

ดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์บน
ตัวรองรับไบโอชาร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

Dehydration of ethanol to ethylene over molybdenum oxides and tungsten oxides
catalysts on biochar support



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty Of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา โมลิบดีนัมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์บนตัวรองรับไบ โอชาร์
โดย	นายปณต ปิ่นสุภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาสน์อำนวย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกราชชัย ไชยชนะ)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปณต ปิ่นสุภา : ดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์. (Dehydration of ethanol to ethylene over molybdenum oxides and tungsten oxides catalysts on biochar support) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.บรรเจิด จงสมจิตร

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ที่ทำมาจากไม้ไผ่ (Mo/BOC และ W/BOC) โดยการทำให้ดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนที่อุณหภูมิ 200 - 400 องศาเซลเซียสและทำการแปรค่าเปอร์เซ็นต์ของโลหะที่ใส่ลงไป 2, 5, 7 และ 10% โดยน้ำหนัก วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้วิธีการเคลือบฝังทั้งหมด หลังจากนั้นจะนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปทำการทดสอบคุณลักษณะด้วยวิธีต่างๆ เช่น SEM-EDX, XRD และอื่นๆ เป็นต้น ต่อมาจะได้ทำการหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันสูงสุด ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนที่ดีที่สุดและอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเอทิลีนมากที่สุด อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบตัวรองรับไบโอชาร์ที่ทำมาจากวัสดุอื่นอีก ได้แก่ ไบโอชาร์จากชานอ้อยและกัญชง โดยผลการทดลองจะได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของโลหะที่เหมาะสมที่สุดคือ 10% ทั้งของโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสแตนออกไซด์ โดย 10%Mo/BOC จะให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดเท่ากับ 44.6% ค่าการเลือกเกิดเอทิลีนมากที่สุด 57.5% และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 400 องศาเซลเซียส 10%W/BOC จะให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดคือ 6.8% ค่าการเลือกเกิดเอทิลีนสูงสุดเท่ากับ 49.6% และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 400 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6570138121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Ethanol Dehydration. Biochar. Molybdenum Oxide. Tungsten Oxide.
Ethylene.

Panot Pinsupa : Dehydration of ethanol to ethylene over molybdenum oxides and tungsten oxides catalysts on biochar support. Advisor: Prof. BUNJERD JONGSOMJIT, Ph.D.

This research investigated the characteristics and efficiency of molybdenum oxide catalysts (Mo/BOC) and tungsten oxide catalysts (W/BOC) supported on bamboo-derived biochar. The catalysts demonstrated their efficacy through catalyzing the dehydration of ethanol to ethylene over a temperature range of 200 to 400 degrees Celsius, with various metal loadings of 2, 5, 7, and 10 wt%. The catalyst preparation involved a complete impregnation method, followed by characterization of the catalysts using various techniques such as SEM-EDX, XRD, and other techniques subsequently. The research aimed to identify the catalyst that provides the highest ethanol conversion, optimal selectivity for ethylene, and the temperature yielding maximum ethylene yield. Additionally, a comparison was made with biochar supports derived from other raw materials including bagasse and hemp. The experimental results indicated that the most suitable metal loading was 10 wt% for both for molybdenum oxide and tungsten oxide catalysts, especially, the 10 wt% Mo/BOC was the best catalyst among other catalysts in this study.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2023

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีบีนามออกไซด์และ
ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ซึ่งนี้สามารถสำเร็จจุลวงไปได้ด้วยดี ด้วยทุนวิจัย fundamental
fund ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ศ.ดร.บรรเจิด จงสมจิตร ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยแนะนำ ซึ่ง
แนวทางการแก้ไข ให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ จนสามารถทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จจุลวงไปได้, ดร.จิรดิ
อบอวย ผู้ซึ่งเป็นพี่เลี้ยงคอยสนับสนุนในเรื่องต่างๆ อาทิเช่น การจัดหาสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย สอนใช้
เครื่องมือ สอนการอ่านค่าและการแปรผลการทดลอง และคอยให้คำปรึกษาและวิธีที่การแก้ไขปัญหาใน
เรื่องต่างๆ และสุดท้ายขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความ
อนุเคราะห์ ไบโอชาร์ ที่ทำมาจาก ชานอ้อยและกัญชง

ปณต ปิ่นสุภา



สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	3
บทที่ 2	6
2.1 ความสำคัญของเอทิลีน	6
2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	6
2.3 ที่มาและความสำคัญของไบโอชาร์.....	8
2.4 โมลิบดินัมออกไซด์และทังสเทนออกไซด์.....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับไบโอชาร์หรือคาร์บอน.....	9
2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับโมลิบดินัม	12

2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับทั้งสแตน	13
2.5.4 งานวิจัยเกี่ยวกับเอทานอลดีไฮเดรชัน	14
บทที่ 3	15
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	15
3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC	15
3.2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC	16
3.3 การทดสอบคุณลักษณะ	16
3.3.1 Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX).....	16
3.3.2 X-Ray Diffractometer (XRD).....	17
3.3.3 Ammonia-Temperature-Programmed Desorption (NH ₃ -TPD).....	17
3.3.4 Nitrogen Physisorption (BET).....	17
3.3.5 X-ray Photoelectron spectroscopy (XPS).....	17
3.3.6 Thermogravimetric Analysis (TGA)	17
3.3.7 ปฏิกิริยาเอทานอลดีไฮเดรชัน (Dehydrogenation Reaction).....	18
3.4 แผนงานวิจัย	20
3.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	20
บทที่ 4	21
4.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาและการศึกษาปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไป เป็นเอทิลีน	21
4.1.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา	21
4.1.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)	21
4.1.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy(SEM)	23

4.1.1.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)	26
4.1.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption (BET)	27
4.1.1.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Ammonia-Temperature-Programmed Desorption (NH ₃ -TPD)	31
4.1.1.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron spectroscopy (XPS)	33
4.2 การศึกษาปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน	34
4.2.1 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC	34
4.2.2 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC	37
4.2.3 การทดสอบเสถียรภาพ	41
4.2.4 สาเหตุของการเสื่อมสภาพ	42
4.2.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)	42
4.2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) หลังการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน	44
4.2.4.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) หลังการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน	45
4.3 การศึกษาผลของตัวรองรับไอซอร์ที่มีมาจากวัสดุต่างชนิดกัน	46
4.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา	46
4.3.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)	46
4.3.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)	47
4.3.1.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption (BET)	48
4.3.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Ammonia-Temperature-Programmed Desorption (NH ₃ -TPD)	49
4.3.1.5 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)	50

บทที่ 5	56
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก การคำนวณความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ความสามารถในการเลือกเกิด และการ คำนวณผลผลิตเอทีลิน	59
บรรณานุกรม.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	64



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตารางแสดงน้ำหนักของสารที่ซั่งในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC	15
ตารางที่ 2 ตารางแสดงน้ำหนักของสารที่ซั่งในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC.....	16
ตารางที่ 3 ตารางแสดงการดำเนินการของเครื่อง GC	19
ตารางที่ 4 ตารางแสดงแผนงานวิจัย.....	20
ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
ตารางที่ 6 ตารางแสดงปริมาณและชนิดของธาตุที่วัดได้จากเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC.....	26
ตารางที่ 7 ตารางแสดงปริมาณและชนิดของธาตุที่วัดได้จากเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาW/BOC	26
ตารางที่ 8 ตารางแสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC.....	28
ตารางที่ 9 ตารางแสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC.....	28
ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าความเป็นกรดจากเทคนิค NH ₃ -TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC	32
ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่าความเป็นกรดจากเทคนิค NH ₃ -TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC	32
ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่าความเป็นผลึกของตัวรองรับ BOC , Bagasse และ Hemp.....	47
ตารางที่ 13 ตารางแสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp	48
ตารางที่ 14 ตารางแสดงค่าความเป็นกรดจากเทคนิค NH ₃ -TPD ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp.....	50

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	5
รูปที่ 2 ภาพกลไกการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนบน.....	7
รูปที่ 3 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะแก๊ส.....	19
รูปที่ 4 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับไปโอซาร์.....	21
รูปที่ 5 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไปโอซาร์.....	22
รูปที่ 6 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC.....	24
รูปที่ 7 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC.....	25
รูปที่ 8 ตัวเร่งปฏิกิริยา BOC, 2%Mo/BOC, 5%Mo/BOC, 10%Mo/BOC, 2%W/BOC,.....	27
รูปที่ 9 การดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจนของ (a) 2%Mo/BOC, (b) 5%Mo/BOC, (c) 7%Mo/BOC, (d) 10%Mo/BOC และ (f) BOC.....	29
รูปที่ 10 การดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจนของ (a) 2%W/BOC, (b) 5%W/BOC, (c) 7%W/BOC, (d) 10%W/BOC และ (f) BOC.....	30
รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว(Binding Energy) ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	33
รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว(Binding Energy) ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	34
รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC.....	35
รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC.....	36
รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าผลผลิตเอทิลีนของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC.....	36
รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าผลผลิตอะเซตัลดีไฮด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC.....	37
รูปที่ 17 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC.....	38
รูปที่ 18 กราฟแสดงค่าผลผลิตเอทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC.....	39
รูปที่ 19 กราฟแสดงค่าผลผลิตอะเซตัลดีไฮด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC.....	39
รูปที่ 20 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC.....	40

รูปที่ 21 ภาพแสดงการเกิดกลไกปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน	40
รูปที่ 22 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC, 10%W/BOC และ BOC ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง.....	41
รูปที่ 23 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC	43
รูปที่ 24 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%W/BOC.....	43
รูปที่ 25 รูปกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC และ 10%W/BOC ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและใช้งานแล้ว	44
รูปที่ 26 ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC และ 10%W/BOC ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและใช้งานแล้ว.....	45
รูปที่ 27 กราฟ XRD ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp	46
รูปที่ 28 ภาพ SEM ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp.....	47
รูปที่ 29 การดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจนของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp.....	49
รูปที่ 30 กราฟ FTIR ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp	51
รูปที่ 31 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp.....	52
รูปที่ 32 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp.....	53
รูปที่ 33 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp	53
รูปที่ 34 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวรองรับ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp	54
รูปที่ 35 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง	55
รูปที่ 36 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง.....	55

บทที่ 1

บทนำ

บทนำ

เอทานอล เป็นสารที่สามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรและผลผลิตที่นำมาผลิตเอทานอลนั้นคือ อ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล โดยวิธีการหมักผลผลิตทางการเกษตรเหล่านั้นกับเอนไซม์ชนิดต่างๆ [1] ซึ่งในปีพ.ศ. 2563 นั้น เกษตรกรของไทยสามารถผลิตอ้อยได้ถึง 66.9 ล้านตันต่อปี [2] และมันสำปะหลัง 28.9 ล้านตันต่อปี [3] ส่งผลให้ประเทศไทยนั้นสามารถผลิตเอทานอลได้ถึง 5.97 ล้านลิตรต่อวัน (ข้อมูลเดือนเมษายน 2564) [4] ด้วยการผลิตระดับนี้ทำให้ประเทศไทยเป็นประเทศที่สามารถผลิตเอทานอลได้มากที่สุดเป็นอันดับ 7 ของโลก และปริมาณการใช้เอทานอลของประเทศไทยนั้นอยู่ที่ 4.04 ล้านลิตรต่อวัน ราคาเฉลี่ยอยู่ที่ 24-25 บาทต่อลิตร (ข้อมูลปีพ.ศ. 2563) ซึ่งการใช้เอทานอลส่วนใหญ่ในประเทศนั้นใช้เพื่อผสมกับน้ำมันเบนซิน เพื่อให้ได้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ [4] โดยสมบัติของเอทานอลนั้น เป็นแอลกอฮอล์ที่ละลายน้ำได้ดี ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนทำลายพื้นผิวระเหยง่าย จุดเดือดต่ำและติดไฟ เมื่อใส่ลงไปนํ้ามันเชื้อเพลิงแล้ว จะช่วยให้น้ำมันเชื้อเพลิงกลายเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด เผาไหม้ได้สมบูรณ์ ช่วยลดการเกิดมลพิษในอากาศและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5] ซึ่งน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่อยู่ในท้องตลาดนั้นมีอยู่ด้วยกัน 4 ประเภท คือ 1.น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91 ส่วนผสมคือ น้ำมันเบนซินที่มีเลขออกเทน 91 ปริมาณ 90% กับเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ปริมาณ 10% 2.น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 ส่วนผสมคือ น้ำมันเบนซินที่มีเลขออกเทน 95 ปริมาณ 90% กับเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ปริมาณ 10% และเพิ่มสารเคมีที่ชื่อ Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE) เพื่อเพิ่มค่าออกเทน 3.น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20 ส่วนผสมคือ น้ำมันเบนซินชนิดพิเศษปริมาณ 80% กับเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ปริมาณ 20% และ 4.น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ที่มีส่วนผสมคือ น้ำมันเบนซินเพียง 15% กับเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ปริมาณ 85% [6] จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเอทานอลที่ถูกนำไปใช้งานนั้นมีความต้องการสูงในตลาดและสามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรของประเทศไทยได้อย่างมหาศาล

แต่ในปัจจุบันนี้ โลกเริ่มให้ความสนใจในเรื่องพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกมากขึ้น เพราะพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาด ลดมลพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ทั่วโลกนั้นเริ่มปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยนั้นเริ่มมีการนำเข้ารถยนต์พลังงานไฟฟ้า (EV) มาใช้ในประเทศบ้างแล้ว โดยในปี พ.ศ.2564 มีรถยนต์พลังงานไฟฟ้าจดทะเบียนใหม่จำนวน 3,994 คัน [7] และมีความเป็นไปได้ว่าในอีก 5-10 ปี รถยนต์ในประเทศไทยนั้นจะเปลี่ยนมาใช้รถยนต์พลังงานไฟฟ้า

เกือบทั้งหมดในประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้กับปริมาณการใช้น้ำมันแก๊สซอฮอล์ลดลงและจะทำให้ความต้องการใช้เอทานอลลดลง ส่งผลให้ความต้องการของอ้อยและมันสำปะหลังลดลง ทำให้ส่งกระทบโดยตรงกับเกษตรกรของประเทศไทย

ทางผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงปัญหานี้ จึงได้คิดค้นงานวิจัยนี้ขึ้นมา โดยการหาทางเปลี่ยนเอทานอลให้ไปเป็นสารที่มีมูลค่าตัวอื่น ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ที่ทำมาจากไม้ผุ (Mo/BOC) และตัวเร่งปฏิกิริยาทังสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ที่ทำมาจากไม้ผุ (W/BOC) ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังและทำการปรับอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ของโลหะที่ใส่ลงไปบนตัวรองรับเท่ากับ 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจะนำตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไปทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เพื่อที่จะเปลี่ยนเอทานอลให้กลายเป็นเอทีลินซึ่งเป็นสารที่มีมูลค่าและทางผู้วิจัยเชื่อมั่นว่างานวิจัยชิ้นนี้จะสามารถช่วยเหลือเกษตรกรของไทยให้ยังคงอยู่ต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ที่ใช้ในปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทีลิน โดยพิจารณาจากค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอล ค่าการเลือกเกิด และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.3.1 ชนิดของโลหะที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิดคือ โมลิบดีนัมออกไซด์ (Molybdenum Oxides) และ ทังสแตนออกไซด์ (Tungsten oxides)

1.3.2 ศึกษาปริมาณของโลหะโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสแตนออกไซด์ที่ใส่ลงไปบนตัวรองรับไบโอชาร์คือ 2%, 5%, 7% และ 10%

1.3.3 ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ที่ทำมาจากไม้ผุเท่านั้นและจะใช้วิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) ทั้งหมด

1.3.4 ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการทำให้ปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ด้วยเทคนิคโปรแกรมอุณหภูมิของปฏิกิริยา ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส

1.3.5 ทำการศึกษาเสถียรภาพ (stability) ของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst deactivation) โดยทำการคัดเลือกจากตัวแทนของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสแตนออกไซด์ ที่ให้ค่าผลผลิตของเอทิลีนสูงสุด ที่อุณหภูมิที่ดีที่สุด

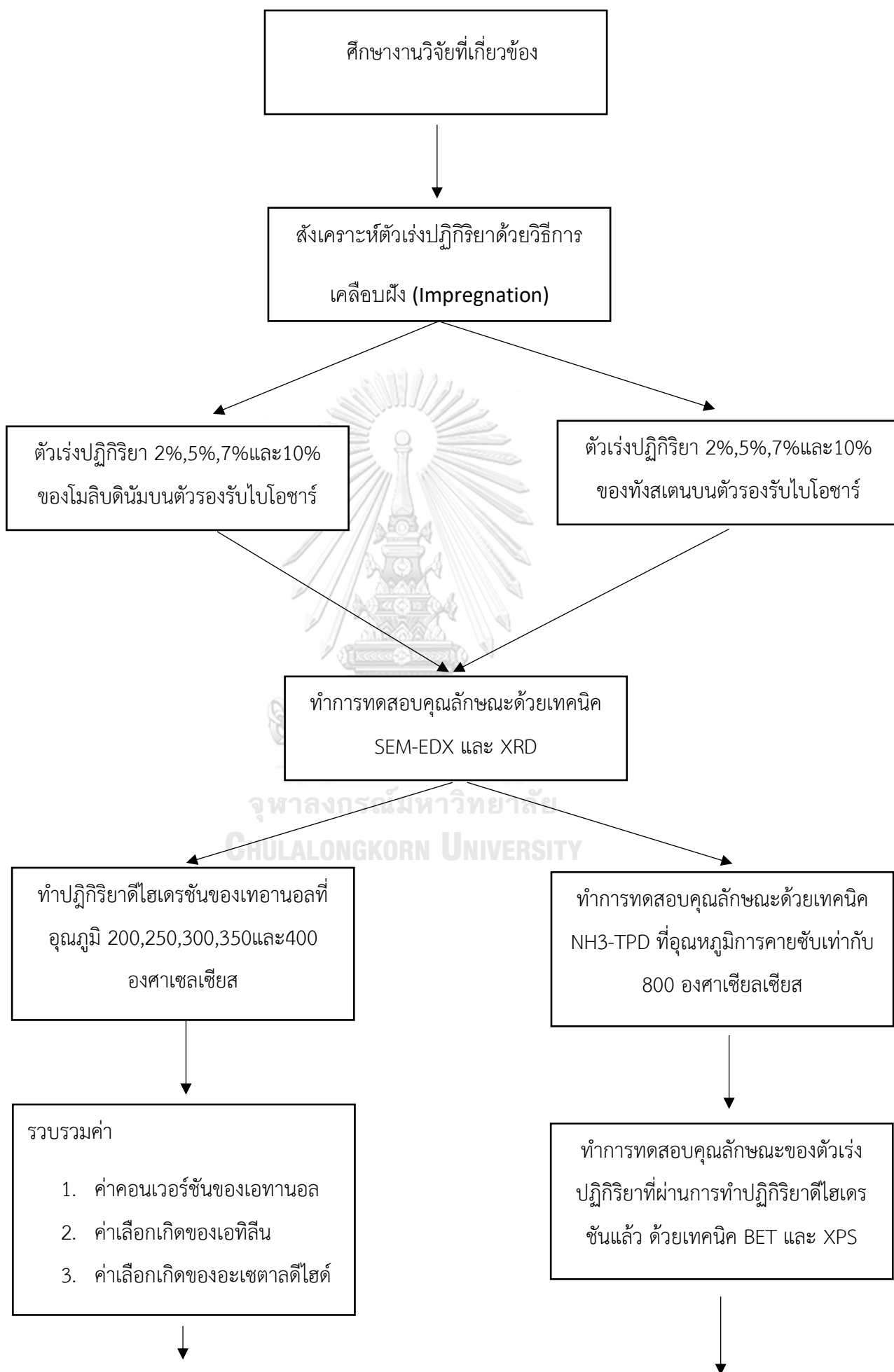
1.3.6 ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของไปโอซาร์ที่ทำมาจากชานอ้อยและกัญชงกับไปโอซาร์ที่ทำมาจากไม้ไผ่ และเลือกตัวแทนโลหะที่ให้ค่าผลผลิตสูงสุด ในปริมาณที่ใส่ลงไปเหมาะสมที่สุด

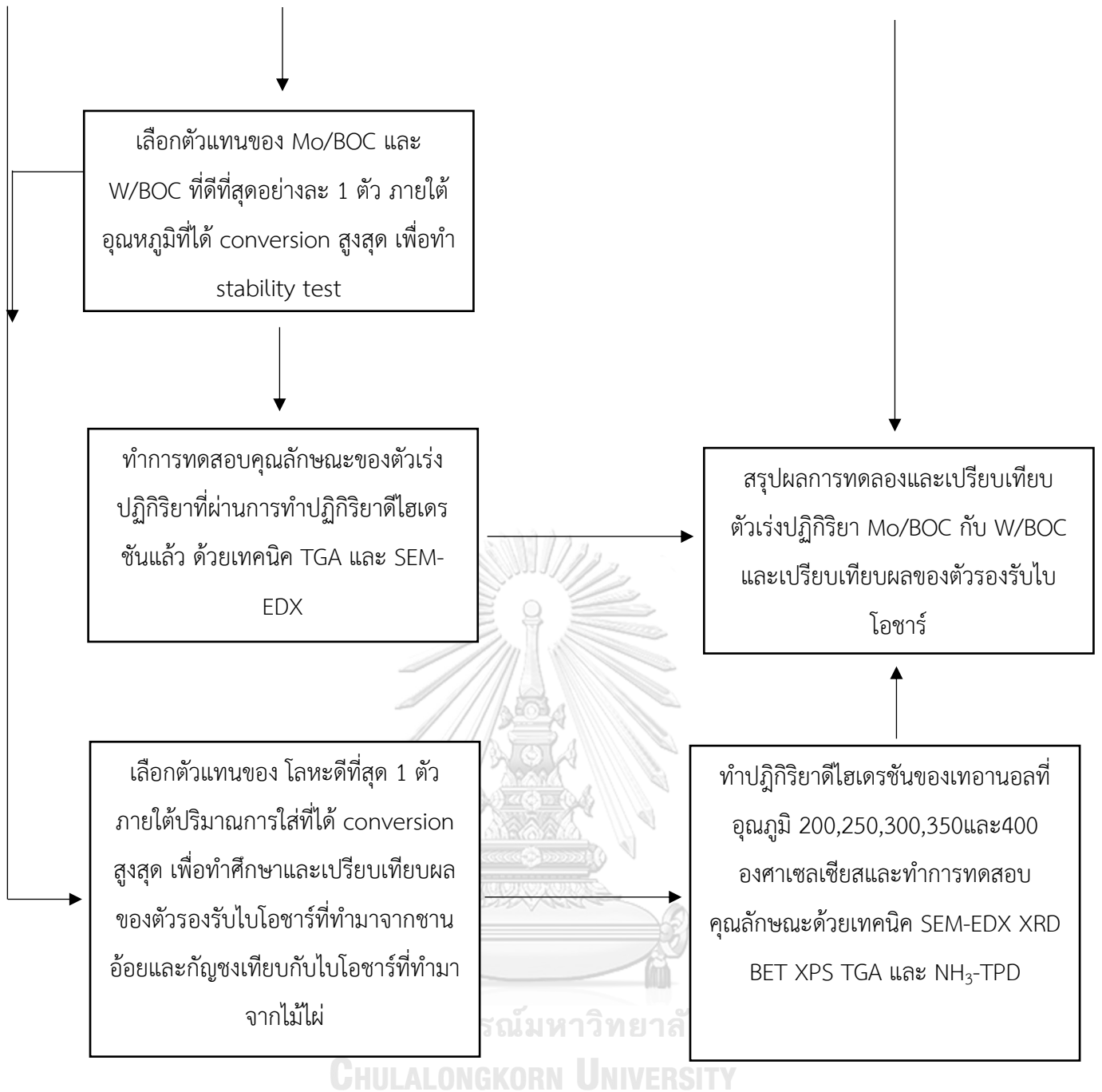
1.3.7 ทำการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ เครื่องเอกซเรย์ ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction; XRD) การทดสอบการดูดซับทางกายภาพ (N₂ physisorption; BET) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM) การเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive X-ray spectroscopy; EDX) การหาความเป็นกรด โดยเทคนิคโปรแกรมอุณหภูมิของการดูดซับแอมโมเนีย (ammonia temperature programmed desorption; NH₃ -TPD) เครื่องมือวิเคราะห์วัสดุนาโนโดยเทคนิคสเปกโตรสโคปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy; XPS) และ เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิตามความร้อน (thermal gravimetric analysis; TGA)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีการวิจัยอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับไปโอซาร์ ส่วนที่ 2 คือ ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไปโอซาร์และส่วนที่ 3 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของตัวรองรับไปโอซาร์ที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน โดยจะมีวิธีดำเนินงานวิจัยดังนี้





รูปที่ 1 ระเบียบวิธีการวิจัย

บทที่ 2

แหล่งที่มาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของเอทิลีน

โดยปกติในชีวิตประจำวันทั่วไปนั้น เอทานอลจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในเรื่องการฆ่าเชื้อโรคเป็นหลัก ซึ่งรู้จักกันในชื่อ เจลแอลกอฮอล์ 75% แต่เอทานอลนั้นยังมีความสำคัญอย่างอื่นอีก นั่นก็คือเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีที่มีมูลค่าได้ โดยเอทานอลนั้นสามารถทำปฏิกิริยาได้หลายชนิดและสามารถแบ่งออกเป็นสารเคมีได้หลายประเภทเช่น ทำปฏิกิริยาสไตรเมอร์ฟอร์มมิงได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจน ทำปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะเซทัลดีไฮด์หรือเอทิลีนออกไซด์และทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพิลีนหรือไดเอทิลอีเทอร์หรือเอทิลีนเป็นต้น [8]

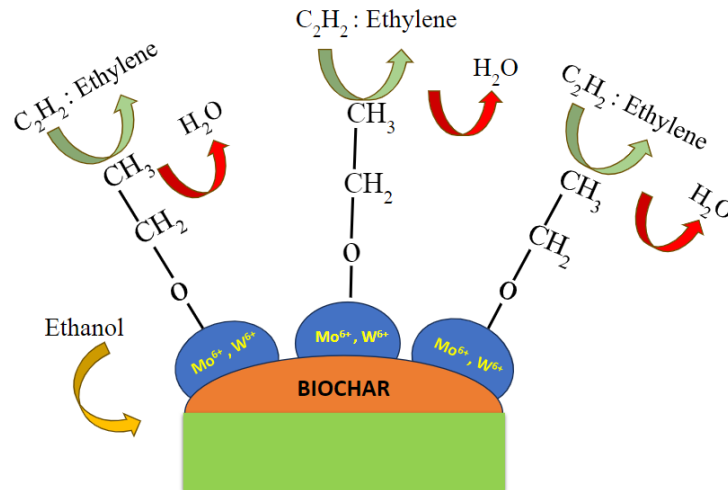
งานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นเอทิลีนโดยปฏิกิริยาดีไฮเดรชันด้วยเหตุผลที่ว่า เอทิลีนนั้นเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญของสารเคมีหลายชนิด เช่น เปลี่ยนไปเป็นโพลีเอทิลีนที่ใช้ในการทำขวดน้ำพลาสติก(ขวด PET) เปลี่ยนไปเป็นเอทิลีนออกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเอทิลีนไกลคอล เปลี่ยนไปเป็นเอทิลเบนซีนที่ใช้ในการผลิตสไตรีน และเปลี่ยนไปเป็นอะเซทัลดีไฮด์ที่ใช้ในการผลิตกรดอะซีติก [9] อีกทั้งราคาของเอทิลีนนั้นราคาสูงกว่าเอทานอลถึง 19.39 เท่า โดยที่เอทานอลราคาอยู่ที่ 29.19 บาทต่อลิตร [10] ส่วนเอทิลีนอยู่ที่ 566 บาทต่อลิตร [11] ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจึงเป็นเหตุผลให้ผู้วิจัยเลือกการเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นเอทิลีน

2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนนั้นเขียนสมการเคมีได้ดังนี้



โดยที่กลไกการเกิดปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นโดยเอทานอลจะไปจับกับโลหะ(Mo,W)ที่อยู่ผิวและในรูพรุนของตัวรองรับไบโอชาร์ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลที่บริเวณโลหะ ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเอทิลีนและน้ำ ตามภาพ



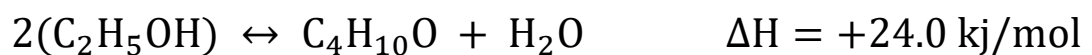
รูปที่ 2 ภาพกลไกการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนบน

ตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC และ W/BOC

ทั้งนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ เช่น ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเอทานอลไปเป็นอะเซทัลดีไฮด์ตามสมการดังนี้



หรือเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นไดเอทิลอีเทอร์ ตามสมการดังนี้



