



การกำจัดมอนอ ไต และไตรกลีเซอไรด์ จากไบโอดีเซล
ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยซิลิกาฟังก์ชันอะมิโน
และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก

REMOVAL OF MONO -, Di - AND TRIGLYCERIDE
FROM BIODIESEL BY ADSORPTION USING
AMINO AND CARBOXYLIC - FUNCTIONALIZED SILICA

นายทวยเทพ	สุทธหลวง	รหัส 57365591
นายประวันวิทย์	บัวบุตร	รหัส 57365713
นายสุรเดช	วงศ์ชมภู	รหัส 57365874

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2560

หัวข้อโครงการ	การกำจัดมอนอ ได และไตรกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซลด้วยกระบวนการดูดซับโดยซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายทวยเทพ สุทธิหลวง	รหัส	57365591
	นายประวันวิทย์ บัวบุตร	รหัส	57365713
	นายสุรเดช วงศ์ชมพู	รหัส	57365874
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.วิวัฒน์ชัย เยาวรัตน์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2560		

บทคัดย่อ


ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสังเคราะห์และตรวจสอบการใช้ซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกในการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซลเพื่อกำจัดมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ อันเป็นสารประกอบที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซลทำให้เกิดการอุดตันหัวฉีดภายในเครื่องยนต์ นอกจากนี้เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการกำจัดมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ โดยการใช้กระบวนการดูดซับจากการสังเคราะห์ซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Silica Surfactant) ด้วยวิธีการพลาสมา และซิลิกาที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Silica Non-Surfactant) ด้วยกระบวนการโซลเจล นอกจากนี้ยังใช้ซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิวฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ผลการตรวจสอบทำให้สามารถยืนยันการฟังก์ชันกันระหว่างซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนโดยเกิดการสั่นของพันธะ N-H ขึ้นที่ยอด 1555 และ 1490 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกตรวจพบยอดที่ 1658 cm^{-1} ซึ่งทำให้พิสูจน์ได้ว่าการทำฟังก์ชันของซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันทั้ง 2 ชนิดเกิดขึ้นจริง เมื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ออกจาก ไบโอดีเซลที่สภาวะในการดูดซับ 25 50 และ 70 องศาเซลเซียส โดยไบโอดีเซลเริ่มต้นมีมอนอกลิเซอไรด์ 2.552 wt% ไดกลีเซอไรด์ 0.121 wt% และไตรกลีเซอไรด์ 0.086 wt% พบว่าการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ที่ดีที่สุด คือการดูดซับด้วยซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถลดปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ได้ 6% และอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน ใช้ซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว สามารถลดปริมาณไดกลีเซอไรด์ได้ 20%

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การกำจัดมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ จากไบโอดีเซลด้วยกระบวนการดูดซับโดยซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากอาจารย์หลาย ๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. วัฒนชัย เยาวรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ซึ่งคอยติดตามความคืบหน้าของโครงการ คอยให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาเพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ไบโอดีเซลเนอรัจี้ จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนในด้านน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อนำมาใช้ในการทดลอง และอุปกรณ์ในการตรวจวัดต่าง ๆ ทำให้ปริญญานิพนธ์สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอขอบคุณบิดา มารดา ผู้ที่คอยให้กำลังใจและแรงใจในการศึกษา ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องอีกหลายท่านที่ช่วยให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ อันมีส่วนที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงและเสร็จสมบูรณ์



คณะผู้ดำเนินดำเนินโครงการ
นายทวยเทพ สุทธหลวง
นายประวันวิทย์ บัวบุตร
นายสุรเดช วงศ์ชมพู
กรกฎาคม 2561

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.3.1 ตัวแปรต้น.....	2
1.3.2 ตัวแปรตาม.....	2
1.3.3 ตัวแปรควบคุม.....	2
1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไปโอดีเซล.....	4
2.2 สิ่งเจือปนภายในน้ำมันไปโอดีเซล.....	4
2.2.1 กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid).....	5
2.2.2 มอนอกลิเซอไรด์ (Monoglycerides).....	5
2.2.3 ไดกลีเซอไรด์ (Diglycerides).....	6
2.2.4 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides).....	6
2.3 กระบวนการดูดซับ.....	7
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	7
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ.....	8
2.3.3 สารลดแรงตึงผิว.....	9
2.4 สภาพมีขั้วของโมเลกุล.....	10
2.4.1 อิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity).....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ขั้วของโมเลกุล.....	11
2.4.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโคเวเลนต์.....	12
2.4.4 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond).....	13
2.5 ซิลิกาและหมู่ฟังก์ชัน.....	13
2.5.1 ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂).....	13
2.5.2 หมู่ฟังก์ชัน (Functionalized Group).....	14
2.6 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	17
2.6.1 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว (Solution Plasma).....	17
2.6.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์.....	20
2.6.3 เครื่องมือวัดแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC).....	22
2.6.4 เครื่องมือวัด Brunauer-Emmett-Teller (BET).....	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.7.1 งานวิจัยที่ศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกากับหมู่ฟังก์ชัน.....	27
2.7.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับมอนอ ได และไตรกลีเซอไรด์.....	28
2.7.3 งานวิจัยที่ศึกษาความเป็นรูพรุนของซิลิกา.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	31
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.3 วิธีการทดลอง.....	32
3.3.1 การเตรียมการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	32
3.3.2 การเตรียมการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂) ให้จับกับหมู่ฟังก์ชัน.....	33
3.3.3 การทดสอบตัวดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์.....	35
3.3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระ.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
4.1 การวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนของซิลิกา.....	37
4.2 การวิเคราะห์ฟังก์ชันของซิลิกา.....	39
4.3 ศึกษาการใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับ.....	41
4.3.1 ขนาดของรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับของซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก.....	43
4.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ.....	44
4.3.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบหาค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก ก.....	54
ภาคผนวก ข.....	58
ภาคผนวก ค.....	60
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	67



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การดูดัชนีทางกายภาพและการดูดัชนีทางเคมี.....	8
2.2 ทิศทางของข่าวสารต่าง ๆ.....	11
2.3 กลุ่มของสารอินทรีย์ที่สำคัญตามชนิดของหมู่ฟังก์ชัน.....	14
2.4 ช่วงคลื่นของแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบต่าง ๆ.....	21
4.1 คุณสมบัติของซิลิกาตัวอย่างและซิลิกาที่เติมสารเพิ่มรูปูน.....	39



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	4
2.2 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมัน ทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล 18 ตัว.....	5
2.3 โครงสร้างมอนอกลิเซอไรด์.....	6
2.4 โครงสร้างไดกลีเซอไรด์.....	6
2.5 โครงสร้างไตรกลีเซอไรด์.....	6
2.6 กลไกการดูดซับ.....	7
2.7 Cetyltrimethyl Ammonium Bromide (CTAB).....	9
2.8 อิเล็กตรอนถูกดึงดูดเท่า ๆ กัน.....	10
2.9 อิเล็กตรอนถูกดึงดูดไม่เท่ากัน.....	10
2.10 อิเล็กตรอนถ่ายเทจากอะตอมหนึ่งไปสู่อีกอะตอมหนึ่ง.....	10
2.11 ลักษณะ Tetrahedral Coordination ของออกซิเจนกับซิลิกา (a) Ball และ Stick Model, (b) Solid Tetrahedron, (c) Skeletal Tetrahedron, และ (d) Space-Filling Mode.....	13
2.12 ขนาดของทรายที่แตกต่างกันไป.....	14
2.13 โครงสร้างของเอมีน.....	15
2.14 เอมีนเกิดพันธะไฮโดรเจน.....	16
2.15 Carboxyl Group.....	17
2.16 แบบจำลองของพลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	19
2.17 ไดอะแกรมของการผลิตพลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	19
2.18 ส่วนประกอบของเครื่อง FT-IR.....	20
2.19 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	23
2.20 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	24
2.21 ระบบการใส่สารตัวอย่าง a. แสดงลักษณะของ Flash vaporizer injection port และ b. แสดง Flash vaporizer ที่ใช้กับ Glass Column.....	24
2.22 เครื่องบันทึกได้โครมาโทแกรม FID ที่ผลิตใช้ใน GC มีลักษณะต่าง ๆ กัน.....	25
2.23 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนของซิลิกาที่ทำหน้าที่เป็นกรดคาร์บอกซิลิก.....	27
3.1 แผนภาพการเตรียมการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์.....	32
3.2 แผนภาพการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์กับอะมิโนฟังก์ชัน.....	33
3.3 แผนภาพการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์กับคาร์บอกซิลิกฟังก์ชัน.....	34
3.4 แผนภาพการทดสอบตัวดูดซับมอนอ ได และไตรกลีเซอไรด์.....	35
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับของไนโตรเจนและความดันสัมพัทธ์.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	38
4.3 หมู่ฟังก์ชันของซิลิกา a) SiO_2 b) $\text{SiO}_2 - \text{NH}_2$ และ c) $\text{SiO}_2 - \text{COOH}$	40
4.4 การเกิดซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก.....	41
4.5 การเปรียบเทียบปริมาณสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยซิลิกาที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกันกับไบโอดีเซลตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	42
4.6 การเปรียบเทียบปริมาณสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชัน 2 ชนิด กับไบโอดีเซลตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	43
4.7 การเปรียบเทียบปริมาณสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	44
4.8 การเปรียบเทียบการดูดซับกรดไขมันอิสระของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ได้มาจากธรรมชาติ เป็นพลังงานทดแทนที่นำมาใช้ในปัจุบันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรม ภาคการเกษตรและยังรวมไปถึงภาคการขนส่ง เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงชนิดที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีคุณสมบัติการเผาไหม้คล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซลที่ได้จากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมอย่างมาก อีกทั้งยังสามารถใช้ทดแทนกันได้ จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญและความน่าสนใจของเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ประโยชน์ [1]

อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลยังมีข้อจำกัดในการใช้งานจริง เนื่องจากภายในไบโอดีเซลมีสารชนิดหนึ่งที่เรียกว่า มอนอกลิเซอไรด์ (Monoglycerides) ซึ่งเป็นสารชนิดหนึ่งที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งเมื่อหลงเหลืออยู่ภายในไบโอดีเซลจะส่งผลให้เกิดไดกลีเซอไรด์ (Diglycerides) และไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) [2] ซึ่งสารข้างต้นเหล่านี้ล้วนแต่ส่งผลต่อการอุดตันของหัวฉีดในเครื่องยนต์ เนื่องจากการจับตัวกันเป็นตะกอนเมื่อเกิดการเผาไหม้ทำให้เกิดความไม่เสถียรของเครื่องยนต์ ตลอดจนก่อให้เกิดเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจกอันเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ในที่สุด [3]

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ และสารปนเปื้อนชนิดอื่นๆในไบโอดีเซล พบว่าการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆในไบโอดีเซลในภาคอุตสาหกรรมนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น กระบวนการล้างด้วยน้ำ (Water Washing Biodiesel) จุดประสงค์หลักเพื่อกำจัดเมทานอล และกลีเซอริน [4] นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสารเจือปนอื่น ๆ ได้เช่นกัน นอกจากนี้กระบวนการที่นิยมใช้ซึ่งสามารถแยกไบโอดีเซลออกจากสารประกอบอื่น ๆ ได้คือ กระบวนการกลั่นไบโอดีเซล โดยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้น มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ จะถูกแยกออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนนี้ [5, 6, 7] และนอกจากนี้ในส่วนของงานวิจัยยังมีการศึกษาการกำจัดสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลด้วยวิธีการดูดซับ เช่น การใช้ซิลิกาในการดูดซับของสเตอรอลกลูโคไซด์ มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ในน้ำมันปาล์มได้ [6] ตลอดจนการใช้ซิลิกาจากแกลบ [8] ผงแกรไฟต์ [9] และซิลิกาเคลือบอะลูมิเนียมออกไซด์ [10] เป็นตัวดูดซับ จากงานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนแต่ละชนิดแตกต่างกันไป

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูล ทำให้ทราบว่ากระบวนการในการกำจัดมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ในวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ใช้พลังงานในการกำจัดสารปนเปื้อนที่สูง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งได้ใช้สารลดแรงตึงผิว CTAB หรือ Cetyltrimethyl Ammonium Bromide ในการสังเคราะห์เพื่อสร้างความแตกต่างของขนาดรูพรุน และเรียกซิลิกาที่ต่างกันสองชนิดว่า ซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Silica Surfactant) และซิลิกาที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วย

สารลดแรงตึงผิว (Silica Non Surfactant) และได้นำซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิวมาทำฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่สนใจ ออกจากไบโอดีเซล โดยมีข้อสันนิษฐานว่า พื้นที่ผิวและการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไป จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนที่สนใจทำได้ดีขึ้น [11, 12] โดยใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับในอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษา คือ 25 50 และ 70 องศาเซลเซียส เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างในการกำจัดมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ในสภาวะต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อกำจัดมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ออกจากไบโอดีเซล
- 1.2.2 เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการการใช้ตัวดูดซับ

1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.3.1 ตัวแปรต้น

- 1.3.1.1 ซิลิกาที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Silica Non-Surfactant)
- 1.3.1.2 ซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Silica Surfactant)
- 1.3.1.3 หมู่ฟังก์ชันที่เชื่อมต่อกับซิลิกาที่ผ่านการบำบัด ($-NH_2$, $-COOH$)
- 1.3.1.4 อุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ (25 50 และ 70 องศาเซลเซียส)

1.3.2 ตัวแปรตาม

- 1.3.2.1 ความแตกต่างของรูพรุนระหว่างซิลิกาที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัด
- 1.3.2.2 หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหลังการสังเคราะห์
- 1.3.2.3 ปริมาณของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เหลืออยู่
- 1.3.2.4 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

- 1.3.3.1 ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลต่อรอบการทดลอง
- 1.3.3.2 ปริมาณของซิลิกาที่ใช้ในการดูดซับต่อรอบการทดลอง

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

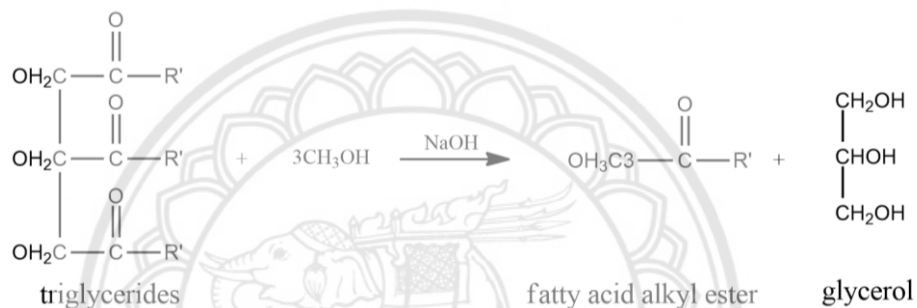
- 1.4.1 ห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.4.2 ห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากทั้งน้ำมันพืชและไขมันสัตว์โดยผ่านกระบวนการทางเคมี ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification) โดยทำปฏิกิริยากับสารประกอบแอลกอฮอล์ และมีสารประกอบที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเกิดเป็นสารประกอบแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Alkyl Ester) และมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลพลอยได้ [1] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

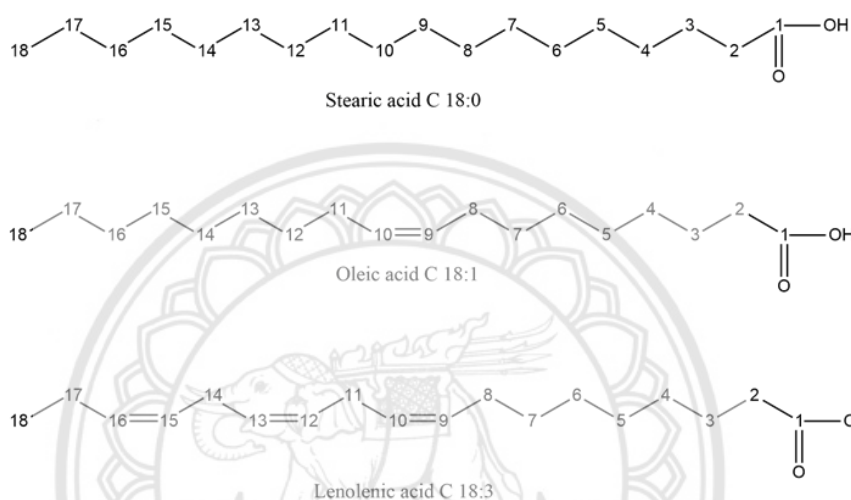
ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเพียงชนิดเดียวที่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปได้ทันที โดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยน หรือปรับแต่งเครื่องยนต์ โดยที่กำลังเครื่องแรงบิด การจุดระเบิด และอัตราการกินน้ำมันยังคงเหมือนเดิมและสามารถเลือกได้ว่าจะใช้ไบโอดีเซล ร้อยละ 100 เพียงอย่างเดียวหรือจะใช้ผสมกับน้ำมันปิโตรเลียมในอัตราส่วนต่าง ๆ ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเพียงชนิดเดียว ที่ได้รับการรับรองจากสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งศุนย์ยานยนต์แห่งชาติสหรัฐอเมริกา (US-EPA) ว่าในไอเสียนั้นมีค่ามลพิษต่ำ มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ โดยผ่านการทดสอบทั้ง Clean Air Act และ Energy Policy Act [7]

2.2 สิ่งเจือปนภายในน้ำมันไบโอดีเซล

สิ่งเจือปนที่พบในไบโอดีเซล จากวัตถุดิบตั้งต้น และหลังจากผ่านขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะพบกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) และยังรวมไปถึงมอนอกลิเซอไรด์ (Monoglycerides) ไดกลีเซอไรด์ (Diglycerides) และไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) เป็นต้น

2.2.1 กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)

กรดไขมัน (Fatty Acid) คือ โครงสร้างของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid) ซึ่งมีสายโซ่เป็นแบบโซ่ตรง หรือแตกกิ่ง (Aliphatic Hydrocarbon) โดยกรดไขมันที่เสถียรจะมีคาร์บอนเป็นเลขคู่ และมักจะ ประกอบด้วยคาร์บอนตั้งแต่ 12 ถึง 26 อะตอม แต่ที่พบบ่อยที่สุดในชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว คือ คาร์บอน 16 และ 18 อะตอม โดยทั่วไปแล้ว กรดไขมันสามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลอื่น ๆ ได้ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของ ไตรกลีเซอไรด์ แต่เมื่อใดก็ตามที่โมเลกุลของกรดไขมันไม่ได้ไปทำปฏิกิริยาหรือเชื่อมต่อกับ โมเลกุลอื่นเมื่อนั้นมันจะถูกเรียกว่า กรดไขมันอิสระ



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมัน ทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล 18 ตัว

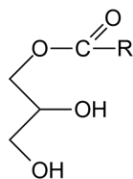
การเกิดกรดไขมันอิสระเป็นต้นเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียอาหาร (Food Spoilage) คือ การเกิดกลิ่นผิดปกติ ที่เรียกว่า กลิ่นหืน (Rancidity) และทำให้ค่าความเป็นกรด (Acid Value, AV) ของน้ำมันสูงขึ้น [11] สำหรับการคำนวณหาค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระแสดงในหัวข้อ 3.3.4

2.2.2 มอนอกลิเซอไรด์ (Monoglycerides)

มอนอกลิเซอไรด์ เป็นกลีเซอไรด์ที่โมเลกุลกลีเซอรอลมีพันธะเอสเทอร์กับโมเลกุลหนึ่งของกรดอะมิโน ซึ่งอาจจะเรียกชื่อที่ตรงกับโครงสร้างโมเลกุลและเป็นนิยามใช้ในปัจจุบัน คือ Acylglycerol และ Monoacylglycerol ดังรูปที่ 2.3

โดยมอนอกลิเซอไรด์เกิดขึ้นจากทั้งกระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการเคมี หรือที่เรียกว่า กระบวนการทางชีวเคมี อาทิเช่น การแยกสลายไตรกลีเซอไรด์ด้วยน้ำอาศัยปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลเปสที่ช่วยย่อยสลายไลโปโปรตีน การแยกสลายไดกลีเซอไรด์ด้วยน้ำอาศัยปฏิกิริยาของ

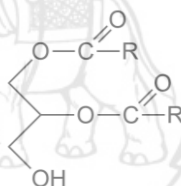
เอนไซม์ไลเปสที่ช่วยย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์ และเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) ในกระบวนการ Alkanoylation ที่เปลี่ยนกลีเซอรอลไปเป็นไขมัน [13]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างมอนอกลิเซอไรด์

2.2.3 ไตรกลีเซอไรด์ (Diglycerides)

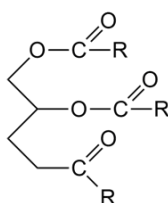
ไตรกลีเซอไรด์ เป็นกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยไฮดรอกซิลไขมันคู่ที่มีพันธะโคเวเลนต์กับโมเลกุลของกลีเซอรอลผ่านพันธะเอสเทอร์ โดยมีชื่อเรียกเป็นที่นิยมน่า Diacylglycerol (DAG) โดยเกิดจากกรดไขมันสองโมเลกุลทำปฏิกิริยากับหมู่ $-OH$ ของกลีเซอรอล จึงจะทำให้ได้ไตรกลีเซอไรด์ [14] ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างไตรกลีเซอไรด์

2.2.4 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides)

ไตรกลีเซอไรด์ หรือไตรเอซิลกลีเซอรอล (Triacylglycerol) เป็นไขมันที่ประกอบด้วยกรดไขมันสามโมเลกุลรวมตัวกับกลีเซอรอลหนึ่งโมเลกุล กรดไขมันที่มาประกอบเป็นไตรกลีเซอไรด์นั้น อาจจะเป็นกรดไขมันชนิดเดียวกัน [15] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างไตรกลีเซอไรด์

