นการยึดติดกันด้วยแรงแบบอ่อน ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ขนาดและความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับ ในขณะที่การดูดซับทางเคมี เป็นการสร้างพันธะของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความแข็งแรง

การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อกระบวนการดูดซับนั้นๆ สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณา [13] คือ

1. ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ควรมีขนาดพอดีหรือใหญ่กว่า เพื่อที่จะให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนได้
2. ประเภทของตัวดูดซับสามารถเลือกดูดซับที่ต้องการแยก ออกจากสารผสมนั้นๆ
3. ตัวดูดซับมีความแข็งแรงและทนทานต่อการนำไปใช้งาน เช่น ทนทานต่อการกัดกร่อนและอุณหภูมิ เป็นต้น

4. ตัวดูดซับจะต้องไม่เกิดปฏิกิริยากับสารประกอบในของผสมนั้นๆ
5. ตัวดูดซับที่มีความพรุนสูง มีความหนาแน่นต่ำ แต่มีความแข็งแรงและไม่แตกง่าย
6. ตัวดูดซับควรเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายและราคาไม่แพง

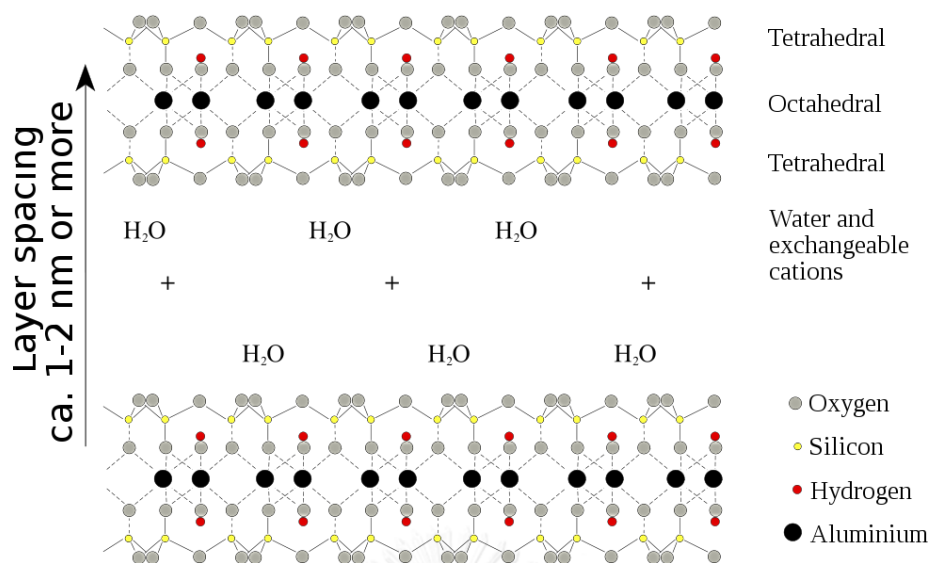
ตัวดูดซับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมโตรเคมี และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น จะจำแนกตัวดูดซับตามธาตุองค์ประกอบออกเป็น 2 ประเภท คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์และตัวดูดซับอินทรีย์

ในงานวิจัยนี้ได้นำตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติและตัวดูดซับอินทรีย์ผสมกัน ซึ่งตัวดูดซับที่ผู้วิจัยเลือกมาศึกษา คือ ดินฟอก (Activated bleaching earth) เป็นตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ และไคโตซาน (Chitosan) เป็นตัวดูดซับอินทรีย์ เนื่องจากตัวดูดซับทั้งสองชนิดนี้มีต้นทุนต่ำและหาได้ง่ายในประเทศ

ก. ตัวดูดซับอนินทรีย์

ตัวดูดซับอนินทรีย์ เป็นตัวดูดซับที่มีธาตุโลหะเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะการเกิดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ เป็นตัวดูดซับที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) ซิลิกา (Silica) และดินฟอก (Activated bleaching earth) เป็นต้น ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ เป็นตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการเลียนแบบสารประกอบจากธรรมชาติ ได้แก่ ผลึกคัดโมเลกุล (Zeolite molecular sieves) และตัวดูดซับโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะอธิบายลักษณะทั่วไปของดินฟอก (Activated bleaching earth)

ดินฟอก (Activated bleaching earth) เป็นแร่ดินเหนียว (Clay mineral) ชนิดหนึ่ง ที่เกิดจากการผุพังของหิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดอนุภาคของดินชนิดนี้จะเล็กมากถึงระดับไมครอน [14] ซึ่งโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นผลึกโดยจะพบอะลูมินาโมเลกุลแปดระนาบอยู่ระหว่างในชั้นของซิลิกาออกไซด์ โดยที่อะตอมของซิลิกาบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมอลูมิเนียมในชั้นของโมเลกุลสี่เหลี่ยมปิรามิดและอะตอมอลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียมในชั้นโมเลกุลแปดระนาบ จึงเป็นผลให้พื้นของดินฟอกมีประจุเป็นลบ ซึ่งการเสียสมดุลจึงทำให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผิวของดินฟอกได้ [15] จากโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น (Hydrophobic) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้พบว่า การที่ความยาวของสายโซ่เพิ่มขึ้นทำให้มีความไม่ชอบน้ำสูงขึ้นเนื่องจาก Phthalate ester ที่อยู่ในสายโซ่ [16] ซึ่งโครงสร้างของดินฟอกแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของดินฟอก (Activated bleaching earth)[17]

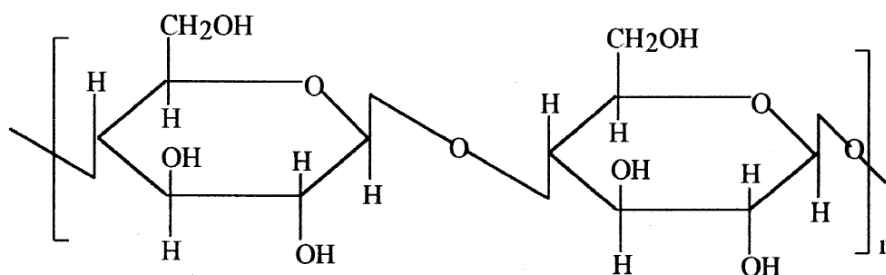
ข. ตัวดูดซับอินทรีย์

เช่น ผักตบชวา ชานอ้อย เชื้อราชนิด *M. Rouxii* และ *A. coerulea* เปลือก yellow horn เปลือกมะนาวที่ผ่านการกระตุ้น (Activated lemon peels) [18] และไคโตซาน (Chitosan) งานวิจัยนี้จะอธิบายไคตินและไคโตซาน

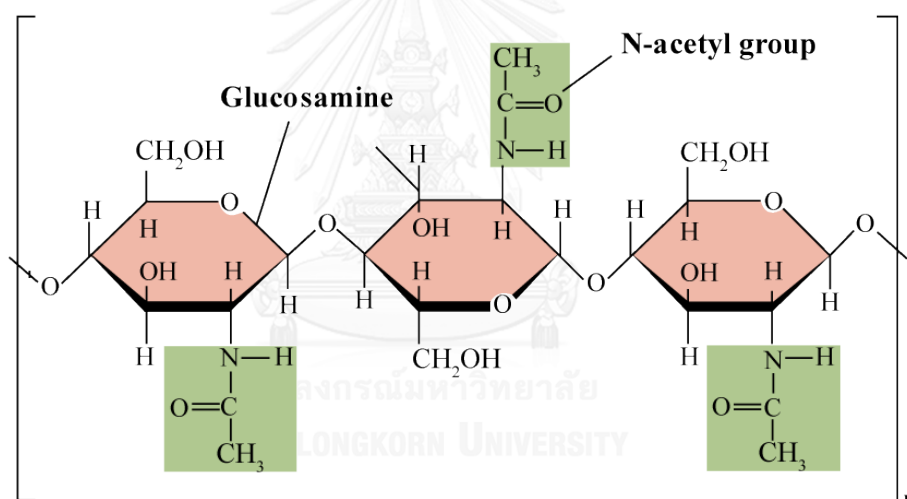
ไคตินและไคโตซานเป็นวัสดุชีวภาพที่มีประโยชน์และน่าสนใจ ดังนั้นจึงมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งไคโตซานนั้นเป็นอนุพันธ์ของไคติน [19] โดยไคตินถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Braconnot ใน ค.ศ. 1811 ต่อมา ในปี ค.ศ. 1823 วัสดุธรรมชาติชนิดนี้ถูกเรียกว่า ไคติน โดย Odier คำว่า Chitin มาจากคำว่า Chiton ในภาษากรีก ซึ่งหมายถึง เกราะหุ้ม [20, 21]

ไคติน เป็นวัสดุชีวภาพที่พบมากเป็นอันดับสองรองจาก เซลลูโลส ซึ่งวัสดุชีวภาพทั้งสองชนิดนี้จะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เซลล์ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งไคตินจะพบมากในกระดองปู แกนปลาหมึก กุ้ง และแมลง นอกจากนี้ยังพบตามผนังเซลล์ของสาหร่าย เห็ดรา ยีสต์ และจุลินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งปริมาณไคตินที่พบจากแหล่งต่างๆ จะมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ไคตินจัดเป็นกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเส้นตรงเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่จะแตกต่างตรงที่หน่วยย่อย (Monomer) ของเซลลูโลสเป็น D-glucose ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังในรูปที่ 2.5 และหน่วยย่อยของไคติน คือ 2-acetamido-2-deoxy-D-glucose โดยชื่อทางเคมีของไคติน คือ Poly β -(1 \rightarrow 4)-2- acetamido-2-deoxy- D-glucose ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกลูโคส ที่ต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะแบบ β -1,4 และหมู่ Hydroxyl (-OH) ที่ตำแหน่ง C-2 จะถูกแทนที่ด้วยกลุ่ม acetyl amino (-NHCOCH₃) ซึ่งโครงสร้างของไคตินแสดงดังในรูปที่ 2.6 ไคตินสามารถย่อยสลายได้

เองตามธรรมชาติด้วยเอนไซม์ไคทิเนส (Chitinase) [19] ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์พันธะ N-acetyl- β -D-glucosaminide 1, 4- beta-linkage โมเลกุลของไคตินจะต่อกันเป็นสายยาวที่ไม่มีประจุ ดังนั้นจึงทำให้ไคตินไม่สามารถละลายน้ำ

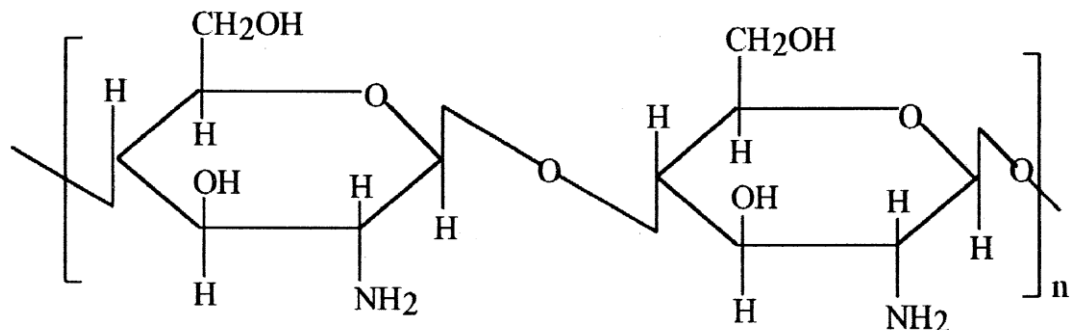


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส [19]



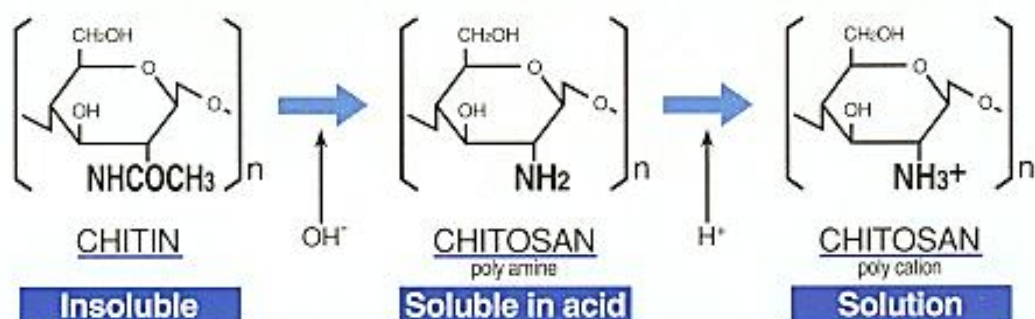
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของไคติน [21]

ไคโตซาน เป็นสารโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งเป็นของอนุพันธ์ของไคติน ที่ได้จากการการผ่านปฏิกิริยา Deacetylation โดยไคโตซานถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1859 ด้วยความบังเอิญ โดย Rouget เขาพบได้จากการที่เอาไคตินไปต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น [19] ไคโตซานจะมีปริมาณของหมู่อะซีทิล (Acetyl) ต่ำ เนื่องจากผ่านปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของไคตินด้วยสารละลายต่างเข้มข้น ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างของไคตินเปลี่ยนไปโดยมีการแทนที่หมู่อะซีตามิโด (-NHCOCH₃) ด้วยหมู่อะมิโน (-NH₂) บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังนั้นโครงสร้างของไคโตซาน คือ โพลีเมอร์ของ D-glucosamine (Poly(1, 4-2 amino-2-deoxy- β -D-glucosamine)) ซึ่งโครงสร้างของ ไคโตซานแสดงดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของไคโตซาน [19]

ไคโตซานจะไม่ละลายน้ำ ต่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่าความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 6 ซึ่งตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการละลายไคโตซาน คือ กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก นอกจากนี้ยังสามารถละลายในกรดอินทรีย์บางชนิดได้แก่ กรดไนตริก กรดเปอร์คลอริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดฟอสฟอริก ความสามารถในการละลายของไคโตซานจะขึ้นกับระดับการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation, %DD) ไคโตซานเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ ประจุบวก (Cationic polyelectrolyte) เนื่องจากหมู่เอมีโนในสารละลายกรดมีการรับโปรตอน อยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) แสดงดังรูปที่ 2.8 จึงทำให้ไคโตซานสามารถดูดซับโลหะ สีย้อม และสารอินทรีย์ได้ นอกจากนี้ไคโตซานยังมีคุณสมบัติอย่างอื่นที่โดดเด่นอีกมากมายเช่น สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ (Biodegradability) มีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Anti-bacterial) [22] และมีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แสดงการโปรตอนตหมู่เอมีโนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) [22]

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.2.3.1 ค่าความเป็นกรดต่าง

เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีต่อการแตกตัวของไอออนในสารละลาย โดยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดต่างต่ำ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) สูง และปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH^-) จะแปรผันตามค่าความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้น จากปัจจัยข้างต้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยขึ้นอยู่กับชนิดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับและธรรมชาติของตัวที่ถูกดูดซับ เช่น ตัวดูดซับไคโตซาน เมื่อค่าความเป็นกรดต่างต่ำ จะเกิดการโปรตอนเนตหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ทำให้หมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนพื้นผิวไคโตซานอยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) มากขึ้น ดังนั้นตัวดูดซับไคโตซานจึงสามารถดูดซับสารที่เป็นประจุลบได้ [5, 22, 23]

2.2.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นกับขนาดและพื้นที่ผิวนั้นขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน จะมีความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นยิ่งตัวดูดซับมีขนาดเล็ก ปริมาณตัวดูดซับจะสูงขึ้น ส่วนตัวดูดซับที่มีรูพรุน ค่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผันตามขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดของตัวที่ถูกดูดซับด้วย เช่น ตัวที่ถูกดูดซับที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดซับก่อน และตัวที่ถูกดูดซับที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกดูดซับในภายหลังตามลำดับ [24] แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในรูพรุน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของตัวดูดซับ

2.2.3.3 สมบัติของตัวถูกดูดซับ

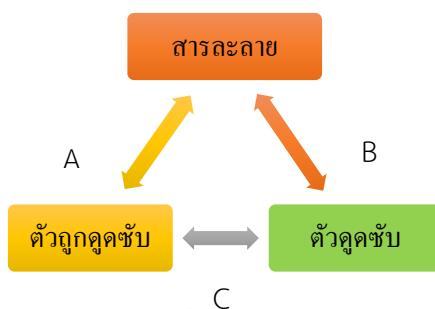
ซึ่งตัวถูกดูดซับสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท [24]

ก. ตัวถูกดูดซับที่ไม่มีขั้ว ประสิทธิภาพในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับน้ำหนัก และขนาดของโมเลกุลเป็นหลัก แรงที่ใช้ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เป็นต้น

ข. ตัวถูกดูดซับที่มีขั้ว ขนาดและน้ำหนักจะไม่มีผลมากนักเนื่องจากแรงหรือพันธะที่เกิดขึ้นจะมาจากความแรงของประจุ และค่า Ionic strength

2.2.3.4 ภูมิภาคตัวดูดซับ [24]

ภูมิภาคตัวดูดซับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อความสามารถในการดูดซับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ความสามารถของการดูดซับในสารละลาย [24]

ปฏิกิริยา A เป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ หากตัวดูดซับละลายในสารละลาย นั่นหมายถึงตัวดูดซับสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับสารละลายได้ดี ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับ

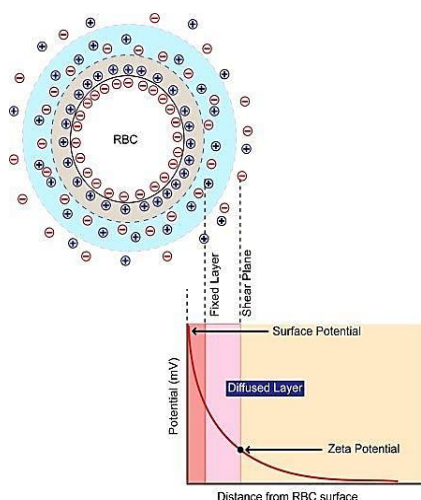
ปฏิกิริยา B เป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ ซึ่งสารละลายจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับตัวดูดซับ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณพื้นผิวและรูพรุนของตัวดูดซับลดน้อยลงนำไปสู่ประสิทธิภาพในการดูดซับตัวดูดซับลดลง

ปฏิกิริยา C เป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับ โดยที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับนั้นมีมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ และสารละลายกับตัวดูดซับ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น

ดังนั้น ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับจะต้องลดปฏิกิริยา A กับ B และเพิ่มปฏิกิริยา C แต่ทั้งนี้การเลือกชนิดของสารละลายก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับ ควรที่จะเลือกให้เหมาะสมกับชนิด คุณสมบัติและการนำไปใช้ของตัวดูดซับ

2.2.3.5 ความหนาของชั้นฟิล์มของตัวดูดซับ

ชั้นฟิล์ม คือชั้นของประจุที่ล้อมรอบตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะส่งผลต่อการแพร่ของตัวดูดซับหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นชั้นตอนควบคุมอัตราการแพร่ของตัวดูดซับ ดังนั้น ถ้าต้องการให้อัตราการแพร่เพิ่มสูงขึ้น จะต้องเพิ่มความปั่นป่วนของตัวดูดซับในสารละลายหรือเติมพลังงานให้กับระบบ



รูปที่ 2.10 แสดงการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของอนุภาค [25]

2.2.3.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ

การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้สมดุลของระบบเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าพลังงานจลน์มากขึ้น จึงทำให้อนุภาคของตัวดูดซับสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการแพร่ผ่านของตัวถูกดูดซับเข้าสู่ตัวดูดซับไปยังบริเวณกระตุ้น (Active site) ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลจากประเภทปฏิกิริยาของตัวดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย คือ ปฏิกิริยาดูดความร้อนและปฏิกิริยาคายความร้อน [13]

2.2.3.7 ความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงจะมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำ อันเป็นผลมาจากแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) [26]

2.2.4 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ

วัฏภาคการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว (Fluid phase) เคลื่อนที่ไปยังผิวของตัวดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุม เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเริ่มต้นของของผสม และปริมาณตัวดูดซับ เป็นต้น เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายเคลื่อนที่ไปยังผิวของตัวดูดซับเท่ากับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เคลื่อนออกจากผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) โดยที่จุดสมดุลการดูดซับความเข้มข้นของ

ตัวถูกละลายจะมีค่าคงที่ ซึ่งสมมูลการดูดซับนั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการแยกของผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture)

สมมูลการดูดซับจะแปรผันตามกับชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายผสม ซึ่งแบบจำลองสมมูลการดูดซับ จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [13] คือ

ก. แบบจำลองสมมูลดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm)

แบบจำลองสมมูลดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (q_t) กับความเข้มข้นสมมูลของสารละลายผสม (C_t) โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่

ข. แบบจำลองสมมูลดูดซับที่ความดันหรือความเข้มข้นคงที่ (Adsorption isobar)

แบบจำลองสมมูลดูดซับที่ความดันหรือความเข้มข้นคงที่ โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (q_t) กับอุณหภูมิสมมูล (T) ในระบบ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นสมมูลของสารละลายผสม (C_t) หรือความดัน (P_t) ของก๊าซคงที่

ค. แบบจำลองสมมูลการดูดซับในกรณีที่ความสามารถในการดูดซับสมมูลของตัวดูดซับคงที่ (Adsorption isostere)