2.3 ที่มาและความสำคัญของไบโอชาร์

ไบโอชาร์หรือถ่านชาร์โคลคาร์บอน คือถ่านไม้ที่ได้จากการเผาไหม้ของไม้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถผลิตได้จากไม้หลายชนิด แต่ชนิดที่ทางผู้วิจัยเลือกมานั้นคือไบโอชาร์ ที่ได้จากการเผาไม้ไผ่ โดยกระบวนการเผา จะเผาด้วยอุณหภูมิที่สูง 1,200 องศาเซลเซียส นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ นี้ เรียกว่า “การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส” ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยมาก ซึ่งประโยชน์ของไบโอชาร์นั้นสามารถนำไปเป็นได้ทั้ง เชื้อเพลิง ใช้ในการปรับปรุงดิน ช่วยเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร รวมถึงลดระยะเวลาการปลูกได้โดยใช้เป็นวัสดุปลูกร่วมกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ลดการดูดซับสารเคมีที่ใช้กำจัดวัชพืช ศัตรูพืช และโลหะหนักที่อยู่ในดินและน้ำของพืชที่ปลูก ทั้งยังสามารถช่วยในการดูดซับแก๊สและลดกลิ่นได้ดี [12] อีกทั้งผู้ผลิตไบโอชาร์นั้นล้วนเป็นเกษตรกรของประเทศไทย ทางผู้วิจัยจึงเลือกไบโอชาร์ มาเป็นตัวรองรับในงานวิจัยครั้งนี้เพราะหาได้ง่าย ราคาถูก สามารถผลิตได้ในประเทศและเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะช่วยเพิ่มยอดขายให้กับเกษตรกรของประเทศไทย

ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ว ไบโอชาร์นิยมมาใช้ประโยชน์ในเรื่องของการดูดซับสารพิษหรือเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้ดิน ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยที่ชื่อ “In-situ retention of nitrogen, phosphorus in agricultural drainage and soil nutrients by biochar at different temperatures and the effects on soil microbial response” ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาเรื่อง การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียทางการเกษตร และเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ด้วยไบโอชาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของไบโอชาร์จะเพิ่มขึ้น โดยสามารถลดไนโตรเจนได้ถึง 29.31 – 30.67% และลดฟอสฟอรัสได้ 21.92 – 25.21% อีกทั้งไบโอชาร์ยังสามารถเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดินได้อย่างมากในเรื่อง ความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดิน [13] อย่างไรก็ตามก็ยังมีงานวิจัยที่ใช้ไบโอชาร์นั้น ไปใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยที่ชื่อ “Investigation on deactivation progress of biochar supported Ni catalyst during biomass catalytic cracking process” ซึ่งทำงานวิจัยเรื่องตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไบโอชาร์ที่เตรียมด้วยวิธีการคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน ที่มีผลต่อการลดลงของไฮโดรคาร์บอนตัวหนัก ในการทำขบวนการแยกสลายของพลังงานชีวมวล ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบน

ตัวรองรับไปโอซาร์ที่เตรียมด้วยวิธีการ คาร์โบเทอร์มอลรีดักชันนั้นสามารถลดการเกิดไฮโดรคาร์บอนตัวหนักได้ [14] ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำไปโอซาร์มาเป็นตัวรองรับในงานวิจัยครั้งนี้

2.4 โมลิบดีนัมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์

โลหะที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้นั้นผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกโลหะที่ได้มีงานวิจัยยืนยันมาแล้วว่าเหมาะสมกับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันนั่นก็คือโมลิบดีนัมและทังสเตนออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่นโมลิบดีนัม จากงานวิจัยที่ชื่อว่า “Dehydration of Amides to Nitriles over Heterogeneous Silica-Supported Molybdenum Oxide Catalyst” โดยงานวิจัยนี้ได้ทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอมายด์ไปเป็นไนไตรด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกา ($\text{MoO}_x/\text{SiO}_2$) ซึ่งให้ค่าผลผลิตของไนไตรด์สูงถึง 87-97% [15] ส่วนของทังสเตนออกไซด์งานวิจัยชื่อว่า “Catalytic Dehydration of Ethanol over W/TiO₂ Catalysts Having Different Phases of Titania Support” งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์และได้ค่าผลผลิตเอทิลีนถึง 60.3% [16] ประกอบกับยังไม่มีงานวิจัยชิ้นไหนเลยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมและทังสเตนออกไซด์บนตัวรองรับไปโอซาร์ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้ผู้วิจัยตัดสินใจเรื่องโลหะ 2 ชนิดนี้

ทางผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบนตัวรองรับไปโอซาร์และตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนออกไซด์บนตัวรองรับไปโอซาร์จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนได้ด้วยค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลสูง มีค่าการเลือกเอทิลีนเกิดที่ดีและมีเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยอดเยี่ยม

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับไปโอซาร์หรือคาร์บอน

ในปี 2565 คุณ Yan Hao และคณะผู้จัดทำได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมินา-คาร์บอนนาโนซีทที่ทำการปรับปรุงด้วย

แอมโมเนีย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถทำให้เกิดค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลถึง 98.3% ค่าการเลือกเกิดเอทิลีนถึง 97% และมีเสถียรภาพที่สูงสามารถใช้งานได้นานถึง 144 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส [17]

ในปี 2562 คุณ Arnon Khamkeaw และคณะผู้จัดทำ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเซลลูโลสของแบคทีเรียและนำไปปรับแต่งด้วยใส่กรดฟอสฟอริก 30 - 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนได้ โดยให้ค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลเท่า 98 - 100% ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนเท่ากับ 93 - 100% และทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งสามารถใช้งานได้ถึง 12 ชั่วโมง [18]

ในปี 2566 คุณ Honghui Gong และคณะ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดลิวลินิกและเฟอร์ฟูรอลแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑเป็น เอทิลลิวลีนेट โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไบโอซาร์ที่ได้จากกากกาแฟและถูกปรับแต่งด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไบโอซาร์ที่ได้จากกากกาแฟและถูกปรับแต่งด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดลิวลินิกและเฟอร์ฟูรอลแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑเป็น เอทิลลิวลีนेट ได้ โดยให้ค่าผลผลิตสูงถึง 97.6% และตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถใช้งานได้ถึง 7 รอบ [19]

ในปี 2566 คุณ Wenjun Zeng และคณะ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม(II)และอาเซนต(V) ด้วยสารประกอบเฟอร์ริไฮเดรทไบโอซาร์ โดยผลการทดลองพบว่า สารประกอบเฟอร์ริไฮเดรทไบโอซาร์ สามารถดูดซับโลหะหนักแคดเมียม(II)ได้ 82.03 ไมโครโมลต่อกรัม และอาเซนต(V)ได้ 531.53 ไมโครโมลต่อกรัม ซึ่งมากกว่าไบโอซาร์บริสุทธิ์ โดยไบโอซาร์บริสุทธิ์สามารถดูดซับโลหะหนักแคดเมียม(II)ได้เพียง 26.90 ไมโครโมลต่อกรัมและอาเซนต(V)ได้ 40.24 ไมโครโมลต่อกรัม [20]

ในปี 2566 คุณ Shujie Hu และคณะ ได้ทำการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับโครเมียม(VI)ในน้ำ ด้วยไบโอซาร์ที่ถูกปรับแต่งโดย ไอออน(III)คลอไรด์ โดยผลที่ศึกษาได้คือ ด้วยไบโอซาร์ที่ถูกปรับแต่งโดยไอออน(III)คลอไรด์ สามารถดูดซับโครเมียม(VI)ในน้ำได้ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับนั้นมากกว่าไบโอซาร์ที่ไม่ได้ปรับแต่งถึง 1.54 - 8.20 เท่า [21]

ในปี 2566 คุณ Yingjie Yin และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบบางอย่างของไบโอชาร์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด ในสภาวะการทดลองแบบ ไฮโดรนิค โดยจากการศึกษาพบว่า ไบโอชาร์นั้นมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงดินและมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนได้ดี แต่หากใช้ไบโอชาร์ที่มีปริมาณมากเกินไป จะไปขัดขวางการเจริญเติบโตของต้นข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับต้นข้าว [22]

ในปี 2566 คุณ Zhuo Wei และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของไบโอชาร์ ในการดูดซับน้ำมันดิบที่ปนเปื้อนอยู่ในธรรมชาติ โดยผลการศึกษานั้นพบว่า ไบโอชาร์นั้น มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับน้ำมันดิบที่ปนเปื้อน แต่เป็นเพียงการทดลองในห้องแล็บเท่านั้นการจะนำออกมาใช้งานจริงนั้น ยังคงมีข้อจำกัดอีกมาก [23]

ในปี 2565 คุณ Mohamed A. El-Nemr และคณะ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับ การกำจัดโครเมียม(VI)ในน้ำด้วยไบโอชาร์ ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของกากเปลือกถั่วด้วย 50% กรดซัลฟิวริก โดยผลการทดลองพบว่า ไบโอชาร์ปริมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้น สามารถดูดซับโครเมียม(VI) ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรได้ถึง 158.73 มิลลิกรัมต่อกรัม [24]

ในปี 2565 คุณ Peiyao Deng และคณะ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับฟอสฟอรัส ด้วยไบโอชาร์ ที่มีการปรับปรุงด้วยการตกตะกอนของ ไอออน(III)คลอไรด์ โพลีแอซิดอะมีนเปอร์แมนังกานेट และ cationic polyacrylamide โดยผลการวิจัยพบว่าที่การเตรียมไบโอชาร์ด้วยไอออน(III)คลอไรด์ จะให้ผลการดูดซับฟอสฟอรัสดีที่สุด โดยมากขึ้นถึง 77 เท่า [25]

ในปี 2566 คุณ Jinlong Du และคณะผู้จัดทำได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมันน้ำมันเมล็ดยางพาราด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ ซึ่งผลการทดลองนั้นจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาของการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสได้ดียิ่งขึ้น โดยจะทำให้ได้ผลผลิตที่มากขึ้นและลดการเกิด Coke จาก 13.57 เหลือเพียง 5.59% [26]

2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับโมลิบดินัม

ในปี 2566 คุณ Carolus B. Rasrendra และคณะผู้จัดทำ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับ HY และแกรมมาซีโอไลท์ ในน้ำมันดีเซล โดยผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับ HY และแกรมมาซีโอไลท์ สามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันได้ โดยสามารถกำจัด ไคเบนโซไทโอฟินได้ โดยลดจาก 2000 ppm เหลือ 8.2 ppm และยังสามารถกำจัด 4,6-ไดเมทิล ไคเบนโซไทโอฟินได้จาก 260 ppm เหลือ 5.28 ppm ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มี HY ซีโอไลท์ [27]

ในปี 2566 คุณ Wenjing Bao และคณะ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลโมลิบดินัมซัลไฟด์บนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมที่มีรูพรุนขนาดกลาง เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน โดยผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลโมลิบดินัมซัลไฟด์บนตัวรองรับคาร์บอนทรงกลมที่มีรูพรุนขนาดกลางนั้น มีประสิทธิภาพในการจับไคเบนโซไทโอฟินได้โดยลดจาก ได้ถึง 99.2% หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันไปแล้ว 4 ชั่วโมง [28]

ในปี 2566 คุณ Gui Liu และคณะได้ทำวิจัยเกี่ยวกับ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นเมทานอลและสารไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมซัลไฟด์ในตัวรองรับซีโอไลท์ ZSM-5 โดยผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมซัลไฟด์ในตัวรองรับซีโอไลท์ ZSM-5 สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นเมทานอลและสารไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นได้ โดยไฮส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์จะได้ค่าคอนเวอร์ชันที่ 10.2% และค่าการเลือกเกิดเมทานอลที่ 98% ส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์จะได้ค่าเลือกเกิดของไฮโดรคาร์บอน $C_2 - C_3$ เท่ากับ 98% [29]

ในปี 2566 คุณ Guiming Peng และคณะได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับ ปฏิกิริยาอเล็กโทรเคมีคอลไนโตรเจน รีดักชัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมบอไรด์ เพื่อให้ได้แอมโมเนีย โดยผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมบอไรด์ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาอเล็กโทรเคมีคอล ไนโตรเจน รีดักชัน โดยได้ค่าผลผลิตเท่ากับ 7.65 ไมโครกรัมต่อชั่วโมง.มิลลิกรัม และค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 12.47% [30]

ในปี 2563 คุณ Zhongliang Yu และคณะได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดฟอร์มิกไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแกรมมาโมลิบดินัมไนไตรด์ โดยผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแกรมมาโมลิบดินัมไนไตรด์ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกรดฟอร์มิกไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ โดยได้ค่าการเลือกเกิดของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงถึง 99.8% และยังสามารถกักได้ที่อุณหภูมิต่ำ (100 – 200 องศาเซลเซียส) [31]

2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับทังสเทน

ในปี 2564 คุณ Alessandro Bellè และคณะได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับ ปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสของกลีเซอรอลไปเป็น 1,2-โพรเพนไดออล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยารูบิเดียม-ทังสเทนออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังร่วม โดยผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยารูบิเดียม-ทังสเทนออกไซด์ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสของกลีเซอรอลไปเป็น 1,2-โพรเพนไดออลได้ ซึ่งได้ค่าคอนเวอร์ชัน 73 – 99% และค่าการเลือกเกิดของ 1,2-โพรเพนไดออลเท่ากับ 88 – 98% [32]

ในปี 2562 คุณ Orsina Verdes และคณะ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีการปรับแต่งของธาตุ ซีเซียม ฟอสฟอรัส ทังสเทนและพาราเดียมบนตัวรองรับ SBA-15 โดยผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลคือ ซีเซียม 2.5 ฟอสฟอรัส ทังสเตรบนตัวรองรับ SBA-15 ซึ่งได้ค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอล 100% และค่าการเลือกเกิดของเอทิลีน 89% [33]

ในปี 2565 คุณ Ismail Boz และคณะผู้จัดทำได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกลีเซอรอลไปเป็นแเอโครลินด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเทนบนตัวรองรับ MCM-48 โดยทำการปรับอัตราส่วนทังสเทนที่ใส่ลงไปบนตัวรองรับ MCM-48 และผลการทดลองสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเทนบนตัวรองรับ MCM-48 สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกลีเซอรอลไปเป็นแเอโครลินได้ โดยค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดเท่ากับ 15% และค่าการเลือกเกิดแเอโครลินอยู่ที่ 21% ปริมาณทังสเทนที่ใส่แล้วทำให้ได้ค่าเหล่านี้คือ 15% โดยน้ำหนัก [34]

2.5.4 งานวิจัยเกี่ยวกับเอทานอลดีไฮเดรชัน

ในปี 2559 คุณ Patricio González-Navarrete คุณ Maria Schlangen และคุณ Helmut Schwarz ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมและทังสเตนมอนออกไซด์ โดยศึกษาการเกิดเรโซแนนซ์ของปฏิกิริยานี้ ผลการทดลองคือตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนได้พร้อมกันเกิดได้ถึง 4 เรโซแนนซ์ [35]