2.3 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) [12, 16]

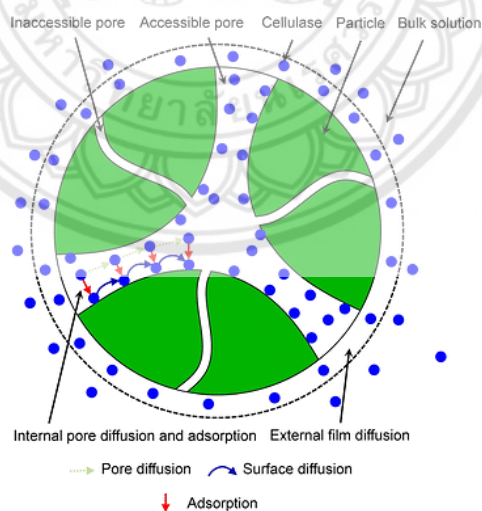
2.3.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของเหลวหรือของแข็งมาเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเกิดขึ้นเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Intra Particle Diffusion หรือ Pore Diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดของตัวถูกดูดซับบนผิวในรูพรุน พื้นผิวตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะนี้อาจเกิดการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือแรงทางเคมี หรือเกิดขึ้นทั้งสองชนิดพร้อมกัน [12, 16, 17]



รูปที่ 2.6 กลไกการดูดซับ

ที่มา : Haiyan Zhang และคณะ (2016) [17]

2.3.2 ประเภทของการดูดซับ

2.3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในช่องของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในช่องของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในช่องของเหลวเข้ามาติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (Activation Energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดขึ้นกันได้หลายชั้น (Multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกัน อยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน [12]

2.3.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมชั้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรงแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ดังตารางที่ 2.1 [12]

ตารางที่ 2.1 การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ	50-400 kJ/mol	20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	สูง	ต่ำ
การผันกลับ	ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้ เป็นส่วนใหญ่
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
การเกิดพลังงานก่อกัมมันต์	มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงโคเวเลนต์	แรงแวนเดอร์วาลส์
การประยุกต์ใช้	สามารถหาอัตราการดูดซับและคายซับได้	สามารถหาพื้นที่ผิวสัมผัสและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับได้

ที่มา : <https://pradthana.wordpress.com/tag/การดูดซับ> [12]

2.3.3 สารลดแรงตึงผิว (Surface Active Agent)

สารลดแรงตึงผิวมีชื่อเรียกโดยทั่วไปทางวิทยาศาสตร์ว่า “Surfactant” สารลดแรงตึงผิวเดิมทีเดิยมาจากภาษาเยอรมันว่า Tensid ซึ่งตั้งโดยนักเคมีชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1960 สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Group)

ส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและโพลิเมอร์สังเคราะห์ ลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิวคือเมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ อย่างขึ้น เช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียกและกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะพยายามหนีน้ำโดยไปเกาะกับพื้นผิวที่ว่าง เช่น อากาศ ส่วนที่ชอบน้ำจะยังคงอยู่ในน้ำ สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทซึ่งแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Group) ได้แก่

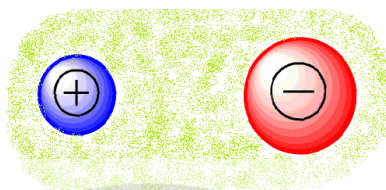
1. Anionic Surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำให้ประจุลบ อาทิเช่น Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) เป็นต้น
2. Cationic Surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำให้ประจุบวก อาทิเช่น Cetyltrimethyl Ammonium Bromide (CTAB) ดังรูปที่ 2.7 เป็นต้น
3. Nonionic Surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ อาทิเช่น Polyoxyethylene Alcohol เป็นต้น
4. Amphoteric Surfactant หรือ Zwitterionic Surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่ชอบน้ำ สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะมีคุณสมบัติที่แสดงออกว่าจะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของสภาวะแวดล้อม อาทิเช่น b-N-Alkylaminopropionic Acids เป็นต้น [18, 28]



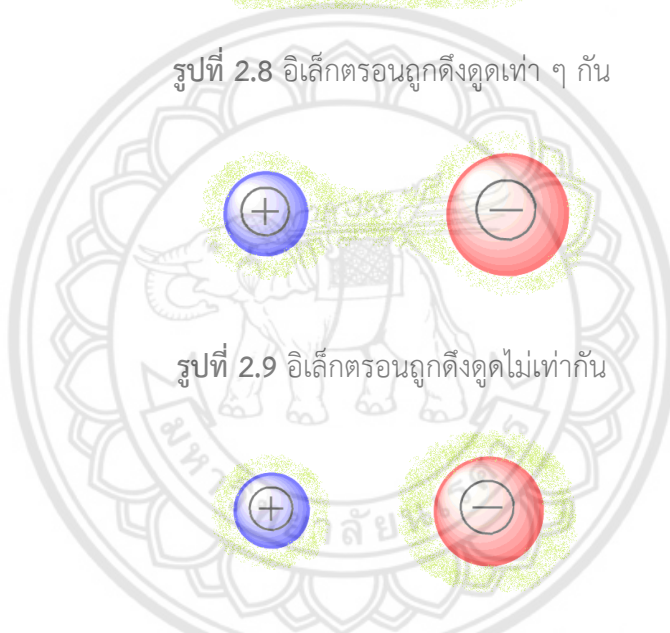
รูปที่ 2.7 Cetyltrimethyl Ammonium Bromide (CTAB)

2.4 สภาพมีขั้วของโมเลกุล

ในพันธะโคเวเลนต์ อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะจะเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอะตอมทั้งสองที่สร้างพันธะกัน ถ้าพบว่า อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเคลื่อนที่อยู่ตรงกลางระหว่างอะตอมพอดี แสดงว่าอะตอมคู่นั้นมีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเท่ากัน แต่ถ้าพบว่าอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเคลื่อนที่อยู่ใกล้อะตอมใดอะตอมหนึ่งมากกว่าอีกอะตอมหนึ่ง แสดงว่าอะตอมคู่นั้น มีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะไม่เท่ากัน [19] ดังรูปที่ 2.8 2.9 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.8 อิเล็กตรอนถูกดึงดูดเท่า ๆ กัน



รูปที่ 2.9 อิเล็กตรอนถูกดึงดูดไม่เท่ากัน

รูปที่ 2.10 อิเล็กตรอนถ่ายเทจากอะตอมหนึ่งไปสู่อีกอะตอมหนึ่ง

2.4.1 อิเล็กโทรเนกาติวิตี (Electronegativity)

ค่าที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนของธาตุที่สร้างพันธะกันเป็นสารประกอบเรียกว่า อิเล็กโทรเนกาติวิตี (Electronegativity) จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนประจุในนิวเคลียส และระยะระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสธาตุที่มีจำนวนประจุในนิวเคลียสมาก แต่มีระยะระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสต่างกันน้อยจะมีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีสูงกว่า ธาตุที่มีจำนวนประจุในนิวเคลียสน้อย แต่มีระยะระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสต่างกันมาก [19]

ค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีนำไปใช้อธิบายสมบัติบางประการของสารได้ เช่น ขั้วของพันธะโคเวเลนต์ ถ้าพันธะโคเวเลนต์เกิดจากอะตอมที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีเท่ากัน เช่น พันธะในโมเลกุล

ของ H_2 O_2 N_2 F_2 Br_2 I_2 และ P_4 อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะจะอยู่ตรงกลางระหว่างอะตอมทั้งสอง เป็นส่วนใหญ่ หรืออาจกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะจะถูกนิวเคลียสของอะตอมทั้งสองดึงดูดด้วยแรงเท่า ๆ กัน เราเรียกพันธะโคเวเลนต์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า พันธะโคเวเลนต์ไม่มีขั้ว [19]

ถ้าพันธะโคเวเลนต์เกิดจากอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกัน อะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีมากกว่า จะดึงอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะเข้ามาใกล้ตัวมันเอง อะตอมนี้จะแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นลบ และอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีน้อยกว่าจะถูกดึงอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะไป อะตอมนี้จะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวก เราเรียกพันธะโคเวเลนต์ชนิดนี้ว่า พันธะโคเวเลนต์มีขั้ว โดยการแสดงขั้วของพันธะโคเวเลนต์ ใช้สัญลักษณ์ δ^- และ δ^+ และความแรงของขั้วของพันธะขึ้นกับผลต่างของค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอมคู่สร้างพันธะ โดยถ้าค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีแตกต่างกันมากกว่า สภาพขั้วจะแรงกว่า เช่น $H-F$ มีสภาพขั้วแรงกว่า $H-Cl$ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าพันธะที่เกิดจากอะตอมต่างชนิดกันเป็นพันธะมีขั้ว [19]

2.4.2 ขั้วของโมเลกุล

มีวิธีพิจารณาว่าโมเลกุลใดมีขั้วหรือไม่มีขั้วมีหลักดังนี้

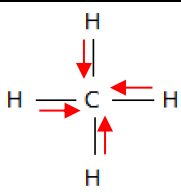
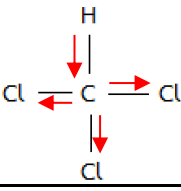

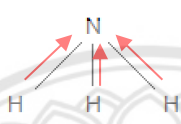
2.4.2.1 โมเลกุลใดที่มีแต่พันธะที่ไม่มีขั้วทั้งสิ้น เช่น H_2 O_2 N_2 Br_2 I_2 และ P_4

2.4.2.2 โมเลกุลใดที่มีพันธะมีขั้ว โมเลกุลนั้นอาจมีขั้วหรือไม่มีขั้วก็ได้ ขึ้นกับการเขียนเวกเตอร์แล้วดูการหักล้างกันของทิศทางของขั้วของพันธะรอบอะตอมกลาง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ทิศทางของขั้วสารต่าง ๆ

สาร	สูตรโครงสร้างแบบเส้น	รูปร่างโมเลกุล	สภาพขั้ว
$BeCl_2$	$Cl \leftarrow Be \rightarrow Cl$	เส้นตรง	ไม่มี
HCN	$H \rightarrow C \equiv N$	เส้นตรง	มี
BF_3		สามเหลี่ยมแบนราบ	ไม่มี
CH_2O		สามเหลี่ยมแบนราบ	มี

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ทิศทางของชั่วสารต่าง ๆ

CH ₄		ทรงสี่หน้า	ไม่มี
CHCl ₃		ทรงสี่หน้า	มี
H ₂ O		มุมงอ	มี
NH ₃		พีระมิดฐาน สามเหลี่ยม	มี

ที่มา : <http://www.kr.ac.th/tech/detchm48/b03.html>

2.4.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโคเวเลนต์

การเปลี่ยนแปลงสถานะของสารต้องมีการให้ความร้อนแก่สาร เพื่อให้อนุภาคของสารมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะหลุดออกจากกัน แสดงว่าสารแต่ละสถานะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อยจากของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงสถานะของสารโคเวเลนต์มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเท่านั้น ไม่มีการทำลายพันธะเคมี ดังนั้น สารที่มีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง แสดงว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง [19]

2.4.3.1 ประเภทของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโคเวเลนต์

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารโคเวเลนต์ที่มีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารโคเวเลนต์ที่มีขั้วมี 2 ชนิดรวมอยู่ด้วยกัน คือ แรงลอนดอนกับแรงดึงดูดระหว่างขั้ว และเรียกแรง ทั้งสองรวมกันว่า แรงแวนเดอร์วาลส์

- แรงลอนดอน (London Force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงอ่อน ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในสารทั่วไป และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุลของสาร
- แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole – Dipole Force) เป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงกระทำระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบของโมเลกุลที่มีขั้ว [19]

2.4.4 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)

แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากไฮโดรเจนอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์ กับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ๆ และมีขนาดเล็ก ได้แก่ F O และ N เป็นต้น แล้วเกิดพันธะโคเวเลนต์มีขั้วชนิดมีสภาพขั้วแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นนี้อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะจะถูกดึงเข้ามาใกล้อะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง มากกว่าทางด้านอะตอมของไฮโดรเจนมาก และอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ยังมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว จึงเกิดดึงดูดกันระหว่างอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวกับอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีอำนาจไฟฟ้าบวกสูงของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน [19]

2.5 ซิลิกาและหมู่ฟังก์ชัน

2.5.1 ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นสารประกอบทางเคมีชนิดหนึ่งที่เกิดจากธาตุซิลิกอนและธาตุออกซิเจน มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ที่ไม่สามารถละลายน้ำโดยจะพบว่าเกิดขึ้นหลายลักษณะ เช่น ควอตซ์ (Quartz) เป็นต้น ซึ่งซิลิกามีคุณสมบัติเป็นกรดที่สามารถทำปฏิกิริยากับด่างเข้มข้นได้ โดยซิลิกายึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์กับออกซิเจนอย่างแข็งแรง ในการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล [20] ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะ Tetrahedral Coordination ของออกซิเจนกับซิลิกา (a) Ball และ Stick Model, (b) Solid Tetrahedron, (c) Skeletal Tetrahedron, และ (d) Space-Filling Mode

ที่มา : ดร.พัชรินทร์ วรธนกุล.(2010) [20]

ลักษณะของซิลิกา แบ่งได้ 2 รูปแบบ ได้แก่

2.5.1.1 เป็นลักษณะของซิลิกาจากสิ่งมีชีวิต เช่น ซิลิกาที่มีในสาหร่ายเปลือกแข็ง เป็นต้น

2.5.1.2 เป็นรูปผลึกมีขนาดของผลึกที่แตกต่างกัน เช่น ทราวย เป็นต้น ดังรูปที่ 2.12





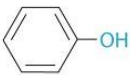



รูปที่ 2.12 ขนาดของทรายที่แตกต่างกันไป

ที่มา : <https://www.maxpixel.net/Stones-Silica-Grain-Rounded-Fine-Sand-390734>



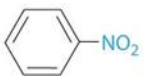
2.5.2 หมู่ฟังก์ชัน (Functionalized Groups)

หมู่ฟังก์ชัน คือ กลุ่มของอะตอมที่เป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุลอื่นจะทำให้เกิดการกำหนดสมบัติทางเคมีรวมทั้งสมบัติทางกายภาพของสารเคมีนั้น ๆ โดยสามารถจำแนกกลุ่มของสารอินทรีย์ที่สำคัญตามชนิดของหมู่ฟังก์ชัน [21, 22] ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กลุ่มของสารอินทรีย์ที่สำคัญตามชนิดของหมู่ฟังก์ชัน

Class	General Formula	Example	Common Name (Systematic Name)	Common Suffix/Prefix (Systematic)
Hydrocarbons				
Alkanes	RH	CH ₃ CH ₃	ethane	-ane
Alkenes	RR'C=CR''R'''	H ₂ C=CH ₂	ethylene (ethene)	-ene
Alkynes	RC≡CR'	HC≡CH	acetylene (ethyne)	(-yne)
Arenes	ArH ^a		benzene	-ene
Halogen-Containing Compounds				
Alkyl halides	RX	CH ₃ CH ₂ Cl	ethyl chloride (chloroethane)	halide (halo-)
Aryl halides	ArX ^a		chlorobenzene	halo-
Oxygen-Containing Compounds				
Alcohols	ROH ^a	CH ₃ CH ₂ OH	ethyl alcohol (ethanol)	-ol
Phenols	ArOH ^b		phenol	-ol
Ethers	ROR'	H ₃ CH ₂ COCH ₂ CH ₃	diethyl ether	ether
Aldehydes	RCHO		acetaldehyde (ethanal)	-aldehyde (-al)
Ketones	RR'C=O		acetone (2-propanone)	-one
Carboxylic acids	RCO ₂ H		acetic acid (ethanoic acid)	-ic acid (-oic acid)

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) กลุ่มของสารอินทรีย์ที่สำคัญตามชนิดของหมู่ฟังก์ชัน

Carboxylic Acid Derivatives				
Esters	$\text{RCO}_2\text{R}'$		methyl acetate (methyl ethanoate)	-ate (-oate)
Amides	RCONHR'		N-methylacetamide	-amide
Nitrogen-Containing Compounds				
Amines	$\text{RNH}_2, \text{RNHR}', \text{RNR}'\text{R}''$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_2$	ethylamine	-amine
Nitriles	$\text{RC}\equiv\text{N}$	$\text{H}_3\text{C}\equiv\text{N}$	acetonitrile	-nitrile
Nitro compounds	ArNO_2^a		nitrobenzene	nitro-

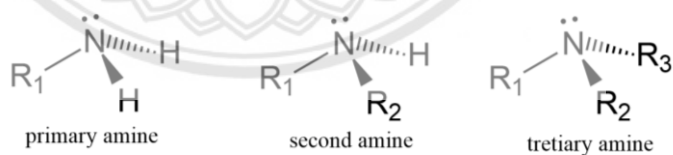
^aR indicates an alkyl group ^bAr indicates an aryl group.

ที่มา : <https://chem.libretexts.org>

จากการศึกษาจะพบว่า มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเชื่อมต่อกับซิลิกาแล้วนำมาประยุกต์เพิ่มเติมที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด อันได้แก่เอมีน และกรดคาร์บอกซิลิก

2.5.2.1 เอมีน (Amines)

เอมีน เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากหมู่แอลคิลหรือหมู่แอริลเข้าแทนที่ไฮโดรเจนในโมเลกุลของแอมโมเนีย ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันคือ หมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) โดยสารประกอบที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติทั่วไป และสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ซึ่งโครงสร้างของเอมีนเขียนได้ [21] ดังรูปที่ 2.13

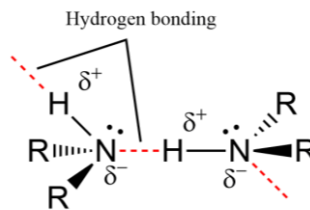


รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเอมีน

2.5.2.1.1 สมบัติทั่วไปของเอมีน

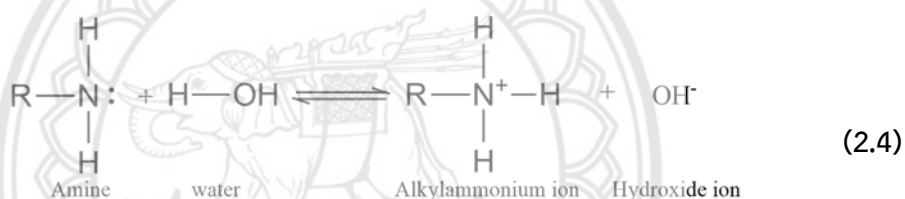
ก. จุดเดือดเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการมีมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น

ข. เมื่อเปรียบเทียบจุดเดือดของแอลเคน เอมีน และแอลกอฮอล์ ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกันพบว่า เอมีนมีจุดเดือดสูงกว่าแอลเคน จึงมีทั้งแรงลอนดอนและแรงดึงดูดระหว่างขั้ว นอกจากนี้เอมีนยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ด้วย [21] ดังรูปที่ 2.14

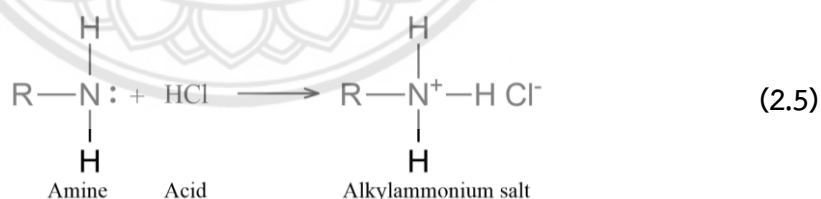


รูปที่ 2.14 เอมีนเกิดพันธะไฮโดรเจน

ค. เอมีนละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายมีขั้ว สารละลายของเอมีนในน้ำมีสมบัติเป็นเบส เนื่องจากไนโตรเจนมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวซึ่งรับโปรตอนจากน้ำได้เกิดเป็น แอลคิลแอมโมเนียมไอออน เอมีนละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายมีขั้ว สารละลายของเอมีนในน้ำมีสมบัติเป็นเบส เนื่องจาก ไนโตรเจนมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวซึ่งรับโปรตอนจากน้ำได้เกิดเป็น แอลคิลแอมโมเนียมไอออน $[RNH^3^+]$ และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) [20] ดังสมการที่ 2.4

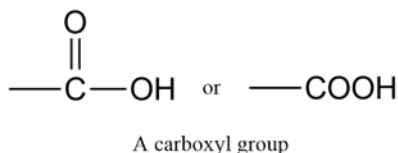


เอมีนมีสมบัติเป็นเบส เกิดปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือ ดังสมการที่ (2.5)



2.5.2.2 กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid)

กรดคาร์บอกซิลิกเป็นสารอินทรีย์มีสูตรทั่วไปเป็น $R-COOH$ โดยมีหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่อะตอมคาร์บอนเดียวกันเป็น หมู่ฟังก์ชัน [22] ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Carboxyl group

กรดคาร์บอกซิลิกมีทั้งชนิดที่เป็นกรดอะลิฟาติก เช่น กรดอะซีติกซึ่งมีหมู่แอลคิลเป็น CH_3 ที่สร้างพันธะกับ COOH และชนิดที่เป็นกรดอะโรมาติกที่มีหมู่ที่มาก่อพันธะกับ COOH เป็นหมู่อาริล (Ar) เช่น กรดเบนโซอิกที่มีหมู่อาริลเป็นหมู่ฟีนิล (Phenyl $\text{C}_6\text{H}_5\text{-R}$ และ PH) เป็นต้น [22]

2.5.2.2.1 สมบัติทางกายภาพของกรดคาร์บอกซิลิก [22]