แบบจำลองสมมูลการดูดซับในกรณีที่ความสามารถในการดูดซับสมมูลของตัวดูดซับคงที่ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสมมูลของสารละลายผสม (C_t) กับอุณหภูมิสมมูล (T) ในระบบนั้นๆ ณ ความสามารถในการดูดซับสมมูลของตัวดูดซับ (q_t) ที่ได้ทำการกำหนดไว้

ถึงแม้ว่าในกระบวนการดูดซับจะมีทั้งการคายความร้อนและดูดความร้อน แต่โดยทั่วไปแล้วความร้อนในการดูดซับจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีมาก อีกทั้งยังสามารถระบายความร้อนออกจากตัวดูดซับได้ง่าย ส่งผลให้อุณหภูมิในกระบวนการดูดซับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในกระบวนการดูดซับจึงนิยมเลือกแบบจำลองสมมูลดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm) เพื่อดูสมมูลการดูดซับในระบบนั้นๆ โดยแบบจำลองสมมูลดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามระบบการดูดซับ คือ แบบจำลองสมมูลการดูดซับเชิงเดี่ยว และแบบจำลองสมมูลการดูดซับของของเหลว ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการศึกษการดูดซับในวัฏภาคของเหลว ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอรายละเอียดเฉพาะแบบจำลองสมมูลการดูดซับของเหลว โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.4.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) [13, 27, 28]

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ถูกอธิบายในปี ค.ศ. 1918 โดย Irving Langmuir ซึ่งได้อธิบายถึงโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ในเวลาต่อมาแบบจำลองแลงเมียร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการศึกษาการดูดซับฟอสเฟตบนดิน ในปี ค.ศ. 1956 โดย Fride Shapiro และ Olsen และ Watanabe ในปี ค.ศ. 1957 หลังจากนั้นแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกนำมาอธิบายการดูดซับบนพื้นผิวของคอลลอยด์ โดยแบบจำลองนี้สามารถอธิบายได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำ โดยการดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเป็นการดูดซับเชิงเคมี ซึ่งสมมติฐานมีดังต่อไปนี้

ก. โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีความจำเพาะต่อรูพรุนและไม่เกิดแรงระหว่างโมเลกุลกับรูพรุนอื่น

ข. ในแต่ละตำแหน่งของรูพรุนจะจับได้เพียง 1 โมเลกุล

ค. พลังงานในการดูดซับในแต่ละตำแหน่งมีค่าเท่ากัน

โดยแบบจำลองแลงเมียร์จะไม่นิยมนำมาอธิบายการดูดซับบนตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) แต่จะสามารถอธิบายได้ดีกับตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ซึ่งสมการการดูดซับแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ 2.2

$$q_e = \frac{q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_0 = จำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L = ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัมต่อลิตร)

C_0 = ความเข้มข้นที่สภาวะเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)

จากสมการ 2.2 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0} + \left(\frac{1}{K_L q_0} \right) \left(\frac{1}{C_e} \right) \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟโดยพลอตระหว่าง $1/C_e$ กับ $1/q_e$ ซึ่ง q_0 สามารถหาได้จากจุดบนตัดแกน y และ K_f หาได้จากความชัน และเมื่อ q_0 มีค่ามาก แสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก และ K_f มีค่ามาก หมายถึงตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับดี

2.2.4.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) [13, 29]

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช ได้ถูกนำมาอธิบายการดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากัน โดยความสัมพันธ์ที่สมดุลการดูดซับของแบบจำลองฟรุนดลิช แสดงดังสมการ 2.4

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.4)$$

- เมื่อ
- q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - q_0 = จำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - K_F = ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดลิช
 - n = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)
 - C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัมต่อลิตร)
 - C_0 = ความเข้มข้นที่สภาวะเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)

จากสมการ 2.4 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังนี้

$$\text{Log}q_e = \text{Log}K_F + 1/n\text{Log}C_e \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $\ln C_e$ กับ $\ln q_e$ ซึ่ง K_F สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y และ n หาได้จากความชัน และเมื่อ n มีค่ามาก แสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก และ K_F มีค่ามาก หมายถึงตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับดี

2.2.4.3 แบบจำลองการสมดุลดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan's isotherm) [13, 29, 30]

แบบจำลองสมดุลดูดซับของโกเบิล (Koble) และคอร์ริแกน (Corrigan) ถูกอธิบายในปี ค.ศ. 1952 เป็นการนำแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ และแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิชมารวมกัน โดยแบบจำลองของโกเบิล (Koble) และคอร์ริแกน (Corrigan) แสดงได้ดังสมการ 2.6

$$q_e = q_o \left(\frac{(K_{Kc}C_e)^n}{1+(K_{Kc}C_e)^n} \right)^n \quad (2.6)$$

- เมื่อ
- q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - q_o = จำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - K_{Kc} = ค่าคงที่การดูดซับของของโกเบิล (Koble) และคอร์ริแกน (Corrigan)
 - n = ดัชนีชี้กำลังของแบบจำลองที่มีผลต่อจำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของ ตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล
 - C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัมต่อลิตร)

จากสมการ 2.6 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{q_o K_{Kc}^n} \right) \frac{1}{C_e^n} + \frac{1}{q_o} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $1/C_e^n$ กับ $1/q_e$ ซึ่ง $1/q_o$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y และ K_{Kc} หาได้จากความชัน และเมื่อ $1/q_o$ มีค่ามาก แสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก และ K_{Kc} มีค่ามาก หมายถึงตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับดี

2.2.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic model of adsorption)

จลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นการศึกษาอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้น โดยจะวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นเริ่มต้นหรือผลิตภัณฑ์เทียบกับเวลา ซึ่งอัตราการดูดซับอธิบายถึงกลไกการดูดซับ โดยมีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยทั่วไปจะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะ

แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองปฏิกิริยาอาฟلامี ในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และ ค่า error function ซึ่งแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับดังกล่าวได้แสดงรายละเอียด ดังนี้

ก. แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) [28, 29]

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ถูกอธิบายในปี ค.ศ. 1989 โดย Lagergren ซึ่งเป็นการอธิบายการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น A และ B แล้วได้ผลิตภัณฑ์ P ดังสมการ 2.8



โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับสารตั้งต้น B เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A นั้นมากกว่า B มากๆ โดยที่กฎอัตราปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.9

$$-d[B]/dt = k' [B] \quad \text{เมื่อ } k' = k[A] \quad (2.9)$$

จากสมการ 2.9 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ 2.10

$$\ln[B] = -k' t + C \quad (2.10)$$

และจากสมการ 2.9 สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการดูดซับได้ดังสมการ 2.11

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.11)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.11 โดยกำหนดให้ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะทำให้ได้ดังสมการ 2.12

$$\ln \left(\frac{q_e}{q_e - q_t} \right) = k_1 t \quad (2.12)$$

สมการ 2.12 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการ 2.13

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2.13)$$

เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ
(มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_1 = ค่าคงที่ของอัตราเร็วอันดับหนึ่งเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท)

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ k_1 และ จุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\ln(q_e)$

ข. แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) [31-33]

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ถูกอธิบายในปี ค.ศ. 1995 โดย Ho ซึ่งได้อธิบายถึงอัตราของปฏิกิริยาการดูดซับอันดับสอง ในกระบวนการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุสองบวกบนพีต (Peat) ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับค่าความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ โดยตั้งสมมติฐานว่ากระบวนการเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และขึ้นกำหนดอัตราคือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยปฏิกิริยาอันดับสองเทียมขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับและปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ ณ สภาวะสมดุล ซึ่งกฎอัตราสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.14

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.14)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.14 โดยที่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะทำให้ได้ดังสมการ 2.15

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.15)$$

สมการ 2.15 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ 2.16

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.16)$$

เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล
(มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ
(มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 = ค่าคงที่ของอัตราเร็วอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท)

จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/q_e$ และ จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/(q_e^2 k_2)$

ค. แบบจำลองปฏิกิริยาอาฟลามิ (Avrami) [34, 35]

แบบจำลองปฏิกิริยาอาฟลามิ ถูกอธิบายในปี ค.ศ. 1937 โดย Kolmogorov พบว่าปฏิกิริยาอาฟลามิ ซึ่งกระบวนการดูดซับที่ได้ สามารถอธิบายขั้นกำหนดอัตราเกิดขึ้นได้ทั้งขั้นตอนการดูดซับเชิงเคมีและกายภาพ โดยจลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ ดังสมการ 2.17

$$q_t = q_e(1 - \exp^{-(k_{Av}t)^n}) \quad (2.17)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.17 โดยที่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการเส้นตรง แสดงได้ดังสมการ 2.18

$$\ln\left(\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right)\right) = n \ln k_{Av} + n \ln t \quad (2.18)$$

- เมื่อ
- q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - q_t = ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - k_2 = ค่าคงที่ของอาฟลามิ (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาทึ)
 - t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาทึ)
 - n = ค่าคงที่อื่นๆ

จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\ln(q_e/(q_e - q_t)))$ กับ t กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ n และ จุดตัดแกน y เท่ากับ k_{Av}

ซึ่งความถูกต้องของสมการดูดซับและจลนพลศาสตร์ดูดซับ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 แสดงดังสมการ 2.19 [36]

$$R^2 = \frac{\sum [q_{t,cal} - (q_{t,exp}/N)]^2}{\sum [q_{t,exp} - (q_{t,exp}/N)]^2} \quad (2.19)$$

และค่า error function แสดงดังสมการ 2.20 [34]

$$\text{Err}(\%) = \sqrt{\frac{\sum\{(q_{t,\text{exp}} - q_{t,\text{cal}})/q_{t,\text{exp}}\}^2}{N-1}} \times 100 \quad (2.20)$$

- เมื่อ
- $q_{t,\text{exp}}$ = ความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - $q_{t,\text{cal}}$ = ความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการคำนวณ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - N = จำนวนชุดข้อมูลจากการทดลอง
 - t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.2.6 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption)

อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาเกี่ยวกับพลังและการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยพารามิเตอร์ของอุณหพลศาสตร์นี้ [37] ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) ซึ่งพิจารณาตามสมการ 2.21

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (2.21)$$

หรือ

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.22)$$

- เมื่อ
- K = ค่าคงที่การดูดซับ
 - ΔG° = ค่าพลังงานอิสระของกิบส์
 - R = ค่าคงที่ของแก๊ส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมล
 - T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าคงที่สมดุล สามารถพิจารณาได้ดังสมการ 2.23

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{\Delta H^\circ}{RT^2} \quad (2.23)$$

จากสมการ 2.23 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังนี้

$$\ln K = -\frac{\Delta H^\circ}{2.303RT} + \frac{\Delta S^\circ}{2.303R} \quad (2.24)$$

โดยที่ K สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.25

$$K = \frac{q_e}{C_e} \quad (2.25)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e = ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงาน ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

จากสมการ 2.24 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ กับ $1/T$ โดยที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) ได้จากความชัน และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) จากความชัน หาได้จากจุดตัดแกน y

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Srinivasan และ Viraraghavan [5] ศึกษาการขจัดน้ำมันจากน้ำโดยการดูดซับบนก้อนเชื้อรา 2 ชนิด ได้แก่ *M. rouxii*, *A. coerulea* เทียบกับตัวดูดซับโคโคซานและเปลือก walnut น้ำมันที่นำมาศึกษา ได้แก่ น้ำมันแร่ น้ำมันพืช และน้ำมันตัดชิ้นงาน และค่าความกรดต่าง ได้แก่ ค่าความกรดต่างเท่ากับ 5 และ 7.6 จากผลการทดลองการดูดซับของตัวดูดซับ 4 ชนิด พบว่าตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดสามารถดูดซับน้ำมันพืชได้ดีที่สุด ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 ทั้งนี้เนื่องจากการโปรโตเนตหมู่อะมิโน(-NH₂)จะเกิดได้ดีช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่ต่ำ และตัวดูดซับชนิดโคโคซาน มีความสามารถดูดซับดีที่สุดคือ 99.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้เนื่องจากโคโคซานมีจำนวนหมู่อะมิโนมากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่ศึกษาความสามารถในการขจัดน้ำมันโดยการดูดซับตัวดูดซับบนก้อนเชื้อรา 2 ชนิด เนื่องจากคณะผู้วิจัยได้ค้นพบว่าเชื้อราสองชนิดนี้มีหมู่อะมิโนที่ผนังเซลล์จึงน่าจะสามารถขจัดน้ำมันได้ อีกทั้งยังไม่มีงานวิจัยใดนำเชื้อรามาขจัดน้ำมันโดยกระบวนการดูดซับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเชื้อราสองชนิดคือ *M. Rouxii* และ *A. coerulea* มาศึกษาความสามารถในการขจัดน้ำมันโดยเทียบกับตัวดูดซับโคโคซานและเปลือก wanat ซึ่งพบว่า *M. rouxii* แสดงช่วงร้อยละการขจัดน้ำมัน จาก ร้อยละ 77 ถึง ร้อยละ 93 ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5 โดยความสามารถในการดูดซับน้ำมันแรมีค่าเท่ากับ 77.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ความสามารถในการดูดซับน้ำมันพืชมีค่าเท่ากับ 92.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และความสามารถในการดูดซับน้ำมันตัดชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 84 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า *M. rouxii* มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่าง ๆ สูงกว่า *A. coerulea* เนื่องจาก *M. rouxii* มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าและผนังเซลล์ของ *M. Rouxii* มีปริมาณ โคโคซานสูงกว่า *A. coerulea* ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ *M. Rouxii* สามารถดูดน้ำมันได้ดีกว่า *A. coerulea* อย่างไรก็ตาม *M. rouxii* มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่าง ๆ ได้น้อยกว่าตัวดูดซับโคโคซานและเปลือก walnut ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากที่ผนังเซลล์ของ *M. rouxii* มีปริมาณ

โคโตซานเพียง 32 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีประมานน้อยมากเมื่อเทียบกับโคโตซานจากกระดองปู ความแตกต่างของจำนวนหมู่อะมิโนที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ

Sun และคณะ [3] ศึกษาลักษณะการดูดซับน้ำมันเหลือทิ้งใช้บนตัวดูดซับ H-Oleoyl-carboxymethyl chitosan เทียบกับตัวดูดซับโคโตซาน จากการทดลองพบว่า เมื่อน้ำหนักของน้ำมันเหลือทิ้งเริ่มต้นคงที่ที่ 5.3 มิลลิกรัม ในน้ำทิ้ง 50 มิลลิลิตร และใช้ตัวดูดซับปริมาณ 10 กรัม จะได้ว่าตัวดูดซับ H-Oleoyl-carboxymethyl chitosan ใช้เวลาเพียง 3 นาที ก็สามารถขจัดน้ำมันได้ร้อยละ 99 ในขณะที่โคโตซานต้องใช้เวลาถึง 30 นาที จึงสามารถขจัดน้ำมันได้ร้อยละ 87 จากการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 0.5 ถึง 7.5 พบว่าในช่วงความเป็นกรดต่างจาก 5 ถึง 7 ความสามารถในการขจัดน้ำมันเหลือทิ้งบนตัวดูดซับ H-Oleoyl-carboxymethyl chitosan และตัวดูดซับโคโตซาน มีค่าคงที่ตลอดช่วงความเป็นกรดต่างจาก 0.5 ถึง 5 แต่เมื่อเพิ่มความเป็นกรดต่างมากกว่า 5 ค่าความสามารถในการขจัดจะลดลงประมาณร้อยละ 5 สำหรับตัวดูดซับ H-Oleoyl-carboxymethyl chitosan และ ประมาณร้อยละ 20 สำหรับตัวดูดซับโคโตซาน การดูดซับน้ำมันเหลือทิ้งบนตัวดูดซับ H-Oleoyl-carboxymethyl chitosan สามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิชและจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่าอันดับการดูดซับสอดคล้องกับแบบ Pseudo-second order มากกว่า Pseudo-first order สำหรับการศึกษานำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่โดยการอบภายใต้ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียสเทียบกับการชะล้าง พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำมันเหลือทิ้งของตัวดูดซับ H-Oleoyl-carboxymethyl chitosan ที่ผ่านการนำกลับมาใช้ใหม่โดยการอบภายใต้ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าตัวดูดซับ H-Oleoyl-carboxymethyl chitosan ที่ผ่านการนำกลับมาใช้ใหม่โดยการชะล้าง ประมาณ 1.2 เท่า

Li และคณะ [38] ศึกษาการขจัดน้ำมันออกจากน้ำด้วยเปลือก yellow horn ที่ผ่านการบำบัดด้วยไอออนิลิควิด (Ionic liquid) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อนำมาดูดซับน้ำมัน 5 ชนิด คือน้ำมันดิบ น้ำมันพืช น้ำมันปรุงอาหาร น้ำมันแร่ น้ำมันเครื่อง จากการทดลอง พบว่าความสามารถในการดูดซับของเปลือก yellow horn ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยไอออนิลิควิด (Ionic liquid) และเปลือก yellow horn ที่ผ่านการบำบัดด้วยไอออนิลิควิด (Ionic liquid) มีค่าสูงขึ้นเมื่อความหนืดของน้ำมันมีค่าน้อยลง เนื่องจากความหนืดจะไปยังยังการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำมันไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับ และเมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดของน้ำมันจะลดลงส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับน้ำมันได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับน้ำมันเป็นกระบวนการไดนามิก ซึ่งเป็นสมดุลการดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีการเคลื่อนไหวคงที่

(Braunian motion) และเมื่อโมเลกุลน้ำมันอยู่ใกล้ตัวดูดซับจะเกิดการจับและเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำมันจะไม่เสถียร ส่งผลให้การดูดซับน้ำมันบนตัวดูดซับนั้นลดลง จึงเป็นเหตุให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจากการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่าง พบว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 5 เนื่องจากการโปรโตเนตหมู่อะมิโน ($-NH_2$) จะเกิดได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่ต่ำ นอกจากนี้เปลือก yellow horn ที่ผ่านการบำบัดด้วยไอออนิกคลิควิด (Ionic liquid) จะให้ผลความสามารถในการดูดซับสูงกว่าเปลือก yellow horn ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยไอออนิกคลิควิด (Ionic liquid) ประมาณ 1.5 เท่า เปลือก yellow horn ที่ผ่านการบำบัดด้วยไอออนิกคลิควิด (Ionic liquid) ที่ระดับความเข้มข้น 20 โมลาร์ จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 0.65 กรัมต่อกรัม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่าอันดับการดูดซับสอดคล้องกับแบบ Pseudo-first order มากกว่า Pseudo-second order และการดูดซับเหล่านี้ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลประมาณ 60 ถึง 90 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำมันมีค่าประมาณร้อยละ 80 ถึงแม้ตัวดูดซับนั้นจะผ่านการใช้งานเพื่อการดูดซับมาแล้ว 7 ครั้ง

Xiaobing และคณะ [39] ศึกษาการดูดซับน้ำมันจากน้ำเสียด้วยถ่านหิน แล้วทำการแยกถ่านหินออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการทำให้ลอย โดยตัวแปรที่นำมาศึกษา คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ประเภทของถ่านหิน ขนาดอนุภาคของถ่านหิน ความเป็นกรดต่างและความเข้มข้นของน้ำมัน ผลการวิจัย พบว่า การดูดซับน้ำมันด้วยถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มไปสู่ค่าสมดุล เมื่อใช้ขนาดอนุภาคถ่านหินเท่า ๆ กัน จะพบว่า ความสามารถในการดูดซับน้ำมันบนถ่านหินแอนทาไซต์มีค่ามากกว่าถ่านหินลิกไนต์ เมื่อใช้ถ่านหินชนิดเดียวกัน จะพบว่าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้ผลการดูดซับมากกว่าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาผลของค่าความกรดต่าง พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำมันบนถ่านหินแอนทาไซต์ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการเพิ่มความเป็นกรดต่างจาก 4 ถึง 9 ดังนั้นสามารถใช้ถ่านหินแอนทาไซต์มาดูดซับน้ำมันจากน้ำเสียโดยที่น้ำเสียไม่ต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดต่าง ไอโซเทอมการดูดซับน้ำมันบนถ่านหินแอนทาไซต์สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันส่งผลให้ความสามารถการดูดซับของถ่านหินแอนทาไซต์เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งเป็นผลมาแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันเท่ากับ 160.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับน้ำมันได้สูงสุดบนถ่านหินแอนทาไซต์มีค่าเท่ากับ 23.8 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อศึกษากลไกการดูดซับ พบว่ากลไกการดูดซับประกอบด้วย การดูดซับทั้งที่เป็นกระบวนการทางกายภาพพร้อมกับการดูดซับทางเคมี