ในปี 2562 คุณ Dilshad Masih และคณะผู้จัดทำได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Rho Zeolite, ZSM-5 และ γ -Al₂O₃ ที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอทานอลดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนได้ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนสูงที่สุดคือ Rho Zeolite ซึ่งสูงถึง 99% [36]

ในปี 2563 คุณ S. Said และคณะได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมและซิงค์บนตัวรองรับซีโอไลต์ AlPO₄-5 ที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบฝัง โดยผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมและซิงค์บนตัวรองรับซีโอไลต์ AlPO₄-5 สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลได้ โดยที่ 400 องศาเซลเซียสจะมีค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนสูงถึง 93% และมีค่าคอนเวอร์ชันประมาณ 45% [37]

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 ถ่านไบโอชาร์
- 3.1.2 แอมโมเนียมเฮปตะโมลิบเดต เตตระไฮเดรท $((\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O})$
- 3.1.3 แอมโมเนียม เมต้าทังสเดน ไฮเดรท $((\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}\cdot 5\text{H}_2\text{O})$
- 3.1.4 น้ำ DI

3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC

ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 2%Mo/BOC จำนวน 2 กรัม เริ่มจากชั่งสาร แอมโมเนียมเฮปตะโมลิบเดต เตตระไฮเดรท $((\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O})$ จำนวน 0.074 กรัม ละลายในน้ำ DI 2 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปหยดใส่ถ่านไบโอชาร์ที่ซั้งไว้ 1.96 กรัม เมื่อหยดจนครบแล้ว นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำสารที่อบแล้วไปเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcine) ด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อเผาจนครบระยะเวลาแล้ว จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%Mo/BOC

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC ที่ 5%,7%และ 10% ใช้วิธีการเตรียมแบบเดียวกับ 2%Mo/BOC แต่ให้เปลี่ยนปริมาณสารที่ซั้งตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงน้ำหนักของสารที่ซั้งในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC

สารเคมี	ตัวเร่งปฏิกิริยา			
	2%Mo/BOC (กรัม)	5%Mo/BOC (กรัม)	7%Mo/BOC (กรัม)	10%Mo/BOC (กรัม)
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.074	0.184	0.258	0.368
ถ่านไบโอชาร์	1.96	1.9	1.86	1.8

3.2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 2%W/BOC จำนวน 2 กรัม มีวิธีการโดยเริ่มจากซังสารแอมโมเนียม เมต้าทังสเตน ไฮเดรท $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.054 กรัม ละลายในน้ำ 2 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปหยดใส่ถ่านไบโอชาร์ที่ซังไว้ 1.96 กรัม เมื่อหยดจนครบแล้ว นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำสารที่อบแล้วไปเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcine) ด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อเผาจนครบระยะเวลาแล้ว จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%W/BOC

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC ที่ 5%, 7% และ 10% ใช้วิธีการเตรียมแบบเดียวกับ 2%W/BOC แต่ให้เปลี่ยนปริมาณสารที่ซังตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2 ตารางแสดงน้ำหนักของสารที่ซังในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

สารเคมี	ตัวเร่งปฏิกิริยา			
	2%W/BOC (กรัม)	5%W/BOC (กรัม)	7%W/BOC (กรัม)	10%W/BOC (กรัม)
$(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.054	0.134	0.188	0.268
ถ่านไบโอชาร์	1.96	1.9	1.86	1.8

3.3 การทดสอบคุณลักษณะ

3.3.1 Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX)

เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) (Hitashi mode S-3400N, ญี่ปุ่น) ใช้เพื่อหาลักษณะสัณฐานและการกระจายตัวของธาตุที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทคนิค SEM นี้จะถูกใช้งานในโหมด อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (back-scattering electron mode) ที่ 15 kV และเทคนิค EDX นั้นดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Link Isis series 300

3.3.2 X-Ray Diffractometer (XRD)

ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะถูกทดสอบคุณลักษณะด้วย Bruker D8 Advance X-ray diffractometer ที่ Cu K α ($\lambda = 1.54439 \text{ \AA}$) เพื่อดูลักษณะความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยรูปแบบของ XRD นั้นจะใช้การสแกนอยู่ที่ $2.4^\circ \text{ min}^{-1}$ ในช่วง 2θ ระหว่าง 20 ถึง 80° ด้วยความละเอียด 0.04°

3.3.3 Ammonia-Temperature-Programmed Desorption (NH₃-TPD)

สามารถวัดความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย ระบบ Micromeritics chemisorp 2750 pulse chemisorption ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $0.05 - 0.1$ กรัมกับไอควอตซ์ 0.03 กรัม ใส่ไปในควอตซ์รูปร่าง ทำการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ภายใต้การไหลของฮีเลียมตลอดเวลา เมื่อทำการไล่ความชื้นเสร็จแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะที่มีก๊าซแอมโมเนียเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงโดยการไหลของก๊าซ 15% แอมโมเนีย/ฮีเลียม เพื่อให้เกิดการดูดซับทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและแอมโมเนีย หลังจากนั้นจะทำการคายซับภายใต้การไหลของฮีเลียมที่อุณหภูมิ $40 - 800$ องศาเซลเซียสและเมื่อถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสแล้วจะค้างไว้ 30 นาที ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.3.4 Nitrogen Physisorption (BET)

เทคนิค BET จะใช้การดูดซับของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียสใน Micromeritics ASPS 2000 เพื่อใช้ในการหา พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.5 X-ray Photoelectron spectroscopy (XPS)

เทคนิค XPS ใช้เพื่อหาเลขออกซิเดชันของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะวัดค่าอยู่ในช่วงพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ที่ $215 - 250 \text{ eV}$

3.3.6 Thermogravimetric Analysis (TGA)

เทคนิค TGA ใช้เพื่อวัดหาปริมาณ เขม่า (Coke) ที่เกิดขึ้นหลังจากนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้งานแล้ว โดยจะวัดภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนในช่วงอุณหภูมิ $30 - 1000$ องศาเซลเซียส

3.3.7 ปฏิกิริยาเอทานอลดีไฮเดรชัน (Dehydrogenation Reaction)

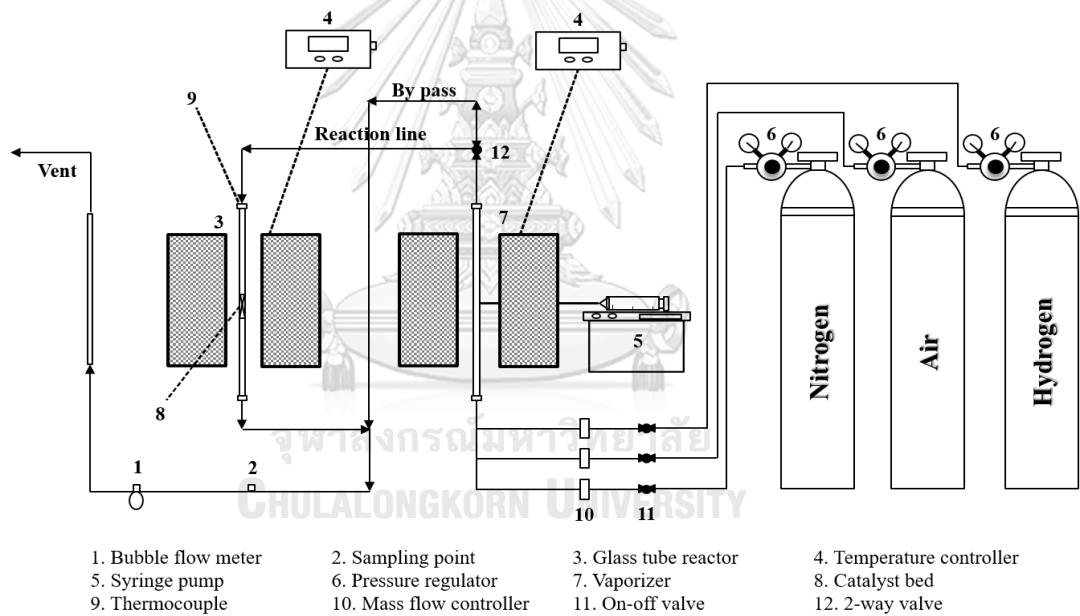
สารเคมีที่ใช้

1. เอทานอลความบริสุทธิ์ 99.99 % จาก Merck.
2. ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.99% จาก Linde.
3. ก๊าซไฮโดรเจนความบริสุทธิ์ 99.99% จาก Linde.
4. อากาศผสมแก๊สไนโตรเจน จาก Linde.

ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลนั้นจะเกิดในเครื่องปฏิกรณ์ชนิด fixed-bed continuous flow microreactor โดยเริ่มจากการชั่งไฮควอตซ์ 0.015 กรัม ใส่ลงไปในหลอดแก้วเพื่อเป็นฐาน หลังจากนั้นจะชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม ใส่ลงไปในชั้นกลางและชั่งไฮควอตซ์อีก 0.005 กรัม ปิดชั้นบนเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อใส่หลอดแก้วเข้าเครื่องปฏิกรณ์แล้ว จะทำการไล่ความชื้นให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาภายในการไหลของก๊าซไนโตรเจน 60 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะเริ่มทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลโดยการระเหยเอทานอลที่ 120 องศาเซลเซียส เอทานอลในสถานะแก๊สจะถูกส่งเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์โดยไนโตรเจนเป็นตัวพาด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 0.397 มิลลิลิตร/ชั่วโมง (WHSV=3.13) ด้วยหลอดฉีดยาที่ถูกควบคุมโดยปั๊มรุ่น Razel model R99-E หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาที่ 200 – 400 องศาเซลเซียสและเก็บผลทุกๆ การเพิ่มอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสซ้ำ 3 ครั้ง เมื่อการทำปฏิกิริยาผ่านไป 30 นาทีจนอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) แล้ว จะเก็บตัวอย่างสารที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์ไปทำการวิเคราะห์ด้วย Shimadzu gas chromatography 14-B ด้วย flame ionization detector (FID) โดยการใช้ DB-5 capillary column โดยการใช้เข็มเก็บตัวอย่างครั้งละ 1 มิลลิลิตร ฉีดใส่เครื่อง GC โดยการดำเนินการของเครื่อง GC แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ตารางแสดงการดำเนินการของเครื่อง GC

Gas Chromatography	Shimadzu GC 14-B
ชนิดเครื่องตรวจวัด	FID
Capillary column	DB-5
แก๊สนำพา	แก๊สไนโตรเจน
อุณหภูมิของคอลัมน์	เริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส สุดท้าย 40 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ฉีดสารเข้าเครื่อง	150 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจวัด	150 องศาเซลเซียส
ระยะเวลาในการตรวจวัด	3 นาที



รูปที่ 3 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะแก๊ส

3.4 แผนงานวิจัย

ตารางที่ 4 ตารางแสดงแผนงานวิจัย

แผนงาน	ปี 2566										
	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	
1.ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←————→										
2.สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา 2.1 2%,5%,7%และ10% Mo/BOC 2.2 2%,5%,7%และ10% W/BOC	←————→										
3.ส่งทดสอบคุณลักษณะ			←————→								
4.ทำการทดสอบปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน			←————→								
5.สรุปผลและอภิปราย								←————→			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

3.5.1 งานวิจัยชิ้นนี้สามารถใช้เป็นข้ออ้างอิงกับอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล

3.5.2 งานวิจัยชิ้นนี้เป็นทางเลือกในการผลิตเอทิลีนที่สะอาดกว่าวิธีการปัจจุบัน

บทที่ 4

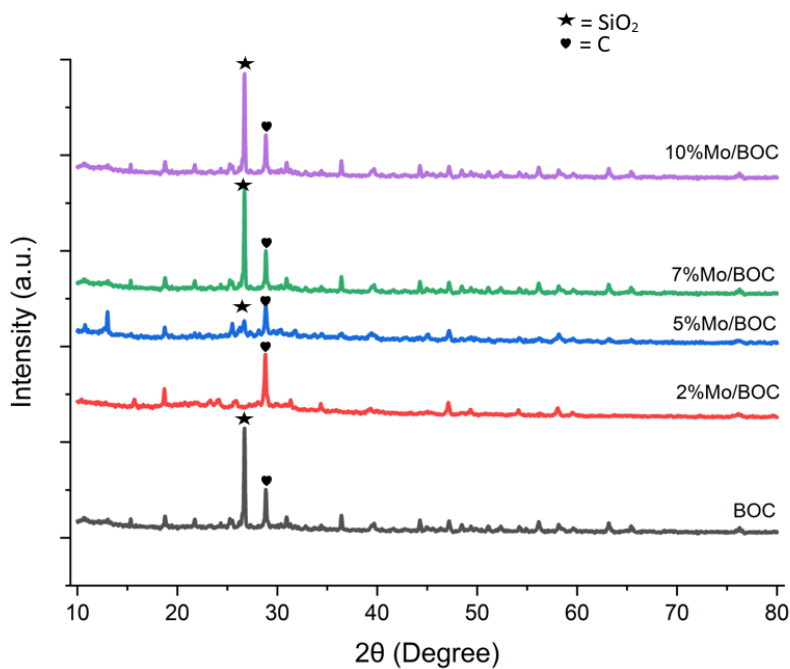
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาและการศึกษาปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน

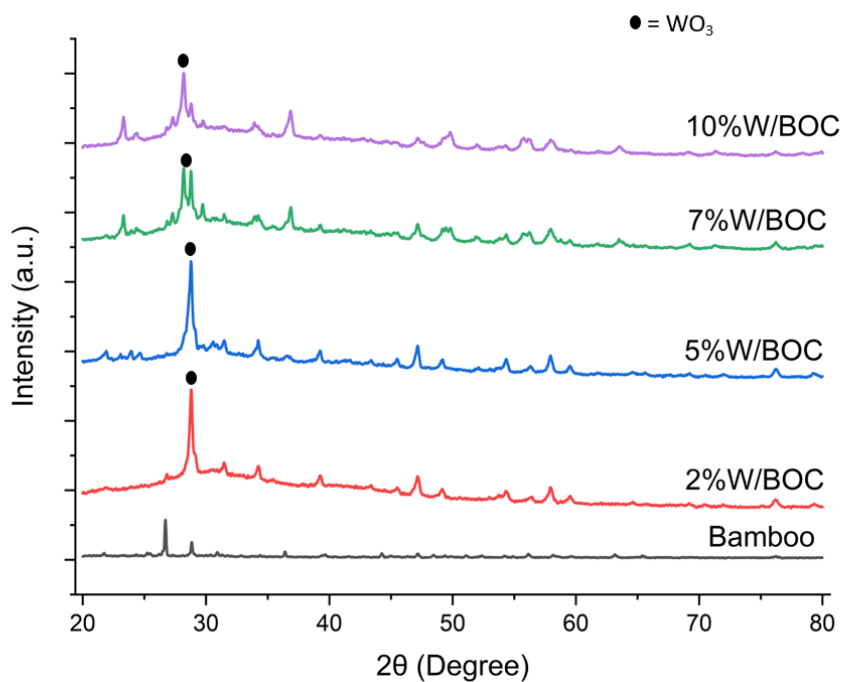
4.1.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