ก. จุดเดือด โดยทั่วไปจุดเดือดของกรดคาร์บอกซิลิกสูงกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์แอลดีไฮด์ หรือคีโตน เมื่อมีมวลโมเลกุลของสารเท่ากันหรือใกล้เคียง การที่กรดคาร์บอกซิลิกมีจุดเดือดสูงมีผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง 2 โมเลกุลของกรดคาร์บอกซิลิก (Hydrogen Bonded Dimer) เกิดเป็นไดเมอร์ที่มีเสถียรภาพสูง เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวด้วยพันธะไฮโดรเจนถึง 2 พันธะ ส่งผลให้มวลโมเลกุลของกรดมีค่าเป็น 2 เท่าของมวลโมเลกุลเดิมจึงทำให้มีจุดเดือดสูง

ข. จุดหลอมเหลว โดยทั่วไปกรดคาร์บอกซิลิกที่มีคาร์บอนมากกว่า 8 อะตอมจะเป็นของแข็ง ยกเว้นกรดที่ไม่อิ่มตัวหรือมีพันธะคู่ สำหรับกรดที่มีพันธะคู่และมีโครงสร้างแบบซิส (Cis-Isomer) จะมีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุดเช่น กรดสเตียริกและกรดลิโนเลอิก ซึ่งมีคาร์บอน 18 อะตอมเท่ากัน แต่พบว่า กรดสเตียริกเป็นกรดอิ่มตัวมีจุดหลอมเหลวที่ 70 องศาเซลเซียส ส่วนกรดลิโนเลอิกเป็นกรดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ มีจุดหลอมเหลวที่ -5 องศาเซลเซียส เป็นต้น

ค. กรดคาร์บอกซิลิก สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ จึงทำให้พบว่ากรดที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (คาร์บอนไม่เกิน 4 อะตอม) จะสามารถละลายได้ดีในน้ำ

2.6 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

2.6.1 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิญญากาศของเหลว (Solution Plasma)

กระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลว (Solution Plasma Process) เป็นวิธีการใหม่ที่เป็นประโยชน์และง่ายต่อการเตรียมอนุภาคนาโนโลหะ (NPs) เนื่องจากการที่ไม่เข้าสู่ความเสถียรของพลาสมาทำให้เกิดอนุภาคนาโนโลหะที่รวดเร็วกว่าปกติ และโลหะ NPs ประเภทต่าง ๆ เหล่านี้

เกิดขึ้นโดยการสังเคราะห์จากการปล่อยแก๊สเรืองแสงระหว่างแท่งโลหะกับอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายที่ไม่มีตัวทำละลายใด [23, 24]

พลาสมา (Plasma) จัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจาก มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน โดยจะประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและลบ การอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasineutral) โดยพลาสมาเกิดจากแก๊สที่ถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน คลื่นไมโครเวฟ และรังสียูวี เป็นต้น ทำให้แก๊สแตกตัวกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือไอออน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) [23, 24]

2.6.1.1 ประเภทของพลาสมา

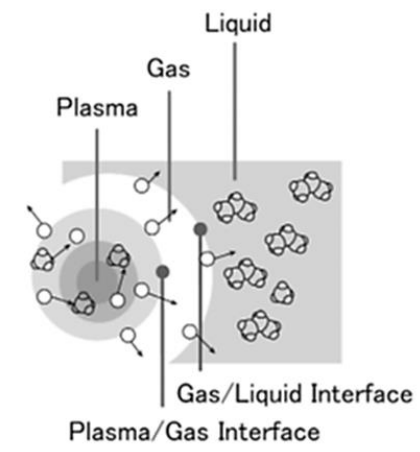
ก. พลาสมาอุณหภูมิต่ำ คือ พลาสมาที่เกิดจากการให้พลังงานต่ำแก่แก๊ส ส่งผลให้เกิดการแตกตัวไม่สมบูรณ์ของอนุภาคไอออนในระบบที่มีอุณหภูมิต่ำเช่น ระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่ความดันต่ำ

ข. พลาสมาอุณหภูมิสูง คือ พลาสมาที่เกิดจากการให้พลังงานสูงแก่แก๊ส ส่งผลให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคไอออนที่เกือบจะสมบูรณ์ และประจุสุทธิที่อยู่ในระบบจะมีสถานะสมดุล เช่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ไอพ่นเครื่องยนต์ เป็นต้น [24]

2.6.1.2 หลักการของพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

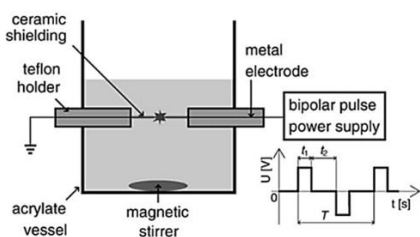
พลาสมาวิทยุภาคของเหลว คือ กระบวนการผลิตพลาสมาที่ล้อมรอบไปด้วยวิทยุภาคของเหลว โดยใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาพลาสมาที่ของเหลวที่ล้อมรอบนั้น ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของสารละลายนั้น ซึ่งจะเกิดเป็นฟองแก๊สเกิดขึ้น หรือนั่นก็คือหมู่ว่องไว (Free radical) ที่มักเกิดขึ้นระหว่างการรีด สารละลายที่เกิดจากพลาสมา เช่น Hydroxyl Radical (OH[•]) Hydroperoxyl Radical (H₂O₂[•]) Free Electron (e⁻) Superoxide Anion (O₂^{•-}) เป็นต้น [24]

พลาสมาเกิดขึ้นที่ตำแหน่งช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ที่ถูกล้อมรอบด้วยแก๊สและของเหลว ส่งผลให้เกิดผิวสัมผัสระหว่างสถานะ 2 บริเวณ คือ พลาสมาแก๊ส และแก๊สกับของเหลว ซึ่งกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อถึงจุดที่สารเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคไอออนหรือสถานะพลาสมาที่สามารถนำไฟฟ้าได้จะทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นบริเวณรอบ ๆ ขั้วอิเล็กโทรดนั้น กลายเป็นหมู่ว่องไว โดยการกระตุ้นสารละลายด้วยแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดพลาสมาฟองแก๊ส และหมู่ว่องไวดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะเกิดการถ่ายโอนหมู่ว่องไวจากที่มีความเข้มข้นมากไปยังที่น้อยกว่าโดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวล ดังนั้น สารที่อยู่ในวิทยุภาคของเหลวจะแพร่เข้ามาแทนที่และถูกกระตุ้นให้แตกตัวกลายเป็นพลาสมาต่อไป จากหลักการดังกล่าวส่งผลให้พลังงานภายในสารละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นด้วย [24, 25]



รูปที่ 2.16 แบบจำลองของพลาสมาวิภากาศของเหลว
ที่มา : Takai, Osamu. (2008)

พลาสมาวิภากาศของเหลว สามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมา โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นอุปกรณ์จ่ายไฟแรงดันและความถี่สูง เป็นระบบกระแสตรง ซึ่งอุปกรณ์จ่ายไฟจะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ให้กับระบบ โดยมีทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าแบบสลับขั้วบวกและลบ (Bipolar Pulsed) เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ในอุปกรณ์จ่ายไฟที่มีหน้าที่ในการแปลงระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังถังปฏิกรณ์พลาสมา เพื่อผลิตพลาสมาต่อไป สำหรับส่วนที่ 2 คือ ถังปฏิกรณ์พลาสมา โดยทั่วไปแล้วนิยมทำจากแก้วรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งตำแหน่งด้านข้างทั้งสองด้านของถังปฏิกรณ์จะติดตั้งอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุทังสเตนและเหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกหุ้มด้วยเซรามิก เพื่อป้องกันความร้อนและการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตพลาสมาดังแสดงในรูปที่ 2.17 ในการผลิตพลาสมาวิภากาศของเหลวจะเชื่อมต่ออุปกรณ์จ่ายไฟเข้ากับอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน โดยใช้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สูง โดยค่าแรงดันและความถี่ที่ใช้ในการผลิตพลาสมาขึ้นอยู่กับ การนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลายภายในเครื่องกำเนิดพลาสมา [23, 24, 25]

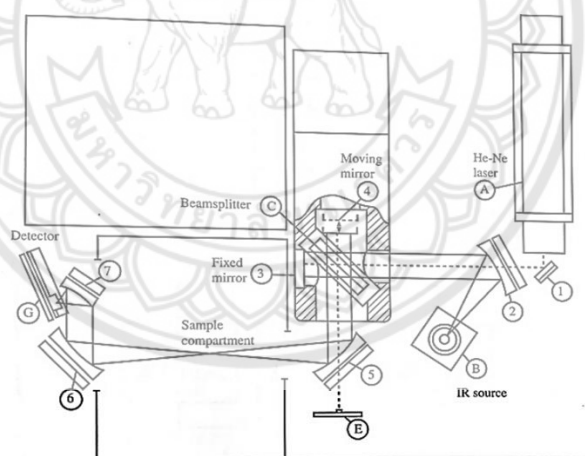


รูปที่ 2.17 ไดอะแกรมของการผลิตพลาสมาวิภากาศของเหลว
ที่มา : Potocký Š, N. Saito, and O Takai. (2009)

2.6.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Spectrometer) อาจเรียกอีกแบบว่า สเปกโตรมิเตอร์ระบบไม่มีการกระจายแสง (Non Dispersive Spectrometer) ซึ่งจะใช้ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) แทนโมโนโครมิเตอร์ที่ใช้ในระบบกระจายแสง โดยปัจจุบันนิยมใช้จะเป็นระบบ FT-IR Spectrometer ซึ่งประกอบไปด้วยกระจกระนาบ 2 ชุด วางในลักษณะตั้งฉากกันและกัน โดยด้านหนึ่งจะถูกตั้งอยู่กับที่และอีกด้านจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งมีตัวแยกแสง (Beam Splitter) ทำด้วยแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ จำนวน 2 แผ่น ที่เคลือบด้วยเจอร์มาเนียม ซึ่งเป็นฟิล์มบางอยู่ตรงกลาง

โดยส่วนประกอบที่สำคัญ จากรูปที่ 2.18 จะพบว่า เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่ (B) ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่ Beam Splitter (C) ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ (3) และกระจกที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (4) เมื่อลำแสงสะท้อนมาที่ Beam Splitter จะเกิดการหักล้างกันของแต่ละความยาวคลื่น และเมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณ (G) จะอ่านทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงการสแกนของกระจก โดยที่อัตราความเร็วของกระจกจะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่จากสัญญาณอ้างอิงตัววัดสัญญาณ (E) ที่เรียกกันว่า Internal Reference Laser (A) [26]



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของเครื่อง FT-IR

ที่มา : รศ. แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. (2011)

การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectral Analysis) [26]

1) ตรวจหาหมู่คาร์บอนิล

- ยอดของหมู่ $C=O$ จะปรากฏในช่วง $1820-1660\text{ cm}^{-1}$ และมีการดูดกลืนแสงมากที่สุด

2) ถ้ามีหมู่ $C=O$ จะต้องตรวจหาฟังก์ชันดังต่อไปนี้

- กรด ตรวจหาหมู่ OH จะปรากฏยอดที่กว้างในช่วง $3400-2400\text{ cm}^{-1}$ จะทับซ้อนกับยอด $C-H$

- เอไมด์ ตรวจสอบหมู่ $-NH$ จะปรากฏยอดที่มีความสูงขนาดกลางใกล้ 3400 cm^{-1}
 - เอสเทอร์ ตรวจสอบหมู่ $C-O$ จะปรากฏยอดการดูดแสงใกล้เคียงกันมากที่ช่วง $1300-1000\text{ cm}^{-1}$
- 3) ถ้าไม่มีหมู่ $C=O$ จะต้องตรวจหาฟังก์ชันดังต่อไปนี้
- เอมีน ตรวจสอบหมู่ $-NH$ จะปรากฏยอดปานกลางที่ช่วง 3400 cm^{-1}
 - อีเทอร์ ตรวจสอบหมู่ $C-O$ จะปรากฏยอดที่มีการดูดแสงใกล้เคียงกันมากที่ช่วง $1300-1000\text{ cm}^{-1}$
 - แอลกอฮอล์ ตรวจสอบหมู่ $-OH$ จะปรากฏยอดที่กว้างมากใกล้ $3400-3300\text{ cm}^{-1}$
- 4) ถ้าเป็นพันธะคู่หรือวงแหวนอะโรมาติก
- ถ้าพบจุดยอดสูงปานกลางถึงสูงในช่วง $1600 - 1450\text{ cm}^{-1}$ จะเป็นยอดวงแหวนอะโรมาติก
 - ถ้าพบที่เลขคลื่นยาวกว่า 3000 cm^{-1} จะเป็นอะโรมาติกและไวนิล $C-H$
 - ถ้าพบที่เลขคลื่นสั้นกว่า 3000 cm^{-1} จะเป็นแอลิแฟติก $C-H$
- 5) ถ้าเป็นพันธะสาม (Triple Bond)
- ถ้ามีจะพบจุดยอดสูงปานกลางใกล้ 2250 cm^{-1}
- 6) ถ้ามีหมู่ไนโตรจะพบ 2 ยอดสูงใกล้ $1600-1530\text{ cm}^{-1}$ และ $1390-1300\text{ cm}^{-1}$
- 7) ตรวจสอบหมู่ไฮโดรคาร์บอน ยังไม่มีวิธีการที่สามารถระบุได้ แต่ใช้การตรวจยืนยันที่มียอดการดูดกลืนแสง $C-H$

ตารางที่ 2.4 ช่วงคลื่นของแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบต่าง ๆ

Region	Group	Possible Compounds Present (or Absent)
3700-3100	$-OH$ $-NH$ $\equiv C-H$	Alcohols, aldehydes, carboxylic acids Amides, amines Alkynes
3100-3000	$=CH$	Aromatic compounds
-	$-CH_2$ or $-CH=CH-$	Alkenes or unsaturated rings
3000-2800	$-CH$, $-CH_2-$, $-CH_3$	Aliphatic groups
2800-2600	$-CHO$	Aldehydes (Fermi doublet)
2700-2400	$-POH$ $-SH$ $-PH$	Phosphorus compounds Mercaptans and thiols Phosphines
2400-2000	$-C\equiv N$ $-N=N^+=N^-$ $-C\equiv C-$	Nitrioles Azides Alkynes*
1870-1650	$C=O$	Acid halides, aldehydes, amides, amino acids, anhydrides, carboxylic acids, esters ketones, lactams, lactones, quinones
1650-1550	$C=C$, $C=N$, NH	Unsaturated aliphatics, *aromatics, unsaturated heterocycles, amides, amines, amino acids
1550-1300	NO_2 CH_3 and CH_2	Nitro compounds Alkanes, alkenes, etc.
1300-1000	$C-O-C$ and $C-OH$ $S=O$, $P=O$, $C-F$	Ethers, alcohols, sugars Sulfur, phosphorus, and fluorine compounds
1100-800	$Si-O$ and $P-O$	Oganosilicon and phosphorus compounds
1000-650	$=C-H$ $-NH$	Alkenes and aromatic compounds Aliphatic amines
500-400	$C-halogen$ Aromatic rings	Halogen compounds Aromatic compounds

ที่มา : รศ. แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. (2011) [26]

2.6.3 เครื่องมือวัดแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคอีกชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกสารผสม ซึ่งคล้ายกับโครมาโทกราฟีเหลว (LC) แต่เทคนิคที่ใช้แยกสารที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นแก๊สได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง (ไม่เกิน 450 °C) และต้องเสถียรที่อุณหภูมินั้น ถ้าสารใดเปลี่ยนเป็นแก๊สได้ยาก ก็อาจจะใช้เทคนิคอื่น ๆ บางอย่างเข้าช่วยได้ เช่น อาศัยปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์อื่น ๆ เช่น ถ้าสารตัวอย่างเป็นกรดที่มีจุดเดือดสูงอาจใช้วิธีทำให้เป็นเอสเทอร์จุดเดือดจะต่ำลง หรืออาจใช้หลักการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) ให้กลายเป็นสารที่มีสถานะเป็นแก๊สได้แล้วให้แก๊สนั้นผ่านเข้าไปในคอลัมน์ที่บรรจุด้วยสารที่จะทำหน้าที่แยกซึ่งเรียกว่า วัสดุภาคคงที่ โดยอาศัยการพาเข้าไปในคอลัมน์ด้วยวัสดุภาคเคลื่อนที่ หรือเรียกว่า Carrier Gas การเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ของสารที่จะแยกกับแก๊สพาจะไม่เกิดขึ้นหรือไม่มีความสำคัญ ส่วนวัสดุภาคคงที่อาจเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้

โดยจะประกอบด้วยสารที่สามารถดูดซับ (Adsorbed) สารที่จะแยกได้ในทางปฏิบัติอาจเป็น Gas-Solid Chromatography (GSC) หรือ Gas-Liquid Chromatography (GLC) [27]

2.6.3.1 ประเภทของแก๊สโครมาโทกราฟี

2.6.3.1.1 แก๊ส ของแข็งโครมาโทกราฟี (GSC)

วิธีนี้ใช้กับวัสดุภาคที่คงที่ ซึ่งเป็นของแข็งที่สามารถดูดซับ (Adsorption) สารที่เป็นแก๊ส ซึ่งต้องการแยก และไม่มีสารอื่นใดเคลือบอยู่ ส่วนใหญ่แล้ววิธีนี้ค่อนข้างแคบเพราะใช้แยกเฉพาะสารที่เป็นแก๊ส หรือโมเลกุลเล็ก ๆ ดังนั้น คอลัมน์ที่ใช้มักถูกบรรจุด้วย Active Solid เช่น ตัวกรองระดับโมเลกุล รูพรุนของ พอลิเมอร์ ซิลิกาเจล และถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

2.6.3.1.2 แก๊ส ของเหลวโครมาโทกราฟี (GLC)

วิธีนี้ใช้กับวัสดุภาคที่คงที่ที่เป็นของเหลว ซึ่งอาจเป็นสารที่เป็นของแข็งนำไปละลายในตัวทำละลายที่ระเหยง่ายแล้วนำไปเคลือบบน Solid Supports ซึ่งมีคุณสมบัติเฉื่อยและไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการแยกสาร เมื่อสารตัวอย่างที่เป็นแก๊สหรือไอของสารที่ผสมกันอยู่ เมื่อผ่านคอลัมน์สารจะแยกออกจากกันได้ด้วยการกระจายตัวที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุภาคเคลื่อนที่ กับวัสดุภาคคงที่ ซึ่งทำหน้าที่เป็น วัสดุภาคของเหลว ถ้าสารใดหรือแก๊สใดละลายในวัสดุภาคของเหลวได้ดีกว่าก็จะถูกจับไว้นาน โครมาโทแกรมของสารนี้จะออกมาทีหลัง ค่าเวลาเก็บรักษา (Retention Time) จะมากกว่าแก๊ส หรือไอของสารที่ออกจากคอลัมน์ก่อนค่าเวลาเก็บรักษาจะน้อยกว่าเพราะถูกจับไว้ได้ไม่ดี [27]

2.6.3.2 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

2.6.3.2.1 Gas Traps และ Filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Cartridge คือมี

- Molecular Sieve Trap ใช้ดูดความชื้น
- Oxygen Trap เป็น Cartridge ที่จับแก๊สออกซิเจน
- Hydrocarbon Filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับ Carrier Gases (H_2 , Ne, Ar and N_2) ควรจะต้องผ่านแผ่นกรองอากาศแบบแผ่นกรองคาร์บอน

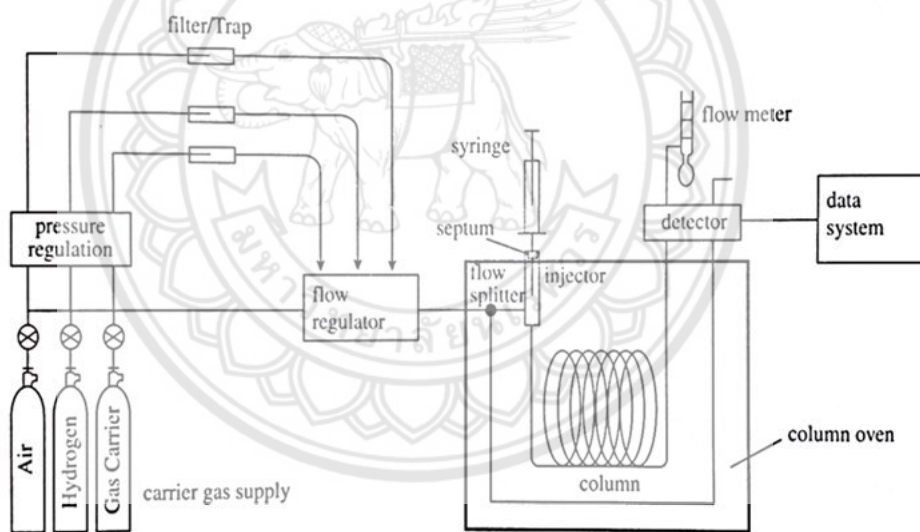
2.6.3.2.2 ส่วนที่จะฉีดสารตัวอย่างเข้าคอลัมน์ (Injection Port)

2.6.3.2.3 คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด

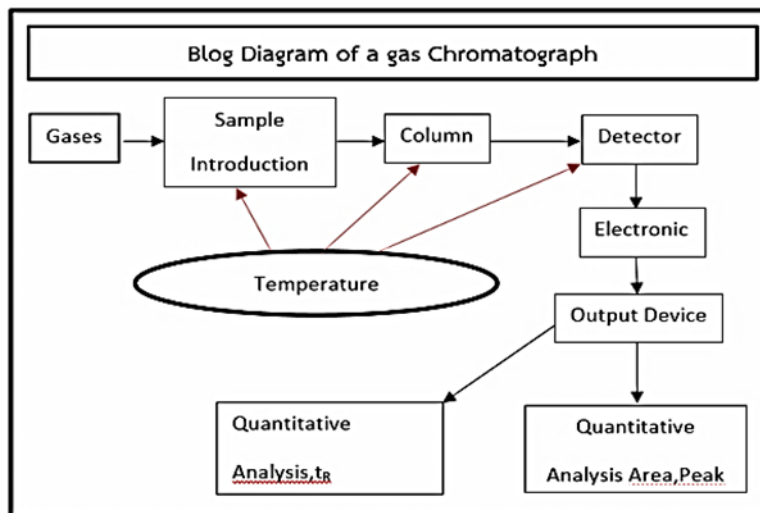
2.6.3.2.4 เครื่องตรวจจับ (Detectors) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับตรวจวัดสารแต่ละชนิดที่ถูกแยกออกมาจากคอลัมน์