Shavandi และคณะ [26] ศึกษาการขจัดน้ำมันเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มโดยการดูดซับด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ การดูดซับจะเป็นแบบแบดซ์ ตัวแปรที่นำมาศึกษา อาทิ ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณของตัวดูดซับ อัตราการกวน เวลาที่ใช้สำหรับดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน ค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 3 ถึง 9 พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติสามารถขจัดน้ำมันได้ถึงร้อยละ 70 ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และเพิ่มอีกครั้งที่ค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 7 ถึง 9 เนื่องจากเกิดการ Hydrolysis ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาน้ำมันที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.6 ถึง 8 กรัมต่อ 500 มิลลิลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติเพิ่มขึ้นจาก 40 มิลลิกรัมต่อกรัม ถึง 265.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุลหรือเกิดการถ่ายโอนมวลเพิ่มสูงขึ้น (Driving force) ที่เพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับได้ถึงร้อยละ 69.72 ที่เวลา 50 นาที อัตราการกวนที่ใช้ระหว่าง 90 ถึง 200 รอบต่อนาที พบว่าความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจนถึงอัตราการกวนที่ 120 รอบต่อนาที หลังจากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จากผลของปริมาณของซีโอไลต์ธรรมชาติสำหรับการดูดซับน้ำมัน เหลือทิ้งเมื่ออัตราการกวนคงที่ที่ 120 รอบต่อนาที พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ 10 กรัม สามารถขจัดน้ำมันได้ถึงร้อยละ 70 การดูดซับน้ำมันของซีโอไลต์สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังนั้นลักษณะการดูดซับของซีโอไลต์จึงเป็นแบบการดูดซับหลายชั้น จากการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ พบว่างานวิจัยนี้สอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order มากกว่า Pseudo-first order โดยขึ้นกำหนดอัตราคือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างซีโอไลต์ธรรมชาติกับน้ำมัน

Lertsutthiwong และคณะ [40] ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพ ไคโตซาน-แรมอนต์มอริลโลไนต์ โดยที่ไคโตซาน-แรมอนต์มอริลโลไนต์ ถูกดัดแปลงด้วยการแทนที่ด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพไคโตซานในชั้นโซเดียมของแรมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งตัวแปรที่นำมาศึกษา คือ น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน ร้อยละการกำจัดหมู่เอซิติล และสัดส่วนของไคโตซานกับแรมอนต์มอริลโลไนต์ จากผลการงานวิจัย พบว่า ปริมาณของไคโตซานที่แทรกอยู่ในชั้นโซเดียมของแรมอนต์มอริลโลไนต์ ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน โดยที่ปริมาณของไคโตซานที่เข้าไปแทรกอยู่ในชั้นโซเดียมของแรมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานลดลง เนื่องจากโมเลกุลที่ใหญ่จะเกิดการอุดตันในชั้นของโซเดียมของแรมอนต์มอริลโลไนต์ ดังนั้นปริมาณของไคโตซานที่เข้าไปแทรกอยู่ในชั้นโซเดียมของแรมอนต์มอริลโลไนต์จึงลดลง ซึ่ง ปริมาณไคโตซานที่แทรกในชั้นแรมอนต์มอริลโลไนต์มากที่สุดคือ ที่น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานเท่ากับ 71,000 กรัมต่อโมล หรือระดับการกำจัดหมู่เอซิติลร้อยละ 80 ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรมอนต์มอริลโลไนต์ เท่ากับ 2:1 เมื่อนำไคโตซาน-แรมอนต์มอริลโลไนต์มาศึกษาคุณสมบัติพบว่าไคโตซาน-แรมอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการ

ดูดซับที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซับสีย้อมประจุลบ ซึ่งสามารถดูดซับได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรมมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถดูดซับได้เพียง 65 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้โคโตซาน-แรมมอนต์มอริลโลไนต์ยังสามารถยับยั้ง *E. coli* ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในอนาคตโคโตซาน-แรมมอนต์มอริลโลไนต์อาจมีการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับสีย้อมและใช้เป็นสารยับยั้งแบคทีเรีย

Ahmad และคณะ [22] ศึกษาการขจัดน้ำมันเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มโดยการดูดซับด้วยโคโตซานชนิดผง และโคโตซานชนิดแผ่น การดูดซับจะให้เป็นแบบแบบตซ์ตัวแปรที่นำมาศึกษา ได้แก่ ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน ค่าความเป็นกรดต่าง เวลาที่ใช้สำหรับดูดซับ ผลงานวิจัย พบว่า ความสามารถในการขจัดน้ำมันเหลือทิ้งของโคโตซานชนิดผงดีกว่าโคโตซานชนิดแผ่น เนื่องจากโคโตซานชนิดผลมีพื้นที่มากกว่าถึง 10 เท่า จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวสูงดูดซับ มีผลทำให้ความสามารถในการขจัดน้ำมันเพิ่มขึ้น เพราะ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จะทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น และจากการการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำมันจาก 0.01 กรัมต่อลิตร ถึง 0.04 กรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก ความเข้มข้นของน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นน้ำมันในน้ำเสียกับที่บริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลหรือแรงผลักดันเพิ่มขึ้น (Driving force) และเมื่อศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่าง พบว่าความสามารถในการขจัดน้ำมันของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถขจัดได้ 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 4.5 เนื่องจากหมู่อะมิโนของโคโตซานจะถูกโปรโตเนตด้วยโปรตรอน ทำให้อยู่ในรูปแอมโมเนียม (-NH_3^+) ซึ่งทำหน้าที่เป็นบริเวณกระตุ้น (active site) ของโคโตซาน เพื่อให้จับกับประจุลบของโมเลกุลน้ำมัน และจะเกิดได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่ต่ำ หลังจากนั้นความสามารถในการขจัดน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 7 ถึง 8 เนื่องจากเกิดการ Hydrolysis ของไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่าอันดับการดูดซับสอดคล้องกับแบบ Pseudo-second order มากกว่า Pseudo-first order และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับน้ำมันด้วยโคโตซานชนิดผง พบว่าสมการการดูดซับสอดคล้องกับแบบฟรุนดิชมากกว่าแลงเมียร์ ดังนั้นลักษณะการดูดซับของโคโตซานชนิดผงจึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย การเตรียมตัวดูดซับ ขั้นตอนการทดลองพร้อมตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับและน้ำมันหล่อเย็นในของไหลตัดชิ้นงาน ตลอดจนการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ แบบจำลองจลนพลศาสตร์ และแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 เครื่องชั่งละเอียด
- 3.1.2 เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) รุ่น SLR บริษัท Scientific Promotion Co. LTD
- 3.1.3 เครื่องปั่นสารละลาย (Overhead stirrer) รุ่น RW20 digital ยี่ห้อ IKA
- 3.1.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส รุ่น F-22 ยี่ห้อ Horiba
- 3.1.5 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker)
- 3.1.6 เครื่องปั๊ม (Peristaltic Pump) รุ่น 77200-60 ยี่ห้อ Masterflex
- 3.1.7 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- 3.1.8 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Zetasizer) รุ่น Zetasizer nano ZS90 ยี่ห้อ Malvern
- 3.1.9 เครื่อง BET surface area รุ่น ASAP 2020 ยี่ห้อ Micromeritic
- 3.1.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) รุ่น JSM-6400 ยี่ห้อ JEOL
- 3.1.11 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer : FT-IR รุ่น 470 ยี่ห้อ Thermo
- 3.1.12 เครื่อง XRD (X – ray Diffraction) รุ่น D8-Discover ยี่ห้อ Bruker
- 3.1.13 เครื่องวิเคราะห์ Contact angle รุ่น 200F1 บริษัท Rame-Hart Instrument co.
- 3.1.14 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UV-2800
- 3.1.15 กล้องจุลทรรศน์กระบอกตา (microscope) รุ่น N-117MS
- 3.1.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy : TEM) รุ่น JEM-2100 ยี่ห้อ JEOL

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 ไคโตซานแบบแผ่น (poly- β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose: $C_6H_{12}O_4N$)_n มีร้อยละการกำจัดหมู่อะซิติก (%DD) มากกว่าร้อยละ 95 จากบริษัท S.Y.K. Enterprise จากประเทศไทย

3.2.2 ดินฟอก (Activated bleaching earth) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90 จากบริษัท Dhenkaset Industrial. จากประเทศไทย

3.2.3 กรดแอซิติก (Acetic Acid: CH_3COOH) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.7 จากบริษัท RCL Labscan จากประเทศไทย

3.2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide: NaOH) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 จากบริษัท Merck จากประเทศเยอรมัน

3.2.5 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid: HCl) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 37 จากบริษัท J.T. Baker จากประเทศนิวซีแลนด์

3.2.6 โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate: $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$) มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 97 บริษัท Ajax Finechem จากประเทศออสเตรเลีย

3.2.7 ของไหลตัดชิ้นงาน (Cutting fluid) จากบริษัท Houghton จากประเทศไทย

3.3 การเตรียมตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท คือ ตัวดูดซับไคโตซานที่ขึ้นรูปแบบเม็ด หรือเรียกว่า ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซาน โดยแต่ละประเภทมีวิธีเตรียมแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไคโตซาน และขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับแต่ละประเภท

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไคโตซาน

ละลายไคโตซาน 2 กรัม ลงในสารละลายกรดแอซิติก ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องปั่นสารละลาย (Overhead stirrer) ด้วยอัตราการกวน เท่ากับ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายไคโตซานใส

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับแต่ละประเภท

3.3.2.1 ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด

หยดสารละลายไคโตซานที่เตรียมได้ในขั้นตอน 3.3.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปั๊ม (Peristaltic Pump) ผ่านเข็มฉีดยาลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการขึ้นรูป โดยแช่นาน 12 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำตัวดูดซับมาล้างด้วยน้ำปราศจากประจุจนกระทั่งมีความเป็นกรดต่างเป็นกลาง

3.3.2.2 ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซาน

เติมดินฟอกลงในสารละลายไคโตซานที่เตรียมจากขั้นตอน 3.3.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยจำนวนดินฟอกที่เติมลงไปให้เป็นไปตามสัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานตามที่ต้องการศึกษา และทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ที่อัตราการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นฉีดสารละลายโซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ระดับความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะได้ตัวดูดซับมีลักษณะเส้นใย จากนั้นแช่ตัวดูดซับทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ล้างตัวดูดซับด้วยน้ำปราศจากประจุจนกระทั่งมีความเป็นกรดต่างเป็นกลาง

3.4 ขั้นตอนการทดลองและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ขั้นตอนการจัดของไหลตัดชิ้นงานด้วยวิธีการดูดซับแบบแบดจ์บนตัวดูดซับที่สังเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์หนัก 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่อยู่ในบรรจุของไหลตัดชิ้นงานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.4.2 ทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างของของไหลตัดชิ้นงานที่ต้องการศึกษาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

3.4.3 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker) ด้วยความเร็ว 130 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที

3.4.4 เก็บตัวอย่างของไหลตัดชิ้นงานก่อนและหลังการดูดซับปริมาตร 3 มิลลิลิตร ตามกำหนดช่วงเวลา

3.4.5 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงานโดยใช้เทคนิคทางยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีที่มีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร

3.4.6 นำผลการทดลองที่ได้คำนวณหาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่สังเคราะห์ ด้วยสมการ

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (3.1)$$

เมื่อ

- q_e = ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานชนิดอิมัลชันเสถียร น้ำมันในน้ำ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงาน (ร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร)
- C_e = ความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงาน ณ สภาวะสมดุล (ร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร)
- V = ปริมาตรของของไหลตัดชิ้นงาน (ลิตร)
- W = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

3.4.7 ทำการศึกษามวลของตัวแปรที่ต้องการศึกษา โดยที่ค่าตัวแปรต่างๆ คงที่ โดยใช้วิธีการที่กล่าวข้างต้น ตั้งแต่ข้อ 3.4.1 ถึง 3.4.6

3.5 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรนั้นต่อความสามารถในการจัดของไหลตัดชิ้นงานด้วยการดูดซับแบบกะบนตัวดูดซับที่สังเคราะห์ มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรที่ใช้และช่วงที่ศึกษา

ตัวแปรที่ศึกษา	ช่วงที่ศึกษา	ตัวแปรคงที่			
		▲	■	●	◆
ชนิดของตัวดูดซับ	1. ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด 2. ตัวดูดซับดินพอก-โคโตซาน	-	-	-	-
ค่าความเป็นกรดต่าง (▲)	3 5 7 9 10	-	30	1	0.75
อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (องศาเซลเซียส) (■)	30 40 50 55	3	-	1	0.75
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) (●)	0.2 0.4 0.6 0.8 1	3	30	-	0.75
ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงาน (ร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร) (◆)	0.75 1 2 3 4	3	30	0.2	-
ช่วงเวลาในการดูดซับ (นาที)	15 30 45 60 90 120 180 240 360	-	-	-	-
สัดส่วนโคโตซานต่อดินพอก (กรณีที่ใช้ตัวดูดซับดินพอก-โคโตซาน)	1:0 1:1 1:5	-	-	-	-

3.6 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

3.6.1 ศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคและศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)

3.6.1.1 ตัวดูดซับ

ทำการบดและร่อนผงตัวอย่างตัวดูดซับ โดยการผ่านตะแกรง 325 mesh. จากนั้นชั่งตัวอย่างประมาณ 0.02 กรัม เติมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร นำตัวอย่างกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ประมาณ 30 นาที และปรับค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 3 5 7 9 และ 10 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และนำไปวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตัวดูดซับด้วยเครื่องวัดขนาดศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)

3.6.1.2 ของไหลตัดชิ้นงาน

หยดของไหลตัดชิ้นงาน 1 หยด ลงในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนตัวอย่างด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ประมาณ 30 นาที นำตัวอย่างมาปรับค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 3 5 7 9 และ 10 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตัวดูดซับด้วยเครื่องวัดขนาดศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)

3.6.2 ศึกษาหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน

นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์หนัก 0.1 กรัม มาทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน

3.6.3 ศึกษาลักษณะภายนอกของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ติดบนฐานรอง (stub) และทำการฉาบทองคำลงบนผิวตัวดูดซับด้วยเครื่อง sputter coater จากนั้นนำตัวดูดซับที่ผ่านการฉาบด้วยทองคำไปส่องดูลักษณะภายนอกของตัวดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6.4 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันเฉพาะ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ จำนวน 0.5 กรัม บดกับโพแทสเซียมโบรมาไนด์ (KBr) จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเป็นลักษณะแผ่นใส แล้วนำไปใส่ใน sample holder และนำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันเฉพาะก่อนและหลังการดูดซับด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

3.6.5 ศึกษามุมสัมผัส (Contact angle)

นำตัวดูดซับมาหาค่ามุมสัมผัสระหว่างผิวของตัวดูดซับกับผิวน้ำด้วยเครื่อง Contact angle รุ่น 200F1

3.6.6 ศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD)

นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ก่อนและหลังการดูดซับมาบดละเอียด ใส่ลงในฐานรอง (stub) แล้วกดให้เรียบ นำตัวดูดซับที่เตรียมใส่ลงใน Holder จากนั้นทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD)

3.6.7 ศึกษาขนาดโมเลกุลน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์กระบอกตา (microscope)

หยดของไหลตัดชิ้นงานที่ค่าความเป็นด่างตั้งแต่ 3 5 7 9 และ 10 บนแผ่นแก้ว จากนั้นนำมาส่องดูขนาดโมเลกุลน้ำมันด้วยกล้องจุลทรรศน์กระบอกตา

3.7 การศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ

ในการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ จะทำการทดลองโดยชั่งน้ำหนักตัวดูดซับ ปริมาณ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 กรัม ลงในในขวดรูปชมพู่ที่ภายในบรรจุของไหลตัดชิ้นงานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างของของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 130 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที เก็บตัวอย่างของไหลตัดชิ้นงานที่ก่อนและหลังการดูดซับปริมาตร 3 มิลลิลิตร มาทดสอบหาความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงาน โดยใช้เทคนิคทางยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ที่ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร นำผลการทดลองที่ได้คำนวณหาความสามารถในการดูดซับ

ของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซาน ด้วยสมการ 3.1 จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟและวิเคราะห์ผล ซึ่งไอโซเทอมของการดูดซับที่ใช้ ได้แก่ แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir) แบบจำลองของฟรุนดลิช (Freundlich) และแบบจำลองของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function ในการดูความน่าเชื่อถือ ดังแสดงในสมการ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ

3.8 ศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ในการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ จะทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.75 1 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สำหรับตัวแปรอื่นๆ กำหนดให้คงที่ โดยกำหนดให้สัดส่วนของตัวดูดซับจำนวน 0.2 กรัม ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 130 รอบต่อนาที ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) และแบบจำลองของปฏิกิริยาอาฟลามิ (Avrami) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function ในการดูความน่าเชื่อถือ จะคำนวณดังแสดงในสมการ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ

3.9 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษากุณหพลศาสตร์การดูดซับ จะทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักต่อปริมาตร ตัวดูดซับหนัก 1 กรัม ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 เขย่าด้วยความเร็ว 130 รอบต่อนาที โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) จะคำนวณดังแสดงในสมการ 2.22 การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) จะคำนวณโดยใช้สมการ 2.24

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง โดยเริ่มต้นตั้งแต่ลักษณะของตัวดูดซับ และผลของตัวแปรต่างๆ ต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ แบบจำลองจลนพลศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 คุณลักษณะของตัวดูดซับ

4.1.1 ลักษณะกายภาพ

ตัวดูดซับที่สังเคราะห์และใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดหลัก คือ ตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่หลายสัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซาน โดยตัวดูดซับแต่ละชนิดนั้นมีลักษณะทางกายภาพ ดังนี้ ตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด (CB) มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม สีขาวขุ่น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงความยาวประมาณ 1-2 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1ก ตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซาน (BEC) มีลักษณะเป็นเส้นใยสีเทา เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซาน พบว่าเมื่อดูจากรูปร่างภายนอก สิ่งที่แตกต่างกันมีเพียงความเข้มของสีเทาที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนดินฟอกที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.1ข ถึง ค



(ก)



(ข)



(ค)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

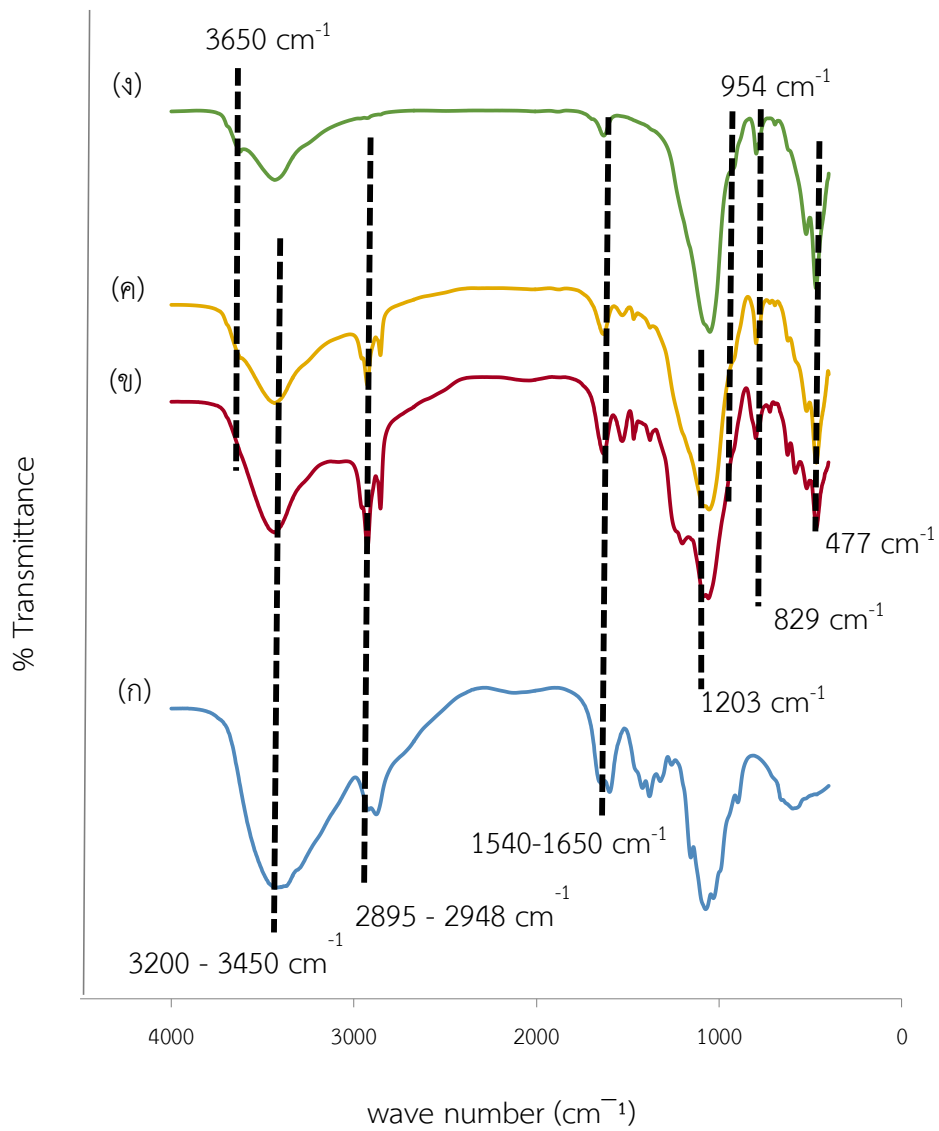
รูปที่ 4.1 ลักษณะกายภาพของตัวดูดซับสังเคราะห์ โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ค) ตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1