การศึกษาด้วยเทคนิค XRD นั้น จะทำการศึกษาที่มุมเลี้ยวเบน (2θ) ระหว่าง 20 ถึง 80 องศาดีกรี ซึ่งจะทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างและขนาดของความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด โดยแสดงได้ตามรูปที่ 4 เป็นการศึกษาของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ จากกราฟจะแสดงให้เห็นพีคของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ 2θ เท่ากับ 26 องศาดีกรี [38] และแสดงให้เห็นพีคของ คาร์บอน (C) ที่ 2θ เท่ากับ 29 องศาดีกรี [39] แต่จะไม่แสดงให้เห็นพีคที่เป็นของผลึกโมลิบดีนัมออกไซด์ เนื่องจากผลึกโมลิบดีนัมนั้นกระจายตัวได้ดีมากทำให้ขนาดของผลึกน้อยกว่า 2 นาโนเมตร เทคนิค XRD จึงไม่สามารถตรวจวัดได้ รูปที่ 5 เป็นการศึกษาของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์ จากภาพจะแสดงให้เห็นพีคของทั้งสแตนออกไซด์ (WO_3) ที่ 2θ เท่ากับ 28 องศาดีกรี [34]



รูปที่ 4 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์



รูปที่ 5 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนออกไซด์บนตัวรองรับไบโอชาร์

อีกทั้งเทคนิค XRD นี้ยังสามารถคำนวณขนาดผลึก (crystal size) ของสารได้จากสมการของ Scherrer ดังนี้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$$

เมื่อ D คือ ขนาดผลึก (นาโนเมตร)

k คือ ค่าคงที่ของเชอร์เรอร์ เท่ากับ 0.9

λ คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.1546 นาโนเมตร

β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มข้นสูงสุด (FWHM)

และ θ คือ มุมของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ซึ่งจะได้ขนาดผลึกดังนี้

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

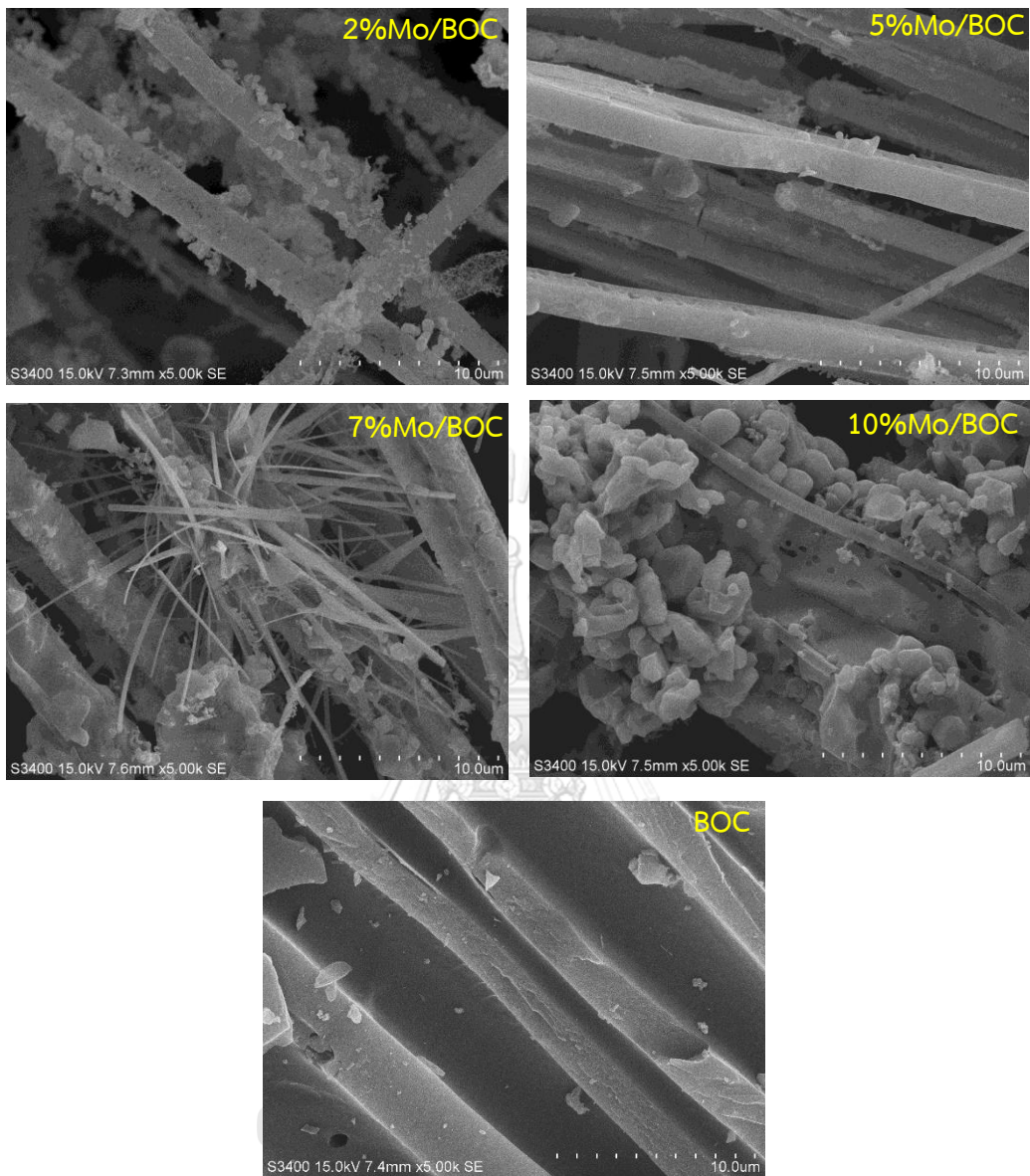
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดผลึกโลหะออกไซด์ (นาโนเมตร)
BOC	n.a.
2%Mo/BOC	n.o.
5%Mo/BOC	n.o.
7%Mo/BOC	n.o.
10%Mo/BOC	n.o.
2%W/BOC	8.0
5%W/BOC	7.3
7%W/BOC	8.0
10%W/BOC	8.5

n.a. = not applicable, n.o. = non observable

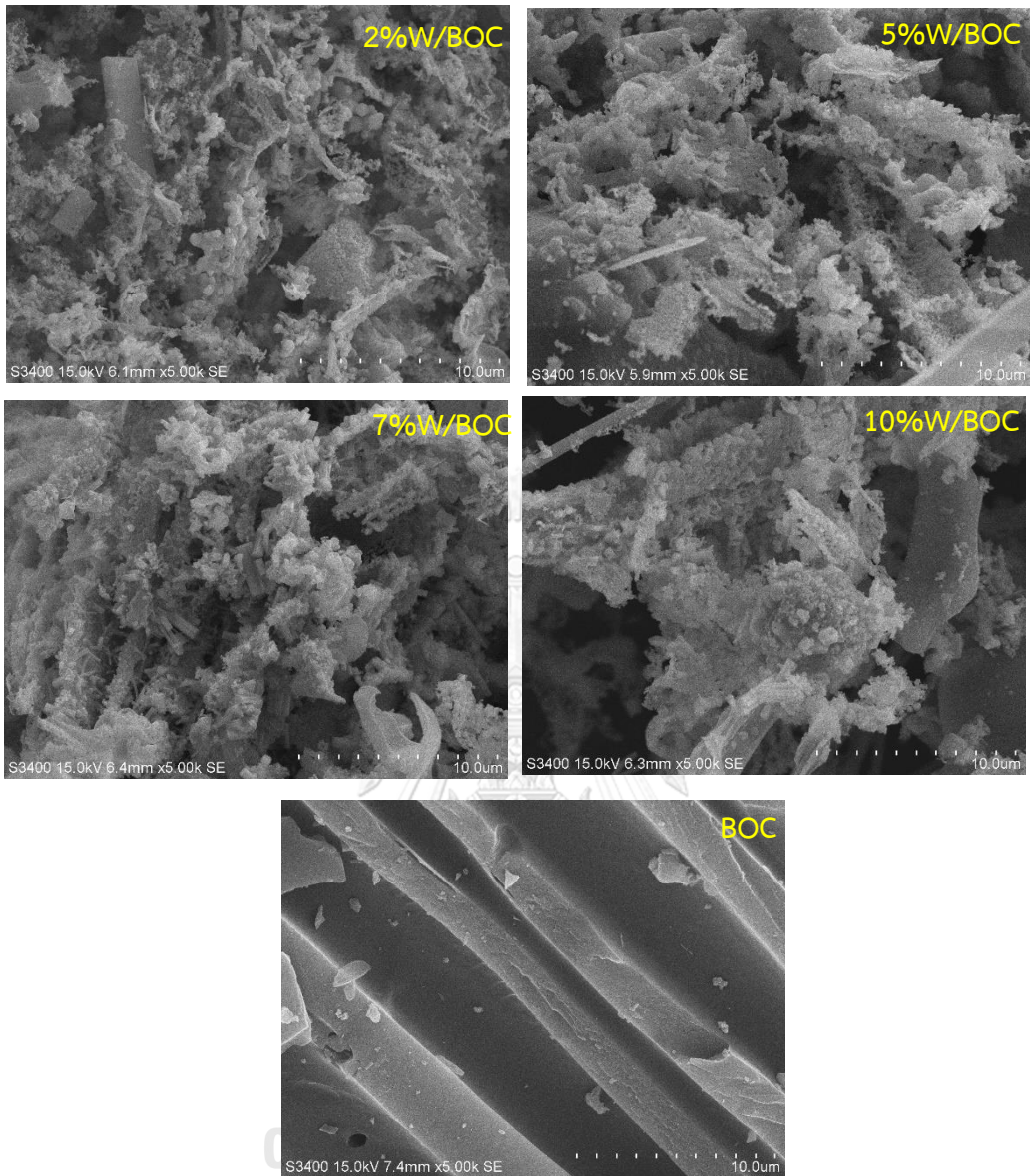
โดยค่าความเป็นผลึกของโมลิบดีนัมออกไซด์นั้น จะสามารถตรวจวัดได้ที่ 2 θ เท่ากับ 59 และ 74 [40] จากตารางที่ 5 พบว่าไม่สามารถคำนวณค่าความเป็นผลึกของโมลิบดีนัมออกไซด์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 5 ที่ไม่สามารถตรวจวัดโมลิบดีนัมออกไซด์ได้ แต่สามารถตรวจพบพีคของทั้งสแตนออกไซด์และคำนวณค่าความเป็นผลึกได้ เนื่องจากขนาดผลึกใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร

4.1.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy(SEM)

เนื่องจากเทคนิค XRD นั้นยังไม่เพียงพอต่อการที่จะสรุปว่าโลหะที่ใส่ลงไปนั้นมีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ จึงนำไปสู่เทคนิค SEM เป็นเทคนิคที่จะแสดงภาพและขนาดของโมเลกุลในลักษณะของภาพถ่าย ซึ่งจากรูปที่ 6 จะแสดงให้เห็นลักษณะที่เป็นเส้นใยและมีอนุภาคทรงกลมติดอยู่ โดยลักษณะที่เป็นเส้นใยนั้นจะเป็นของไบโอชาร์ เนื่องจากไบโอชาร์นั้นทำมาจากไม้ไผ่หรือก็คือพืช จึงทำให้เห็นลักษณะโมเลกุลเป็นเส้นใย ส่วนอนุภาคทรงกลมนั้น ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นโมลิบดีนัมหรือไม่ แต่จะแสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคทรงกลมนั้น เท่ากับ 10 – 80 อังตรอม ในส่วนของรูปที่ 7 จะเห็นลักษณะที่เป็นเส้นใยของไบโอชาร์เหมือนกันแต่จะมีอนุภาคขนาดใหญ่เกาะอยู่ ซึ่งใหญ่เกินมากกว่าสเกลการวัดของภาพนั้นคือ 100 อังตรอม แต่เทคนิคนี้ไม่สามารถดูการกระจายตัวของโลหะออกไซด์ได้หากต้องการดูการกระจายตัวของธาตุต้องวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM



รูปที่ 6 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC



รูปที่ 7 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

4.1.1.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

เพื่อหาปริมาณของธาตุจึงนำไปสู่เทคนิคต่อมาคือ EDX ซึ่งจะเป็นเทคนิคที่แสดงให้เห็นปริมาณและชนิดของธาตุ ตามตารางที่ 6 และตารางที่ 7 แสดงให้เห็นถึงปริมาณโลหะโมลิบดีนัมและทังสเตนที่ทำการเคลือบฝังไปบนตัวรองรับไบโอชาร์ จากตารางจะแสดงให้เห็นถึงปริมาณโลหะที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์การใส่มากขึ้น แต่ไม่เป็นไปตามเปอร์เซ็นต์ที่ใส่นั้นก็คือ 2% 5% 7% และ 10% เนื่องจากเทคนิค EDX นั้นเป็นการตรวจวัดแค่เพียงที่ใกล้ๆผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้เป็นการตรวจวัดทั้งหมด ค่าที่แสดงจึงไม่ได้เป็นปริมาณธาตุที่แท้จริงของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 6 ตารางแสดงปริมาณและชนิดของธาตุที่วัดได้จากเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณธาตุ(%โดยน้ำหนัก)			
	C	Si	O	Mo
BOC	77.66±0.56	4.05±0.45	18.3±0.75	0
2%Mo/BOC	4.08±0.88	37.06±3.23	38.62±3.63	20.23±1.29
5%Mo/BOC	4.53±0.77	35.5±6.72	31.94±0.97	28.04±6.01
7%Mo/BOC	4.34±3.57	22.08±5.62	31.42±2.9	42.15±2.45
10%Mo/BOC	4.15±2.34	16.42±2.69	33.98±2.17	45.45±2.18

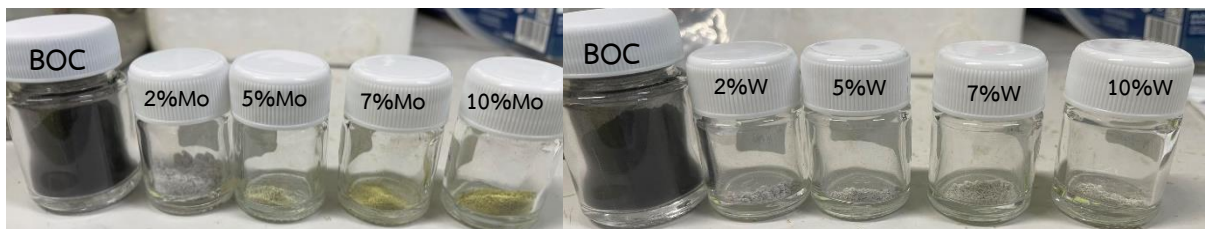
ตารางที่ 7 ตารางแสดงปริมาณและชนิดของธาตุที่วัดได้จากเทคนิค EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาW/BOC