2.6.3.2.5 ส่วนที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) การควบคุมอุณหภูมิให้คอลัมน์เครื่องตรวจจับ และอินเจคเตอร์

2.6.3.2.6 ส่วนที่ใช้ประมวลผล และข้อมูลต่าง ๆ นั้น ได้แก่ อินทิเกรเตอร์ บันทึกโครมาโทแกรม หรือคอมพิวเตอร์ จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงรูปได้ ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20



รูปที่ 2.19 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
ที่มา :รศ.แมน อมรสิทธิ์และคณะ. (2010) [27]

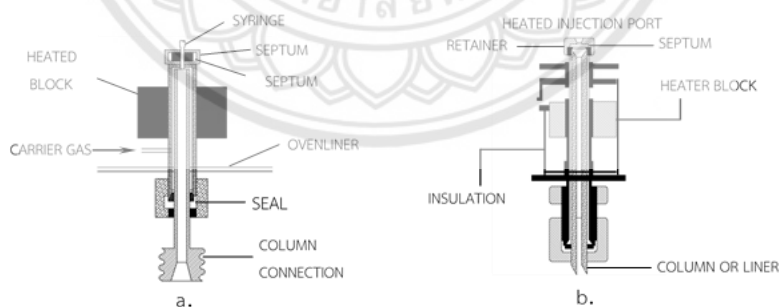


รูปที่ 2.20 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
ที่มา :รศ.แม่น อมรสิทธิ์และคณะ (2010) [27]

2.6.3.3 ระบบการใส่สารตัวอย่าง (Simple Inlet Systems)

2.6.3.3.1 การฉีดสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว (Liquid Sample Inlets)

สารตัวอย่างที่เป็นของเหลวโดยมากจะใช้ Micro Syringe ฉีดสารตัวอย่างขึ้นมาตามปริมาตรที่ต้องการแล้วฉีดเข้าไปผ่าน Silicone Septum ที่อินเจคเตอร์พอร์ตไปยังปลายของคอลัมน์หรืออาจใช้วิธีฉีดเข้าไปที่ Flash Aporizer ดังรูปที่ 2.21 โดยสารตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนให้เป็นไอด้วยความร้อนจาก Heater Block [27]



รูปที่ 2.21 ระบบการใส่สารตัวอย่าง a. แสดงลักษณะของ Flash vaporizer injection port และ b. แสดง Flash vaporizer ที่ใช้กับ Glass column

2.6.3.4 เครื่องตรวจวัด (Detectors)

เครื่องตรวจวัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถให้สัญญาณเพื่อบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาที่ออกมาจากคอลัมน์แล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดได้ด้วย ดังนั้น เครื่องตรวจวัด จึงเป็นเครื่องมือที่มีลักษณะเฉพาะ

สามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ ได้ให้สภาพไวสูงพอ มีการตอบสนองที่ดีต่อช่วงของความเข้มข้นและหลายชนิด การจำแนกประเภทของเครื่องวัดแยกออกได้เป็นหลายประเภทตามคุณสมบัติการตรวจวัด

ในที่นี้เครื่องตรวจวัด ที่เลือกใช้คือ Flame Ionization Detector (FID) ซึ่งเป็นเครื่องตรวจวัด ชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจหาสารประกอบพวกอินทรีย์ (Organic Compounds) หรือสารประกอบที่มี C-C และ C-H bonds

ลักษณะของ FID จะพบแก๊สไฮโดรเจนถูกจุดให้ติดไฟด้วยเครื่องทำความร้อนซึ่งอยู่ใกล้กับ Flame Jet ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าไปทำหน้าที่ทั้งสองอย่าง คือ ช่วยการเผาไหม้ของไฮโดรเจน และช่วยพาให้แก๊สที่เผาไหม้แล้วออกไป แก๊สจะพาสารตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์จะเข้าสู่เปลวไฟ จะทำให้สารเหล่านั้นเกิดไอออนไนเซชันได้เป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยัง Flame jet และไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรด สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังอิเล็กโทรมิเตอร์ และบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกได้โครมาโทแกรม FID ที่ผลิตใช้ใน GC มีลักษณะต่าง ๆ กัน [27] ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เครื่องบันทึกได้โครมาโทแกรม FID ที่ผลิตใช้ใน GC มีลักษณะต่าง ๆ กัน

ที่มา : รศ. แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ (2010) [27]

2.6.4 เครื่องมือวัดBrunauer เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (BET)

เครื่องมือวัดBrunauer เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ ใช้กับกระบวนการดูดซับหลายชั้นและมักใช้แก๊สที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับพื้นผิวของวัสดุเป็นตัวดูดซับ เพื่อหาปริมาณพื้นที่ผิวที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งไนโตรเจนเป็นแก๊สที่ใช้กันมากที่สุด สำหรับใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวด้วยวิธี BET เหตุนี้มาตรฐานการวิเคราะห์ BET จะใช้อุณหภูมิในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิจุดเดือดของ

ไนโตรเจน โดยมีจุดประสงค์เพื่ออธิบายการดูดซับโมเลกุลของแก๊สทางกายภาพบนพื้นผิวที่เป็นของแข็ง และเป็นเทคนิคพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์สำหรับการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ [23]

แนวคิดของทฤษฎีคือ ส่วนขยายของทฤษฎีแลงเมียร์ ซึ่งเป็นทฤษฎีสำหรับการดูดซับโมเลกุลเดี่ยวเพื่อการดูดซับหลายชั้นโดยมีสมมติฐานกล่าวคือ โมเลกุลของแก๊สดูดซับของแข็งในชั้นอนันต์ โมเลกุลของแก๊สมีความสัมพันธ์กับชั้นที่อยู่ติดกันเท่านั้น และทฤษฎีนี้สามารถนำมาใช้กับแต่ละชั้นได้ สมการของ บรูว์นอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ ได้ตั้งสมการที่ (2.6) ดังนี้ [27]

$$\frac{1}{v[(p_0/p)-1]} = \frac{c-1}{v_m c} \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{1}{v_m c} \quad (2.6)$$

เมื่อ p_0 และ p คือความสมดุลและแรงดันอิ่มตัวของตัวดูดซับที่อุณหภูมิของการดูดซับ
 v_m คือ ปริมาณแก๊สที่ดูดซับ (ตัวอย่างเช่นในหน่วยปริมาตร)
 v_0 คือ ปริมาณของแก๊สที่ดูดซับด้วยมอนอลิเยอร์
 c คือ ค่าคงที่ของบรูว์นอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ หาได้จากสมการที่ (2.7)

$$c = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right) \quad (2.7)$$

เมื่อ E_1 คือ ความร้อนของการดูดซับสำหรับชั้นแรก
 E_L คือ สำหรับชั้นที่สองและสูงกว่าและเท่ากับความร้อนของการทำให้เป็นของเหลว

ทฤษฎี BET สามารถหาได้เหมือนกับทฤษฎีแลงเมียร์ แต่โดยการพิจารณาการดูดซับโมเลกุลของโมเลกุลหลายชั้นซึ่งไม่จำเป็นต้องทำเป็นชั้นก่อนที่จะเริ่มก่อตัวเป็นชั้นบนสุด นอกจากนี้มีสมมติฐานการวิเคราะห์ BET คือ

- ก. การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบนพื้นผิวตัวอย่างที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน (หนึ่งตัวต่อโมเลกุล)
- ข. ถ้าพิจารณาเฉพาะโมเลกุล ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นพื้นที่การดูดซับเดี่ยวสำหรับโมเลกุลของชั้นบน
- ค. ชั้นโมเลกุลบนสุดมีความสมดุลกับวิภาคของแก๊ส คือการดูดซับโมเลกุล (Adsorption) และ อัตราการพังทลายของโมเลกุล (Desorption) ที่คล้ายคลึงกัน
- ง. การคายความร้อนเป็นกระบวนการที่จำกัดด้วยแรงโมเลกุล ได้แก่ ความร้อนที่เกิดจากการดูดซับ
- จ. เมื่อความดันอิ่มตัวจำนวนโมเลกุลของชั้นมีแนวโน้มที่จะไม่มีที่สิ้นสุด

เมื่อพิจารณาตัวอย่างของแข็งที่มีอยู่ในบรรยากาศที่มีการควบคุม ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) โดยกำหนดให้

θ_i คือ The Fractional coverage ของพื้นผิวตัวอย่างที่ปกคลุมด้วยจำนวน i ของชั้นโมเลกุล

$R_{ads,i-1}$ คือ อัตราการดูดซับ สำหรับโมเลกุลบนชั้น θ_{i-1}

$R_{des,i}$ คือ ความดันตลอดจนการเกิดการคายบนชั้น i เป็นสัดส่วนกับพื้นผิวเศษส่วน θ_i

$$R_{ads,i-1} = k_{i-1}P\theta_{i-1} \tag{2.8}$$

$$R_{des,i} = k_i\theta_i \tag{2.9}$$

เมื่อ k_i และ k_{i-1} คือ ค่าคงที่ที่พลังงานจลน์ของการดูดซับบนชั้นที่ i และ $i-1$ ตามลำดับ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สำหรับกระบวนการดูดซับ ค่าคงที่เหล่านี้จะสันนิษฐานว่าคล้ายคลึงกับค่าพื้นผิว สมมติว่ากฎการคายของอาร์เรเนียสเป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวข้อง [27] สามารถแสดง สมการที่ (2.10)

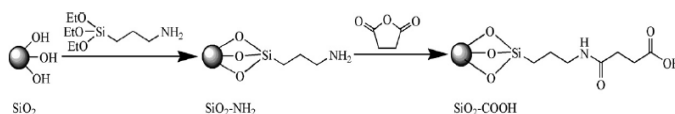
$$k_i = \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right) \tag{2.10}$$

เมื่อ E_i คือ ความร้อนของการดูดซับ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่ศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกากับหมู่ฟังก์ชัน

Yanqing An และคณะ (2007) ศึกษาการเตรียมซิลิกาที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก จากการศึกษาขั้นตอนแรกมีการทำการทดลองเพื่อให้ได้ซิลิกาที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโนก่อน จากนั้นจึงเติม Succinic Anhydride เพื่อให้เกิดเป็นซิลิกาที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก โดยพบว่า หมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกทำหน้าที่เป็นตัว Covalently ได้ดีกับพื้นที่ผิวของซิลิกาและมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะอนุภาคนาโนของซิลิกา ดังรูปที่ 2.23 [29]



รูปที่ 2.23 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนของซิลิกาที่ทำหน้าที่เป็นกรดคาร์บอกซิลิก

ที่มา : Yanqing An และคณะ (2007)

Panuphong Pootawang และคณะ (2012) ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคของเล็กของเงินจับตัวอยู่ในซิลิกาโดยวิธีการใช้เครื่องกำเนิดพลาสมาวัสดุของเหลวเพื่อลดพาราไนโตรฟินอล โดยพบว่าสามารถสังเคราะห์ซิลิกาที่ถูกอนุภาคของเล็กของเงินจับตัวอยู่โดยใช้เวลา 3 นาที ในการสังเคราะห์ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วที่จะได้มาซึ่งอนุภาคขนาดเล็กตลอดจนพบว่าอนุภาคเหล่านั้นมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นแบบเหลี่ยม 2 มิติที่เรียงซ้อนกันและมีพื้นที่ผิวที่มาก จึงทำให้สามารถลดพาราไนโตรฟินอลได้ดี [30]

R. Kumar และคณะ(2013) ศึกษาตัวดูดซับซิลิกาที่ทำจาก Ethylene Diamine Tetra-Acetic Acid (EDTA) ถูกสังเคราะห์โดยใช้โดยใช้ (3-aminopropyl) Triethoxysilane (APTES) เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่ม Silanol (Si-OH) ของซิลิกาและคาร์บอกซิลิกเพื่อการกำจัด Cu(II) , Zn(II) และ Ni(II) จากสารละลายในน้ำ โดยพบว่าโลหะไอออนทั้งสามตัวเป็นเวลา 45 นาที การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าการดูดซับของ Cu(II) Zn(II) และ Ni(II) เข้าสู่ EDTA-silica และมีความสามารถในการดูดซับ มอนอเลเยอร์สูงสุดสำหรับ Cu(II) Zn(II) และ Ni(II) มีค่าเท่ากับ 79.36 74.07 และ 67.56 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ [42]

2.7.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับมอนอ ไต และไตรกลีเซอไรด์

กำพล ประทีปชัยกูร และคณะ (2008) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม คือ ความเร็วรอบของใบกวน ปริมาณเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริก) และอุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา และในการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่างด้วยเครื่อง TLC/FID พบว่า สามารถลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวมซึ่งมีกรดไขมันอิสระปริมาณร้อยละ 8-12 โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันภายใน 30 วินาที ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวมที่ 10:1 กรดซัลฟิวริกปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม และใช้ความเร็วรอบของใบกวนที่ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [5]

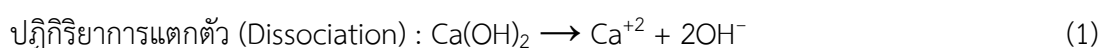
ภาคภูมิ จตุรพรสวัสดิ์ และคณะ (2011) ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากแกลบเพื่อดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากแกลบเพื่อดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ จากการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับการแกลบ ซึ่งเตรียมจากการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 450 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าแกลบ 700 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับดีกว่าแกลบ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาแกลบที่อุณหภูมิสูงทำให้สิ่งเจือปนน้อยและรูพรุนมีขนาดใหญ่ สำหรับการแช่กรดของแกลบที่ 450 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่การแช่กรดของแกลบที่ 700 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง อาจเนื่องจากการแช่กรดส่งผลต่อขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวและองค์ประกอบของตัวดูดซับ โดยลำดับการแช่กรดก่อนหลังไม่มีนัยสำคัญ ตัวดูดซับที่มีความสามารถใน

การดูดซับดีที่สุด คือ แก้วกลบแช่กรดก่อนเผาที่ 450 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้ 210 มิลลิกรัมของกรดไขมันต่อกรัมของตัวดูดซับ [8]

Bing Lun Li และคณะ (2011) ทำการทดลองการใช้ของแข็งขนาดนาโนของกลีเซอรินในการดูดซับบริเวณพื้นผิวของผงแกรไฟต์ โดยจากการทดลองพบว่าการเกิดของแข็งขนาดนาโน (Monolayer) ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวกว่าสารบางชนิดที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ความแปรผันของจุดหลอมเหลวแบบ Monolayer เป็นสมบัติของความยาวของสายโซ่หมู่แอลคิล และขอบเขตของการไม่อิมตัวมีผลกระทบที่น่าสนใจ โดยกลุ่มไฮดรอกซิลจะถูกแทนที่ด้วยหมู่แอลคิล ในการเปลี่ยนจาก มอนอกลิเซอไรต์ ไปเป็น ไดกลีเซอไรต์ และไตรกลีเซอไรต์ และ ยังระบุด้วยว่าเมื่อความยาวของคาร์บอนของกรดไขมันที่ยึดติดกับโมเลกุลของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายของหมู่แอลคิลเพิ่มขึ้นตาม แม้ว่าจะจะเป็นผลค่อนข้างเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความไม่แน่นอนในการวัดเทียบกับความแปรผันของจำนวนหมู่แอลคิล ความแปรปรวนนี้ ควรได้รับการศึกษาสำหรับผลของ มอนอ ได และไตรกลีเซอไรต์ ซึ่งอาจนำไปสู่การมีปฏิสัมพันธ์ของ Van der Waals ที่แข็งแรงระหว่างแต่ละโมเลกุล [46]

G. M. Chupka และคณะ (2013) ผลของโมโนกลีเซอรินที่อิมตัวต่อสมรรถนะของไบโอดีเซลที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยจากงานวิจัยได้ศึกษาผลของปริมาณมอนอกลิเซอไรต์ที่อิมตัวของ B100s ที่มีต่อจุดเยือกแข็งทั้งหมด 4 สภาวะในการทดสอบ ผลการทดลองพบว่าเมทิลแอลกอฮอล์ที่ถูกผสม SMG 140 ตัวอย่างแสดงให้เห็นถึงผลของ SMG มีผลต่อจุดเยือกแข็งมากกว่าสมบัติอื่น ๆ โดยเมื่อเพิ่มขึ้นปริมาณ SMG 0.01 wt.% ของ ไบโอดีเซลทำให้จุดเยือกแข็งเพิ่มขึ้นได้ถึง 4 องศาเซลเซียส ในขณะที่ SMG คงที่ต่อการเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลจุดเยือกแข็งกลับลดลงเช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณน้ำมันหอมระเหยดีเซลด้วยการเพิ่มความสามารถในการละลายของ SMG ซึ่งหมายความว่าอนุภาคของ SMG ใน B100 ช่วยให้สามารถเตรียมส่วนผสมของไบโอดีเซลที่มีจุดเยือกแข็งหรือลดลงได้ การเพิ่มอัตราส่วน Monoglyceride To SMG ที่ไม่อิมตัวโดยการผสมใน Monoolein จะทำให้จุดเยือกแข็งลดลง เนื่องจาก Monoolein ยับยั้งการเกิด Nucleation ของ SMG [47]

AlešVávra และคณะ (2016) ได้ศึกษาการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากเมทิลเอสเทอร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาการเกิดกรดไขมันอิสระหยุดชะงักลงด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (KOH) และการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าวิธีนี้สามารถทำให้กรดไขมันอิสระตกตะกอนและแยกตัวได้อย่างรวดเร็วในระหว่างสถานะของเอสเทอร์ ซึ่งจะทำได้กรดไขมันอิสระที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่มีข้อเสียคือการก่อตัวของกรดไขมันอิสระถูกจำกัดด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสบู่แคลเซียมสถานะของแข็งขึ้น [48]



ปฏิกิริยาสะเทิน (Neutralization) : $2\text{H}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (3)

นอกจากนี้การเติมน้ำเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดการแยกตัวของไฮดรอกไซด์กับแคลเซียมไอออน ดังสมการที่ 1 ซึ่งจำทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระได้สบู่แคลเซียมที่แข็งตัว ดังสมการที่ 2 ซึ่งถูกถอดออกโดยการหมุนเหวี่ยงเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา แบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาสามารถคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดกรดไขมันอิสระ เพื่อให้คุณภาพไบโอดีเซลสามารถตอบสนองต่อ EN 1421 : อัตราส่วนแคลเซียมต่อ FFAs เท่ากับ 3.33: 1 การเติมน้ำ 0.14% เวลาปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง [48]

Potjane Saeong และคณะ (2017) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อพื้นผิวของสเตอรอลกลูโคไซด์ในน้ำมันปาล์ม โดยใช้การดูดซับด้วยซิลิกา ซึ่งจากผลของการทดสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ทำให้ทราบว่ามีการปนเปื้อนของสิ่งปนเปื้อนในน้ำมัน แม้ว่าจะมีการปนเปื้อนของ มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ภายในไบโอดีเซล แต่ก็ยังเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM 6751 และ EN 14214 ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการกำจัดสเตอรอลกลูโคไซด์ในไบโอดีเซล ตลอดจนการออกแบบการตอบสนองต่อพื้นผิวของสเตอรอลกลูโคไซด์ โดยตัวแปรอิสระที่ศึกษา มีความเข้มข้นของซิลิกา อุณหภูมิในการดูดซับ และเวลาในการดูดซับ เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการกำจัดสเตอรอลกลูโคไซด์ คือความเข้มข้นของซิลิกาที่ร้อยละ 3 โดยมวล อุณหภูมิในการดูดซับ 112 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 72 นาที ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ทำให้พบว่า สเตอรอลกลูโคไซด์ที่ถูกกำจัดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และส่งผลให้คุณภาพของไบโอดีเซลสูงขึ้น ประกอบไปน้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 99.72 มอนอกลิเซอไรด์ร้อยละ 0.38 ไดกลีเซอไรด์ร้อยละ 0.09 และไตรกลีเซอไรด์ร้อยละ 0.14 [6]

2.7.3 งานวิจัยที่ศึกษาความเป็นรูพรุนของซิลิกา

Kenneth Stafford และคณะ (2014) ศึกษาการดูดซับแก๊สด้วยโครงสร้างที่มีรูพรุน โดยการจำลองโมเลกุล และใช้ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่นเป็นพื้นฐาน เพื่อเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเกิดฮิสเทอรีซิสลูป และมีการนำข้อเสนอแนะการแบ่งประเภทของฮิสเทอรีซิสลูปใน IUPAC ปี 1984 มาพิจารณาด้วย โดยใน IUPAC นั้นยึดพื้นฐานจากการสังเกตจากการทดลองและการประยุกต์เข้ากับหลักการพื้นฐานในการเติมเต็มรูพรุน ซึ่งได้ข้อสรุปว่าไม่มีความจำเป็นเร่งด่วนใด ๆ ที่จำเป็นต้องปรับแก้ข้อเสนอแนะของ IUPAC [31]