4.1.2 หมู่ฟังก์ชันเฉพาะ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

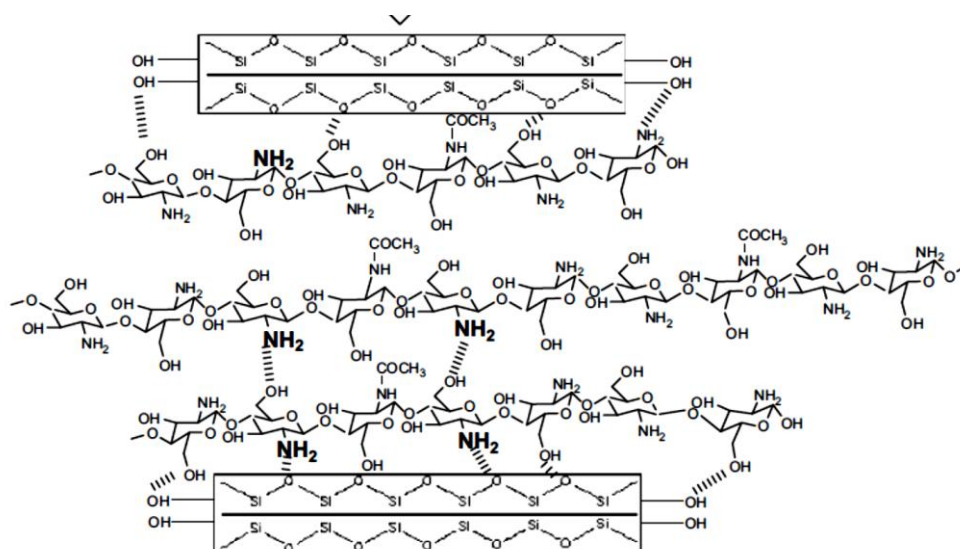
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด คือ ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินพอก-โคโตซาน ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด (CB) จะพบแถบการดูดกลืนหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ แถบการดูดกลืนของหมู่เอมีน (N-H stretching) อย่างชัดเจน ในช่วงเลขคลื่นประมาณ $3200-3450\text{ cm}^{-1}$ เนื่องจากหมู่เอมีนเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของโคโตซาน [41] แถบการดูดกลืนของหมู่ O-H stretching ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3400 cm^{-1} ซึ่งเกิดการซ้อนทับกันกับหมู่เอมีน (N-H stretching) [42] หมู่ฟังก์ชัน C-H stretching ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ $2895 - 2948\text{ cm}^{-1}$ และแถบการดูดกลืนของหมู่ N-H bending ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1659 cm^{-1} แสดงดังรูป 4.2ก สำหรับตัวดูดซับดินพอก-โคโตซาน พบว่าเมื่อเติมดินพอกลงในสารละลายโคโตซานตามสัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานที่แตกต่างกันแล้วทำการขึ้นรูปด้วยสารละลายโซเดียมลอริลซัลเฟต โดยเมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 แสดงดังรูป 4.2ข พบว่าเกิดการย้ายของหมู่ฟังก์ชัน N-H bending ที่เกิดจากการสั่น จากช่วงเลขคลื่น 1659 cm^{-1} ที่ปรากฏในตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด เป็น 1552 cm^{-1} ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่อะมิโนที่แสดงประจุบวกของโคโตซานกับประจุลบของดินพอก [43] และนอกจากหมู่อะมิโนที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับประจุลบของดินพอกยังมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของโคโตซานก็สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันที่แสดงประจุลบของดินพอกภายในชั้นของซิลิเกตได้เช่นเดียวกัน [44] แสดงดังรูป 4.3 จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 นอกจากจะปรากฏหมู่ฟังก์ชันสำคัญของโคโตซาน คือ แถบการดูดกลืนของหมู่เอมีน (N-H stretching) และหมู่ฟังก์ชันของโซเดียมลอริลซัลเฟต ได้แก่ แถบการดูดกลืนของหมู่ S=O ที่ช่วงเลขคลื่น 1203 cm^{-1} หมู่ R-O-S แสดงที่ช่วงเลขคลื่น 1097 cm^{-1} 1060 cm^{-1} และ 993 cm^{-1} หมู่ C-H₂ (สายโซ่ยาวมากกว่า 4 อะตอม) ที่ช่วงเลขคลื่น 813 cm^{-1} หมู่ S-O ที่ช่วงเลขคลื่น 635 cm^{-1} และหมู่ C-H แสดงที่ช่วงเลขคลื่น 583 cm^{-1} [8] ภายในโครงสร้างแล้ว ยังพบแถบการดูดกลืนของหมู่ O-H stretching ในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3650 cm^{-1} แถบการดูดกลืนของหมู่ (Al,Mg)-OH ที่ช่วงเลขคลื่น 829 cm^{-1} แถบการดูดกลืนของหมู่ Al-OH ที่ ช่วงเลขคลื่น 954 cm^{-1} และแถบการดูดกลืนของหมู่ Si-O ที่ช่วงเลขคลื่น 477 cm^{-1} ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของดินพอก [41] โดยหมู่ฟังก์ชันของดินพอกแสดงดังรูป 4.3ก สำหรับตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 จะปรากฏแถบการดูดกลืนหมู่ฟังก์ชันเช่นเดียวกับตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อ

โคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 แสดงดังรูป 4.3ค จะเห็นว่าแถบการดูดกลืนของหมู่ O-H stretching ปรากฏในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3650 cm^{-1} มีลักษณะชัดเจนเข้มข้นเมื่อเพิ่มปริมาณของดินฟอกในสัดส่วนของดินฟอกต่อ โคโตซาน แต่ในขณะที่แถบการดูดกลืนของหมู่ N-H stretching หมู่ C-H stretching และหมู่ N-H bending ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ $3200\ 2895$ และ 1600 cm^{-1} ตามลำดับ แถบสเปกตรัมมีความเข้มลดลงเมื่อสัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณดินฟอกที่เพิ่มขึ้นนั้นเปรียบเสมือนปริมาณโคโตซานลดลง ดังนั้นจากผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าโมเลกุลของโคโตซานได้มีการแทรกเข้าไปในชั้นของดินฟอก โดยหมู่ฟังก์ชันเอมีนที่แสดงประจุบวก หรือที่เรียกว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_3^+) ได้ทำการแลกเปลี่ยนประจุกับโซเดียมไอออน (Na^+) ภายในชั้นของดินฟอก จากนั้นแอมโมเนียมไอออนได้จับกับหมู่ฟังก์ชันที่แสดงประจุลบบนดินฟอกด้วยพันธะไฮโดรเจน [40, 45] จากแถบสเปกตรัมของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซาน จึงบอกได้ว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้





รูปที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 (ง) ดินฟอก



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซาน [44]

4.1.3 โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X – ray Diffraction: XRD)

จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X – ray Diffraction: XRD) รุ่น D8-Discover ยี่ห้อ Bruker สำหรับตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด จะแสดงตำแหน่งของโคโตซานที่ 2theta เท่ากับ 10.1 และ 19.9 องศา [40] แสดงดังรูป 4.4ก สำหรับดินฟอกประกอบด้วยแร่สำคัญ 3 ชนิด คือ แร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) พิก XRD ที่ตำแหน่ง 2theta เท่ากับ 5.8 และ 19.9 องศา แสดงถึงแร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ส่วนที่ตำแหน่ง 2theta เท่ากับ 20.9 และ 26.7 องศา จะแสดงถึงแร่ควอตซ์ (Quartz) และที่ตำแหน่ง 2theta เท่ากับ 22.0 และ 27.8 องศา จะแสดงถึงแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ดังแสดงในรูป 4.4ข ถึง 4.4ง เมื่อพิจารณาตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานที่ต่างกัน จะพบว่าสัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเพิ่มขึ้นความเป็นผลึกของโครงสร้างจะลดลง ทั้งนี้สังเกตได้จากความเข้มของพิก XRD ที่ตำแหน่งของแร่ 3 ชนิด จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 2theta ประมาณ 5.8 ซึ่งเป็นตำแหน่งแร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) จะเกิดการเคลื่อนตำแหน่งไปยังตำแหน่งที่มีมุมองศาที่เล็กลงตามสัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากประจุบวกของโคโตซานเกิดการจับกับกับประจุลบของมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ภายในโครงสร้างของตัวดูดซับ คือ ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (BEC1:1) จะมี 2theta ประมาณ 5.5 องศา ดังรูป 4.4ข และตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 จะมี

2theta ประมาณ 5.7 องศา ดังรูป 4.4ค ซึ่งปริมาณและลักษณะโครงสร้างผลึกของโคโตซานที่แทรกภายในชั้นของดินพอกสามารถดูได้จากระยะห่างของชั้นดินพอกที่ขยายขึ้น (d-spacing) ซึ่งคำนวณจากสมการ 4.1 [46]

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4.1)$$

เมื่อ n = คือจำนวนเต็มที่แทนด้วยอันดับของการเลี้ยวเบน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

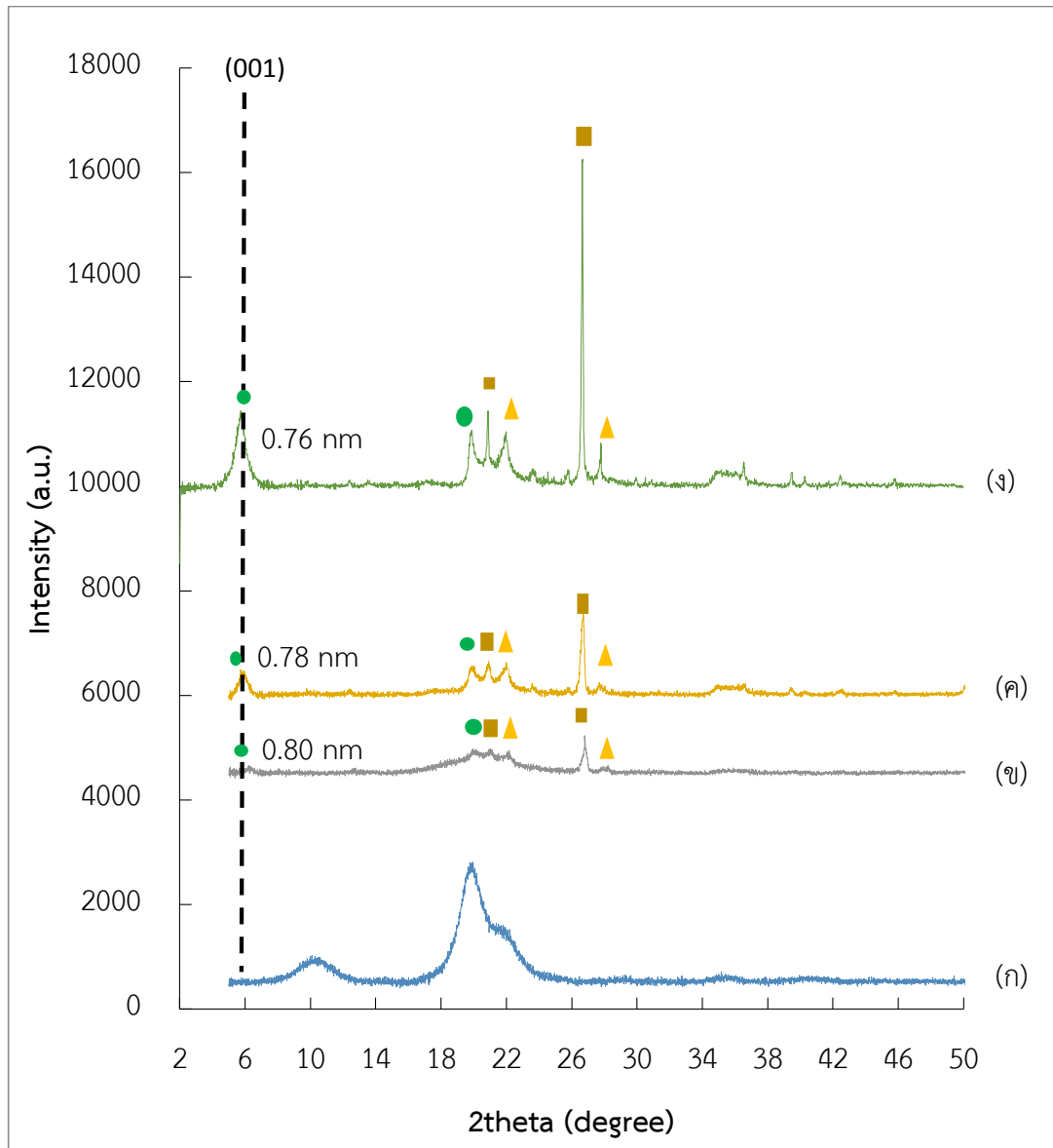
λ = คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (อังสโตม)

d = คือระยะห่างระหว่างระนาบ (อังสโตม)

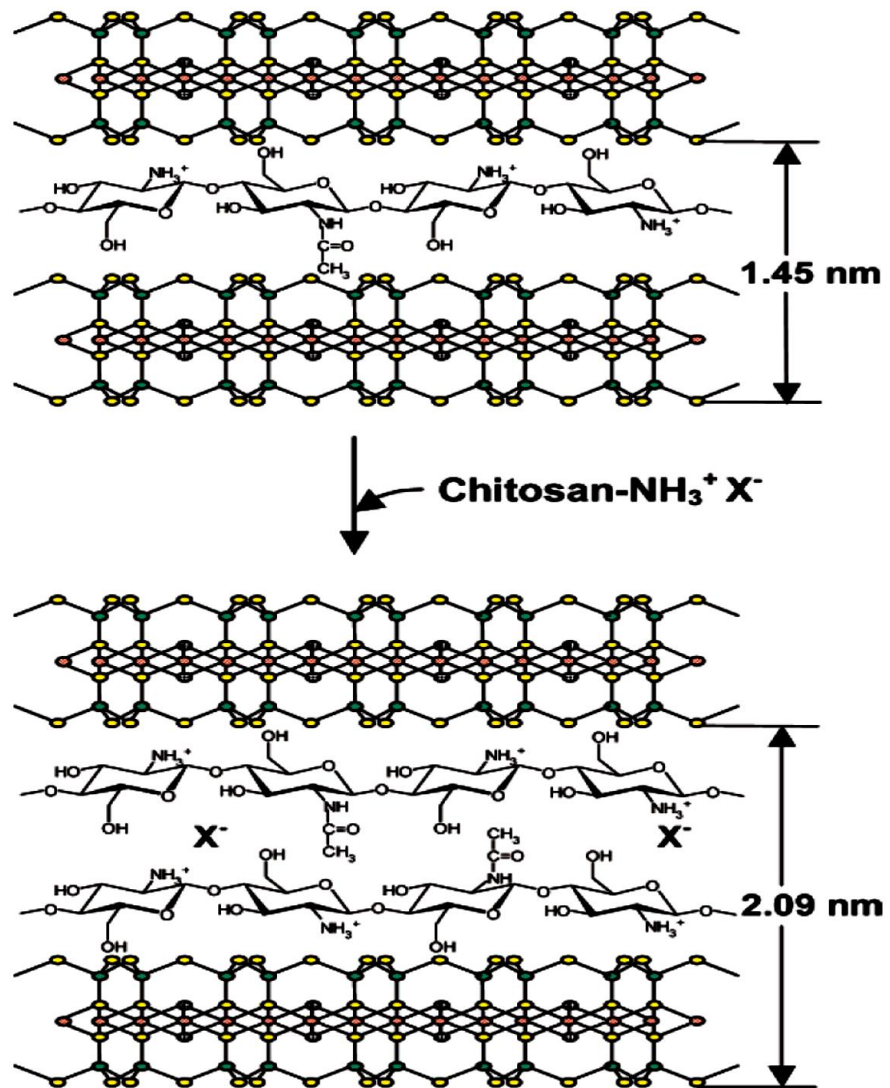
θ = คือมุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบผลึก (องศา)

ลักษณะโครงสร้างผลึกของโคโตซานที่แทรกภายในชั้นของดินพอก จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือโครงสร้างผลึกชั้นเดียว (monolayer) จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ (d-spacing) อยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 1.45 นาโนเมตรและโครงสร้างผลึก 2 ชั้น (Bilayer) จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ (d-spacing) อยู่ในช่วงที่ประมาณ 2.09 นาโนเมตร [43] แสดงดังรูป 4.5 จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ (d-spacing) เพิ่มขึ้นเป็น 0.8 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับดินพอกที่ไม่มีการดัดแปร จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ เพียง 0.76 นาโนเมตร เนื่องจากภายในชั้นซิลิกาออกไซด์ของดินพอกเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cationic exchange process) ระหว่างโซเดียมไอออน (Na^+) ของดินพอกกับแอมโมเนียมไอออน (NH_3^+) ของโคโตซาน [40, 43] ในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับโดยการเติมดินพอกลงในสารละลายโคโตซาน ซึ่งมีสถานะของเหลว ส่งผลให้ชั้นของดินพอกเกิดการบวม ดังนั้นโมเลกุลของโคโตซานสามารถแทรกเข้าไปในชั้นของดินและเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนได้ง่ายขึ้น [44] และเมื่อสัดส่วนของดินพอกต่อโคโตซานเพิ่มขึ้นเป็น 5 ต่อ 1 พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับ (d-spacing) มีค่าลดลง เป็น 0.78 นาโนเมตร เนื่องจากปริมาณของโคโตซานที่เข้าไปแทรกและเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนบวกในชั้นซิลิกาออกไซด์ของดินพอกลดลง อย่างไรก็ตามระยะห่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 ต่างอยู่ในช่วง 1.45 นาโนเมตร จึงกล่าวได้ว่าตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 (BEC5:1) มีโครงสร้างผลึกชั้นเดียว (monolayer) จากผลดังกล่าวได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) จะเห็นว่าปริมาณดินพอกที่เพิ่มขึ้นนั้นเปรียบเสมือนปริมาณโคโตซานลดลง ดังนั้นการเข้าไปแทรกระหว่างชั้นดินพอกจึงมีปริมาณน้อยลง และเมื่อพิจารณา

ลักษณะของพีค XRD ที่ระนาบ 001 ซึ่งเป็นตำแหน่งแรมมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ดังรูป 4.4 จะเห็นว่าความเข้มของพีคนั้นมากขึ้น อีกทั้งฐานของพีคนั้นแคบลง นั่นคือตัวดูดซับมีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบส่งผลให้มีความเป็นผลึกสูงขึ้น



รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 (ง) ดินฟอก (BE) (สัญลักษณ์ ● = แรมมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite); ■ = แร่ควอตซ์ (Quartz); ▲ = แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar))



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการแทรกตัวของไคโตซานในชั้นซิลิกาออกไซด์ของดินฟอก [43]

4.1.4 วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับที่สังเคราะห์และของไหลตัดชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานด้วยเทคนิค (X – ray Fluorescence: XRF)

จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น ด้วยเครื่อง X – ray Fluorescence: (XRF) รุ่น PW2400 ยี่ห้อ Philips พบว่า ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับแสดงดังตาราง 4.1 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าโมเลกุลของไคโตซานได้มีการแทรกเข้าไปในชั้นของดินฟอก โดยหมู่ฟังก์ชันเอมีนที่แสดงประจุบวก หรือที่เรียกว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_3^+) ได้ทำการแลกเปลี่ยนประจุกับโซเดียมไอออน (Na^+) ภายในชั้นของดินฟอก จากนั้นแอมโมเนียมไอออนได้จับกับหมู่ฟังก์ชันที่แสดงประจุลบบนดินฟอกด้วยพันธะไฮโดรเจน [40, 44, 45] จะเห็นได้ว่าจำนวนโซเดียมน้อยลงเมื่อสัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานมากขึ้น แสดงได้ว่าการแทรกของไคโตซานในชั้นดินฟอก

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	อื่นๆ
ดินฟอกที่ไม่การตัดแปร	0.18	0.72	1.0	0.31	6.97	34.20	1.73	0.87
ดินฟอก-ไคโตซาน (1:1)	0.09	0.21	0.34	0.18	1.91	9.00	0.46	4.81
ดินฟอก-ไคโตซาน (1:0.2)	0.17	0.33	0.64	0.25	4.08	20.10	0.92	2.52

4.1.5 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน

จากวิเคราะห์หาผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน แสดงผลดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายการดูดซับไนโตรเจน

ตัวดูดซับ	สัญลักษณ์	พื้นที่ผิว จำเพาะ (ตารางเมตร ต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อ กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางของรู พรุน (อังสตรอม)
โคโตนานชนิดเม็ด	CB	1.22	0.0001	19.43
ดินฟอก-โคโตนาน (1:1)	BEC1:1	10.10	0.0158	48.27
ดินฟอก-โคโตนาน (5:1)	BEC5:1	38.93	0.0634	49.79
ดินฟอก	BE	98.84	0.1362	47.98

จากผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน ดังตาราง 4.2 พบว่า ตัวดูดซับโคโตนานชนิดเม็ด จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยที่สุด เมื่อทำการเติมดินฟอกที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีค่ามากขึ้น แสดงว่าการเติมดินฟอกมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ แต่อย่างไรก็ตามค่าต่างๆเหล่านี้มีค่าน้อยกว่าของดินฟอก ยกเว้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากโคโตนานเข้าไปแทรกในโครงสร้างของดินฟอก แสดงดังผลของเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