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณธาตุ(%โดยน้ำหนัก)			
	C	Si	O	W
BOC	77.66±0.56	4.05±0.45	18.3±0.75	0
2%W/BOC	10.78±3.39	36.39±1.65	34.04±3.57	18.8±7.18
5%W/BOC	11.97±4.18	23.51±5.47	31.87±5.83	32.65±5.48
7%W/BOC	1.94±1.05	11.88±1.14	18.17±2.87	68.02±4.38
10%W/BOC	2.75±0.42	7.03±6.87	19.05±4.23	71.18±5.06

เพราะฉะนั้นจากเทคนิคทั้ง 3 ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า Mo/BOC นั้นมีธาตุโมลิบดีนัมอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา แต่การกระจายตัวนั้นดีมากจนเทคนิค XRD ไม่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งเมื่อไปดูที่เทคนิค SEM จะเห็นขนาดโมเลกุลของโมลิบดีนัมอยู่ที่ 10 – 80 อังตรอมและสุดท้ายที่เทคนิค EDX แสดงให้เห็นถึงปริมาณธาตุของโมลิบดีนัม ในส่วนของ W/BOC นั้นสามารถตรวจวัดได้ตั้งแต่เทคนิค XRD แล้วว่ามีธาตุ WO_3 ในเทคนิค SEM ก็จะมีขนาดของโมเลกุลที่ใหญ่เกินกว่าสเกลของ SEM นั้นก็คือ 100 อังตรอมและยังแสดงถึงปริมาณของสังกะสีในเทคนิค EDX อีกด้วย

4.1.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption (BET)

เทคนิค BET ทำเพื่อศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9 โดยจะแสดงให้เห็นว่า ตัวรองรับ BOC นั้นมีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ $2.56 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.0003 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน เท่ากับ 0.46 nm และพบว่าเมื่อทำการใส่โลหะโมลิบดีนัมลงไป 2% 5% 7% และ 10% ดังตารางที่ 8 จะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มเป็น 5.76, 6.15, 7.68 และ $14.76 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ อีกทั้งปริมาณของรูพรุนและขนาดของรูพรุนยังเพิ่มขึ้นอีกด้วยและเมื่อใส่โลหะทั้งสแตน 2% 5% 7% และ 10% ดังตารางที่ 9 พบว่าค่าพื้นที่ผิวเพิ่มเป็น 4.90, 7.49, 9.21 และ $9.44 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ โดยปริมาณของรูพรุนและขนาดของรูพรุนยังเพิ่มขึ้นเพราะว่าตัวรองรับไบโอชาร์นั้น มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนค่อนข้างน้อย เมื่อทำการเคลือบฝังด้วยโลหะโมลิบดีนัมและทั้งสแตนลงไป โลหะเหล่านี้จะไปสร้างชั้นเคลือบบนพื้นผิวของอนุภาคไบโอชาร์ ส่งผลให้ค่าต่างๆดังตารางเพิ่มมากขึ้นและจากรูปที่ 8 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะสีของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเป็นสีของโลหะมากขึ้น ซึ่งหมายถึงปริมาณชั้นเคลือบของโลหะมากขึ้น และพบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%Mo/BOC และ 2%W/BOC ค่าปริมาณรูพรุนและค่าขนาดของรูพรุนไม่เป็นไปตามแนวโน้มเนื่องจากอาจจะเกิดข้อผิดพลาดจากการทดลอง



รูปที่ 8 ตัวเร่งปฏิกิริยา BOC, 2%Mo/BOC, 5%Mo/BOC, 10%Mo/BOC, 2%W/BOC, 5%W/BOC, 7%W/BOC และ 10%W/BOC

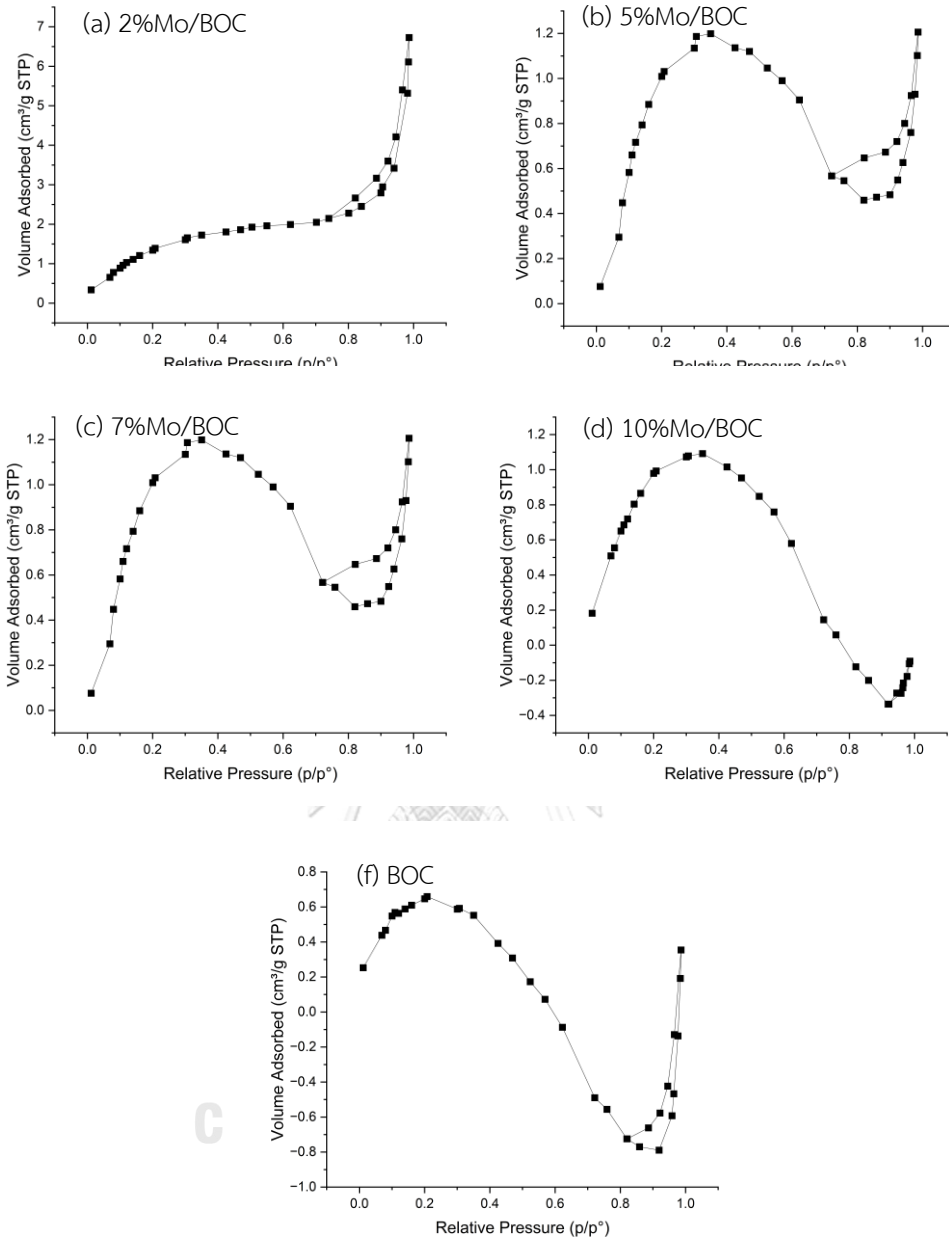
ตารางที่ 8 ตารางแสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว BET (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุน (nm)
BOC	2.56	0.0003	5.27
2%Mo/BOC	5.76	0.0095	8.93
5%Mo/BOC	6.15	0.0017	7.32
7%Mo/BOC	7.68	0.0019	6.96
10%Mo/BOC	14.76	0.0020	5.78

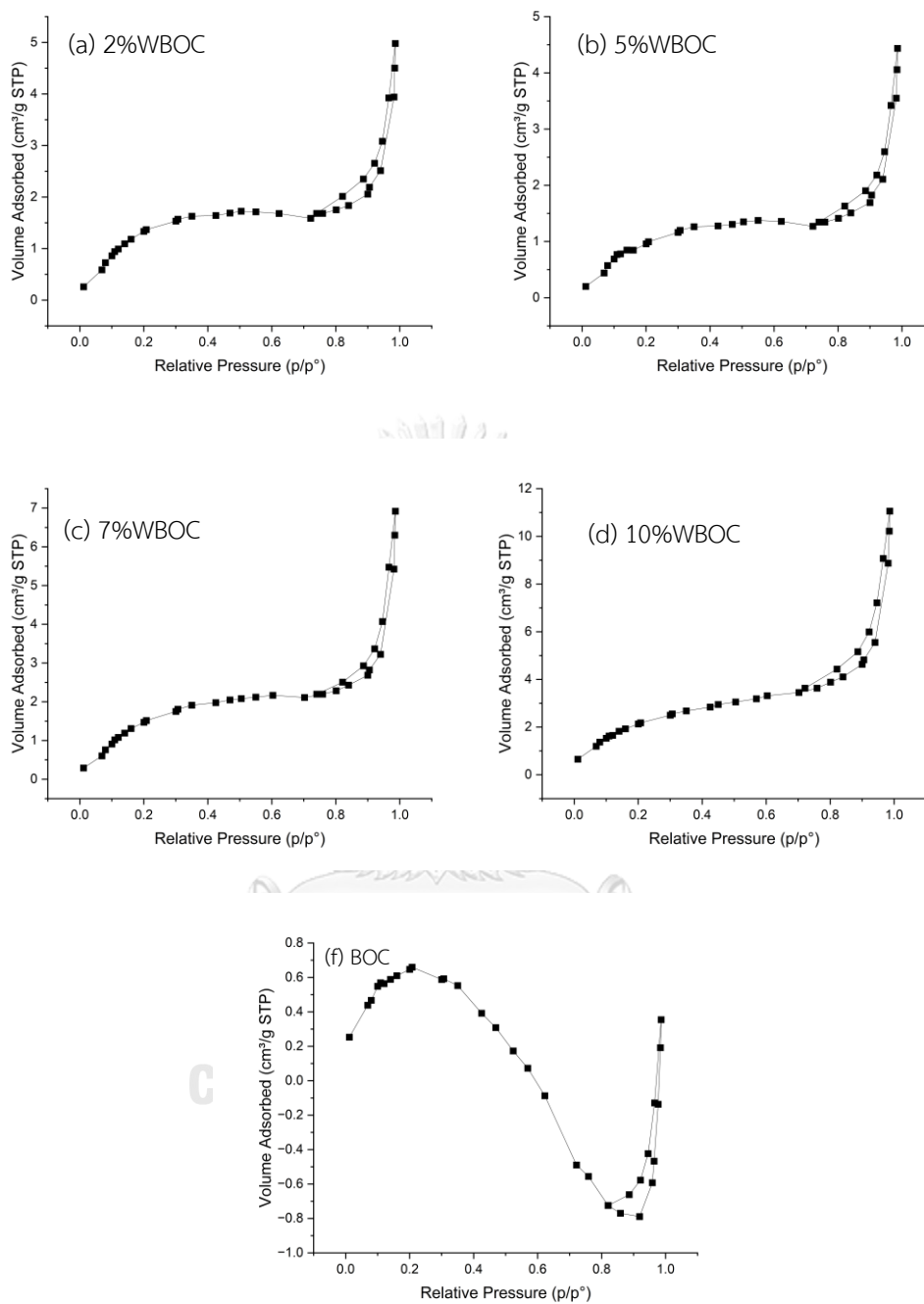
ตารางที่ 9 ตารางแสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว BET (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุน (nm)
BOC	2.56	0.0003	5.27
2%W/BOC	4.90	0.0070	8.27
5%W/BOC	7.49	0.0063	7.26
7%W/BOC	9.21	0.0097	6.56
10%W/BOC	9.44	0.0158	6.52

เทคนิค BET แสดงดังรูปที่ 9 และ 10 สามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC และ W/BOC จากการจำแนกโดย IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [41] จำแนกเป็นไอโซเทอรัมแบบที่ 4 แสดงลักษณะไอโซเทอรัมที่ปรากฏฮีสเทอริซิสลูป (hysteresis loop) เกิดขึ้นที่ $P/P_0 > 0.6$ ซึ่งบ่งชี้การมีอยู่ของโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (mesoporous) จากวงฮีสเทอริซิสลูปของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC และ W/BOC



รูปที่ 9 การดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจนของ (a) 2%Mo/BOC, (b) 5%Mo/BOC, (c) 7%Mo/BOC, (d) 10%Mo/BOC และ (f) BOC



รูปที่ 10 การดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจนของ (a) 2%W/BOC, (b) 5%W/BOC, (c) 7%W/BOC, (d) 10%W/BOC และ (f) BOC

4.1.1.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Ammonia-Temperature-Programmed Desorption (NH₃-TPD)

เทคนิค NH₃-TPD วิเคราะห์เพื่อศึกษาปริมาณของความเป็นกรด เช่น กรดอ่อนถึงปานกลาง หรือกรดแก่ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบพีคแสดงความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งสูงสุดของพีค ได้แบ่งช่วงของพีคที่เกิดขึ้นดังนี้ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 50 - 450 °C แสดงถึงตำแหน่งความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางและในช่วงมากกว่า 450 °C แสดงถึงตำแหน่งความเป็นกรดแก่ [42] นอกจากนี้ ยังมีการคำนวณวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดและความหนาแน่นของกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 10 และตารางที่ 11 พบว่าตัวรองรับไบโอชาร์นั้นมีความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลาง เท่ากับ 10.7 umol NH₃/g และมีความความเป็นกรดแก่เท่ากับ 335.1 umol NH₃/g ซึ่งเมื่อคำนวณหาเป็นอัตราส่วนแล้วพบว่าอัตราส่วน กรดอ่อนถึงปานกลางต่อกรดแก่ประมาณ 1 : 31 เท่า แสดงว่าตัวรองรับไบโอชาร์นั้นมีความเป็นกรดแก่สูงมาก แต่เมื่อใส่โลหะโมลิบดีนัมลงไป ดังตารางที่ 10 จะพบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%Mo/BOC, 5%Mo/BOC, 7%Mo/BOC และ 10%Mo/BOC อัตราส่วนกรดอ่อนถึงปานกลางต่อกรดแก่นั้นเท่ากับ 1 : 4, 1 : 3, 1 : 2 และ 1 : 1.3 ตามลำดับหรือก็คือเมื่อเราใส่โลหะโมลิบดีนัมออกไซด์ลงไปทำให้ความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางมากขึ้นและความเป็นกรดแก่ลดลง เช่นเดียวกับตารางที่ 11 เมื่อใส่โลหะทั้งสแตนลงไปพบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%W/BOC, 5%W/BOC, 7%W/BOC และ 10%W/BOC อัตราส่วนกรดอ่อนถึงปานกลางต่อกรดแก่เท่ากับ 1 : 15, 1 : 13, 1 : 12 และ 1 : 11 ตามลำดับ