K. S. W. SING และคณะ (1985) ทำการศึกษาข้อมูลการดูดซับแก๊ส (Physisorption) และ กำหนดข้อเสนอสำหรับมาตรฐานของขั้นตอนและคำศัพท์ซึ่งจะนำไปสู่การยอมรับหลักปฏิบัติโดยทั่วไป เพื่อให้ครอบคลุมแง่มุมทางทฤษฎีของ Physisorption ตลอดจนมีการกำหนดพื้นที่ผิวของโลหะให้ชัดเจน อีกทั้งปฏิกิริยาทางเคมีที่แตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะการดูดซับสารเคมีที่มีรูปแบบแตกต่างกัน [32]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดกำจัดสเตอรอลกลูโคไซด์ออกจากไบโอดีเซลด้วยกระบวนการดูดซับที่มีซิลิกอนไดออกไซด์จับเป็นกลุ่มกับ หมู่ฟังก์ชันโดยการใช้จำนวน 2 แบบ คือ $\text{SiO}_2\text{-NH}_2$ และ $\text{SiO}_2\text{-COOH}$ เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

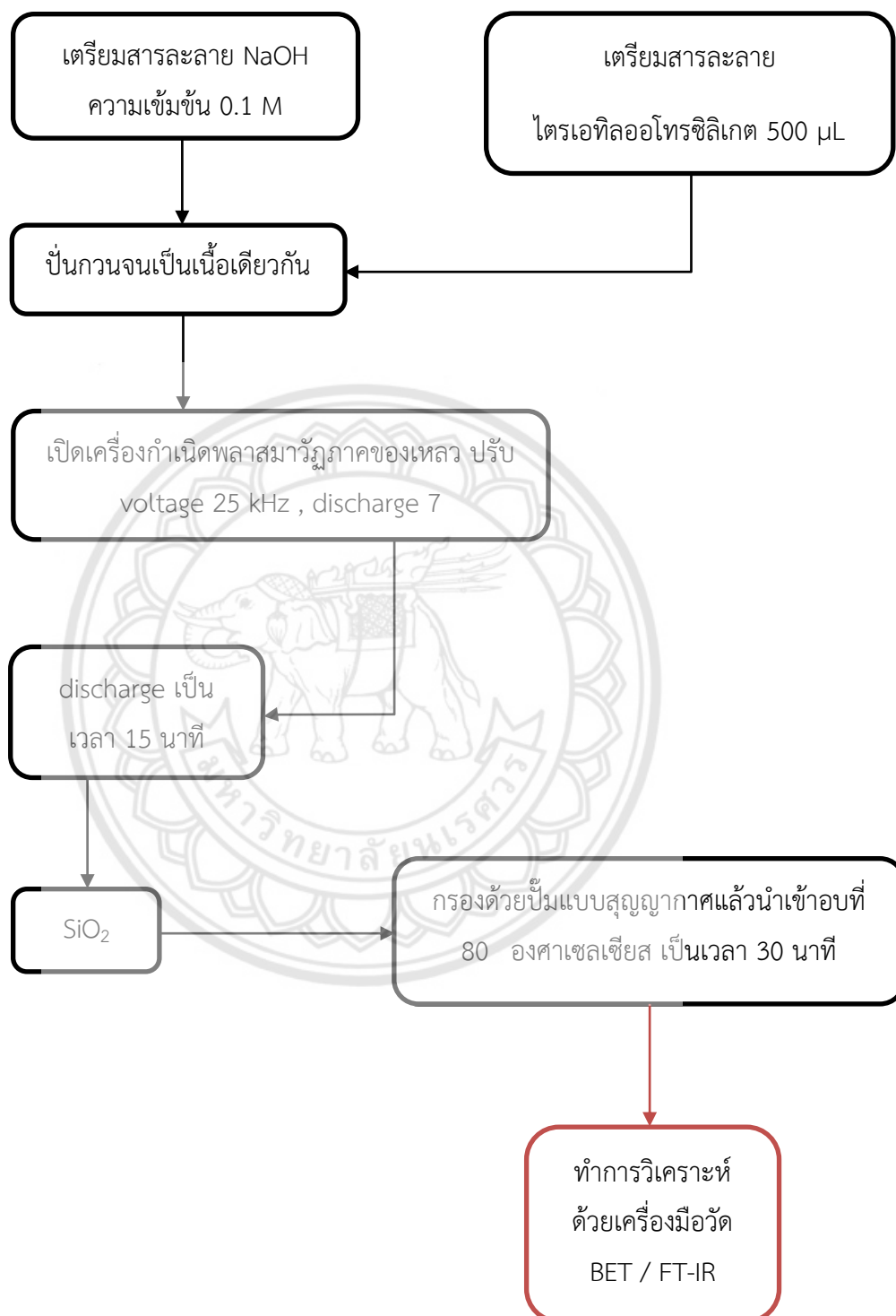
- 3.1.1 ไตรเอทิลออร์โทซิลิเกต (Triethylorthosilicate) ยี่ห้อ SIGMA-ALDRICH
- 3.1.2 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide) ยี่ห้อ PanReac AppliChem
- 3.1.3 ซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethyl Ammonium Bromide) ยี่ห้อ SIGMA-ALDRICH
- 3.1.4 N,N-ไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N-Dimethyl Formamide) ยี่ห้อ RCI Labscan Limited
- 3.1.5 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีเลน (3-Aminopropyl Triethoxylane) ยี่ห้อ EDM Millipore
- 3.1.6 เอทานอล (Ethanol) ยี่ห้อ SIGMA-ALDRICH
- 3.1.7 ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (Succinic Anhydride) ยี่ห้อ SIGMA-ALDRICH
- 3.1.8 น้ำกลั่น (Deionized Water)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 หอดูดซับ (Packed Column)
- 3.2.2 ปั๊มแบบรีดท่อ (Peristaltic Pump)
- 3.2.3 ตู้อบสารเคมี (Oven)
- 3.2.4 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว (Solution Plasma)
- 3.2.5 เครื่องมือวัดแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)
- 3.2.6 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ระบบฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum – GX
- 3.2.7 เครื่องวัดวัต Brunauer–Emmett–Teller (BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น TriStar II 3020

3.3 วิธีการทดลอง

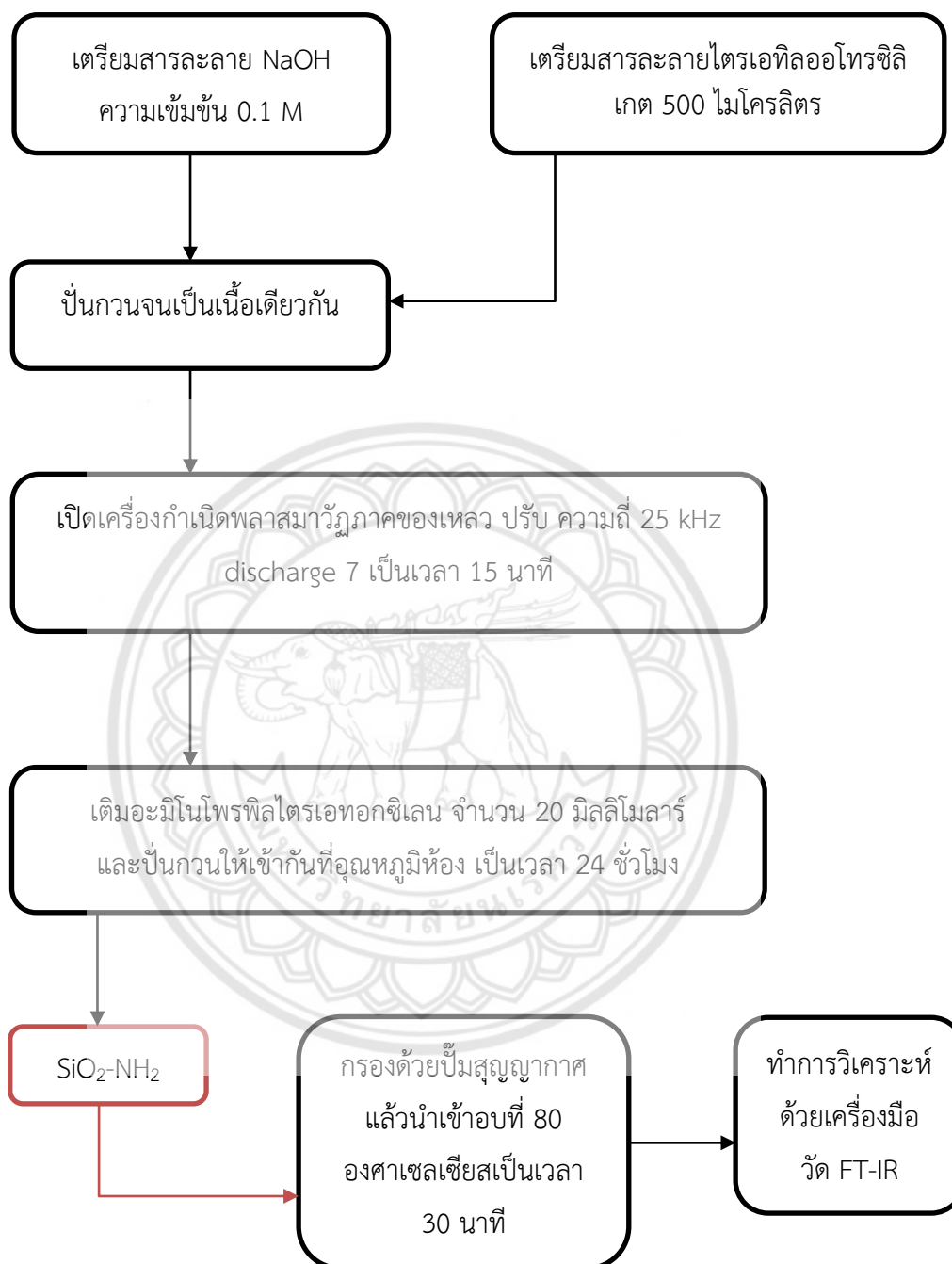
3.3.1 การเตรียมการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว



รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์

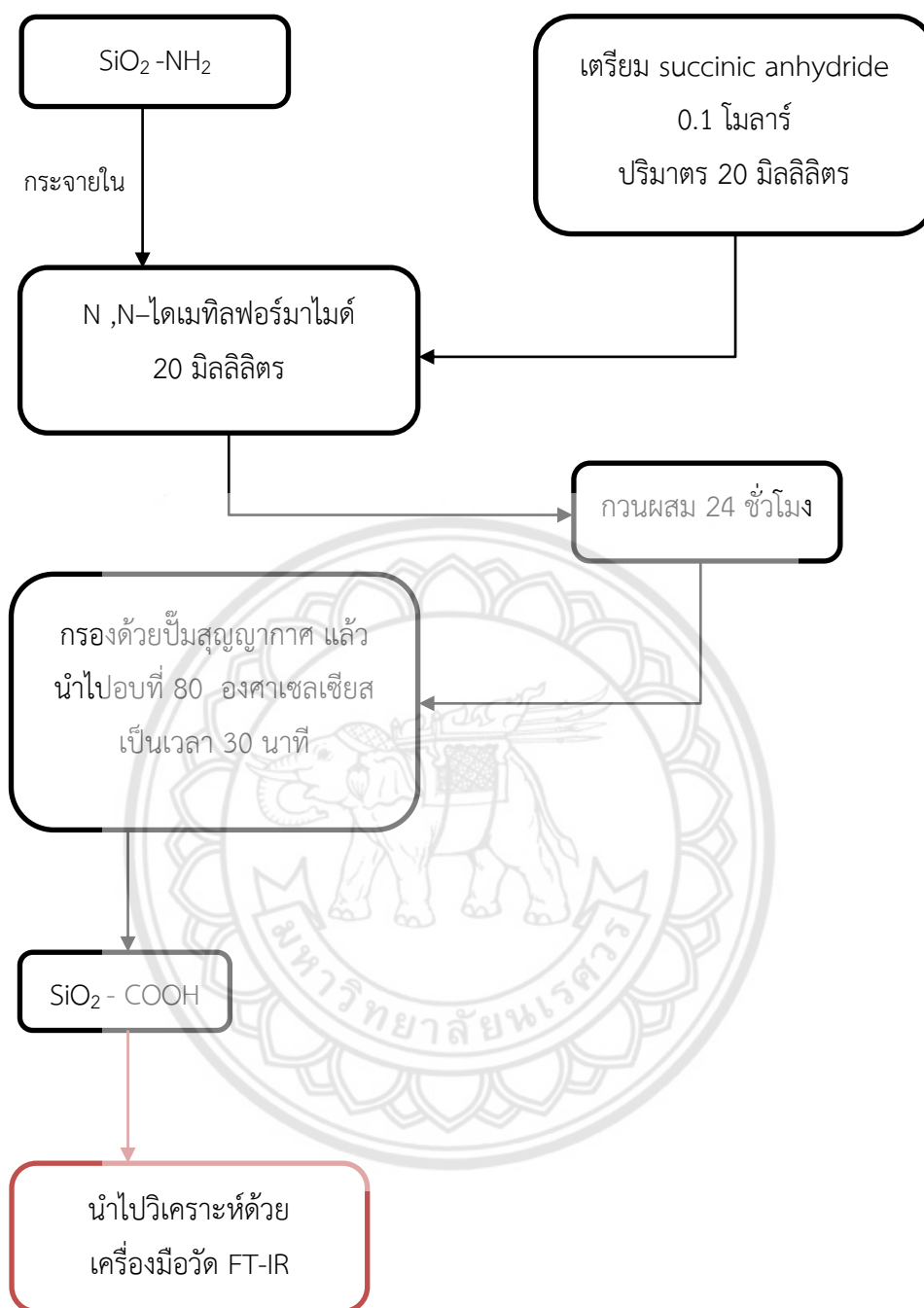
3.3.2 การเตรียมการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ให้จับกับหมู่ฟังก์ชัน

3.3.2.1 การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์กับอะมิโนฟังก์ชัน



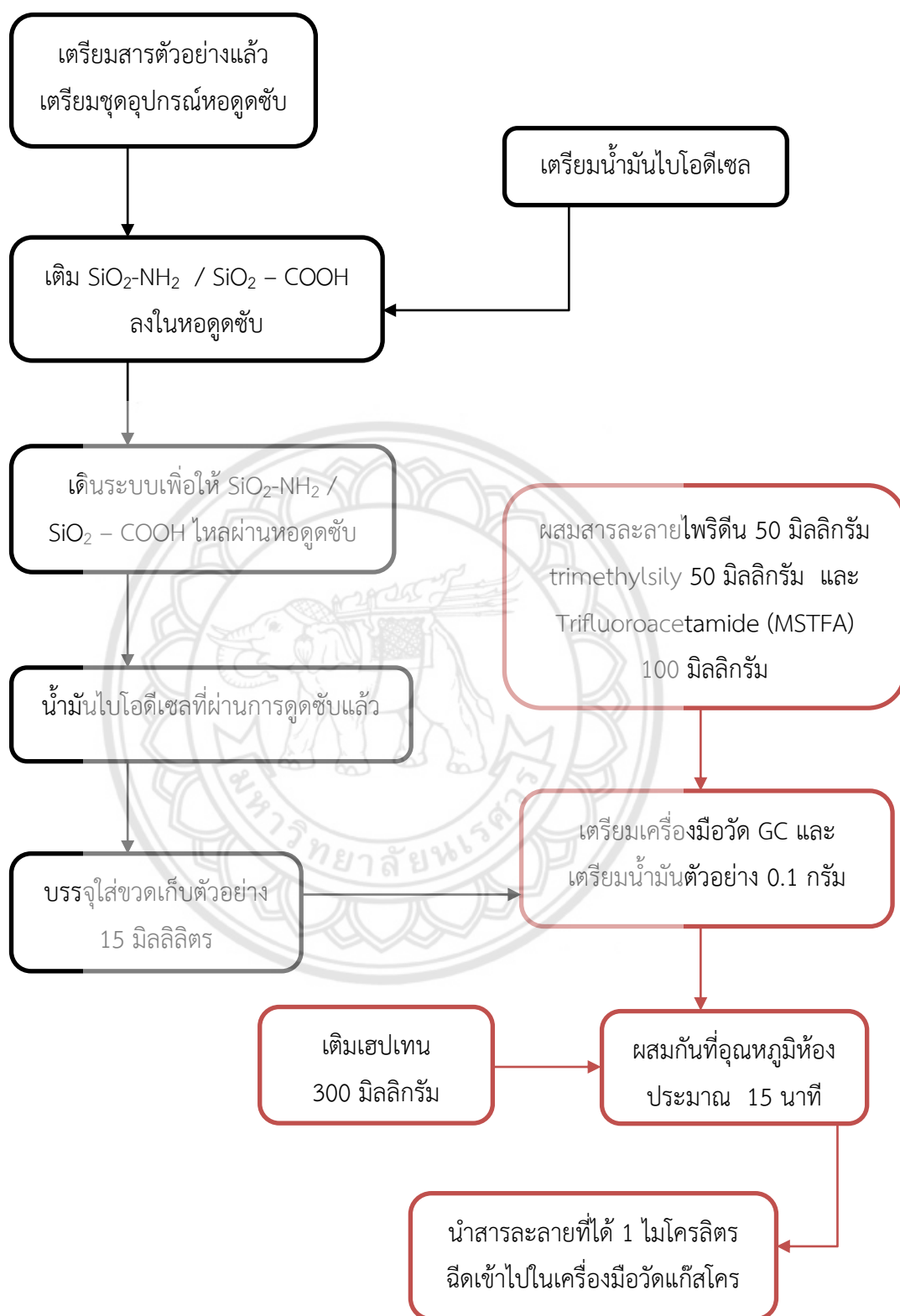
รูปที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์กับอะมิโนฟังก์ชัน

3.3.2.2 การเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์กับคาร์บอกซิลิกฟังก์ชัน



รูปที่ 3.3 แผนภาพการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์กับคาร์บอกซิลิกฟังก์ชัน

3.3.3 การทดสอบตัวดูดซับมอนอกลิเซอไรต์ ไตรกลีเซอไรต์ และไตรกลีเซอไรต์



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทดสอบตัวดูดซับมอนอกลิเซอไรต์ ไตรกลีเซอไรต์ และไตรกลีเซอไรต์

3.3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระ [11]

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระจะใช้วิธีการไทเทรต (Titration) โดยนำสารตัวอย่างมาทำปฏิกิริยากับสารมีฤทธิ์ต่างที่ทราบความเข้มข้นเพื่อคำนวณหาค่าปริมาณกรดในตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D664-04

3.3.4.1 สารเคมี

- ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol)
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide)
- ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)

3.3.4.2 อุปกรณ์

- ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- ปิเปต (Pipet) ขนาด 25 มิลลิลิตร
- บิวเรต (Buret) ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.3.4.3 วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 5 กรัม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 25 มิลลิลิตร และหยดฟีนอล์ฟทาลีน 3 - 5 หยด

เขย่าผสมในขวดรูปชมพู่

3. ไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (สารละลายต่าง) ความเข้มข้น 0.25 โมลต่อลิตร จนกระทั่งสารละลายเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อนอย่างถาวร

3.3.4.4 การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระใช้สูตรจากมาตรฐาน ASTM D664

$$\%FFA = \frac{\text{Volume of KOH} \times \text{Concentration of KOH} \times \text{Molecule of KOH}}{\text{Weight of biodiesel}} \quad (3.1)$$

โดย Volume of KOH คือ ปริมาณของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)
 Concentration of KOH คือ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (โมลต่อลิตร)
 Molecule of KOH คือ โมเลกุลของกรดไขมันโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัมต่อโมล)
 Weight of Biodiesel คือ น้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลตัวอย่างที่ทำการไทเทรต (กรัม)

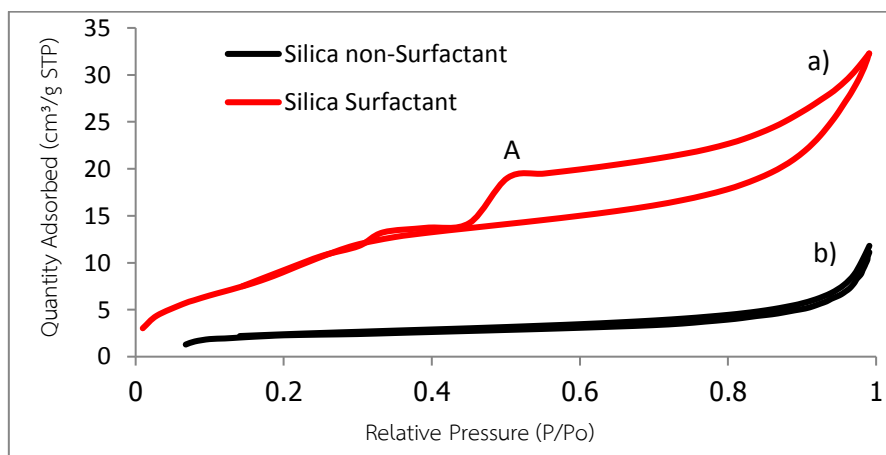
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้นำเสนอถึงผลของการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ออกจากน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้ตัวดูดซับซิลิกาที่ได้จากการสังเคราะห์จากนั้นเติมหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก โดยศึกษาผลของการดูดซับในสภาวะที่แตกต่างกัน โดยในตอนต้นที่ 1 ศึกษาความมีรูพรุนที่แตกต่างกัน โดยนำซิลิกาผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และซิลิกาไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Non-Surfactant) ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัด Brunauer-Emmett และเทลเลอร์ (BET) ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ฟังก์ชันของซิลิกา โดยการนำซิลิกาผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว ซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่อะมิโน และซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่คาร์บอกซิลิก ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูออริเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) และส่วนสุดท้ายในตอนต้นที่ 3 ศึกษาผลของความมีรูพรุนที่แตกต่างกัน ผลของหมู่ฟังก์ชันกับซิลิกาในการดูดซับ และผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ออกจากน้ำมันไบโอดีเซล