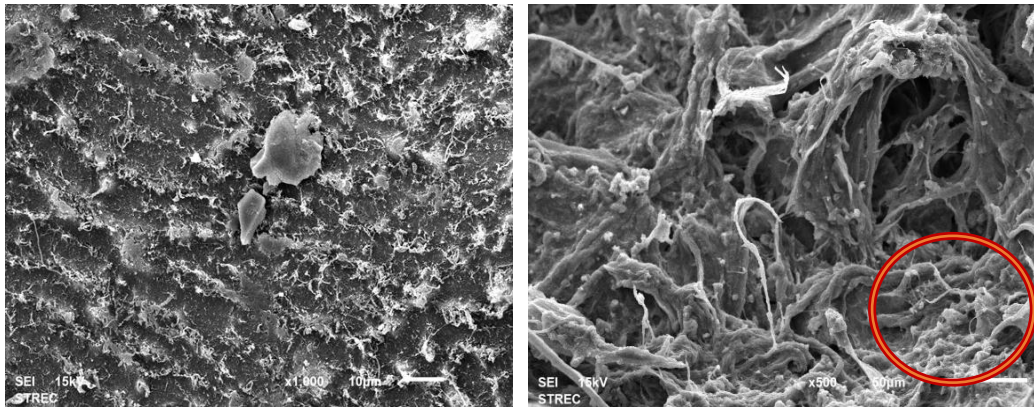
4.1.6 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

จากการนำตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับไปวิเคราะห์ดูลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อุณหภูมิห้อง ณ ความดันบรรยากาศ แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

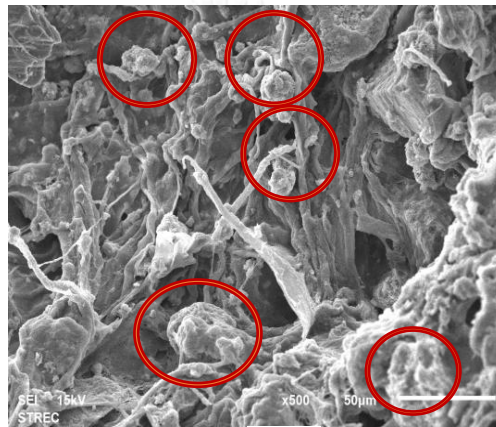
จากรูปที่ 4.6 ก แสดงให้เห็นถึงรูปร่างสัณฐานของตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด มีลักษณะพื้นผิวขรุขระและมีความพรุน เนื่องจากผ่านกระบวนการทำให้แห้งด้วยความเย็น (Freeze drying) ซึ่งทำให้น้ำภายในตัวดูดซับหายไปและเกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุนเข้ามาแทนที่ ในขณะที่ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานต่างๆ ได้แก่ ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 แสดงดังรูป 4.6 ข และ 4.6 ค ตามลำดับ พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่องกันและดินฟอกจะไปเกาะตามเส้นใยของโคโตซาน เมื่อมีสัดส่วนดินฟอกสูงขึ้น จะเห็นว่าดินฟอกมีการยึดเกาะตามเส้นใยโคโตซานมากขึ้นและมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเล็ก กระจายทั่วเส้นใย โดยจะมีลักษณะคล้ายรูปร่างของปะการังสมอง ด้วยลักษณะรูปร่างเช่นนี้จึงเป็นเหตุให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของตัวดูดซับมากขึ้น ดังแสดงผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับสังเคราะห์หลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ณ ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 และใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม พบว่า บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับต่างๆ มีลักษณะบวมและปกคลุมไปด้วยของไหลตัดชิ้น ไม่พบรอยแยกบนตัวดูดซับเหมือนกับกรณีก่อนการดูดซับ แสดงว่าโมเลกุลของน้ำมันได้ถูกดูดซับบนตัวดูดซับแล้ว [8]



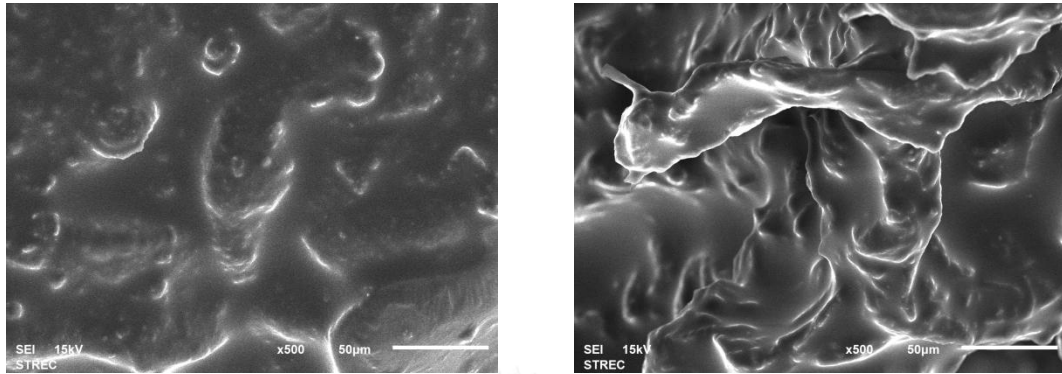
(ก)

(ข)



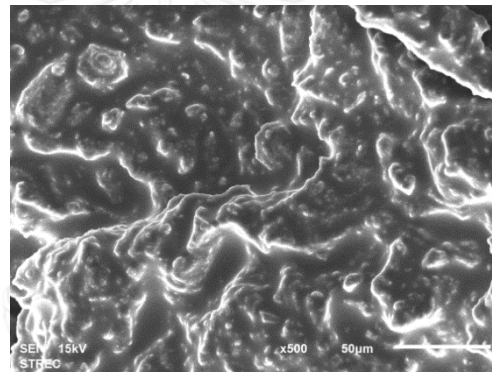
(ค)

รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะสีฐานของตัวดูดซับสังเคราะห์ก่อนการดูดซับด้วยกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1



(ก)

(ข)



(ค)

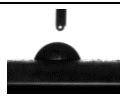

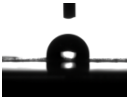
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับสังเคราะห์หลังการดูดซับด้วยกลีโกลูทเทอโรสนิเล็กโตรอนแบบส่องกราด โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ข) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ค) ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1

4.1.7 ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับด้วยการวัดมุมสัมผัส (Contact angle)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับด้วยการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการหยดน้ำลงบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ลักษณะของหยดน้ำจะเกิดการแผ่กระจายเป็นวงกว้าง และขนาดของหยดน้ำบนตัวดูดซับนั้นต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำนั้นเกิดการดูดซับหรือแพร่เข้าไปในตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดได้ดี โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเพียง 68.1 องศา ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดมีคุณสมบัติชอบน้ำ และจากการวิเคราะห์ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับด้วยการวัดมุมสัมผัสของตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานต่าง ๆ กัน พบว่ามุมสัมผัสของน้ำบนตัวดูดซับมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซาน ซึ่งแสดงดังตาราง 4.3 จะเห็นว่าค่ามุมสัมผัสบนน้ำตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 มีค่าเท่ากับ 96.6 และ 97.7 องศา ตามลำดับ เมื่อทำการหยดน้ำลงบนตัวดูดซับ พบว่าหยดน้ำจะมีลักษณะกลม และขนาดของหยดน้ำเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของดินฟอกที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับหรือการแพร่ของโมเลกุลน้ำเกิดได้ไม่ดี เป็นเพราะโครงสร้างของดินฟอกมีลักษณะเป็นผลึกจะพบอลูมินาโมเลกุลแปรระนาบอยู่ระหว่างในชั้นของซิลิกาออกไซด์ โดยที่อะตอมของซิลิกาบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมอลูมิเนียม ในชั้นของโมเลกุลสี่เหลี่ยมปิรามิดและอะตอมอลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียมในชั้นโมเลกุลแปรระนาบ ซึ่งการเสียสมดุลจึงทำให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผิวของดินฟอกได้ จากโครงสร้างดังจึงกล่าวส่งผลให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น (Hydrophobic) [16]

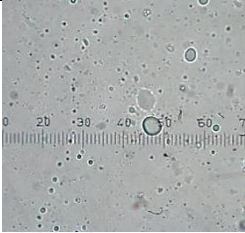
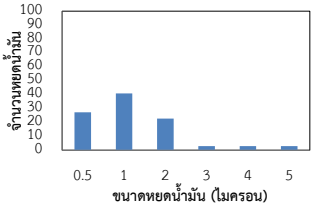
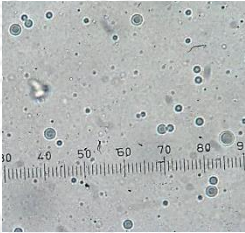
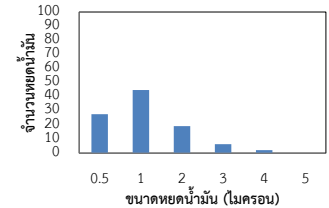
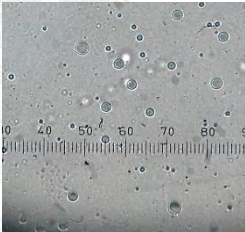
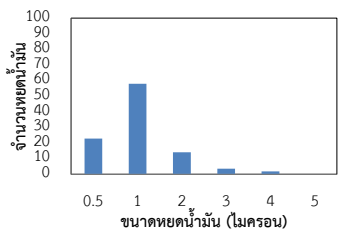
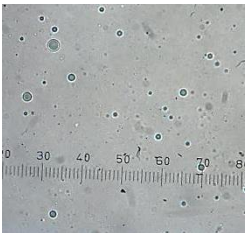
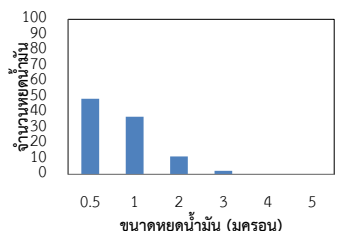
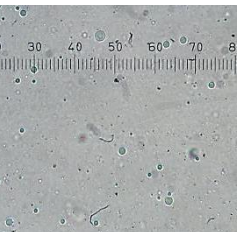
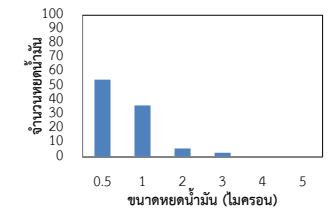
ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	สัญลักษณ์	ค่ามุมสัมผัส (องศา)	ภาพประกอบ
ไคโตซานชนิดเม็ด	CB	68.1	
ดินฟอก-ไคโตซาน (1:1)	BEC1:1	96.6	
ดินฟอก-ไคโตซาน (5:1)	BEC5:1	97.7	

4.1.8 วิเคราะห์ขนาดหยดของไหลตัดชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์กระบอกตาคู่ (Microscope)

เมื่อหยดของไหลตัดชิ้นงาน 1 หยด ลงบนกระจกแล้วปิดทับด้วยกระจกอีกแผ่นเพื่อ ดูขนาดของหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงาน ณ ระดับความเป็นกรดต่างๆด้วยกล้องจุลทรรศน์ กระบอกตาคู่ (Microscope) ณ กำลังขยาย 100 เท่า พบว่า มีจำนวนหยดน้ำมันของไหลตัดชิ้นงาน ประมาณ 40 ถึง 60 หยด และมีขนาดต่างๆกันขึ้นกับระดับความเป็นกรดต่าง ซึ่งมีรายละเอียดแสดง ในตารางที่ 4.4 ขณะนำไปใช้งานในกระบวนการตัดชิ้นงาน แต่เมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง ค่าความเป็น กรดต่างของไหลตัดชิ้นงานจะเปลี่ยนไป โดยส่วนมากแล้วจะเปลี่ยนสู่ภาวะกรด [1] จากผลการทดลอง พบว่าหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานมีขนาดลดลงจาก 1.3 1.1 1.0 0.8 และ 0.6 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อของไหลตัดชิ้นงานมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 5 7 9 และ 10 ตามลำดับ การที่ขนาดหยด น้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเข้าสู่ภาวะกรด แสดงว่าหยดน้ำมันเหล่านั้นเกิดการ เคลื่อนที่เข้าหากันและรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น นั้นหมายถึงอิมัลชันน้ำมันในน้ำมีแรงผลักลดลง [47]

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานที่ระดับความเป็นกรดต่าง ๆ กัน

ค่าความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงาน	ช่วงขนาดหยดของไหลตัดชิ้นงาน (ไมครอน)	ค่าเฉลี่ยขนาดหยดของไหลตัดชิ้นงาน (ไมครอน)	ภาพประกอบ	กราฟแสดงขนาดของไหลตัดชิ้นงาน (ไมครอน)
3	0.5-5	1.3		 จำนวนหยดน้ำมัน ขนาดหยดน้ำมัน (ไมครอน)
5	0.5-4	1.1		 จำนวนหยดน้ำมัน ขนาดหยดน้ำมัน (ไมครอน)
7	0.5-4	1.0		 จำนวนหยดน้ำมัน ขนาดหยดน้ำมัน (ไมครอน)
9	0.5-2	0.8		 จำนวนหยดน้ำมัน ขนาดหยดน้ำมัน (ไมครอน)
10	0.5-2	0.6		 จำนวนหยดน้ำมัน ขนาดหยดน้ำมัน (ไมครอน)

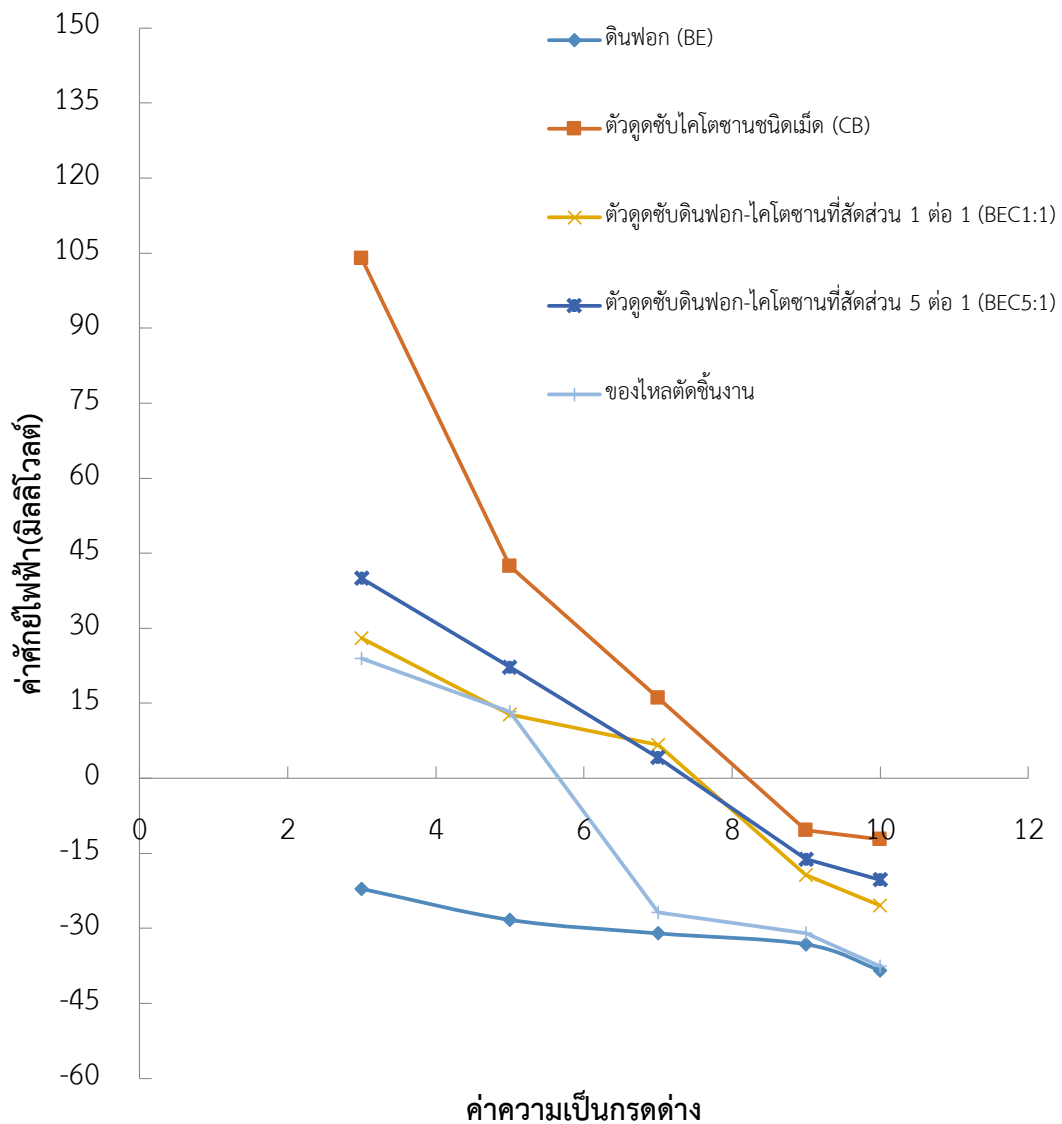
4.1.9 ศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวดูดซับและของไหลตัดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)

การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับและหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.8 จากผลการทดลองจะพบว่า ตัวดูดซับแต่ละชนิดและของไหลตัดชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าจากค่าศักย์ไฟฟ้าบวกไปหาค่าศักย์ไฟฟ้าลบ โดยผ่านจุดที่มีศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ (Point of zero charge) เมื่อมีการปรับค่าความเป็นกรดต่างจากภาวะกรดเป็นภาวะต่าง สำหรับตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเท่ากับศูนย์ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 8.3 7.6 และ 7.5 ตามลำดับ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของตัวดูดซับมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge) จะพบว่าประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีแนวโน้มเป็นบวก ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างของตัวดูดซับมีค่าสูงกว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ประจุเป็นศูนย์จะพบว่าประจุที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นลบ [48] ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากค่าความเป็นกรดต่างในภาวะกรด หมู่อะมิโนของโคโตซานสามารถแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยที่โปรตอนจะเข้าไปจับกับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) เกิดการโปรโตเนตทำให้หมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนพื้นผิวโคโตซานเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) [23] จึงเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในภาวะต่างหมู่อะมิโนจะไม่เกิดการโปรโตเนต ซึ่งจะอยู่ในรูปของ $-NH^-$ [48] จึงเป็นเหตุให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ สำหรับดินฟอกที่ไม่ผ่านการดัดแปร พื้นผิวจะมีประจุเป็นลบในทุกช่วงค่าความเป็นกรดต่างซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [49, 50]

เมื่อพิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่ประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge) ของของไหลตัดชิ้นงาน พบว่ามีค่าเท่ากับ 5.5 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 5.5 เช่นของไหลตัดชิ้นงานจะมีประจุที่พื้นผิวเป็น +24 มิลลิโวลต์ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ซึ่งจะทำให้มีความเสถียรอิมัลชันน้ำมันในน้ำต่ำ จึงเป็นเหตุให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าหากันและรวมตัวเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่ดังปรากฏในความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหยดน้ำมันของไหลตัดชิ้นงานกับค่าความเป็นกรดต่าง เมื่อค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่า 5.5 จะพบว่าพื้นผิวของไหลตัดชิ้นงานจะมีประจุลบ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 10 มีค่าศักย์ไฟฟ้าของของไหลตัดชิ้นงานประมาณ -37.6 มิลลิโวลต์ จึงทำให้หยดน้ำมันไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและมีแรงผลักระหว่างหยดน้ำมันค่อนข้างสูง จึงทำให้ยังคงสภาพอิมัลชันเสถียรของน้ำมันในน้ำ [5]

จากค่าศักย์ไฟฟ้านี้เองหากตัวดูดซับมีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกจะสามารถดึงดูดสารที่มีประจุตรงข้ามได้ค่อนข้างดี เนื่องจากอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุ [22, 23] ดังนั้นการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด (ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่

สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1) จะสามารถดูดซับได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่อยู่ในภาวะกรด และเมื่อเพิ่มความเป็นกรดต่างเข้าสู่ภาวะต่างความสามารถในการดูดซับจะมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.8 แสดงศักย์ไฟฟ้าตัวดูดซับและของไหลตัดชั้นงานในช่วงค่าความเป็นกรดต่างต่างๆ

4.2 ผลของตัวแปรต่อการขจัดของไหลตัดชิ้นงานด้วยวิธีการดูดซับแบบแบตช์บนตัวดูดซับต่างๆ

4.2.1 ผลของค่าความเป็นกรดต่าง

ผลความเป็นกรดต่างต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จะทำการศึกษาที่ค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 3 5 7 9 และ 10 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 1 กรัม และทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที แสดงดังรูปที่ 4.9 จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานอยู่ในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีค่าสูงเมื่อความเป็นกรดต่างอยู่ในภาวะกรด แต่เมื่อปรับค่าความเป็นกรดสู่ภาวะต่าง จะพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 2 ชนิดมีค่าลดลง เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ จะพบว่า ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ตลอดช่วงความเป็นกรดต่าง