ซึ่งปริมาณความเป็นกรดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ของสัญญาณ TCD ของฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ดังนี้

$$\text{ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา} = \frac{\text{โมลของการคายซับแอมโมเนีย}}{\text{กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา}}$$

โดย

- ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาในหน่วย ไมโครโมลต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา
- A คือ พื้นที่ใต้กราฟ x 300 (ไมโครโมล) จากกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของระบบ micromeritics chemisorb 2750 Pulse Chemisorption

ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าความเป็นกรดจากเทคนิค NH_3 -TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC

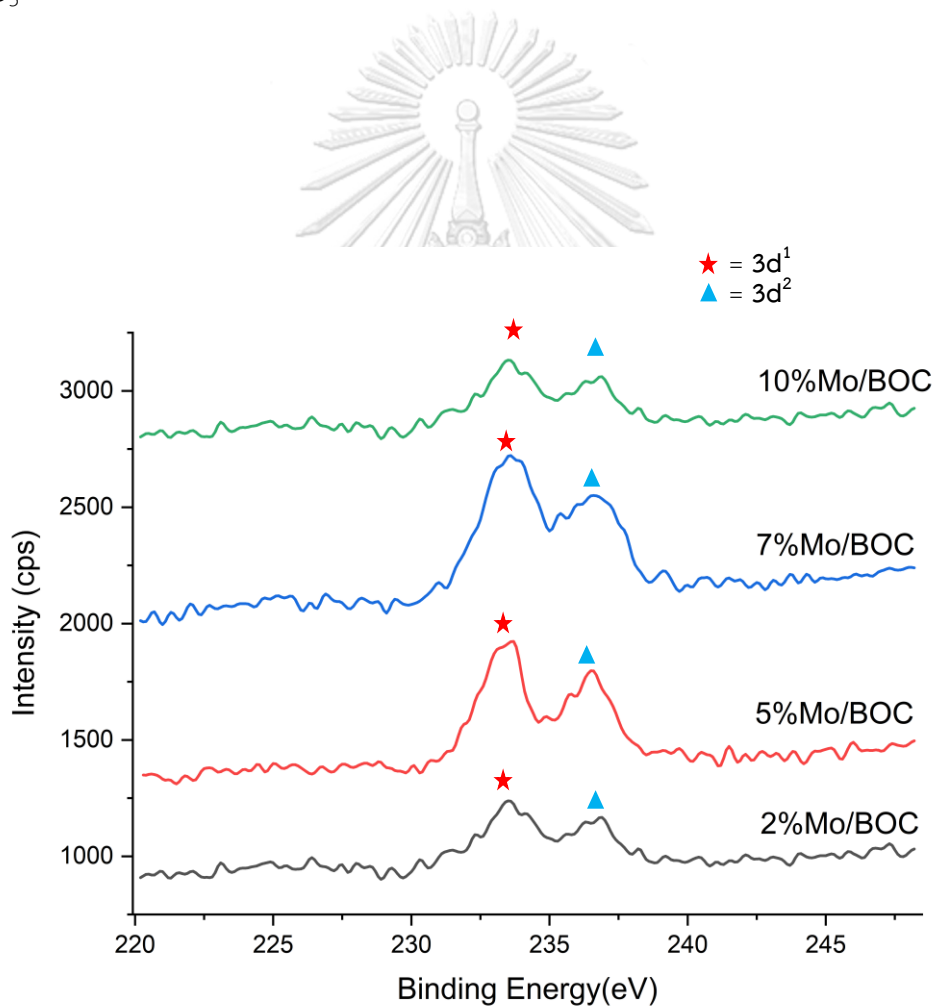
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด ($\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$)			ความหนาแน่นของ กรด ($\mu\text{molNH}_3/\text{m}^2$)
	กรดอ่อนถึงปาน กลาง	กรดแก่	ไซด์ที่เป็นกรด ทั้งหมด	
BOC	10.7	335.1	345.8	131.1
2%Mo/BOC	1.8	7.9	9.8	1.4
5%Mo/BOC	0.9	2.6	5.4	0.4
7%Mo/BOC	1.5	2.9	4.4	0.6
10%Mo/BOC	2.4	3.2	5.6	1.2

ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่าความเป็นกรดจากเทคนิค NH_3 -TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

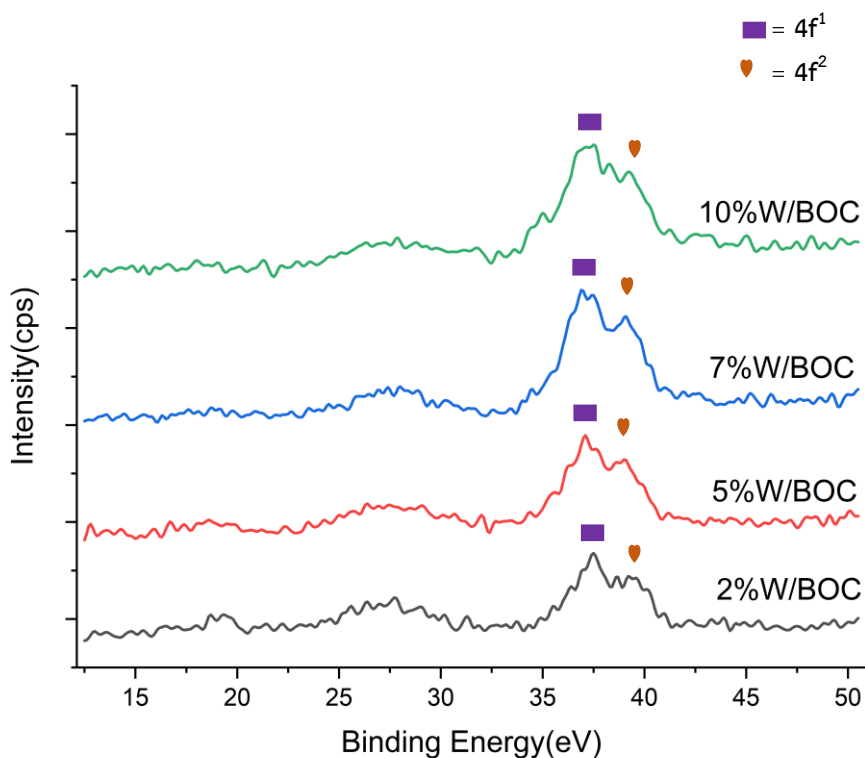
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด ($\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$)			ความหนาแน่นของ กรด ($\mu\text{molNH}_3/\text{m}^2$)
	กรดอ่อนถึงปาน กลาง	กรดแก่	ไซด์ที่เป็นกรด ทั้งหมด	
BOC	10.7	335.1	345.8	131.1
2%W/BOC	1.4	20.6	21.9	2.9
5%W/BOC	1.7	21.6	23.2	4.7
7%W/BOC	1.9	23.9	25.8	2.8
10%W/BOC	1.3	14.4	15.7	1.6

4.1.1.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron spectroscopy (XPS)

เทคนิค XPS วิเคราะห์เพื่อหาเลขออกซิเดชันของโลหะหรือก็คือใช้เพื่อหาเลขออกซิเดชันของ โมลิบดินัมและทังสแตนที่อยู่บนตัวรองรับไบโอชาร์ จากรูปที่ 11 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ของโมลิบดินัมที่ 230 – 237 eV โดยจะเป็นพีคที่แสดงออบิทัล $3d^1$ และ $3d^2$ แสดงว่าโลหะ โมลิบดินัมนี้มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ $6+$ (Mo^{6+}) [43] และมีสูตรโครงสร้างคือ MoO_3 ในส่วนของรูป ที่ 12 จะแสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของทังสแตนที่ 36 – 40 eV ซึ่งเป็นพีคที่แสดงออบิทัล $4f^1$ และ $4f^2$ นั่นก็แสดงว่าโลหะทังสแตนนี้มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ $6+$ (W^{6+}) [44] และมีสูตรโครงสร้างคือ WO_3



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว(Binding Energy) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC



รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

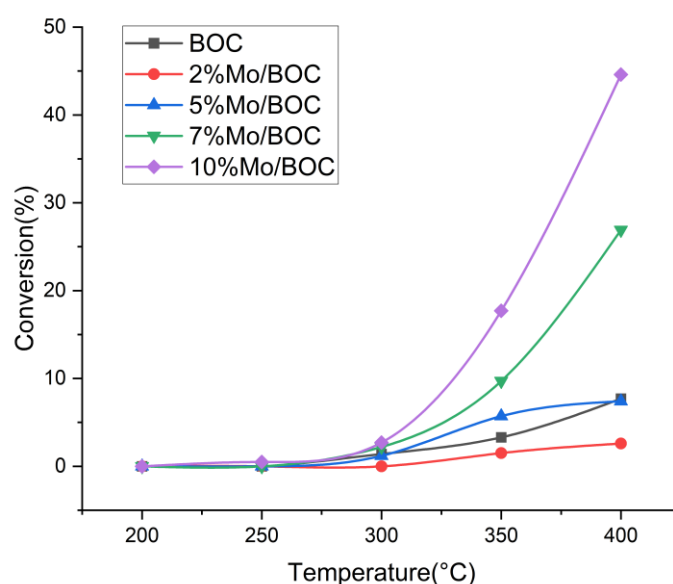
4.2 การศึกษาปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน

4.2.1 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

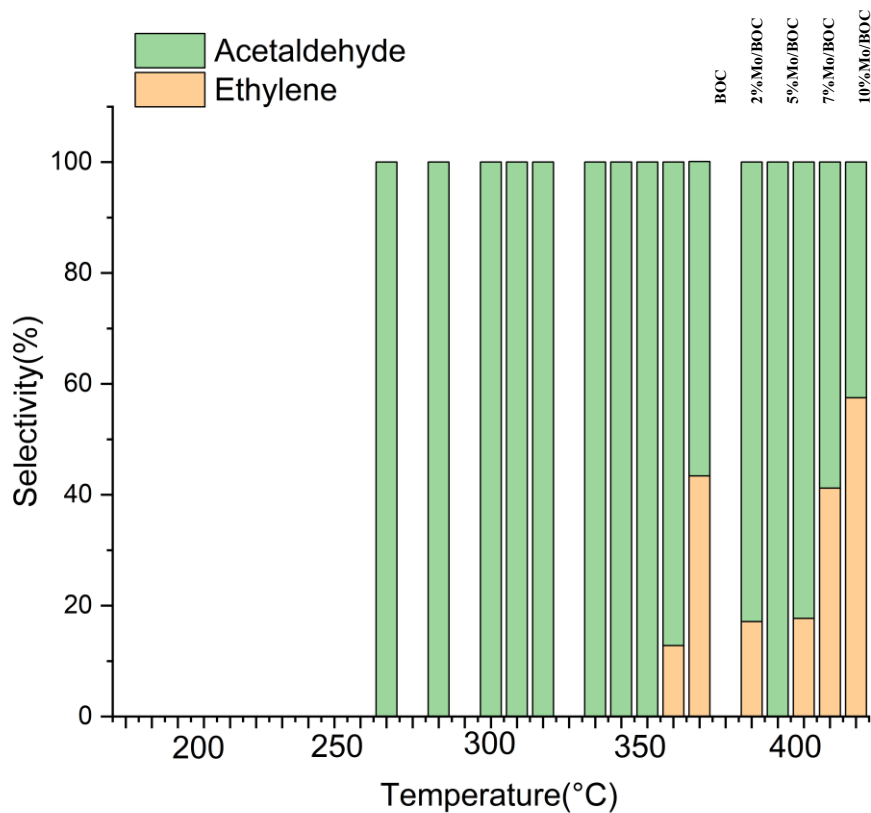
Mo/BOC

ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนจะทำการศึกษากการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 – 400 องศาเซลเซียส ซึ่งจะศึกษาจากค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอล ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีน และค่าผลผลิตของเอทิลีน โดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%Mo/BOC, 5%Mo/BOC 7%Mo/BOC และ 10%Mo/BOC เปรียบเทียบกับตัวรองรับไปโอซาร์ที่ทำมาจากไม้ไผ่ (BOC) ซึ่งจะได้ค่าคอนเวอร์ชัน ดังรูปที่ 13 จากรูปพบว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดของการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน คือ 400 องศาเซลเซียส โดยจะให้ค่าคอนเวอร์ชันของ BOC, 2%Mo/BOC, 5%Mo/BOC 7%Mo/BOC และ 10%Mo/BOC เท่ากับ 7.7%, 2.6%, 7.4%, 26.9% และ 44.6% ตามลำดับ และจากรูปที่ 14 จะแสดงค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วยเอทิลีนและ