4.1 การวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนของซิลิกา

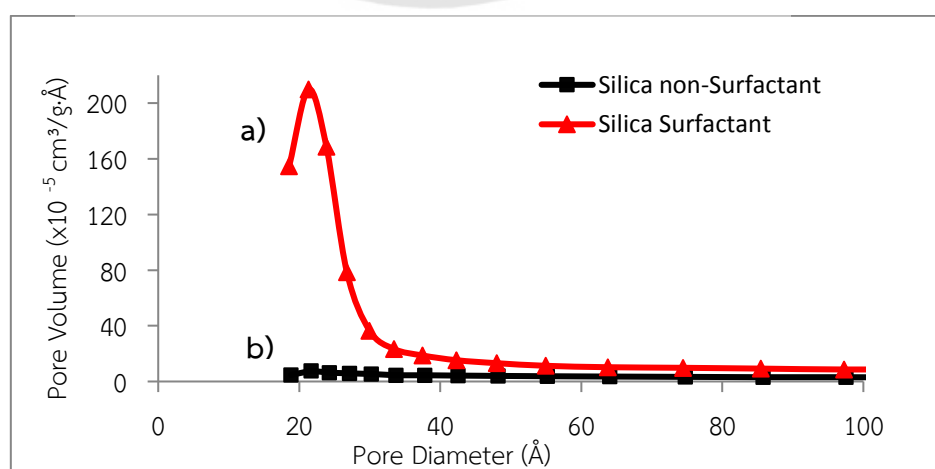
การศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของซิลิกาก่อนการบำบัด และซิลิกาผ่านการบำบัด ด้วยเครื่องมือวัด Brunauer-Emmett และเทลเลอร์ เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดของซิลิกา โดยใช้ปริมาณการดูดซับไนโตรเจนเป็นตัววิเคราะห์ ซึ่งปริมาณการดูดซับของไนโตรเจนเป็นค่าที่แสดงถึงแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุ แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน โดยสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยสภาวะการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ -195.85 องศาเซลเซียส แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับของไนโตรเจนและความดันสัมพัทธ์

เมื่อพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับของซิลิกาที่มีรูพรุน ดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อมีความดันเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน กล่าวคือเกิดจากแรงดึงดูดของตัวดูดซับที่มีมากจึงทำให้ปริมาณของตัวดูดซับและโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่นำไปดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 เส้น a) ซิลิกาผ่านการบำบัด โดยจะพบว่าเกิดฮิสเทอรีซิสลูปอันเกิดจากปริมาณของสารดูดซับที่เกิดความสมดุลของความดันสัมพัทธ์ [43] ซึ่งเมื่อพิจารณารูปแล้วพบว่ามึลักษณะใกล้เคียงกับฮิสเทอรีซิสลูปชนิด H3 ซึ่งบ่งบอกถึงขนาดของอนุภาคที่เป็นแผ่นและมีความเป็นรูพรุน [30, 31] และเมื่อพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพ แล้วจะพบว่าอยู่ในประเภท IV ซึ่งเกิดจากการควบแน่นลักษณะที่คล้ายท่อแคพิลลารีที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคขนาดเมโซ จึงทำให้มีค่าการดูดซับที่สูง [38] โดยนิยมนำมาวิเคราะห์ในอุตสาหกรรมการดูดซับหลายชนิดเช่นกัน และเมื่อพิจารณาจุด A จะหมายถึงเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นที่เกิดขึ้นในอนุภาคซิลิกา [38, 39] ตลอดจนพบว่าปริมาณรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่กราฟมีความชันมากในช่วงแรก แสดงว่ามีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และเกิดการดูดซับที่รูพรุนขนาดเล็กก่อน เมื่อมีปริมาตรรวมของรูพรุนมากขึ้นก็จะทำให้เกิดการดูดซับที่มากขึ้นตามไปด้วย กล่าวคือ ความสามารถในการดูดซับนั้นสอดคล้องกับปริมาตรรวมของรูพรุน [43] และเมื่อพิจารณาลักษณะของเส้นกราฟจะเปลี่ยนแปลงไปทางขวา ประกอบด้วยเส้นกราฟที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าใกล้จุดอิมิตัวของเส้นกราฟไอโซเทอมนั่นเอง ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะพบในอนุภาคขนาดเมโซเท่านั้น [31, 40] และจากรูปที่ 4.1 เส้น b) จะพบว่ามึฮิสเทอรีซิสลูปชนิดที่ H4 กล่าวคือ กราฟประเภทนี้จะเกิดจากวัสดุประเภทถ่านกัมมันต์หรืออนุภาคนาโนที่ใช้ในการดูดซับ มีลักษณะเป็นอนุภาคไมโครขนาดเล็กในตัวดูดซับอันจะปรากฏรูพรุนเพียงขนาดไมโครเมตรเท่านั้น [30, 31, 32]

จากการวัดด้วยเครื่องมือวัด Brunauer, Emmett และ Teller เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลาง นั้นจะสามารถอธิบายค่าการกระจายของขนาดรูพรุน แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากรูปที่ 4.2 แสดงการกระจายของผลการวัดขนาดของรูพรุนของซิลิกาก่อนการบำบัดและซิลิกาผ่านการบำบัด โดยผลการวิเคราะห์พบว่าซิลิกาผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว และซิลิกาไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว มีรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของรูพรุนขนาด 24 อังสตรอม และ 20 อังสตรอม ตามลำดับ กล่าวคือ ซิลิกาไม่ผ่านการบำบัดด้วยมีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าพบว่าซิลิกาผ่านการบำบัดด้วย จึงส่งผลให้ซิลิกาผ่านการบำบัดมีพื้นที่ผิวจำเพาะ BET มากกว่าซิลิกา ก่อนการบำบัด [43] สอดคล้องดังตารางที่ 4.1

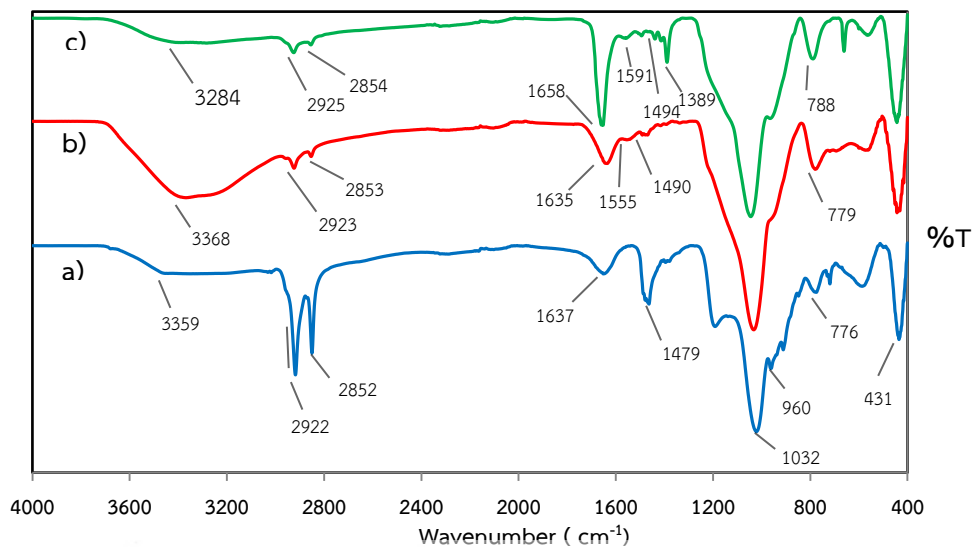
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของซิลิกาตัวอย่างและซิลิกาที่เติมสารเพิ่มรูพรุน

Sample	BET Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)
Silica Non-Surfactant	8.665	0.016
Silica Surfactant	32.872	0.048

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 จะพบว่า ซิลิกา ก่อนการบำบัด มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ที่น้อยกว่าซิลิกาหลังบำบัด ซึ่งมีพื้นที่ผิว BET อยู่ที่ 32.872 m²/g และ 8.665 m²/g ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อปริมาตรของรูพรุนและพื้นที่ผิวมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการดูดซับไนโตรเจนได้ดีขึ้นเช่นกัน [43] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kazuma Nakanishia และคณะ (2015) [33] และงานวิจัยของ Kresge C. และคณะ (1992) [32] กล่าวไว้ว่า การที่ซิลิกามีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวที่ขนาดใหญ่นั้น เกิดจากการใช้กระบวนการ Sol-Gel ในการสังเคราะห์ซิลิกา ซึ่งจะใช้เวลาในการทดลอง จึงทำให้เกิดปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวที่มากกว่า

4.2 การวิเคราะห์ฟังก์ชันของซิลิกา

การศึกษาฟังก์ชันของซิลิกา ซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ด้วยการวิเคราะห์จากเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum – GX เพื่อพิสูจน์ผลการทดลองจากกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีพลาสมา รวมไปถึงกระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกให้กับซิลิกา โดยใช้เลขคลื่น (Wavenumber) เป็นค่าชี้วัด ซึ่งค่าเลขคลื่น เป็นค่าที่แสดงถึงยอดของเลขคลื่น อันจะบ่งบอกเกี่ยวกับองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวซิลิกา โดยสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม ใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Attenuated Reflection Infrared Spectroscopy (ATR) ในสภาวะการวิเคราะห์นั้น ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอินฟราเรด ในช่วงอินฟราเรดย่านกลาง ความยาวคลื่น 400–4000 cm⁻¹ ดังรูปที่ 4.3



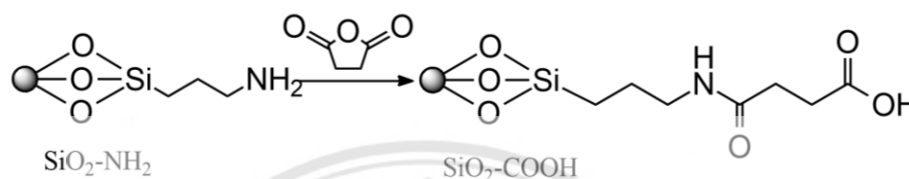
รูปที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันของซิลิกา a) SiO_2 b) $\text{SiO}_2 - \text{NH}_2$ และ c) $\text{SiO}_2 - \text{COOH}$

ผลจากการตรวจวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์จากการศึกษาการเกิดฟังก์ชันของซิลิกา แล้วจะพบว่าจากรูปที่ 4.3 แสดงค่าร้อยละของการส่องผ่านกับเลขคลื่น โดยเมื่อพิจารณาซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีพลาสมา ดังรูปที่ 4.3 เส้น a) แล้วมีค่าคลื่นความถี่อยู่ที่ 3359 2922 2852 1637 1479 1032 960 776 และ 431 cm^{-1} ตามลำดับ โดยยอดที่ 3359 และ 1637 cm^{-1} ปรากฏการณ์ยืดของโมเลกุล -OH ที่เกิดจากการมีน้ำภายในโมเลกุล [34, 35] ยอดที่ 1479 2922 และ 2852 cm^{-1} นั้นแสดงให้เห็นว่าเกิดจากการยืดแบบไม่สมมาตรของหมู่ CH_2 ที่อยู่ในสารลดแรงตึงผิวหรือ CTAB นั้นเอง [36, 37] ยอดที่ 1032 cm^{-1} และ 776 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าเกิดจากการสั่นสะเทือนด้วยการยืดตัวของโมเลกุลอนุภาคขนาดเมโซ โดยจะปรากฏเป็นหมู่ Si-O-Si ยอดที่ 960 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการยืดตัวของโมเลกุล Si-OH และยอดที่ 431 cm^{-1} เกิดจากการยืดตัวของโมเลกุล Si-O [34, 35]

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 เส้น b) จะพบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับ รูปที่ 4.3 เส้น a) แต่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยเกิดยอดขึ้นมาใหม่คือยอดที่ 1555 และ 1490 cm^{-1} ตามลำดับ กล่าวคือ ยอดที่ 1555 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ N-H ที่อยู่ใน Amino Groups [34] และยอดที่ 1490 cm^{-1} คือ การสั่นสะเทือนที่เกิดจากการยืดและการหดตัวของโมเลกุล N-H [35] ซึ่งให้เห็นว่าจากการทดลองสังเคราะห์ $\text{SiO}_2 - \text{NH}_2$ สามารถบ่งบอกถึงการเกิดฟังก์ชันอะมิโนกับซิลิกาได้

จากรูปที่ 4.3 เส้น c) จะปรากฏยอดที่ค่อนข้างคล้ายกันกับรูปที่ 4.3 เส้น a) และรูปที่ 4.3 เส้น b) และพบว่า มียอดที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนและเห็นได้ชัดเพิ่มขึ้นจากเดิม กล่าวได้ว่า ยอดที่ 1658 และ 1389 cm^{-1} ซึ่งยอดที่ 1658 cm^{-1} เกิดจากการที่หมู่ Carboxymethyl เข้าไปแทนที่หรือฉาบลงบนพื้นผิวด้านบนของซิลิกาด้วยกระบวนการ Carboxymethylation Reaction จึงทำให้เกิดยอดดังกล่าวขึ้นซึ่งมีความแข็งแรง [35] และยอดที่ 1494 cm^{-1} คือการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการยืดและ

การหดตัวของโมเลกุล N-H ที่เกิดจากการนำซิลิกาที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันอะมิโนมาพัฒนาจนได้เป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก [35] ตลอดจนยอดที่ 1389 cm^{-1} ปรากฏขึ้นจากการสั่นสะเทือนทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรของ Carboxylate Ion ที่อยู่ในสารเคมี Succinic Anhydride นั้นเอง [35, 36] นอกจากนี้แล้วยังจะสังเกตเห็นยอดที่ 1591 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของโมเลกุล C-N และการสั่นแบบบิดของโมเลกุล C-NH [42] ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าการเกิดฟังก์ชันระหว่างซิลิกากับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกจากการสังเคราะห์ซิลิกาที่มีการฟังก์ชันกับอะมิโนเป็นตัวเริ่มต้นเมื่อเติม Succinic Anhydride เข้าไป ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเกิดซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก

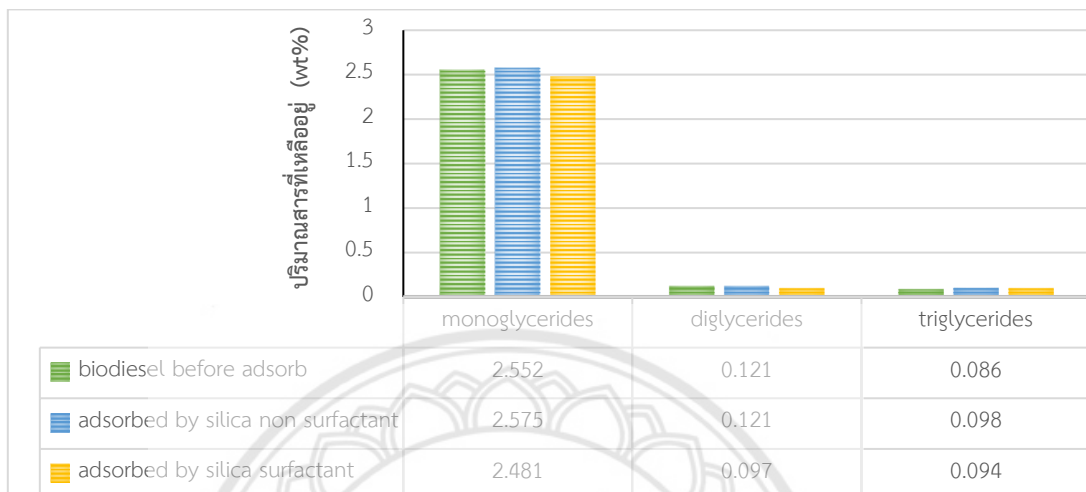
4.3 ศึกษาการใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับ

การศึกษาการใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์จากน้ำมันไบโอดีเซลโดยมีตัวแปรที่ศึกษาด้วยกัน 3 ตัวแปรดังนี้ (1) การศึกษาผลของขนาดรูพรุน เพื่อเปรียบเทียบผลในการดูดซับโดยใช้ซิลิกาที่มีขนาดของรูพรุนต่างกันคือซิลิกาที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวและชนิดที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว (2) การศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่ส่งผลต่อการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่ใช้เติมในซิลิกาชนิดที่ใช้สารลดแรงตึงผิวในการสังเคราะห์สองชนิดด้วยกันคือ หมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (3) การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่แตกต่างกันกับปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่ดูดซับได้ โดยมีอุณหภูมิที่ใช้คือ 25 50 และ 70 องศาเซลเซียส และการวิเคราะห์เพิ่มเติม ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำมันไบโอดีเซลหลังผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาชนิดที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน และซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองการดูดซับคือ 70 องศาเซลเซียส

4.3.1 ขนาดของรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์

การศึกษาการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ด้วยการใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับ โดยการเปรียบเทียบผลของความมีรูพรุนที่แตกต่างกัน โดยอ้างอิงจากการนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ความเป็นรูพรุน (BET) ซึ่งมีเงื่อนไขการทดลองคือที่ใช้คือ ซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และซิลิกาที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว (Non-Surfactant) ในขั้นตอนของการสังเคราะห์ตัวดูดซับ ซึ่งผลของขนาดรูพรุนต่อการดูดซับใน

สมมติฐานตั้งต้นของผู้ทดลองนั้นได้ประเมินไว้ว่าการที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวเพิ่มเข้าไปในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจะทำให้ได้ซิลิกาที่มี รูพรุนเพิ่มมากขึ้นและเป็นผลต่อเนื่องไปยังพื้นที่ในการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยสภาวะของการดูดซับที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม และปริมาตรของไบโอดีเซล 47 มิลลิลิตร แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



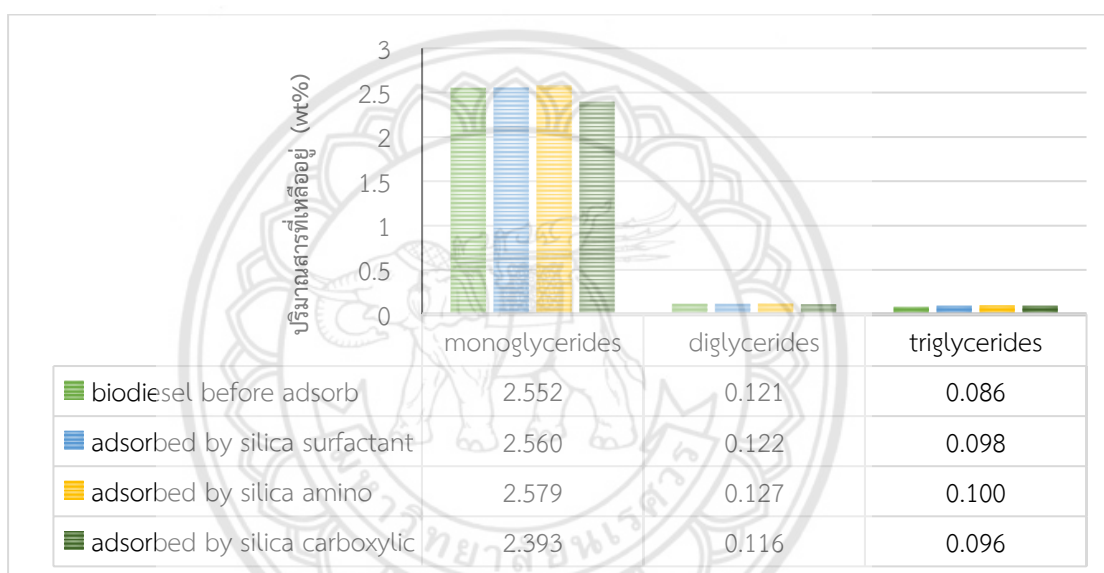
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบปริมาณสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยซิลิกาที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกันกับไบโอดีเซลตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว สามารถดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ โดยร้อยละ ปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 2.48 และไดกลีเซอไรด์ โดยร้อยละปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.09 โดยคิดเป็นร้อยละ 3 และ 20 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลก่อนการดูดซับ ซึ่งให้เห็นว่าซิลิกาที่ผ่านการบำบัดมีความสามารถในการดูดซับสารอื่น ๆ ในน้ำมันไบโอดีเซลมากกว่า ซิลิกาที่ไม่ผ่านการบำบัด แสดงให้เห็นว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับสารที่สนใจทั้งสาม เนื่องจากความเป็นรูพรุนของซิลิกาที่ผ่านการบำบัดมีมากกว่าซิลิกาที่ไม่ผ่านการบำบัด [44] ดังได้กล่าวในหัวข้อ 4.1

เมื่อพิจารณาประเด็นการดูดซับของสารที่สนใจทั้งสามด้วยซิลิกาที่ผ่านบำบัด พบว่า การดูดซับไดกลีเซอไรด์ได้มากกว่ามอนอกลิเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการบำบัดมีความแตกต่างกัน เนื่องจากจากคุณสมบัติความเป็นขั้วของกลีเซอไรด์ทั้งสามชนิด ซึ่งพิจารณาจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) โดยมอนอกลิเซอไรด์มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าไดกลีเซอไรด์ ดังนั้นมอนอกลิเซอไรด์มีความเป็นขั้วมากกว่าไดกลีเซอไรด์ แสดงให้เห็นว่ามอนอกลิเซอไรด์มีความสามารถในการละลายมากกว่าไดกลีเซอไรด์ ดังนั้นความสามารถในการละลายของกลีเซอรินนี้อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับของซิลิกาที่ผ่านการบำบัด ดัง [45] ได้กล่าวว่า แนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานในโครงการวิจัยนี้

4.3.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับของซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก

การศึกษาการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ด้วยการใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับ โดยการเปรียบเทียบผลของหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ซึ่งมีเงื่อนไขการทดลองคือ ซิลิกาที่มีการฟังก์ชันกับหมู่อะมิโน (Amino) และซิลิกาที่มีการฟังก์ชันหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวดูดซับ ซึ่งผลของฟังก์ชันต่อการดูดซับในสมมติฐานตั้งต้นของผู้ทดลองนั้นได้ประเมินไว้ว่าการที่มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจะทำให้ได้ซิลิกาที่มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น และการใช้ฟังก์ชันในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาที่ต่างกันจะทำให้ได้ผลในการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยสภาพของการดูดซับที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม และปริมาตรของไบโอดีเซล 47 มิลลิลิตร แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.6