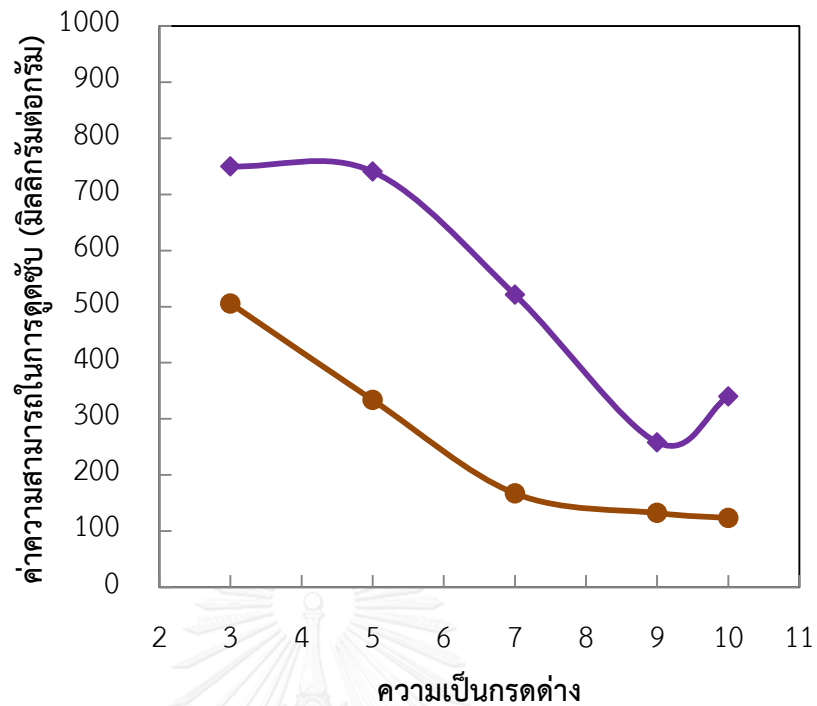
ทั้ง 2 ตัวดูดซับแสดงความสามารถในการดูดซับสูงสุด ณ ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 โดยที่ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 750 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนตัวดูดซับดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด แสดงค่าความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 505 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากค่าศักย์ไฟฟ้าของของไหลตัดชิ้นงาน ณ ค่าความเป็นกรดต่างตลอดช่วงที่ทำการศึกษามีค่าอยู่ในช่วง +24 มิลลิโวลต์ ถึง -37.6 มิลลิโวลต์ เมื่อปรับความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 3 ถึง 10 ค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าเป็น +28 มิลลิโวลต์ แล้วลดลงเป็น -25.4 มิลลิโวลต์ ในขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด มีค่าเป็น +104 มิลลิโวลต์ แล้วลดลงเป็น -12.2 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ ที่ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในภาวะกรด ของไหลตัดชิ้นงานและตัวดูดซับชนิดต่างๆ มีประจุตรงข้ามกัน จึงเกิดการดูดซับได้มากกว่าช่วงความเป็นกรดต่างที่อยู่ในภาวะต่าง ซึ่งประจุของไหลตัดชิ้นงานและประจุของตัวดูดซับต่างเป็นประจุลบเหมือนกัน แต่อยู่ในช่วง ± 40 มิลลิโวลต์ [22, 23, 49-51] ซึ่งยังคงมีแรงผลักดัน จึงยังคงเกิดการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงความเป็นกรดต่างที่อยู่ในภาวะกรด หยดน้ำมันของไหลตัดชิ้นงานจะมีความเสถียรต่ำกว่าช่วงความเป็นกรดต่างในภาวะต่าง ดังนั้นในภาวะกรด หยดน้ำมันของไหลตัดชิ้นงานจะสามารถเคลื่อนที่เข้าหากันและรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมัน

ขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนช่วงความเป็นกรดต่างในภาวะต่าง หยดน้ำมันของไหลตัดชิ้นงานซึ่งมีประจุเป็นลบ นั้นยังมีความเสถียรมากขึ้น จึงไม่เกิดการรวมตัวกันของหยดน้ำมัน หยดน้ำมันจึงมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับหยดน้ำมันในภาวะกรด [5, 22] ซึ่งผลนี้จะสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ขนาดหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์กระบอกตา (Microscope) ด้วยเหตุนี้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่อยู่ในภาวะกรดจึงสูงกว่าในภาวะต่าง

จากการทดลองพบว่า ตัวดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่ สกัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับลดลงเล็กน้อยเมื่อทำการเพิ่ม ความเป็นกรดต่างจาก 3 ถึง 6 ทั้งนี้เนื่องจากหมู่อะมิโนของโคโตซานมีการโปรโตเนตให้อยู่ในรูป ของแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ดังนั้นจึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ของโคโตซานกับหมู่คาร์บอนิลของของไหลตัดชิ้นงาน [23] และหยดน้ำมันใน ของไหลตัดชิ้นงานนั้นไม่เสถียรส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงในภาวะกรด แต่เมื่อค่าความเป็น กรดต่างเป็นกลาง ทำให้ประจุวกบนพื้นผิวตัวดูดซับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของตัวดูดซับ บริเวณหมู่อะมิโนจะเกิดดีโปรโตเนต (Deprotonate) จาก $-NH_3^+$ เป็น $-NH_2$ ทำให้หมู่ฟังก์ชันที่แสดง ประจุวกลดน้อยลง ซึ่งจะนำไปสู่แรงดึงดูดระหว่างประจุลบของหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานกับ ประจุวกของตัวดูดซับนั้นอ่อนลง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง [48] และเมื่อพิจารณาที่ ค่าความเป็นกรดต่างสูงจาก 7 ถึง 9 พบว่าพื้นผิวของโคโตซานในรูปของ $-NH_2$ เปลี่ยนเป็น NH^- ดังนั้น พื้นผิวของโคโตซานจะมีประจุลบทำให้เกิดการแย่งจับของไฮดรอกไซด์ (OH^-) และหมู่คาร์บอนิลของ ของไหลตัดชิ้นงานบนผิวหน้าของโคโตซาน [23] ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง หลังจาก นั้นความสามารถในการดูดซับได้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากเกิดการสลายพันธะไฮโดรเจน (Hydrolysis) ของน้ำมันที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น [26]

สำหรับตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด พบว่า ความสามารถในการดูดซับดีสูงสุดที่ค่า ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 และจะมีค่าลดลงเมื่อความเป็นกรดต่างสู่ภาวะต่าง ในภาวะต่างจะทำให้ ประจุวกบนพื้นผิวตัวดูดซับลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงด้วย อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด ก็ยังน้อยกว่าตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่ สกัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 เพราะความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวดูดซับและ ของไหลตัดชิ้นงาน ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับต่างๆ ในการทดลองต่อไป



◆ ตัวดูดซับดินฟอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1

● ตัวดูดซับโคลโตซานชนิดเม็ด

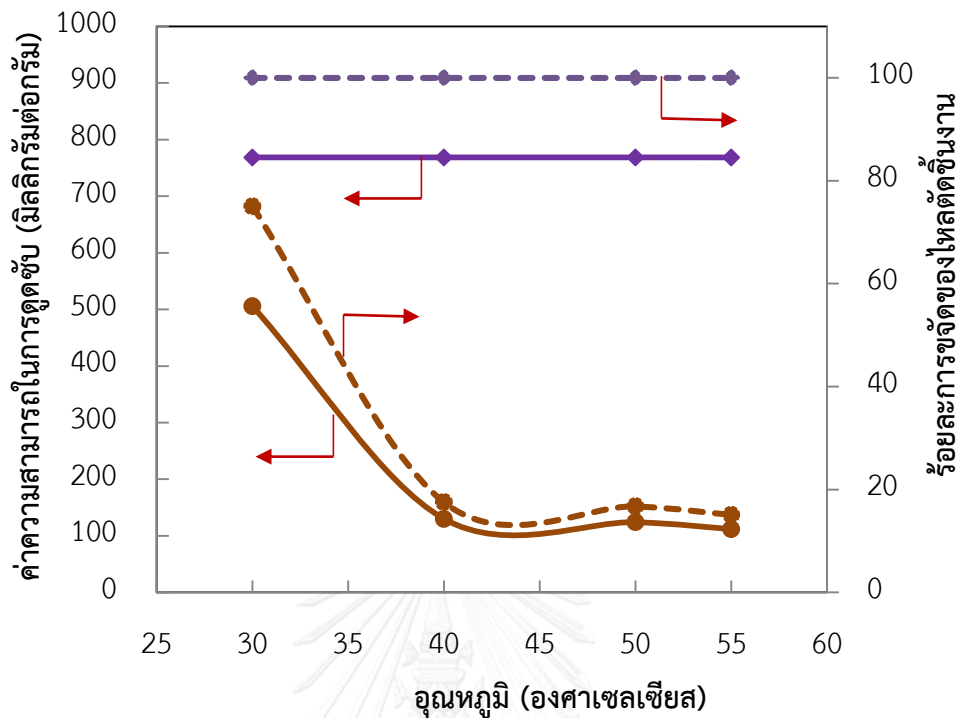
รูปที่ 4.9 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่ค่าความกรดต่างต่างๆ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 1 กรัม และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที

4.2.2 อุณหภูมิการดูดซับ

ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จะศึกษาในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 40 50 และ 55 องศาเซลเซียส เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 1 กรัม และทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ความสามารถในการดูดซับและร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด ณ อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.10

จากการพิจารณาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 55 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานจะลดลงจาก 505 เป็น 112 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อพิจารณาร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงาน พบว่ามีร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานลดลงจากร้อยละ 75 เป็น 16 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic process) นั้นหมายถึงการให้พลังงานแก่ระบบจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ดี

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด นอกจากนี้ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 ยังสามารถดูดซับน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานได้ดีทุกอุณหภูมิ ซึ่งความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 769 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อพิจารณาร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานของตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 พบว่าร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 100 ในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic process) [13] ที่มีลักษณะการดูดซับทั้งเชิงเคมีและกายภาพ แสดงดังรูปที่ 4.10



- ◆ ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1
- ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด

รูปที่ 4.10 แสดงความสามารถในการดูดซับ (เส้นทึบ) และร้อยละการกำจัดของไหลตัดชิ้นงาน (เส้นประ) บนตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 1 กรัม และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที

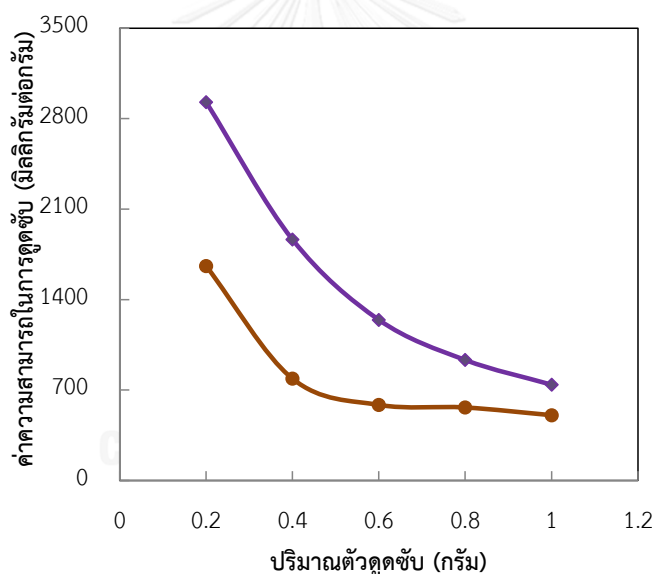
4.2.3 ปริมาณตัวดูดซับ

ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 ทำการศึกษา ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดต่างของของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 กรัม จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน และร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 2 ชนิดที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด พบว่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดมีแนวโน้มลดลงจาก 1,660 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 506 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก จาก 0.2 กรัม เป็น 1 กรัม ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้ปริมาณของไหลตัดชิ้นงานที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะครอบคลุมบริเวณในการเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) บนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ในขณะที่การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับนั้นเป็นการเพิ่มตำแหน่งว่องไวในการจับกับน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด มีค่าสูงขึ้น

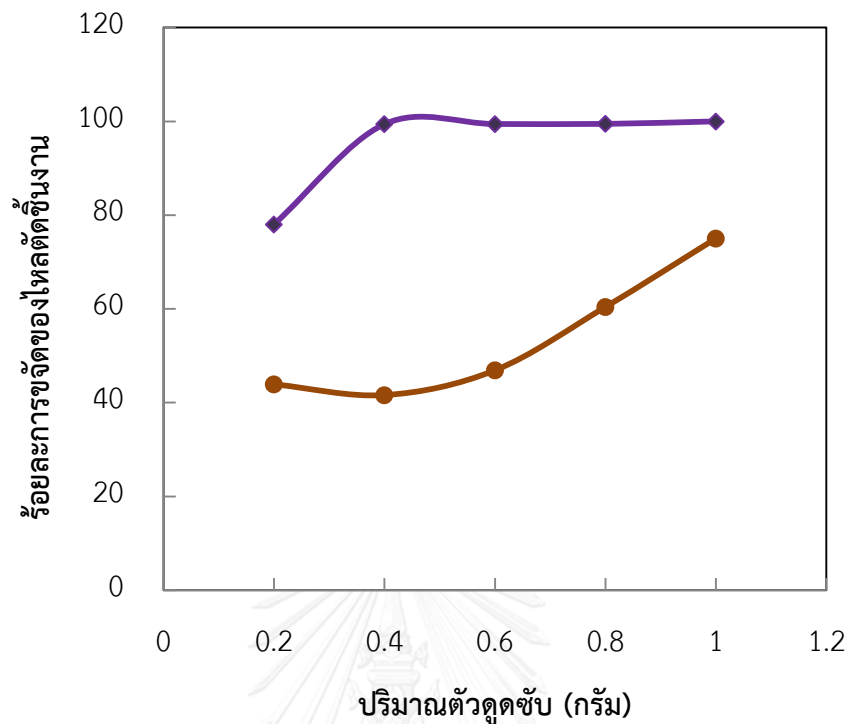
จากการพิจารณาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 ที่ปริมาณต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีแนวโน้มลดลง เหมือนกับตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จาก 0.2 กรัม เป็น 1 กรัม จะมีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงจาก 2,928 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 769 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ามากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ทั้งนี้จากการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ของตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 พบว่ามีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำมากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ซึ่งได้รายละเอียดได้อธิบายไว้ในตาราง 4.3 จากคุณสมบัติดังกล่าวส่งผลให้ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สามารถจับกับน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานสูงกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และเมื่อพิจารณา ร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ

1 ต่อ 1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.2 เป็น 1 กรัม ร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับเพิ่มจากร้อยละ 78 ถึง 100 นอกจากความไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 แล้ว อาจเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ามากกว่าตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด ด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีร้อยละการขจัดของไหลตัดชิ้นงานมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและมีร้อยละการขจัดมากกว่าตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สามารถขจัดของไหลตัดชิ้นงานได้ร้อยละ 99 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับเพียง 0.4 กรัม ในขณะที่ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด ที่ปริมาณเดียวกัน คือ 0.4 กรัม แต่สามารถขจัดของไหลตัดชิ้นงานได้เพียงร้อยละ 42 เท่านั้น



- ◆ ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สกัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1
- ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด

รูปที่ 4.11 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที



- ◆ ตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 1 ต่อ 1
- ตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด

รูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการงอกของไหลตัดขึ้นงานบนตัวดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดขึ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที

4.2.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานที่

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จะศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 0.75 1 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที ความสามารถในการดูดซับของของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 2 ชนิดที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.13

จากผลการทดลองการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษาพบว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จะมีค่าสูงขึ้น จากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.75 1 2 และ 3 ของน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานในสารละลายและบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ ดังนั้นทำให้เกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) ที่มากขึ้น [26] ซึ่งตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถดูดซับสูงสุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 3 ของน้ำหนักต่อปริมาตร แสดงดังรูป 4.13 มีค่าเท่ากับ 4,588 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากการวัดมุมสัมผัสของน้ำบนผิวของตัวดูดซับ (Contact angle) แสดงดังตาราง 4.3 จะเห็นว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 96.6 องศา จะแสดงคุณสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ส่งผลให้ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จึงชอบจับกับหยดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานมากกว่าน้ำ ดังนั้นสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้สูงขึ้น โดยสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูป 4.7 จะเห็นว่าบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับนั้นปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของไหลตัดชิ้น มีลักษณะบวมปกคลุมไปด้วยของไหลตัดชิ้น ไม่พบรอยแยกบนตัวดูดซับเหมือนกับกรณีก่อนการดูดซับ แสดงว่าโมเลกุลของน้ำมันได้ถูกดูดซับบนตัวดูดซับแล้ว [8] อีกทั้งตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูง ซึ่งได้อธิบายไว้ในตาราง 4.2

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานเป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าลดลง แสดงดังรูป 4.13 เนื่องจากที่ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานสูงๆ โมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานจะไปบดบังตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ดูดซับบนตัวดูดซับ ดังนั้นจึงเกิด

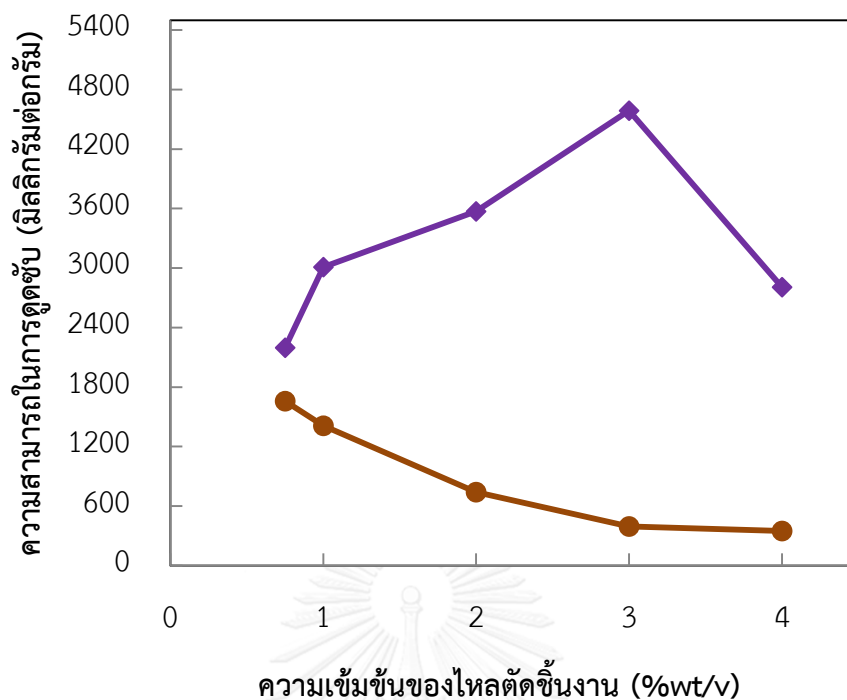
การอุดตันของโมเลกุลของไหลตัดขึ้นบนบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับ ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับของไหลตัดขึ้นงานบนตัวดูดซับลดลง [52] ในขณะที่ตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ด พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไหลตัดขึ้นงานเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดขึ้นงานบนตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ดลดลง ซึ่งแสดงดังรูป 4.13 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ดมีค่าน้อยมาก แสดงในตารางที่ 4.2 จึงเป็นสาเหตุการเกิดการอุดตันของตัวดูดซับได้ง่าย [8] และความสามารถในการดูดซับของไหลตัดขึ้นงานบนตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ด มีค่าน้อยกว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1

จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งแสดงดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นของไหลตัดขึ้นงานเริ่มต้นต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	สัมประสิทธิ์การแพร่ ($\times 10^{-3}$) (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)				
	0.75%	1%	2%	3%	4%
โคโตะซานชนิดเม็ด (CB)	0.37	0.31	0.28	0.27	0.27
ดินฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วน 1 ต่อ 1 (BEC1:1)	0.79	1.00	1.50	2.30	0.90

แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับฟอก-โคโตะซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตะซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไหลตัดขึ้นงานเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 3 ทั้งนี้เนื่องจากเกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) ที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ด จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไหลตัดขึ้นงานเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของไหลตัดขึ้นงานสูงๆ โมเลกุลของไหลตัดขึ้นงานจะไปบดบังตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ดูดซับบนตัวดูดซับ ดังนั้นจึงเกิดการอุดตันของโมเลกุลของไหลตัดขึ้นบนบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับ อีกทั้งตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ดมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนน้อย ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับของไหลตัดขึ้นงานบนตัวดูดซับโคโตะซานชนิดเม็ดลดลง



◆ ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1

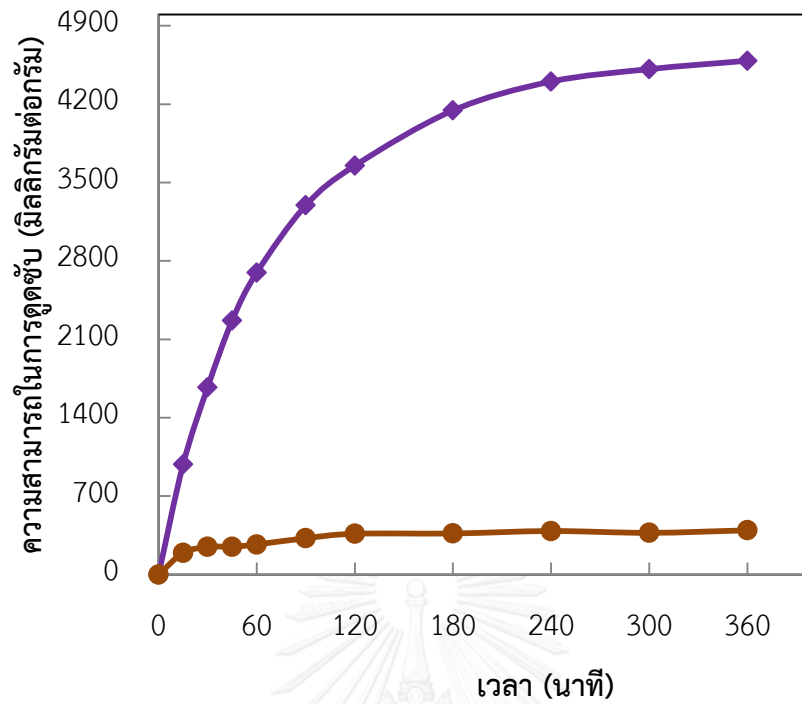
● ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด

รูปที่ 4.13 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานต่างๆ เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.2 กรัม และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 360 นาที

4.2.5 เวลาที่ใช้ในการดูดซับ

ผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบ ต่อนาที ความสามารถในการดูดซับของของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 2 ชนิดที่เวลาการดูดซับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14

การขจัดของไหลตัดชิ้นงานจำเป็นต้องหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ สามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานอย่างเต็มที่ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับก็มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับ จากการทดลองพบว่า ในช่วงภายใน 90 นาทีแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกยังมีจำนวนช่องว่างของรูพรุน [42] ส่งผลให้ของไหลตัดชิ้นงานถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็ว หลังจากผ่านการดูดซับมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และในที่สุดก็จะเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลาประมาณ 120 นาที สำหรับตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และ 310 นาที สำหรับตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จากทั้งหมดนี้จึงกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มเวลาการดูดซับมากเพียงพอ จนการดูดซับเข้าสู่สมดุล จะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น [8, 26, 53] จนเข้าสู่สมดุล จึงจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอีกต่อไป จากผลการทดลองพบว่า ตลอดระยะเวลาการดูดซับที่ 360 นาที ความสามารถในการดูดซับของของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าสูงกว่าของตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด โดยมีค่า 4,588 และ 395 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



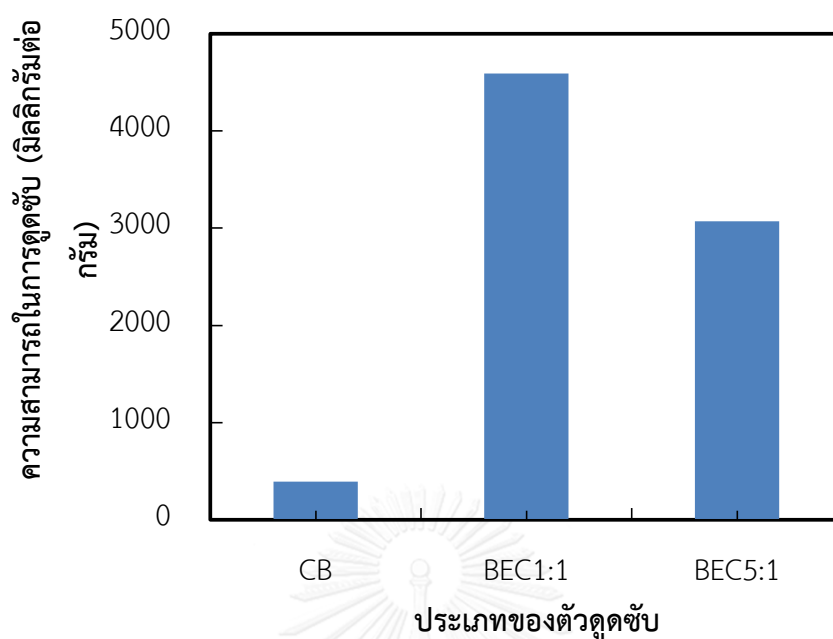
- ◆ ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1
- ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด

รูปที่ 4.14 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 2 ชนิด ที่เวลาการดูดซับ 360 นาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที

4.2.6 ผลของสัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซาน

ผลของของสัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานต่อความสามารถในการดูดซับของของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.15

จากผลการทดลองการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานพบว่า ดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 ทั้งนี้เนื่องจากบนพื้นผิวของดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกมากกว่าตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 ด้วยเหตุนี้เองทำให้ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สามารถจับกับประจุลบของของไหลตัดชิ้นงานได้ดีกว่าตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 นอกจากนี้ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด เนื่องจากตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีรูปร่างเป็นเส้นใย ทำให้มีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ส่งผลให้ตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าการดูดซับจำเพาะสูงกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด

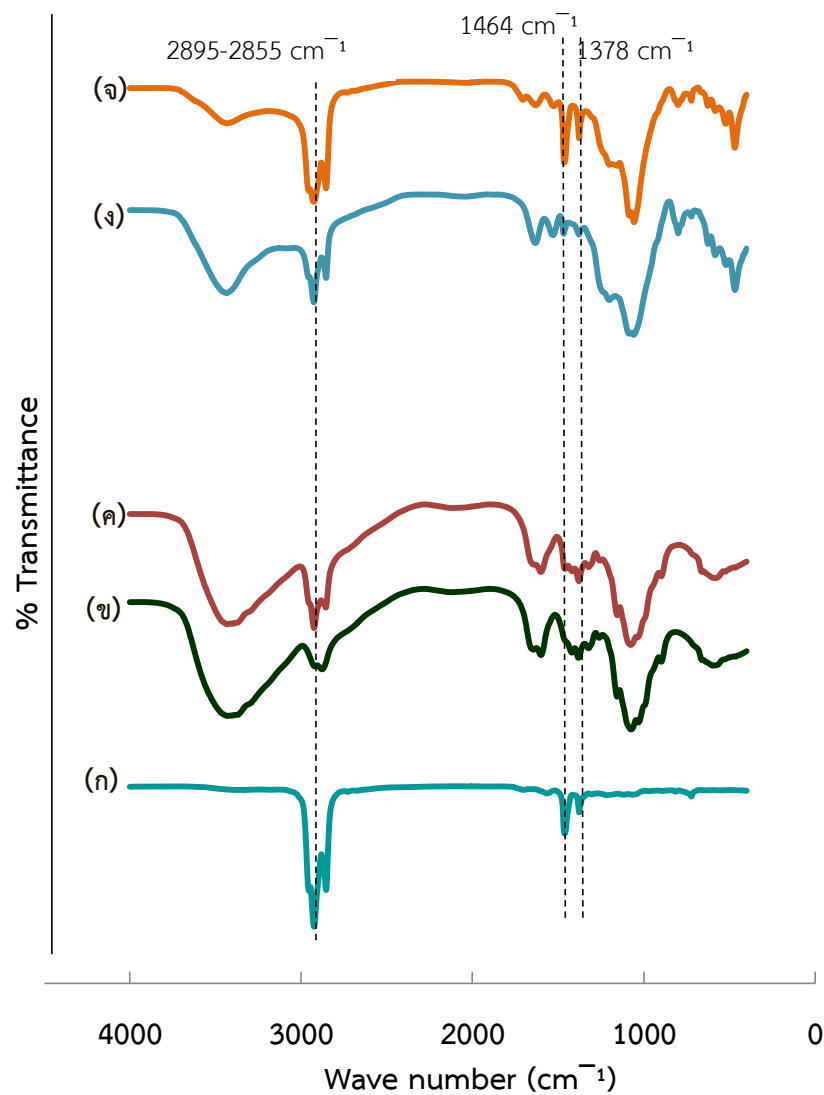


รูปที่ 4.15 แสดงความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ 3 ชนิด (ตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด (CB) ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (BEC1:1) และตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 5 ต่อ 1 (BEC5:1)) ที่เวลาการดูดซับ 360 นาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที

4.3 หมู่ฟังก์ชันเฉพาะของตัวดูดซับหลังการดูดซับ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเป็นกรดต่างของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ 3 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที แสดงดังรูปที่ 4.16

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะของตัวดูดซับหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ 2 ชนิด จะเห็นว่าแถบการดูดกลืนของหมู่แอลเคน (Alkane) มีลักษณะที่เข้มข้นเมื่อเทียบกับก่อนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานในช่วงเลขคลื่นประมาณ 2895 และ 2855 cm^{-1} นั้นแสดงให้เห็นถึงในโครงสร้างมีหมู่แอลเคน (Alkane) ในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนของหมู่เมทิล (Methyl) และเมทิลีน (Methylene) ที่ ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1378 และ 1464 cm^{-1} [8] ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันเฉพาะดังกล่าวเป็นของของไหลตัดชิ้นงาน [8] แสดงดังรูปที่ 4.16 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเข้มของแถบการดูดกลืนของหมู่แอลเคน (Alkane) หมู่เมทิล (Methyl) และเมทิลีน (Methylene) พบว่าตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จะปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของของไหลตัดชิ้นงานเข้มข้นที่สุด รองลงมาคือ ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีโมเลกุลของของไหลตัดชิ้นงานในโครงสร้างมากที่สุด นั้นหมายถึงมีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงที่สุด รองลงมาคือตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับด้วยการวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ซึ่งได้อธิบายดังตาราง 4.3 ซึ่งตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่ามุมสัมผัสมากที่สุด ส่งผลให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำหรือเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) มากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด อีกทั้งตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ซึ่งแสดงในตาราง 4.2 ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ทั้งตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานมากกว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะก่อนและหลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดย (ก) ของไหลตัดชิ้นงาน (ข) ก่อนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ค) หลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (ง) ก่อนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (จ) หลังการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1

4.4 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption)

อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานและการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยพารามิเตอร์ของอุณหพลศาสตร์นี้ [13] ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) ซึ่งได้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน โดยจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 40 50 และ 55 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 1 กรัม และทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ณ ความดันบรรยากาศ โดยค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิต่างๆ จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้ดีทุกอุณหภูมิ มีค่าการดูดซับอยู่ที่ประมาณ 769 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด มีค่าการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นลักษณะการดูดซับจึงเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic process) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) มีค่าเป็นลบ [54] นั่นหมายถึงการให้พลังงานแก่ระบบจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ ในขณะที่ตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าเป็นบวกเล็กน้อย ดังนั้นลักษณะการดูดซับจึงเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic process) ที่มีลักษณะการดูดซับทั้งเชิงเคมีและกายภาพ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

ตัวดูดซับ	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol.K)	ΔG° (kJ/mol)			
			30 °C	40 °C	50 °C	55 °C
ตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด	-34.69	-0.09	-6.4	-3.9	-3.90	-3.8
ตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่ สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซาน เท่ากับ 1 ต่อ 1	0.04	0.05	-13.5	-13.9	-14.4	-14.6

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) ของตัวดูดซับโคโคซานชนิดเม็ด มีค่าเป็นลบแสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีความเป็นระเบียบมากที่บริเวณผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวระหว่างเกิดการดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับดินฟอก-โคโคซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโคซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าเป็นบวก แสดงว่าระบบมีความไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการกระจายตัวของโมเลกุล

หรือพลังงานของน้ำมันในของไหลตัดขึ้นงานบนตัวดูดซับดินพอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จึงมากค่ามาก [54] ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) ของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด คือ ตัวดูดซับโคลโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินพอก-โคลโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคลโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 พบว่ามีค่าเป็นลบ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 55 องศาเซลเซียส ดังนั้นกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นได้เอง

4.5 แบบจำลองสมดุลการดูดซับ (Isotherm adsorption)

การศึกษาแบบจำลองการดูดซับที่เหมาะสมโดยจะพิจารณาจากความสามารถสูงสุดของการดูดซับของไหลตัดขึ้นงานบนตัวดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan isotherm) มาทำนายลักษณะการดูดซับ ซึ่งจะศึกษา ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดต่างของของไหลตัดขึ้นงานเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดขึ้นงานเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 กรัม จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 360 นาที แสดงดังตาราง 4.7

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) ได้อธิบายว่าการดูดซับจะเป็นแบบการดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเป็นการดูดซับทางเคมี โดยสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $1/C_e$ กับ $1/q_e$ ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ $1/K_L q_0$ และจุดตัดแกนในแนวตั้ง เท่ากับ $1/q_0$ ในกรณีแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ควรคำนวณหาปัจจัยของการแยก (R_L) ซึ่งจะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องการดูดซับ โดยปัจจัยของการแยกสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.2

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4.2)$$

เมื่อ $R_L =$ คือ ปัจจัยของการแยก
 $K_L =$ คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)
 $C_0 =$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดขึ้นงาน (กรัมต่อลิตร)

โดยที่ $R_L > 1$ แสดงถึงการดูดซับไม่ดี $R_L = 1$ แสดงถึงการดูดซับคงที่ $0 < R_L < 1$ แสดงถึงการดูดซับดี และถ้า $R_L = 0$ แสดงถึงปฏิกิริยาย้อนกลับ [3]

สำหรับแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) ได้ถูกนำมาอธิบายการดูดซับพื้นผิวที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากัน เป็นแบบกระจายตัว ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ ซึ่ง K_F สามารถหาได้จากจุดตัดแกนในแนวตั้ง และ $1/n$ หาได้จากความชัน เมื่อ $1/n > 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ในการดูดซับมาก $1/n = 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันมาก (Heterogeneous) และถ้า $1/n < 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ในการดูดซับน้อยและพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันน้อย โดยที่แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) จะสามารถดูดซับได้เรื่อยๆ จนเกิดเป็นหลายชั้น (Multilayer) [27] ในขณะที่แบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan isotherm) ได้อธิบายสมดุลการดูดซับแบบผสมระหว่างแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่ 3 พารามิเตอร์ คือ q_0 จะแสดงถึงค่าการดูดซับจำเพาะสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) ค่าคงที่สมดุลการดูดซับโกเบิลคอร์ริแกน (K_{KC}) และ ค่า n แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ นั้นหมายถึง n มีค่ามาก แสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก [13] โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function พบว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดซับจะเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับของไหลตัดขึ้นงานมากกว่า 1 หมู่ (หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อะมิโน) ทำให้ลักษณะการดูดซับเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และจากการหาค่าเข้ากันได้ของค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการคำนวณกับความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function พบว่าตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function เท่ากับ 0.985 และ 2.822 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า K_F และ $1/n$ เท่ากับ 0.017 และ 1.902 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน ซึ่งเป็นการดูดซับแบบผสมระหว่างแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช [55] ดังนั้น ตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สกัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 จึงมีลักษณะการดูดซับเป็นทั้งแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) และการดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) [55] โดยพบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function มีค่าเท่ากับ 0.999 และ 0.122 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า K_F และ n เท่ากับ 0.064 และ 29.66 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าค่า n มีค่ามากกว่า 1 นั้นแสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มี

พื้นที่ในการดูดซับมาก [13] ซึ่งสอดคล้องกับผลของการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน แสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด ส่งผลให้ของตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้มากขึ้น



ตารางที่ 4.7 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับ

แบบจำลองการดูดซับ	ชนิดของตัวดูดซับ	
	ไคโตซานชนิดเม็ด	ดินพอก-ไคโตซานที่ สัดส่วน 1 ต่อ 1
แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์		
$q_{e,EXP}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	395	4,587
$q_{o,cal}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	218	4,439
K_i	0.006	0.013
R_L	0.846	0.0176
R^2	0.466	0.584
Err,%	14.474	12.707
แบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช		
$q_{o,cal}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	382	4,961
K_F	0.017	1.574
$1/n$	1.902	2.632
R^2	0.985	0.676
Err,%	2.828	13.987
แบบจำลองการดูดซับโกเบิลคอร์รีแกน		
$q_{o,cal}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	320	4,593
K_{KC}	0.041	0.064
n	2.025	29.66
R^2	0.064	0.999
Err,%	18.852	0.122

4.6 ศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จะสามารถอธิบายอัตราเร็วของปฏิกิริยาต่อการดูดซับโดยสามารถอธิบายได้จากสมการของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) และแบบจำลองของปฏิกิริยาอาฟลามี่ (Avrami)

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จะใช้ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.75 1 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สำหรับตัวแปรอื่นๆ กำหนดให้คงที่ โดยกำหนดให้สัดส่วนของตัวดูดซับจำนวน 0.2 กรัม ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 130 รอบต่อนาที

จากการศึกษาปัจจัยดังกล่าว สามารถนำมาหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function (Err,%) เพื่อดูความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูล ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.8 4.9 และ 4.10 ซึ่งจากการทดลองพบว่า ตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สอดคล้องกับแบบจำลองของปฏิกิริยาอาฟลามิ (Avrami) ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) และเมื่อพิจารณาค่า error function พบว่ามีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอีก 2 ชนิด และผลจากการคำนวณความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน ($q_{e,cal}$) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของของตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีมากกว่าหนึ่งแบบ จึงอาจกล่าวได้ว่าลักษณะการดูดซับของตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 เป็นทั้งการดูดซับแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) และการดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) ซึ่งสอดคล้องผลของแบบจำลองการดูดซับก่อนหน้านี้ สำหรับตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) จากแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองอีก 2 ชนิด คือ แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และแบบจำลองของปฏิกิริยาอาฟลามิ (Avrami) และเมื่อพิจารณาค่า error function พบว่ามีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอีก 2 ชนิด ดังนั้นตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด จึงสอดคล้องกับแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) โดยพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดจะไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานมากกว่า 1 หมู่ (หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อะมิโน) ทำให้ลักษณะการดูดซับเป็นแบบเนื้อผสม (Heterogeneous) ดังนั้นจึงสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.8 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order)

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ร้อยละน้ำหนัก ต่อปริมาตร)	$q_{e,EXP}$	แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม $\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$			
			$q_{e,cal}$	K_1	R^2	Err,%
ไคโตซาน ชนิดเม็ด	0.75	1,660	1,676	0.012	0.957	14.414
	1	1,408	1,388	0.021	0.988	4.855
	2	742	716	0.017	0.951	14.860
	3	395	372	0.030	0.942	12.156
	4	349	345	0.056	0.975	6.671
ดินฟอก- ไคโตซานที่ สกัดส่วน 1 ต่อ 1	0.75	2,198	2,306	0.004	0.992	4.940
	1	3,011	3,106	0.007	0.995	3.182
	2	3,572	3,790	0.009	0.981	6.089
	3	4,587	4,530	0.014	0.998	3.158
	4	2,809	2,904	0.012	0.998	3.393

ตารางที่ 4.9 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ร้อยละน้ำหนัก ต่อปริมาตร)	$q_{e,EXP}$	แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$			
			$q_{e,cal}$	K_1	R^2	Err,%
ไคโตซาน ชนิดเม็ด	0.75	1,660	2,037	5.87×10^{-5}	0.989	10.741
	1	1,408	1,616	1.53×10^{-5}	0.988	7.621
	2	742	842	2.39×10^{-5}	0.977	10.475
	3	395	391	1.09×10^{-4}	0.976	4.000
	4	349	368	2.71×10^{-3}	0.986	4.651
ดินพอก- ไคโตซานที่ สัดส่วน 1 ต่อ 1	0.75	2,198	2,323	4.13×10^{-7}	0.990	5.700
	1	3,011	3,167	1.01×10^{-6}	0.993	5.178
	2	3,572	3,798	1.84×10^{-6}	0.975	15.915
	3	4,587	5,518	2.84×10^{-6}	0.998	3.060
	4	2,809	3,702	3.01×10^{-6}	0.986	9.101

second order)

ตารางที่ 4.10 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับปฏิกิริยาอาฟลามี่ (Avrami)

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ร้อยละน้ำหนักรต่อปริมาณ)	$q_{e,EXP}$	แบบจำลองของปฏิกิริยาอาฟลามี่ $q_t = q_e(1 - \exp^{-(k_{Av}t)^n})$				
			$q_{e,cal}$	K_1	n	R^2	Err,%
ไคโตซาน ชนิดเม็ด	0.75	1,660	1,077	1.381	7.16	0.334	46.599
	1	1,408	1,082	1.067	2.310	0.480	32.496
	2	742	537	1.831	5.682	0.481	37.114
	3	395	317	1.052	8.265	0.664	25.236
	4	349	320	1.106	4.518	0.831	18.495
ดินฟอก- ไคโตซานที่ สกัดส่วน 1 ต่อ 1	0.75	2,198	2,150	0.006	1.291	0.998	1.171
	1	3,011	3,169	0.008	1.150	0.998	1.264
	2	3,572	3,654	0.011	1.133	0.983	2.282
	3	4,587	4,636	0.013	0.899	0.999	1.059
	4	2,809	2,849	0.012	1.090	0.999	0.523

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 โดยตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองนี้คือ ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นในของไหลตัดชิ้นงาน และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จากการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด มีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความกรดต่างเท่ากับ 3 และความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดลดลง เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับลดลงเล็กน้อย เมื่อทำการเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างจาก 3 ถึง 6 ทั้งนี้เนื่องจากหมู่อะมิโนของไคโตซานมีการโปรตอนเตต ให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ดังนั้นจึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ของไคโตซานกับหมู่คาร์บอนิลของของไหลตัดชิ้นงาน นอกจากนี้ขนาดน้ำมันในของไหลตัดชิ้นงานในภาวะกรดจะไม่เสถียรส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น และผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด พบว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งกระบวนการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบคายความร้อน ในขณะที่ตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 พบว่าสามารถดูดซับของไหลตัดชิ้นงานได้ดีทุกอุณหภูมิ โดยกระบวนการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบดูดความร้อน และผลของความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นในของไหลตัดชิ้นงาน พบว่า ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นในของไหลตัดชิ้นงานจากร้อยละ 0.75 ถึง ร้อยละ 4 ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ทั้งนี้เนื่องตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดมีค่าน้อยมาก จึงเป็นสาเหตุการเกิดการอุดตันของตัวดูดซับได้ง่าย [8] ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ดมีค่าลดลง ส่วนตัวดูดซับดินพอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไหลตัดชิ้นงาน จากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.75 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะทำให้ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ

ของไหลตัดชิ้นงานในสารละลายและบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ ดังนั้นทำให้เกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) ที่มากขึ้น หลังจากนั้นความสามารถของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงานสูงๆ โมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานจะไปคั่งค้างตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ดูดซับบนตัวดูดซับ ดังนั้นจึงเกิดการอุดตันของโมเลกุลของไหลตัดชิ้นงานบนบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับ ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับลดลง [52] อย่างไรก็ตามตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด โดยภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 คือ ค่าความกรดต่างเท่ากับ 3 และเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับมีค่าประมาณ 120 นาที สำหรับตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด และมีค่าประมาณ 310 นาที สำหรับตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุดเท่ากับ 4,587 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด มีค่าความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุดเท่ากับ 395 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากการศึกษาหาแบบจำลองสมดุลการดูดซับของตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด และตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 พบว่าตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่ผลของอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) มีค่าเป็นลบ แสดงว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิปกติ [56] โดยมีค่าความสามารถในการการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด เท่ากับ 1,660 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน ซึ่งเป็นการดูดซับแบบผสมระหว่างแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช นั้นหมายถึงตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 ลักษณะการดูดซับเป็นทั้งแบบเนื้อเดียว และการดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียว ในขณะที่ผลของอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) มีค่าเป็นบวกเล็กน้อย ดังนั้นลักษณะการดูดซับจึงเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic process) เป็นผลมาจากการดูดซับทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ โดยมีค่าความสามารถในการการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 4,587 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาจลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด พบว่า ตัวดูดซับ

โคโตซานชนิดเม็ด มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในขณะที่ตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สอดคล้องกับแบบจำลองของปฏิกิริยาอาฟลามี่ (Avrami)

ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4,587 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ความเข้มข้นน้ำมันเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นในของไหลตัดชิ้นงานเท่ากับ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับมีค่าประมาณ 310 นาที ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการคายซับ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รายการอ้างอิง

1. บริษัท ออยเซอร์ฟ จำกัด. การบำรุงรักษาหล่อเย็น [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.oilservethai.com/index.php?lay=show&ac=article&id=539149449&Ntype=11> [24 ตุลาคม 2558]
2. Pinotti, A. and Zaritzky, N., *Effect of aluminum sulfates and cationic polyelectrolytes on the destabilization of emulsified wastes*. Waste Management, 2001. **21**(6): 535-542.
3. Sun, G.Z., Chen, X.G., Zhang, J., Feng, C., and Cheng, X.J., *Adsorption characteristics of residual oil on amphiphilic chitosan derivative*. Water Sci Technol, 2010. **61**(9): 2363-74.
4. นุสรรา โรจนวิลาวัลย์. การบำบัดน้ำเสียไขมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าและโฟโตอิเล็กโตรเฟนตัน วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
5. Srinivasan, A. and Viraraghavan, T., *Oil removal from water using biomaterials*. Bioresour Technol, 2010. **101**(17): 6594-600.
6. Dabrowski, A., *Adsorption — from theory to practice*. Advances in Colloid and Interface Science, 2001. **93**(1-3): 135-224.
7. เฉลิมชัย อาชวชาลี. เอกสารน้ำมันหล่อลื่นประเภทไฮโดรทริต, บริษัท ซินลู๊ป อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด, 2555.
8. Piyamongkala, K., Mekasut, L., and Pongstabodee, S., *Cutting fluid effluent removal by adsorption on chitosan and sds-modified chitosan*. Macromolecular Research, 2008. **16**(6): 492-502.
9. บริษัท บิ๊ก เคมิคอล จำกัด. สารลดแรงตึงผิวในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรค. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: www.bicchemical.com [25 ตุลาคม 2558]
10. Occupation safety and health administration. Metalworking fluids: safety and health best practices manual. [Online]. 2013. Available from: https://www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids_manual.html [2015, October 22]
11. Bernstein, D.I., *Machine operator's lung*. CHEST Journal, 1995. **108**(3): 636.

12. Kim, M.-J. and Chea, G.-H., *Study on the PV Driven Dehumidifying System with Oyster Shell and Thermoelectric Device*. Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, 2012. **18**(3): 287-293.
13. เตชะ ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ = Adsorption processes, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
14. Deer, William A.; Howie, Robert A.; and Zussman, Jack. An introduction to the rock forming minerals of Entry. 2nd ed. Longman, 1992.
15. Khedr, M.A., Waly, A.I., Hafez, A.I., and Hanaa, A., *Synthesis of modified chitosan-montmorillonite nanocomposite*. Australian Journal of Basic & Applied Sciences, 2012. **6**(6): 216-226.
16. Wu, Y., Si, Y., Zhou, D., and Gao, J., *Adsorption of diethyl phthalate ester to clay minerals*. Chemosphere, 2015. **119**: 690-6.
17. Wikipedia. Montmorillonite. [Online]. 2015. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Montmorillonite> [2015,October 23]
18. Tembhurkar, A.R. and Deshpande, R., *Powdered Activated Lemon Peels as Adsorbent for Removal of Cutting Oil from Wastewater*. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2012. **16**(4): 311-315.
19. Ravi, K. and Majeti, N.V., *A review of chitin and chitosan applications*. Reactive and Functional Polymers, 2000. **46**(1): 1-27.
20. Shahidi, F., Arachchi, J.K.V., and Jeon, Y.-J., *Food applications of chitin and chitosans*. Trends in Food Science & Technology, 1999. **10**(2): 37-51.
21. Jalal, A.F., *Optimization of Chitin Extraction from Chicken Feet*. Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques, 2012. **03**(05).
22. 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 Res, 2005. **39**(12): 2483-94.
23. Ahmad, A.L., Sumathi, S., and Hameed, B.H., *Residual oil and suspended solid removal using natural adsorbents chitosan, bentonite and activated carbon: A comparative study*. Chemical Engineering Journal, 2005. **108**(1-2): 179-185.
24. รศ.ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล. การดูดซับ, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.

25. Tokumasu, F., Ostera, G.R., Amaratunga, C., and Fairhurst, R.M., *Modifications in erythrocyte membrane zeta potential by Plasmodium falciparum infection*. *Exp Parasitol*, 2012. **131**(2): 245-51.
26. Shavandi, M.A., Haddadian, Z., Ismail, M.H.S., Abdullah, N., and Abidin, Z.Z., *Removal of Residual Oils from Palm Oil Mill Effluent by Adsorption on Natural Zeolite*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012. **223**(7): 4017-4027.
27. พัชรินทร์ ทองดอนเอ. การดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนเม็ดโคไโตซานเชื่อมขวางที่มีรูพรุน วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
28. Ho, Y.-S., *Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions*. *Scientometrics*, 2004. **59**(1): 171-177.
29. Hamidpour, M., Kalbasi, M., Afyuni, M., Shariatmadari, H., and Furrer, G., *Sorption of lead on Iranian bentonite and zeolite: kinetics and isotherms*. *Environmental Earth Sciences*, 2010. **62**(3): 559-568.
30. Sari, A., Tuzen, M., Citak, D., and Soylak, M., *Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of adsorption of Pb(II) from aqueous solution onto Turkish kaolinite clay*. *J Hazard Mater*, 2007. **149**(2): 283-91.
31. Ho, Y.S. and McKay, G., *Pseudo-second order model for sorption processes*. *Process Biochemistry*, 1999. **34**(5): 451-465.
32. Ho, Y.-S., *Second-order kinetic model for the sorption of cadmium onto tree fern: a comparison of linear and non-linear methods*. *Water Research*, 2006. **40**(1): 119-125.
33. Ho, Y.-S., *Review of second-order models for adsorption systems*. *Journal of hazardous materials*, 2006. **136**(3): 681-689.
34. Cestari, A.R., Vieira, E.F., Vieira, G.S., and Almeida, L.E., *The removal of anionic dyes from aqueous solutions in the presence of anionic surfactant using aminopropylsilica--a kinetic study*. *J Hazard Mater*, 2006. **138**(1): 133-41.
35. Lopes, E.C., dos Anjos, F.S., Vieira, E.F., and Cestari, A.R., *An alternative Avrami equation to evaluate kinetic parameters of the interaction of Hg (II) with thin chitosan membranes*. *Journal of colloid and interface science*, 2003. **263**(2): 542-547.

36. Wikipedia. Coefficient of determination. [Online]. 2015. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination [2015,October 23]
37. Annadurai, G., Ling, L.Y., and Lee, J.F., *Adsorption of reactive dye from an aqueous solution by chitosan: isotherm, kinetic and thermodynamic analysis*. J Hazard Mater, 2008. **152**(1): 337-46.
38. Li, J., et al., *Oil removal from water with yellow horn shell residues treated by ionic liquid*. Bioresour Technol, 2013. **128**: 673-8.
39. Li, X., Zhang, C., and Liu, J., *Adsorption of oil from waste water by coal: characteristics and mechanism*. Mining Science and Technology (China), 2010. **20**(5): 778-781.
40. Lertsutthiwong, P., Noomun, K., Khunthon, S., and Limpanart, S., *Influence of chitosan characteristics on the properties of biopolymeric chitosan-montmorillonite*. Progress in Natural Science: Materials International, 2012. **22**(5): 502-508.
41. Ainurofiq, A., Nurcahyo, I., and Yulianto, R., *Preparation, characterization and formulation of nanocomposite matrix Na-montmorillonite intercalated medium molecular weight chitosan for theophylline sustained release table*. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 2014. **6**(11): 131-137.
42. Sokker, H.H., El-Sawy, N.M., Hassan, M.A., and El-Anadouli, B.E., *Adsorption of crude oil from aqueous solution by hydrogel of chitosan based polyacrylamide prepared by radiation induced graft polymerization*. J Hazard Mater, 2011. **190**(1-3): 359-65.
43. Darder, M., Colilla, M., and Ruiz-Hitzky, E., *Chitosan-clay nanocomposites: application as electrochemical sensors*. Applied Clay Science, 2005. **28**(1-4): 199-208.
44. Wang, S.F., et al., *Biopolymer chitosan/montmorillonite nanocomposites: Preparation and characterization*. Polymer Degradation and Stability, 2005. **90**(1): 123-131.

45. Monvisade, P. and Siriphannon, P., *Chitosan intercalated montmorillonite: preparation, characterization and cationic dye adsorption*. Applied Clay Science, 2009. **42**(3-4): 427-431.
46. นพิตา วิทยชีระนันท์ และชวลิต งามจรัสศรีวิชัย. เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
47. Schulz, P.C., guez, M.S., Del Blanco, L.F., and Pistonesi, M., *Emulsification properties of chitosan*. Colloid & Polymer Science, 1998. **276**(12): 1159-1165.
48. Zhang, X. and Bai, R., *Mechanisms and kinetics of humic acid adsorption onto chitosan-coated granules*. Journal of Colloid and Interface Science, 2003. **264**(1): 30-38.
49. Bailey, S.E., Olin, T.J., Bricka, R.M., and Adrian, D.D., *A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals*. Water Research, 1999. **33**(11): 2469-2479.
50. Babel, S., *Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review*. Journal of Hazardous Materials, 2003. **97**(1-3): 219-243.
51. Clogston, J.D. and Patri, A.K., *Zeta potential measurement*. Methods Mol Biol, 2011. **697**: 63-70.
52. Karthikeyan, G., Anbalagan, K., and Andal, N.M., *Adsorption dynamics and equilibrium studies of Zn (II) onto chitosan*. Journal of Chemical Sciences, 2004. **116**(2): 119-127. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
53. Stang, M., Karbstein, H., and Schubert, H., *Adsorption kinetics of emulsifiers at oil—water interfaces and their effect on mechanical emulsification*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1994. **33**(5): 307-311.
54. Chiou, M.S. and Li, H.Y., *Adsorption behavior of reactive dye in aqueous solution on chemical cross-linked chitosan beads*. Chemosphere, 2003. **50**(8): 1095-1105.
55. Zhang, M., et al., *Removal of ammonium from aqueous solutions using zeolite synthesized from fly ash by a fusion method*. Desalination, 2011. **271**(1-3): 111-121.
56. Liu, G.-F.C.a.M.-H., *Adsorption of L-lysine from aqueous solution by spherical lignin beads: kinetics and equilibrium studies*. bioresources, 2012. **7**(1): 298-314.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม		
ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก.ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

5. สีหรือกลิ่น	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัด ขณะทำการเก็บตัวอย่าง น้ำ
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนต์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน	Kjeldahl

	อุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.		
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion	
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)			
16.1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP	
16.2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.		
16.3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.		
16.4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.		
16.5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.		
16.6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.		
16.7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.		
16.8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.		
16.9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.		
16.10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.		Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด
16.11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.		

		Inductively Coupled Plasma : ICP
16.12.ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Techique

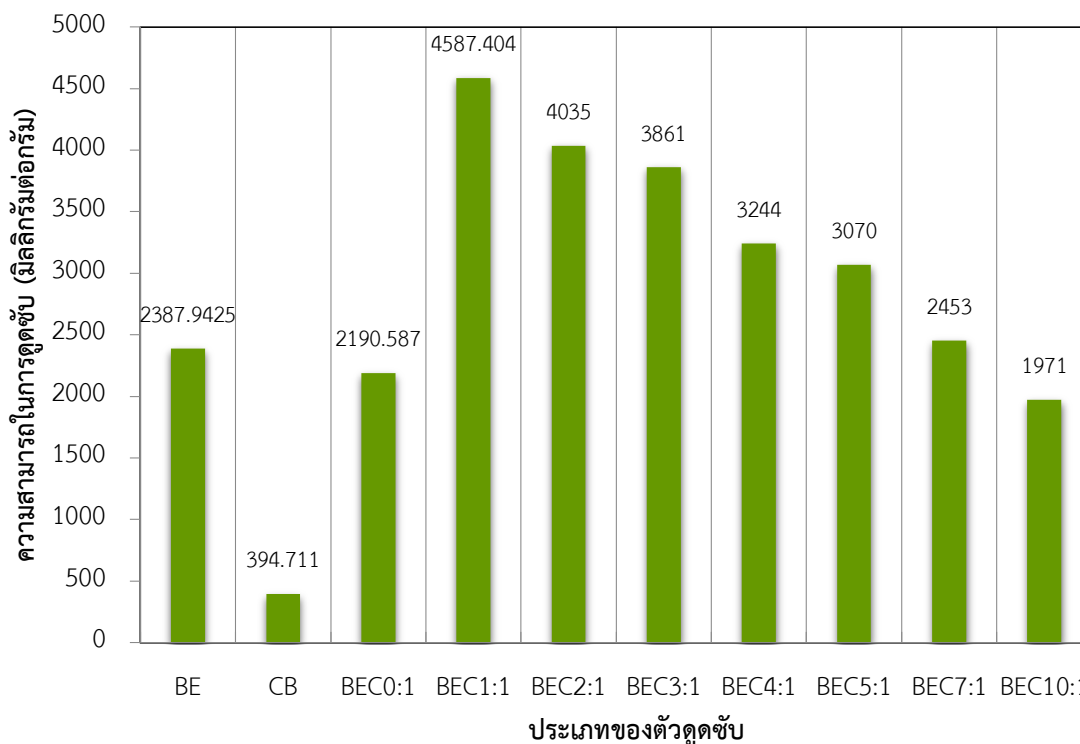
แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



ภาคผนวก ข

สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซาน

สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซาน



รูปที่.ข1 แสดงความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับต่างชนิดกัน ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 0.2 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานตั้งแต่ว้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 360 นาที และความเร็รรอบ 130 รอบต่อนาที

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซาน (BEC) ที่สัดส่วนต่างกัน และทำการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอีก 3 ชนิด คือ ตัวดูดซับดินฟอกที่ผ่านการตัดแปร (BE) ตัวดูดซับไคโตซานชนิดเม็ด (CB) และตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซาน ณ สภาวะเดียวกัน คือ ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 2 กรัมเปียก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงานตั้งแต่ว้อยละ 3 ของน้ำหนักต่อปริมาตร เวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 360 นาที และความเร็รรอบ 130 รอบต่อนาที ซึ่งแสดงรูปที่.1 พบว่าดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วนดินฟอกต่อไคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าการดูดซับมากที่สุด คือ 4,587 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามสัดส่วนของดินฟอกที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องบนพื้นผิวของตัวดูดซับดินฟอก-ไคโตซานที่สัดส่วน

ดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกมากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น ด้วยเหตุนี้เอง ทำให้ตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สามารถจับกับประจุลบของของไหลตัดชิ้นงานได้ดีกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น นอกจากนี้ตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 สามารถดูดซับได้ดีกว่าตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด เป็นผลมาจากตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีรูปร่างเป็นเส้นใย ทำให้มีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับโคโตซานชนิดเม็ด จึงทำให้ตัวดูดซับดินพอก-โคโตซานที่สัดส่วนดินพอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 มีค่าการดูดซับจำเพาะสูงกว่า



ภาคผนวก ค

สูตรและตัวอย่างการคำนวณ

1. เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)

$$\% = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของของไหลตัดชิ้นงาน (ร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร)

C_e = ความเข้มข้นของของไหลตัดชิ้นงาน ณ สภาวะสมดุล (ร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร)

2. สูตรที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้สมการของบอยและคณะ

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 Bt) \quad (1)$$

และคำนวณค่า F ได้จากสมการ 2

$$F = \frac{q_t}{q_e} \quad (2)$$

เมื่อ F = เศษส่วนการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ

q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = เวลา (นาที)

B = ค่าคงที่ของบอย (Boyd's constant) นาที⁻¹

ซึ่งจะคำนวณหาค่า Bt ได้จากสมการ 3 และ 4 โดยมีเงื่อนไข ดังนี้

$$\text{ถ้า } F > 0.85 ; \quad Bt = -0.4977 - \ln(1 - F) \quad (3)$$

$$\text{ถ้า } 0 < F < 0.85 ; \quad Bt = \left(\sqrt{\pi} - \sqrt{\pi - \pi^2 F/3} \right)^2 \quad (4)$$

จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bt กับ t กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และสามารถหาค่าคงที่ของบอย (Boyd's constant)

จากค่าคงที่ของบอย (Boyd's constant) จะทำให้ทราบสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยจะคำนวณได้จากสมการ 5

$$B = \frac{\pi^2 D_i}{r^2} \quad (5)$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
 r = รัศมีรูปทรงของตัวดูดซับ (นาโนเมตร)

3. อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

โดยที่ K สามารถคำนวณได้จากสมการ 6

$$K = \frac{q_e}{C_e} \quad (6)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e = ความเข้มข้นของไหลตัดชิ้นงาน ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 และคำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) ได้จากสมการ 7

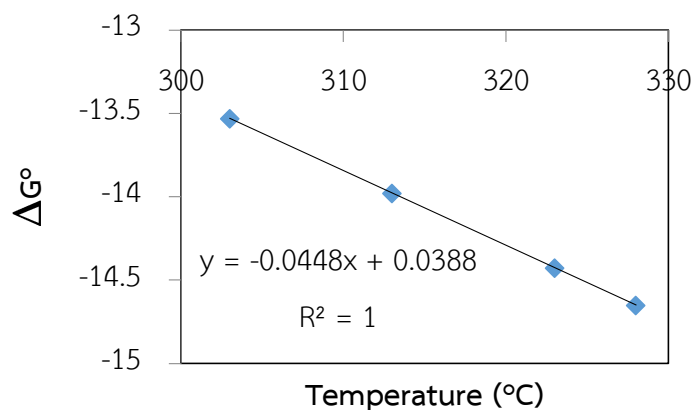
$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (7)$$

จากนั้นคำนวณการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) ได้จากสมการ 8

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (8)$$

จากสมการ 8 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔG° กับ T โดยที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) จากความชัน และหาการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) หาได้จากจุดตัดแกน y

ตัวอย่างการคำนวณ



จากรูป ค1 แสดงอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงานบนตัวดูดซับดินฟอก-โคโตซานที่ สัตส่วนดินฟอกต่อโคโตซานเท่ากับ 1 ต่อ 1 (BEC1:1)

คำนวณค่า K จากสมการ $K = \frac{q_e}{C_e}$

และคำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) ได้จากสมการ $\Delta G^\circ = -RT \ln K$

แสดงดังตาราง

parameter	Temperature (°C)			
	30	40	50	55
lnK	5.4	5.4	5.4	5.4
ΔG°	-13.5	-13.9	-14.4	-14.6

จากสมการอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับของไหลตัดชิ้นงาน $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔG° กับ T โดยให้ ΔG° เป็นแกน y และแกน x คือ T จะได้ความชันเท่ากับ ΔS° และจุดตัดแกน y เท่ากับ ΔH°

จากกราฟ $y = -0.0448x + 0.0388$

$\Delta S^\circ = 0.0448 \text{ kJ/mol K}$

$\Delta H^\circ = 0.0388 \text{ kJ/mol}$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนิตยา เนาวนัด เกิดเมื่อวันที่ 16 เมษายน พุทธศักราช 2532 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2554 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

ผลงาน

Naowanat, N., and Pongstabodee, N., “Removal of water emulsifiable cutting fluid from cooling water by adsorption on chitosan bead and modified chitosan”, The 4th TICHe International Conference 2014, December 2014, Chiang Mai, Thailand.

Naowanat, N., Thouchprasitchai, N., and Pongstabodee, N., Adsorption of emulsified oil from metalworking fluid on activated bleaching earth-chitosan-SDS composites: optimization, kinetic, isotherms. This journal has been accepted to publish in Journal of Environmental Management.

Nitiya Naowanat and Nuttaya Pongstabodee “Removal of cutting oil in wastewater by adsorption from chitosan adsorbent.” Patent No. MSD57I0066