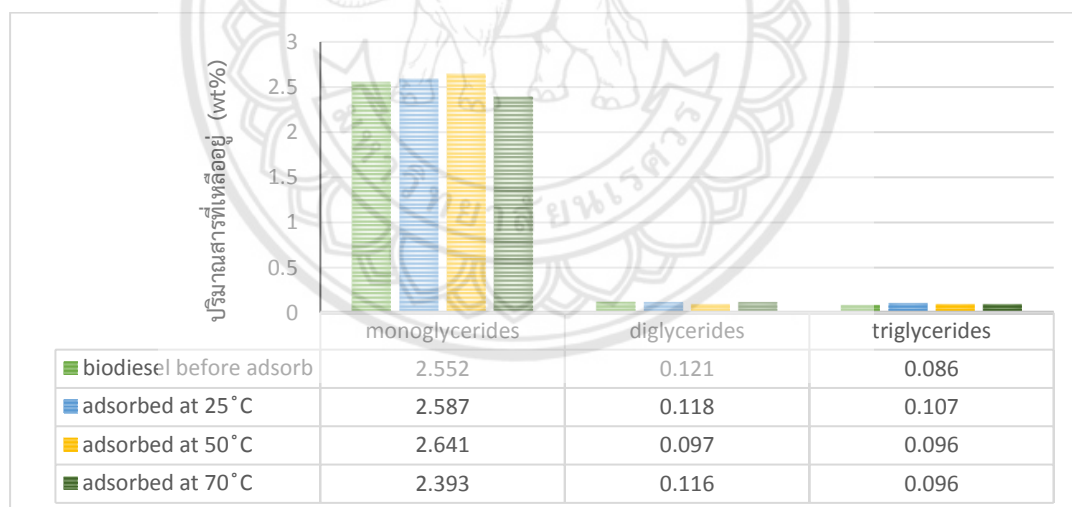
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบปริมาณสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชัน 2 ชนิด กับไบโอดีเซลตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกสามารถดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ โดยร้อยละ ปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 2.393 และไดกลีเซอไรด์ โดยร้อยละปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.116 โดยคิดเป็นร้อยละของมอนอกลิเซอไรด์ที่ถูกดูดซับเท่ากับร้อยละ 6 และไดกลีเซอไรด์ร้อยละ 4 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลก่อนการดูดซับ ซึ่งให้เห็นว่าซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกมีความสามารถในการดูดซับสารอื่น ๆ ในน้ำมันไบโอดีเซลมากกว่าซิลิกาที่มีการฟังก์ชันกับหมู่อะมิโน และซิลิกาที่ไม่มีการเติมหมู่ฟังก์ชัน แสดงให้เห็นว่าการเติมหมู่ฟังก์ชัน และการใช้หมู่ฟังก์ชันต่างชนิดกันส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับสารที่สนใจทั้งสาม เนื่องจากการเติมหมู่ฟังก์ชันของไปจะทำให้ซิลิกาเดิมที่มีความสามารถในการดูดซับสารอื่น ๆ ในน้ำมันไบโอดีเซล มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาประเด็นการดูดซับของสารที่สนใจทั้งสามด้วยซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก พบว่าการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ได้มากกว่าซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชัน อะมิโน แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันมีความแตกต่างกัน ซึ่งพิจารณาจากการที่หมู่คาร์บอกซิลิกสามารถทำพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของมอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ได้ดีกว่าซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน เนื่องด้วยค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของคาร์บอกซิลิกนั้นมีมากกว่า จึงส่งผลให้ซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกนั้นสามารถดูดซับปริมาณของมอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ได้ดีกว่า [12, 19]

4.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการดูดซับ

การศึกษาการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ด้วยซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกเป็นตัวดูดซับ โดยการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งมีเงื่อนไขการทดลองคือใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 25 50 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับในสมมติฐานตั้งต้นของผู้ทดลองนั้นได้ประเมินไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่จะทำให้การดูดซับสารที่สนใจทั้งสามเพิ่มขึ้น โดยสถานะของการดูดซับใช้ปริมาณของซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกในการทดลอง 2 กรัม และไบโอดีเซล 47 มิลลิลิตร แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

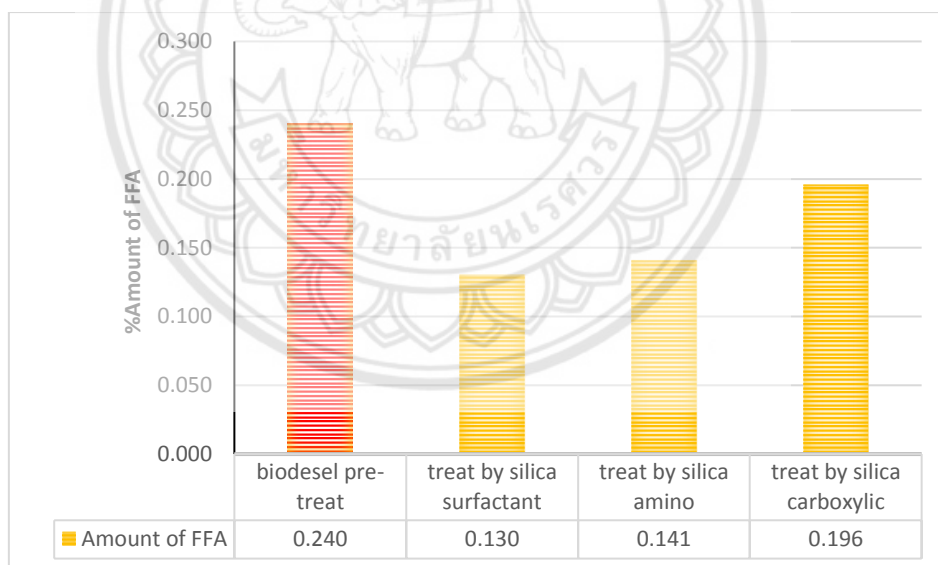
จากรูปที่ 4.7 พบว่า การใช้ซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ โดยร้อยละ ปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 2.393 และไดกลีเซอไรด์ โดยร้อยละปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.116 โดยคิดเป็นร้อยละการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์เท่ากับร้อยละ 6 และ 4 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลก่อนการดูดซับ และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับไดกลีเซอไรด์ โดยร้อยละปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.097

โดยคิดเป็นร้อยละ 19 โดยเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลก่อนการดูดซับ ซึ่งให้ผลดีกว่าในการดูดซับ ไคกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแตกต่างกันความสามารถในการดูดซับสารแต่ละชนิดของตัวดูดซับชนิดเดียวกันมีความแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาประเด็นการดูดซับของสารที่สนใจทั้งสามที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่า ผลในการดูดซับด้วยซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ดีที่สุดที่สังเกตให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงความสามารถในการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์จะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย Duangkamol Na-Ranong และคณะ [49] นอกจากนี้ผลในการดูดซับด้วยซิลิกาฟังก์ชันกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไคกลีเซอไรด์ดีที่สุด

4.3.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบหาค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ

การศึกษาปัจจัยทั้งสามปัจจัย คือ ขนาดรูพรุน ฟังก์ชัน และอิทธิพลของอุณหภูมิ พบว่า มอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่ถูกดูดซับลดลงมากที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 20 โดยเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลก่อนการดูดซับ ผู้ทดลองนั้นได้ประเมินไว้ว่าตัวดูดซับมีการดูดซับสารอื่นก่อนที่จะเกิดการดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ [8, 41] เป็นผลทำให้มีการทำการทดลองวัดค่ากรดไขมันอิสระก่อนและหลังการทดลอง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบการดูดซับกรดไขมันอิสระของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ซิลิกาที่ถูกใช้เป็นตัวดูดซับ มีความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระ โดยเปรียบเทียบซิลิกาผ่านการบำบัดด้วยสารลดความตึงผิว โดยร้อยละปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.13 ซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน โดยร้อยละปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.14 และซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล โดยร้อยละปริมาณที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.19 โดยคิดเป็นร้อยละของกรดไขมันอิสระที่ลดลงไปหลังผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาแต่ละชนิดเท่ากับร้อยละ 46 41 และ 18 ตามลำดับ

จากปริมาณร้อยละของกรดไขมันอิสระที่ลดลง ซิลิกาที่สามารถดูดซับได้น้อยที่สุด คือซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีความสามารถดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ได้มากกว่ากรดไขมันอิสระ และเปรียบเทียบกับซิลิกาชนิดอื่น ๆ ที่อุณหภูมิตีเดียวกัน สำหรับในส่วนของซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับเหมาะกับการใช้ดูดซับกรดไขมันอิสระมากกว่ามอนอกลิเซอไรด์ อย่างไรก็ตาม ซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโน สามารถดูดกรดไขมันอิสระได้น้อยกว่าซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดความตึงผิว

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.7 พบว่า ผลของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ และการเติมหมู่ฟังก์ชันเข้าไปในซิลิกาทำให้พื้นที่ในการดูดซับลดลงเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเข้าไปจับกับพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกาที่ผ่านการบำบัด จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การดูดซับกรดไขมันด้วยซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันอะมิโนลดลง สำหรับฟังก์ชันหมู่คาร์บอกซิลิก ซึ่งได้รับการสังเคราะห์ต่อจากหมู่ฟังก์ชันอะมิโน โดยแสดงผลในส่วนของกราฟวิเคราะห์ FT-IR หัวข้อที่ 4.2 ได้แสดงผลของ N-H ในในยอดที่ 1497 cm^{-1} จึงอธิบายได้ว่า พื้นที่เดิมของซิลิกาที่ผ่านการบำบัดด้วยสารลดแรงตึงผิว ได้รับการเติมเต็มพื้นผิวด้วยหมู่อะมิโนและคาร์บอกซิลิก ส่งผลให้เกิดการขัดขวางพื้นที่ในการดูดซับกรดไขมันอิสระจึงทำให้ดูดซับกรดไขมันอิสระได้น้อยที่สุด



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเติมสารลดแรงตึงผิวเข้าไปในกระบวนการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มรู้พูนของซิลิกานั้นให้ผลดีต่อการดูดซับซึ่งสามารถลดปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ ได้ร้อยละ 3 และร้อยละ 20 ตามลำดับ ในส่วนของการเติมฟังก์ชัน หมูฟังก์ชันอะมิโนนั้นไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ แต่หมูฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกนั้นสามารถดูดซับมอนอกลิเซอไรด์ และ ไดกลีเซอไรด์ได้ร้อยละ 6 และร้อยละ 4 ตามลำดับ ซึ่งก็เนื่องมาจากความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกันระหว่างหมูคาร์บอกซิลิก และไฮดรอกซิลในมอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ ทั้งนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก็ยังส่งผลให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้น

สำหรับในส่วนของกรดไขมันอิสระนั้นซิลิกาที่สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือซิลิกาที่เติมสารลดแรงตึงผิว ถัดมาคือซิลิกาที่มีหมูฟังก์ชันอะมิโน และซิลิกาที่มีหมูฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก โดยสามารถคิดเป็นร้อยละได้เท่ากับ ร้อยละ 46 สำหรับซิลิกาที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว ร้อยละ 41 สำหรับที่มีหมูฟังก์ชันอะมิโน ร้อยละ 18 สำหรับที่มีหมูฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ซึ่งการเติมหมูฟังก์ชันเข้าไปนั้นจะเป็นการลดพื้นที่ผิวลงส่วนหนึ่ง ทำให้ปริมาณของกรดที่ดูดซับได้ลดลงตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดสารปนเปื้อนภายในไบโอดีเซล และการศึกษาเงื่อนไขหรือสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารปนเปื้อนที่สนใจ คือ มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และ ไตรกลีเซอไรด์ จากไบโอดีเซลด้วยกระบวนการดูดซับ โดยซิลิกากับหมูฟังก์ชันอะมิโนและหมูฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก โดยจากการศึกษากระบวนการดูดซับพบว่าผลที่ได้ไม่ตรงตามที่คาดหวังไว้ ซึ่งอาจเกิดจากหลายปัจจัยที่ทำให้กระบวนการดูดซับของตัวดูดซับไม่สมบูรณ์ จึงมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อยอดดังต่อไปนี้

1. การทดลองควรที่จะใช้ช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 70 - 120 องศาเซลเซียส เพื่อให้เห็นค่าความแตกต่างของการทดลองที่ชัดเจน
2. การทดลองการดูดซับควรศึกษาในถังปฏิกรณ์หลายชนิด เช่น ถังปฏิกรณ์แบบกะ เป็นต้น เพราะในบางกรณีถังปฏิกรณ์ชนิดหนึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาที่ทำการทดลอง
3. ควรมีการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ระบบฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของซิลิกาหลังการทดลอง เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของสารในซิลิกาหลังจากการดูดซับ
4. ควรมีการทดสอบไบโอดีเซลหลังผ่านการดูดซับด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีซ้ำ เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการทดสอบ
5. ควรมีการหาปริมาณหมูฟังก์ชันในซิลิกาที่ได้จากการสังเคราะห์ เพราะสันนิษฐานว่าอาจเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการดูดซับ
6. ควรศึกษาเวลาที่ใช้ในการสัมผัสระหว่างไบโอดีเซลและซิลิกา

เอกสารอ้างอิง

- [1] บทความเทคโนโลยีนวัตกรรม (2006). **เชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานจากธรรมชาติเพื่อธรรมชาติ**. สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/374>.
- [2] Lilis Hermida, Ahmad Zuhairi Abdullah, & Abdul Rahman Mohamed. (2011). **Synthesis Of Monoglyceride Through Glycerol Esterification With Lauric Acid Over Propyl Sulfonic Acid Post-Synthesis Functionalized SBA-15 Mesoporous Catalyst**. Chemical Engineering Journal, 174(23), 668-676.
- [3] Inmok Lee, Lisa M. Pfalzgraf, George B. Poppe, Erica Powers, & Troy Haines. (2007). **The Role of Sterol Glucosides on Filter Plugging**. Biodiesel Magazine
- [4] Sanette Marx. (2016). **Glycerol-free biodiesel production through transesterification: a review**. Fuel Processing Technology, 151, 139-147.
- [5] กำพล ประทีปชัยกูร และสุรัชย์ จันทร์ศรี. (2008). **การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ ชนิดที่บรวมด้วยวิธีการเอสเทอร์ฟิเคชัน**. จากการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 387-392.
- [6] Potjane Saeong, Maythee Saisriyoot, Anusith Thanapimmetha, & Penjit Srinophakun. (2017). **The Response Surface Optimization Of Steryl Glucosides Removal In Palm Biodiesel Using Silica Adsorption**. Fuel, 191, 1-9.
- [7] สิริพิชญ์ ส่งทวี. (2557). **การศึกษาการเกิดสเตอรอลกลูโคไซด์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล**. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. วศ.ม.วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [8] ภาคภูมิ จตุพรสวัสดิ์ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมินทร์ ชูวงศ์ ชัยสุข และพรสวรรค์ อิศวแสงรัตน์. (2554). **การเตรียมตัวดูดซับจากแกลบเพื่อดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ**. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 1-4.
- [9] Bing Lun Li, Stuart M. Clarke, & D. Ian Wilson. (2011). **Solid monolayers of glycerides adsorbed on the surface of graphite powder**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 389, 180-187.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Nisakorn Saengprachum, & Somchai Pengprecha. (2016). **Preparation and characterization of aluminumoxide coated extracted silica from rice husk ash for monoglyceride removal in crude biodiesel production.** Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 58, 441-450.
- [11] ศิริวรรณ ตันอายุวรรณ. (2007). **การศึกษาการเสื่อมสภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันสบู่ดำและผลที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.** วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [12] Pradthana. (19 มีนาคม 2008). **กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process).** สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2560, จาก <https://pradthana.wordpress.com/tag>.
- [13] วิกิพีเดีย. (5 พฤษภาคม 2559). **โมโนกลีเซอไรด์.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2561, จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/โมโนกลีเซอไรด์>.
- [14] วิกิพีเดีย. (5 พฤษภาคม 2559). **ไดกลีเซอไรด์.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2561, จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ไดกลีเซอไรด์>.
- [15] วิกิพีเดีย. (5 พฤษภาคม 2559). **ไตรกลีเซอไรด์.** สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2561, จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ไตรกลีเซอไรด์>.
- [16] เตชา ฉัตรศิริเวช. (2009). **กระบวนการดูดซับ (ADSORPTION PROCESSES).** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [17] Haiyan Zhang, Longjian Chen, Minsheng Lu, Junbao Li, & Lujia Han. (2016). **A Novel Film–Pore–Surface Diffusion Model To Explain The Enhanced Enzyme Adsorption Of Corn Stover Pretreated By Ultrafine Grinding.** Biotechnology for Biofuels, 181(9), 1-12.
- [18] Wirunya Cream. (26 กุมภาพันธ์ 2012). **ความตึงผิว (Surface Tension).** สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2561, จาก <http://wirunyacream.blogspot.com/>
- [19] Sukanya Khuenkankong. (2012). **สภาพมีขี้ของโมเลกุล.** สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2560, จาก <http://www.kr.ac.th/tech/detchm48/frame3.html>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [29] Yanqing An, Miao Chen, Qunji Xue, & Weimin Liu. (2007). **Preparation and self-assembly of carboxylic acid-functionalized silica.** Journal of Colloid and Interface Science, 311(2), 507-513.
- [30] Panuphong Pootawang, & Sang Yul Lee. (2012). **Rapid synthesis of Ag nanoparticles-embedded mesoporous silica via solution plasma and its catalysis for 4-nitrophenol reduction.** Materials Letters, 80, 1-4.
- [31] Kenneth S. W. Sing, & Ruth T. Williams. (2014). **Physisorption Hysteresis Loops and the Characterization of Nano-Porous Materials.** Adsorption Science and Technology, 22(10), 773-782.
- [32] K. S. W. SING, D. H. EVERETT, R. A. W. HAUL, L. MOSCOU, R. A. PIEROTTI, J. ROUQUEROL, & T. SIEMIENIEWSKA (1985). **REPORTING PHYSISORPTION DATA FOR GAS/SOLID SYSTEMS WITH SPECIAL REFERENCE TO THE DETERMINATION OF SURFACE AREA AND POROSITY.** Pure & Appl. Chem., 57(4), 603-619.
- [33] Kazuma Nakanishi, Masahiro Tomita, & Katsuya Kato. (2015). **Synthesis of amino-functionalized mesoporous silica sheets and their application for metal ion capture.** Journal of Asian Ceramic Societies, 3(1), 70-76.
- [34] C. T. Kresge, M. E. Leonowicz, W. J. Roth, J. C. Vartuli, & J. S. Beck. (1992). **Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism.** Letters of Nature, 359, 710-712.
- [35] Yuliya Antsiferova, Nataliya Sotnikova and Elena Parfenyuk. (2013). **Different Effects of the Immunomodulatory Drug GMDP Immobilized onto Aminopropyl Modified and Unmodified Mesoporous Silica Nanoparticles upon Peritoneal Macrophages of Women with Endometriosis.** BioMed Research International, 2013, 1-10.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [36] Min Li, Ming-yu Li, Chang-gen Feng, & Qing-xuan Zeng. (2014). **Preparation and characterization of multi-carboxyl-functionalized silica gel for removal of Cu (II), Cd (II), Ni (II) and Zn (II) from aqueous solution.** Applied Surface Science, 314, 1063-1069.
- [37] Leandro Vincius Alves Gurgel, Rossimiriam Pereira de Freitas, & Laurent Frdric Gil. (2008). **Adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) from aqueous single metal solutions by sugarcane bagasse and mercerized sugarcane bagasse chemically modified with succinic anhydride.** Carbohydrate Polymers, 74, 922-929.
- [38] Biplab K. Deka, & Tarun K. Maji. (2012). **Effect of SiO₂ and nanoclay on the properties of wood polymer nanocomposite.** Polymer Bulletin, 70(2), 403-417.
- [39] นิพัทธ์ เกตุประเสริฐ. (2558). **การศึกษาการดูดซับแก๊สในซิลิกาพอร์นโดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [40] ชินวัฒน์ ศาสนนันท์. (2553). **การพัฒนาวัสดุดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียในเขตอุตสาหกรรม.** มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- [41] Wisnu Arfian A. Sudjarwo, & Mei Magdayanti F. Bee. (2017). **Synthesis of Silica Gel from Waste Glass Bottles and Its Application for the Reduction of Free Fatty Acid (FFA) on Waste Cooking Oil.** AIP Conference Proceedings, 1855(1), 1-6.
- [42] R. Kumar, M.A. Barakat, Y.A. Daza, H.L. Woodcock, & J.N. Kuhn. (2013). **EDTA functionalized silica for removal of Cu(II), Zn(II) and Ni(II) from aqueous solution.** Journal of Colloid and Interface Science, 408, 200-205.
- [43] D. H. Everett. (1975). **Capillary condensation and adsorption hysteresis.** Berichte der Bunsengesellschaft, 79(9), 732-734.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [44] ฤชงค์ ศรีหรั่ง. (2558). การศึกษาการดูดซับมีเทนและไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์ที่มีนิกเกิลบนพื้นผิว โดยแบบจำลองมอนติคาร์โล. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [45] ไกรศรี ทองเสมื่อน. (2551). ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของดินต่อระบบการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม .มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [46] Bing Lun Li, Stuart M. Clarke, & D. Ian Wilson. (2011). **Solid monolayers of glycerides adsorbed on the surface of graphite powder.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 389, 180-187.
- [47] G. M. Chupka, L. Fouts, J. A. Lennon, T. L. Alleman, D. A. Daniels, & R. L. McCormick. (2013). **Saturated monoglyceride effects on low temperature performance of biodiesel blends.** Fuel Processing Technology, 118, 302-309.
- [48] Ales Vavra, Martin Hajek, & Frantisek Skopal. (2016). **The removal of free fatty acids from methyl ester.** Renewable Energy, 109, 695-700.
- [49] Na-Ranong D, Launghaleongpong P, & Khambung S. (2015). **Removal of steryl glucosides in palm oil based biodiesel using magnesium silicate and bleaching earth.** Fuel, 143, 229-235.



- 1) ทำการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยกระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก. 1 กระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

- 2) ทำการกวนสารเพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันอะมิโนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ ก.2



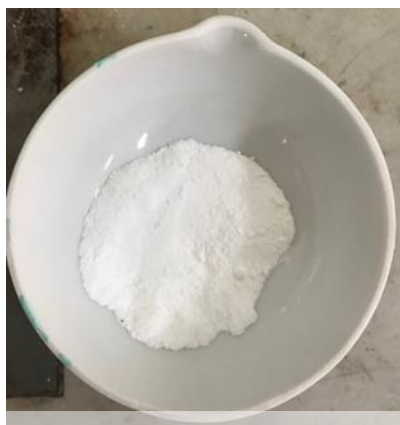
รูปที่ ก. 2 การกวนสารที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- 3) เมื่อครบจำนวน 24 ชั่วโมงแล้ว นำไปกรองด้วยเครื่องแก้วสุญญากาศ ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก. 3 ชุดกรองเครื่องแก้วแบบสุญญากาศ

- 4) เมื่อทำการกรองเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเข้าเตาอบที่ 80°C เป็นเวลา 15 นาที จึงจะได้ซิลิกาที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก. 4 ซิลิกาที่ผ่านการอบเรียบร้อยแล้ว

- 5) ในกรณีการทำซิลิกาแบบ Sol-gel แล้วจะทำการกวนทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก. 5 กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีการแบบ Sol-gel

- 6) นำซิลิกาที่ได้ใส่ลงในส่วนคอลัมน์สำหรับบรรจุซิลิกา ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก. 6 การบรรจุซิลิกาในคอลัมน์

7) ทำการดูดซับน้ำมันไบโอดีเซลด้วยซิลิกา ดังรูปที่ ก.7



รูปที่ ก. 7 การดูดซับน้ำมันไบโอดีเซลด้วยซิลิกา

8) น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก. 8 น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับเรียบร้อยแล้ว

9) ซิลิกาก่อนการทดลองและหลังการทดลอง ดังรูปที่ ก.9



รูปที่ ก. 9 (a) ซิลิกาก่อนการทดลอง (b) ซิลิกาหลังการทดลอง



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

1) การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 M จากมวลโมเลกุลของ NaOH คือ 40.0 g/mol

จะได้น้ำหนักของ NaOH จากสูตร $\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$

$$\frac{g}{40 \frac{g}{mol}} = \frac{0.1 \text{ mol/L} \times 250 \text{ L}}{1000}$$

$$g = 1 \text{ g}$$

2) การเตรียม CTAB ความเข้มข้น 20 mM จากมวลโมเลกุลของ CTAB คือ 364.45 g/mol

จะได้น้ำหนักของ CTAB จากสูตร

$$n = \frac{g}{Mw}$$

$$20 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} = \frac{g}{364.45 \text{ g/mol}}$$

$$g = 7.289 \text{ g/L}$$

เนื่องจากการสังเคราะห์ทำเพียงครั้งละ 50 mL

จึงพบว่า NaOH 1000 mL ใช้ CTAB 7.289 g

ถ้าต้องการ NaOH 50 mL จะใช้ $\text{CTAB} = \frac{50 \text{ mL} \times 7.289 \text{ g}}{1000} = 0.3645 \text{ g}$



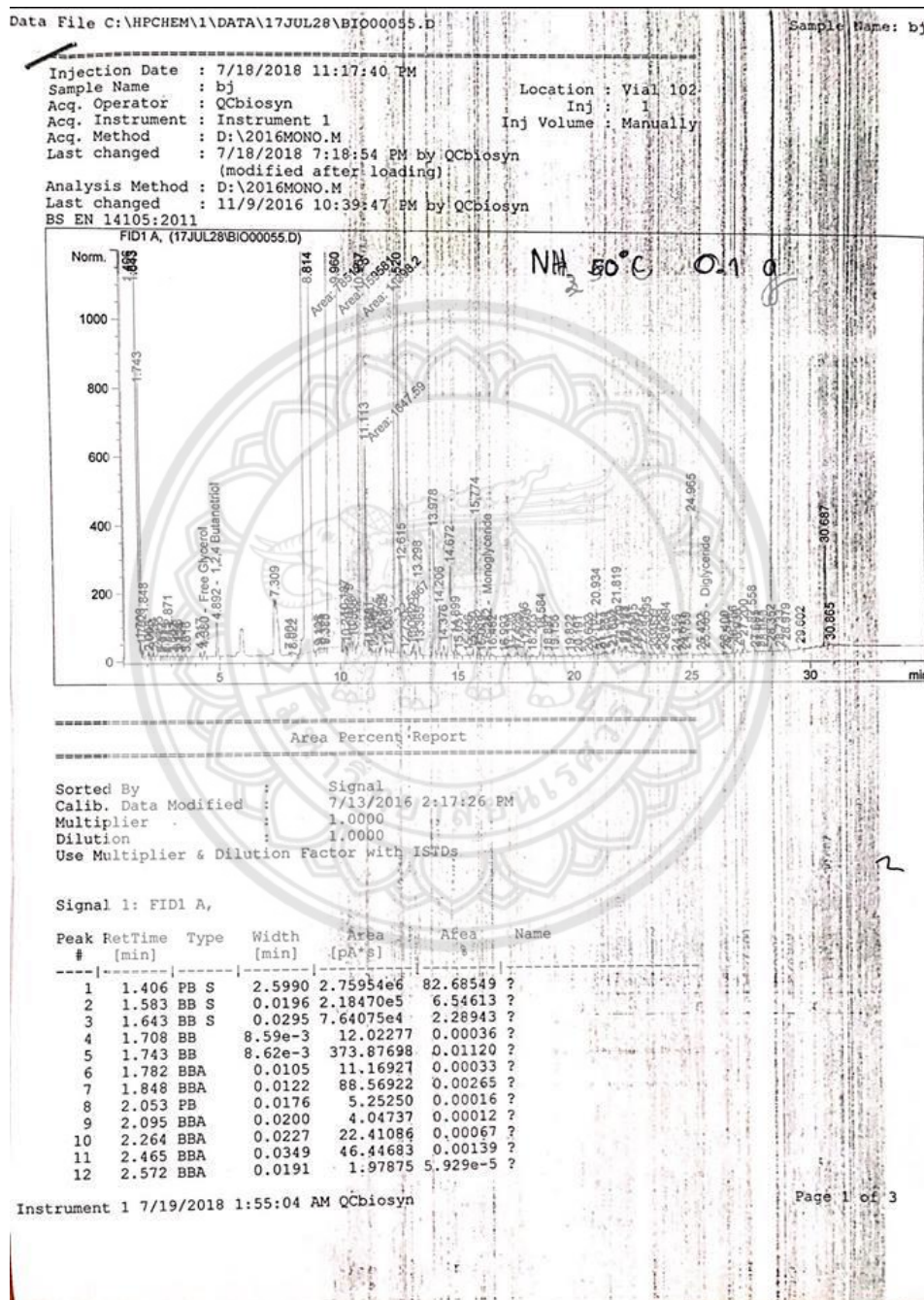
ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบ

มหาวิทยาลัยพระนคร

1) ข้อมูลดิบจากเครื่องมือวัด Gas Chromatography

1.1) จากการนำน้ำมันไบโอดีเซลไปทำการตรวจวัด มอนอ ได และไตรกลีเซอไรด์ จะปรากฏพีก ดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค. 1 พิกจากการวัดด้วยเครื่องมือวัด GC

1.2) เมื่อทำการวัดเรียบร้อยแล้วจะปรากฏพื้นที่ใต้กราฟ ดังรูปที่ ค.2

C:\ANALCHEM\1\DATA\17JUL28\BIO00055.D

Sample Name: bj

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Area %	Name
13	2.654	BBA	0.0205	2.36189	7.077e-5	?
14	2.724	BBA	0.0204	1.81112	5.427e-5	?
15	2.813	BB	0.0178	2.23921	6.709e-5	?
16	2.871	BBA	0.0207	117.44598	0.00352	?
17	3.062	FB	0.0232	1.80269	5.401e-5	?
18	3.127	BBA	0.0260	2.47639	7.420e-5	?
19	3.258	BBA	0.0238	13.96578	0.00042	?
20	3.326	BBA	0.0231	1.45738	4.367e-5	?
21	3.424	BBA	0.0251	6.03175	0.00018	?
22	3.616	BBA	0.0285	5.96030	0.00018	?
23	4.217	FBA	0.0287	24.40100	0.00073	?
24	4.380	FBA	0.0452	57.07751	0.00171	Free Glycerol
25	4.892	FBA	0.0550	410.87561	0.01231	1,2,4 Butanetriol
26	7.309	BB	0.0235	31.98309	0.00096	?
27	7.904	FBA	0.0378	12.45867	0.00037	?
28	8.022	BBA	0.0976	20.48006	0.00061	?
29	8.814	MM	0.2124	7.85125e4	2.35251	?
30	9.105	BB	0.0240	2.87337	8.610e-5	?
31	9.185	BB	0.0531	24.14956	0.00072	?
32	9.325	BB	0.0247	5.27711	0.00016	?
33	9.385	BB	0.0433	8.64580	0.00026	?
34	9.960	MM	0.2620	1.59581e5	4.78159	?
35	10.187	BB	0.0276	161.07701	0.00483	?
36	10.241	BB	0.0345	34.01273	0.00102	?
37	10.379	BB	0.0405	200.78506	0.00602	?
38	10.469	BB	0.0368	76.73869	0.00230	?
39	10.555	BB	0.0422	73.34623	0.00220	?
40	10.967	MM	0.1010	1.13982e4	0.34153	?
41	11.113	MM	0.0459	1647.58545	0.04937	?
42	11.201	MM	0.0236	22.58671	0.00068	?
43	11.258	BB	0.0184	4.50937	0.00014	?
44	11.336	BB	0.0346	21.84748	0.00065	?
45	11.436	BB	0.0493	13.09787	0.00039	?
46	11.575	BB	0.0558	183.40190	0.00550	?
47	11.754	BB	0.0183	27.79538	0.00083	?
48	11.802	BB	0.0223	10.06599	0.00030	?
49	12.008	BB	0.0585	29.31997	0.00088	?
50	12.520	BB	0.1006	1.79394e4	0.53753	?
51	12.615	BBA	0.0344	555.10602	0.01663	?
52	12.730	BBA	0.0305	10.43061	0.00031	?
53	13.042	FB	0.0384	30.80632	0.00092	?
54	13.117	BB	0.0320	54.97620	0.00165	?
55	13.298	BB	0.0453	630.53363	0.01889	?
56	13.365	BBA	0.0191	18.42971	0.00055	?
57	13.978	FB	0.0459	1239.74060	0.03715	?
58	14.206	BB	0.0446	428.30133	0.01283	?
59	14.376	BB	0.0528	128.14934	0.00384	?
60	14.672	BB	0.0602	1148.42078	0.03441	?
61	14.899	BB	0.0402	155.51846	0.00466	?
62	15.031	BBA	0.0457	29.56402	0.00089	?
63	15.446	FB	0.0371	9.14387	0.00027	?
64	15.630	BB	0.0135	2.65979	7.970e-5	?
65	15.774	BB	0.0527	1524.47888	0.04568	?
66	15.892	BB	0.0428	48.88525	0.00146	?
67	16.019	BBA	0.0495	11.02477	0.00033	?
68	16.282	BBA	0.0445	73.52055	0.00220	Monoglyceride
69	16.482	BBA	0.0834	24.25676	0.00073	?
70	16.993	FBA	0.0401	7.51168	0.00023	?
71	17.196	FBA	0.0480	21.09725	0.00063	?
72	17.528	FB	0.0442	29.68311	0.00089	?
73	17.620	BB	0.0351	8.04328	0.00024	?
74	17.846	BB	0.0437	123.66679	0.00371	?
75	17.970	BB	0.0516	74.91045	0.00224	?
76	18.203	BBA	0.0595	24.18074	0.00072	?
77	18.584	BBA	0.0461	204.20387	0.00612	?

Instrument 1 7/19/2018 1:55:04 AM QCbioasyu

Page 2 of 3

รูปที่ ค. 2 พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดจากการวัดด้วยเครื่องมือวัด GC

1.3) เมื่อทำการวัดเรียบร้อยแล้ว จะปรากฏพื้นที่ใต้กราฟ (ต่อ) ดังรูปที่ ค.3

C:\HPCHEM\1\DATA\17JUL28\BIO00055.D

Sample Name: bj

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Area %	Name
78	18.887	BBA	0.0896	33.52152	0.00100	?
79	19.156	BBA	0.0350	6.01351	0.00018	?
80	19.822	PBA	0.0505	13.30084	0.00040	?
81	20.191	PBA	0.0357	4.43012	0.00013	?
82	20.622	PB	0.0311	6.54313	0.00020	?
83	20.782	BB	0.0351	16.49985	0.00049	?
84	20.934	BBA	0.0441	407.06589	0.01220	?
85	21.157	PB	0.0422	14.03263	0.00042	?
86	21.281	BB	0.0364	14.25393	0.00043	?
87	21.354	BB	0.0306	12.42531	0.00037	?
88	21.624	BB	0.0257	7.49012	0.00022	?
89	21.692	BB	0.0187	4.64053	0.00014	?
90	21.819	BB	0.0493	411.52756	0.01233	?
91	21.939	BB	0.0481	52.51448	0.00157	?
92	22.123	BB	0.0342	26.93456	0.00081	?
93	22.193	BB	0.0275	12.94797	0.00039	?
94	22.271	BB	0.0191	7.37637	0.00022	?
95	22.515	BB	0.0446	70.86817	0.00212	?
96	22.595	BB	0.0300	4.28674	0.00013	?
97	22.707	BB	0.0833	17.90456	0.00054	?
98	22.924	BB	0.0437	56.25220	0.00169	?
99	23.095	BB	0.0496	187.35681	0.00561	?
100	23.359	BB	0.0390	43.93677	0.00132	?
101	23.451	BBA	0.0358	8.00851	0.00024	?
102	23.723	PB	0.0400	37.10661	0.00111	?
103	23.828	BB	0.0276	3.13488	9.393e-5	?
104	23.904	BBA	0.0566	153.49831	0.00460	?
105	24.356	PB	0.0351	2.77505	8.315e-5	?
106	24.611	BB	0.0666	17.34492	0.00052	?
107	24.759	BB	0.0373	17.60034	0.00053	?
108	24.965	BBA	0.0447	1385.10779	0.04150	?
109	25.422	PBA	0.0354	7.06459	0.00021	?
110	25.585	PBA	0.0459	29.19441	0.00087	Diglyceride
111	26.400	PB	0.0487	28.08210	0.00084	?
112	26.514	BBA	0.0333	7.31802	0.00022	?
113	26.756	BBA	0.0481	66.86780	0.00200	?
114	26.938	BBA	0.0496	46.65547	0.00140	?
115	27.200	BB	0.0603	173.08308	0.00519	?
116	27.558	BB	0.0599	332.98297	0.00998	?
117	27.695	BBA	0.0467	6.73837	0.00020	?
118	27.921	BBA	0.0394	7.11226	0.00021	?
119	28.050	BBA	0.0371	6.53032	0.00020	?
120	28.352	PBA	0.0495	71.29395	0.00214	?
121	28.733	BBA	0.0718	13.32793	0.00040	?
122	28.979	BBA	0.0614	95.78031	0.00287	?
123	29.602	BBA	0.0705	42.04716	0.00126	?
124	30.687	BBA	0.0524	1085.88831	0.03254	?
125	30.865	BBA	0.0593	25.75434	0.00077	?
126	31.660		0.0000	0.00000	0.00000	Triglyceride

Totals : 3.33740e6

Results obtained with enhanced integrator

2 Warnings or Errors :

Warning : Calibrated compound(s) not found

Warning : Invalid calibration curve (Free Glycerol)

*** End of Report ***

Instrument 1 7/19/2018 1:55:04 AM QCbiosyn

Page 3 of 3

รูปที่ ค. 3 พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดจากการวัดด้วยเครื่องมือวัด GC (ต่อ)

2) ข้อมูลดิบจากเครื่องมือวัด BET

2.1) จากการวัดความเป็นรูพรุนแล้วจะพบปรากฏ Isotherm Linear Plot ของซิลิกาตัวอย่าง ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ค่า Isotherm Linear Plot ของซิลิกาตัวอย่าง

Isotherm Linear Plot		Isotherm Linear Plot	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.011012935	1.293453485	0.958814582	7.59593436
0.032863138	1.616618983	0.963798267	7.92329365
0.067616054	1.871327606	0.967944604	8.259670195
0.079749039	1.936878911	0.971190344	8.568397357
0.099877316	2.037179626	0.973656874	8.842135292
0.120160009	2.126676761	0.977277733	9.212390376
0.140316802	2.203942954	0.979955162	9.574773481
0.16047205	2.275441394	0.981759041	9.880563841
0.180466138	2.345514871	0.984090215	10.31945079
0.200550533	2.40662018	0.98572814	10.64380439
0.249344268	2.518318246	0.988212196	11.11965589
0.29952643	2.625107169	0.988683635	11.34127513
0.349336216	2.73165977	0.990902891	11.80576105
0.398855113	2.840184952		
0.448774765	2.949371132		
0.498629333	3.071542687		
0.548470283	3.203867515		
0.598377359	3.352712739		
0.648116804	3.527262869		
0.697981843	3.733342952		
0.738317817	3.936400056		
0.768579678	4.11603699		
0.79855963	4.331923022		
0.81915314	4.508637778		
0.838909562	4.702774915		
0.85912874	4.929126812		
0.874483125	5.129989507		
0.889558922	5.369931638		
0.904392143	5.647613109		
0.915008177	5.888517489		
0.924712073	6.154702202		
0.933147856	6.414765728		
0.939335841	6.643766354		
0.947122635	6.955598468		
0.953054184	7.243224389		

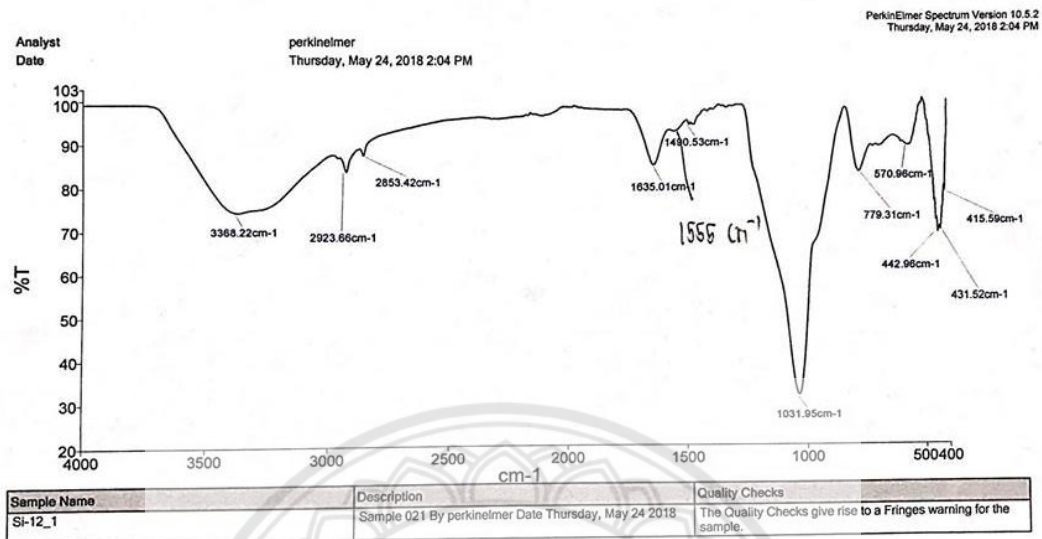
2.2) ค่าที่ปรากฏเป็น Isotherm Linear Plot ของซิลิกาที่เติมสารเพิ่มรูปพรุน ดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 ค่า Isotherm Linear Plot ของซิลิกาที่เติมสารเพิ่มรูปพรุน

Isotherm Linear Plot		Isotherm Linear Plot	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)
0.009583397	3.022511	0.958628953	27.17893
0.028621731	4.366045	0.964009315	27.80908
0.063537657	5.596297	0.9678793	28.31746
0.078575515	5.998559	0.971032105	28.75218
0.099475527	6.505837	0.974072409	29.18106
0.11952905	6.938101	0.976975354	29.61314
0.139312377	7.3756	0.97988537	30.09975
0.159037596	7.836105	0.982098396	30.48251
0.178575509	8.36572	0.984183917	30.8468
0.198032593	8.953382	0.985970665	31.23851
0.24527985	10.46593	0.988122416	31.68018
0.29562124	11.85403	0.989005258	31.94037
0.348816508	12.71827	0.990681651	32.28214
0.397573098	13.22667		
0.447572225	13.66194		
0.498291822	14.09516		
0.548823762	14.53304		
0.598179855	14.98907		
0.647790069	15.48818		
0.697655329	16.07378		
0.737819076	16.65432		
0.768480422	17.18398		
0.798203337	17.79344		
0.818618103	18.3146		
0.838561249	18.91198		
0.858504208	19.60756		
0.873809304	20.25392		
0.8888849	21.00669		
0.903579524	21.90997		
0.914618242	22.70669		
0.924391821	23.51359		
0.932254267	24.2613		
0.93981633	25.01578		
0.946717389	25.75171		
0.952569433	26.43978		

1) ดิบจากเครื่องมือวัด FT- IR

3.1) จากการวัดด้วยเครื่องมือวัด FT- IR จะปรากฏกราฟซิติกาบหมู่มงกซันอะมิโน ดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค. 4 กราฟซิติกาบหมู่มงกซันอะมิโน