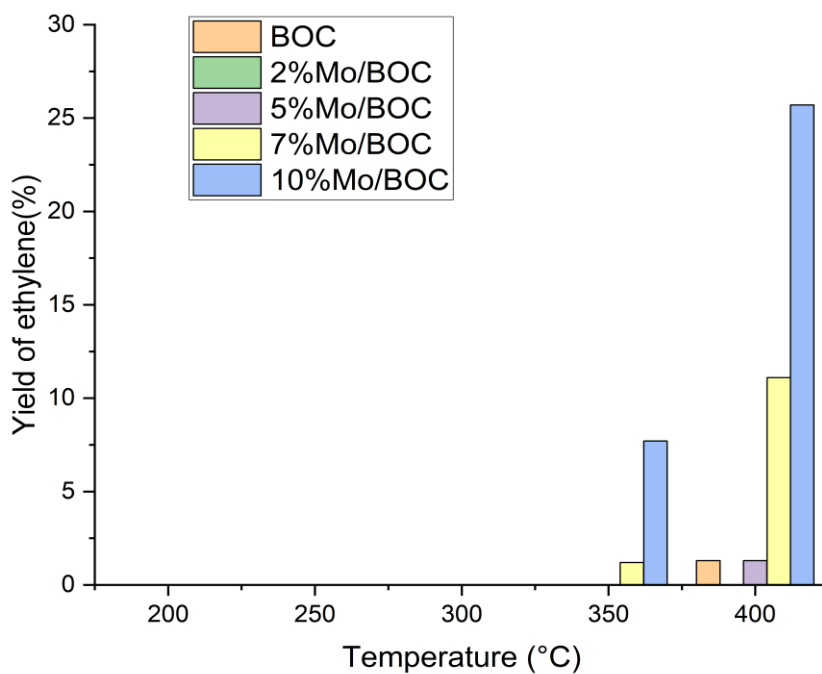
อะเซทัลดีไฮด์ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเกิดเอทิลีนมากที่สุดเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส โดยจะให้ค่าการเลือกเกิดอยู่ที่ 17.1%, 0%, 17.7%, 41.2% และ 57.5% ตามลำดับ และจะให้ค่าการเกิดอะเซทัลดีไฮด์อยู่ที่ 82.9%, 100%, 82.3%, 58.8% และ 42.5% ตามลำดับ อีกทั้งรูปที่ 15 แสดงค่าผลผลิตของเอทิลีนพบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสให้ค่าผลผลิตของเอทิลีนเท่ากับ 1.3%, 0%, 1.3%, 11.1% และ 25.7% ตามลำดับ และรูปที่ 16 แสดงค่าผลผลิตของอะเซทัลดีไฮด์เท่ากับ 6.4%, 2.6%, 6.1%, 15.8% และ 19% ตามลำดับ ดังนั้นพบว่าโมลิบดีนัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบฝังลงไปบนตัวรองรับไบโอชาร์นั้น สามารถช่วยเพิ่มค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอล ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีน และค่าผลผลิตของเอทิลีนได้ ซึ่งสอดคล้องกับผล $\text{NH}_3\text{-TPD}$ เนื่องจากเอทิลีนนั้นจะเกิดขึ้นได้ดีในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางสูง [42] ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางแล้วพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC มีค่ามากที่สุด และเมื่อพิจารณาจากผล BET พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC มีค่าพื้นที่ผิวมากที่สุด จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนดีที่สุด ค่าผลผลิตของเอทิลีนสูงสุดและค่าคอนเวอร์ชันมากที่สุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่การเคลือบฝังโมลิบดีนัมออกไซด์ในปริมาณที่น้อยเกินไปจะส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากโมลิบดีนัมออกไซด์ในปริมาณน้อยนั้นการกระจายตัวของธาตุจะดีมาก จึงสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับไบโอชาร์ได้ เมื่อเข้าไปแล้วจะไปบดบังหรือแทนที่ตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็น C หรือ SiO_2 พิจารณาจากผล XRD ที่ 2%Mo/BOC พีกของ SiO_2 หายไป ที่ 5%Mo/BOC พีก SiO_2 มีค่าน้อยกว่า BOC อีกทั้งจากผล SEM-EDX แสดงให้เห็นถึงปริมาณ C ที่ลดลงเมื่อเติมโมลิบดีนัมออกไซด์ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา 2%Mo/BOC และ 5%Mo/BOC น้อยกว่า BOC



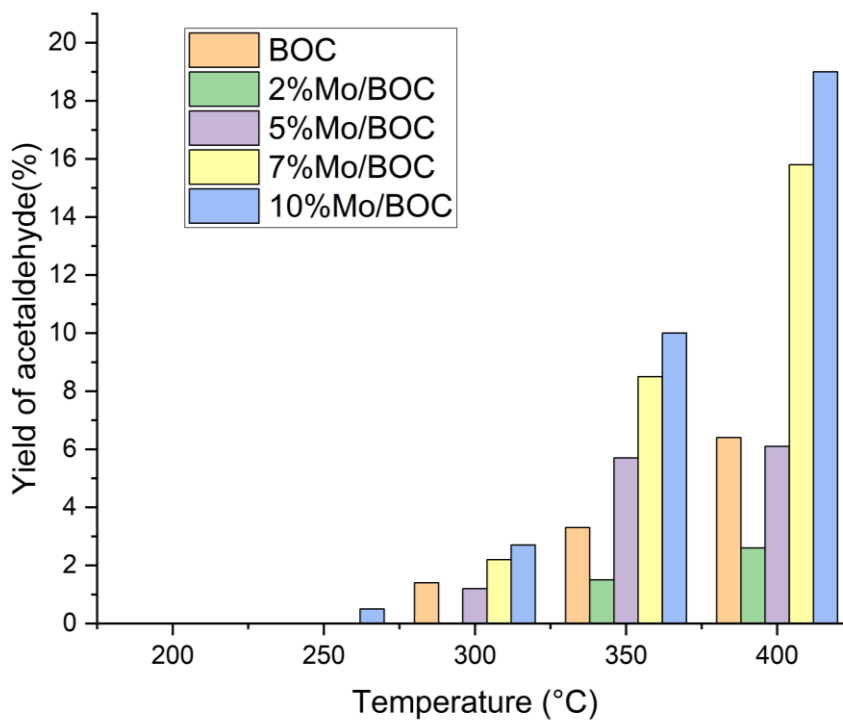
รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC



รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC



รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าผลผลิตเอทิลีนของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC

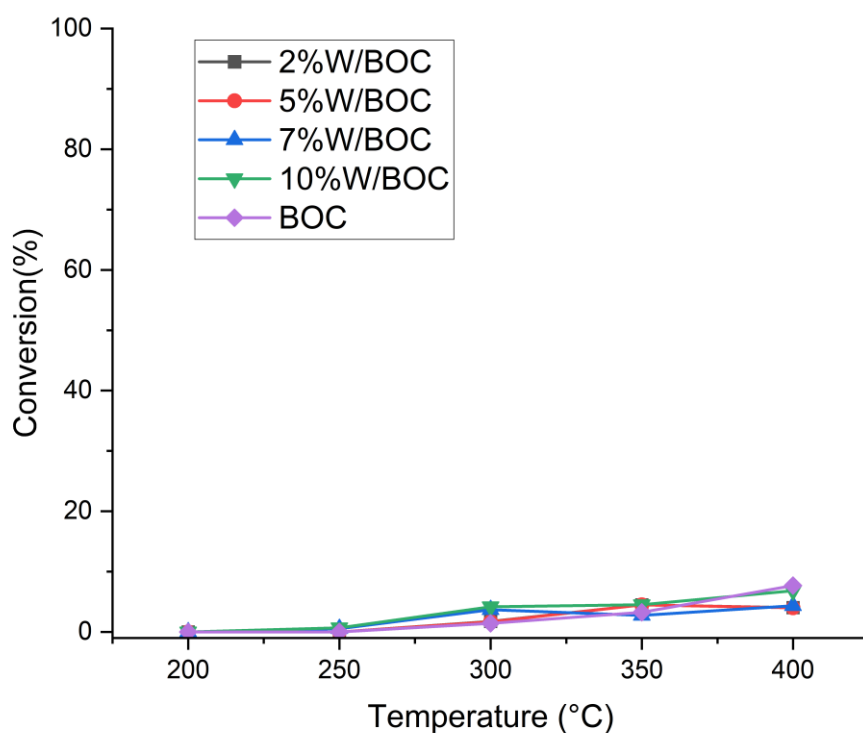


รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าผลผลิตอะเซตัลดีไฮด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC

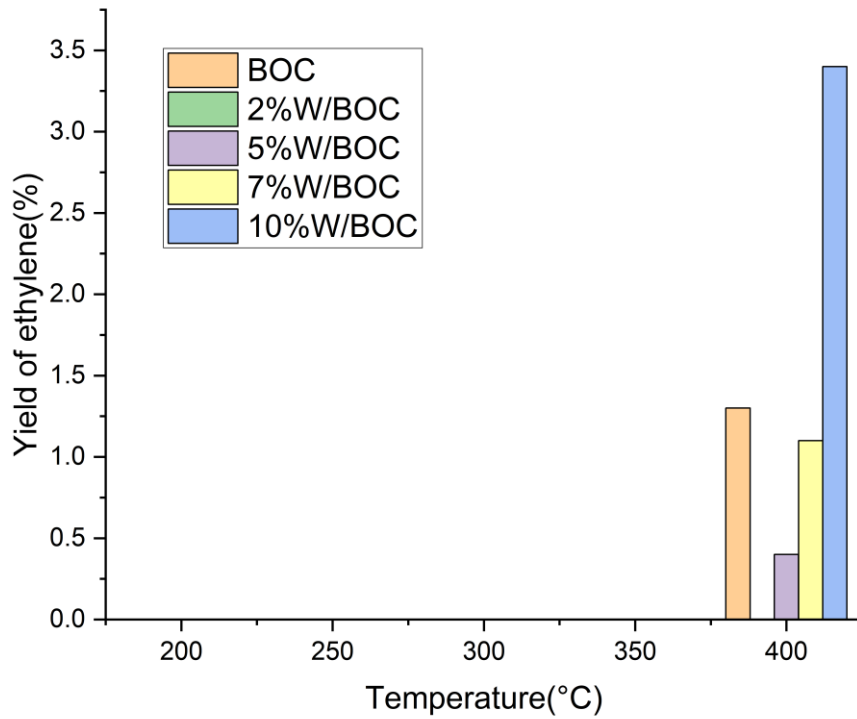
4.2.2 ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC นั้น การทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนสภาวะทุกอย่างจะใช้เหมือนตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้เป็น 2%W/BOC, 5%W/BOC, 7%W/BOC และ 10%W/BOC แทนเพื่อเปรียบเทียบกับตัวรองรับไบโอชาร์ที่ทำมาจากไม้ไผ่ (BOC) ซึ่งจะได้ค่าคอนเวอร์ชันดังรูปที่ 17 จากรูปแสดงถึงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา BOC, 2%W/BOC, 5%W/BOC, 7%W/BOC และ 10%W/BOC ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เท่ากับ 7.7%, 4%, 4%, 4.4% และ 6.8% ตามลำดับ ซึ่งค่าคอนเวอร์ชันของ BOC และ W/BOC มีค่าใกล้เคียงกันและจากภาพที่ 18 แสดงค่าผลผลิตของเอทิลีนภาพที่ 19 แสดงค่าผลผลิตของอะเซตัลดีไฮด์ ตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC จะให้ค่าผลผลิตของทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับ BOC แสดงว่าการเคลือบฝังทั้งสแตนออกไซด์นั้นไม่ได้ช่วยพัฒนาค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลและค่าการเกิดผลผลิตให้กับ BOC เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ของทั้งสแตนนั้นน้อยเกินไป เมื่อศึกษาจากหลากหลายงานวิจัยพบว่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ของโมลิบดีนัมที่ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันและค่าผลผลิตสูงนั้นอยู่ที่ 15-35% โดยน้ำหนัก [34, 45, 46] แต่ในงานวิจัยนี้การใส่ทั้งสแตนออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนดังรูปภาพที่ 20 แสดงค่าการเลือก

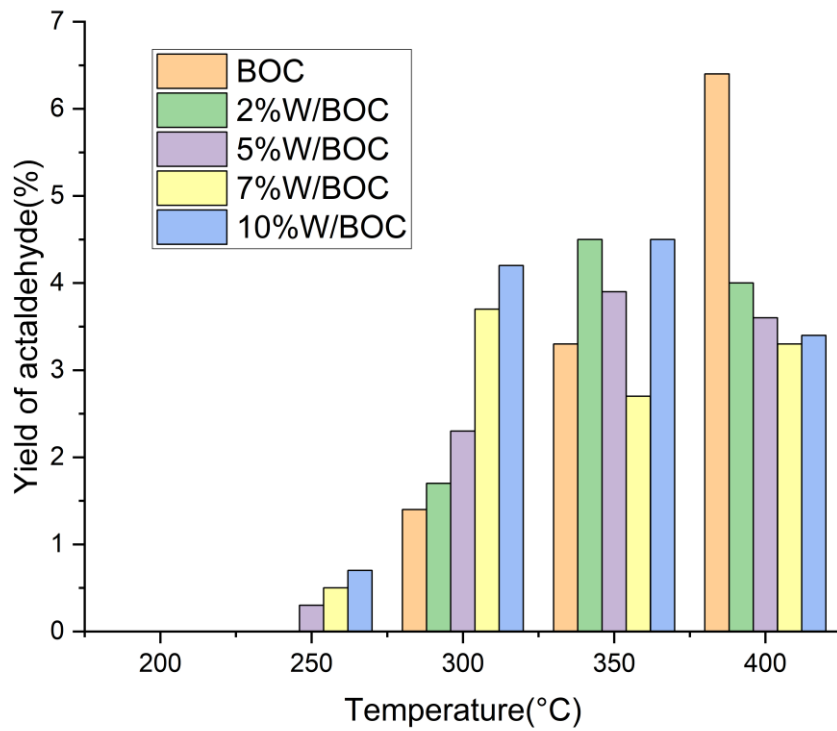
เกิดของเอทิลีน พบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสค่าการเลือกเกิดเท่ากับ 17.1% ,0% , 11%, 23.7% และ 49.6% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC ในเรื่องมีค่าความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางมากผลจากเทคนิค NH_3 -TPD และการแทนที่ของโลหะในเทคนิค SEM-EDX



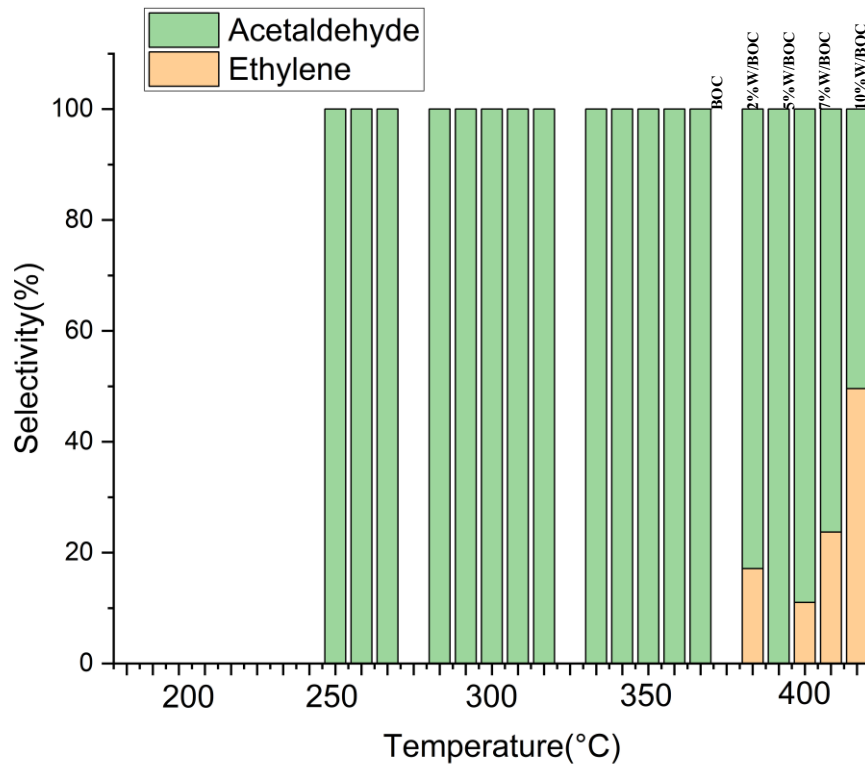
รูปที่ 17 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC



รูปที่ 18 กราฟแสดงค่าผลผลิตเอทานอลของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

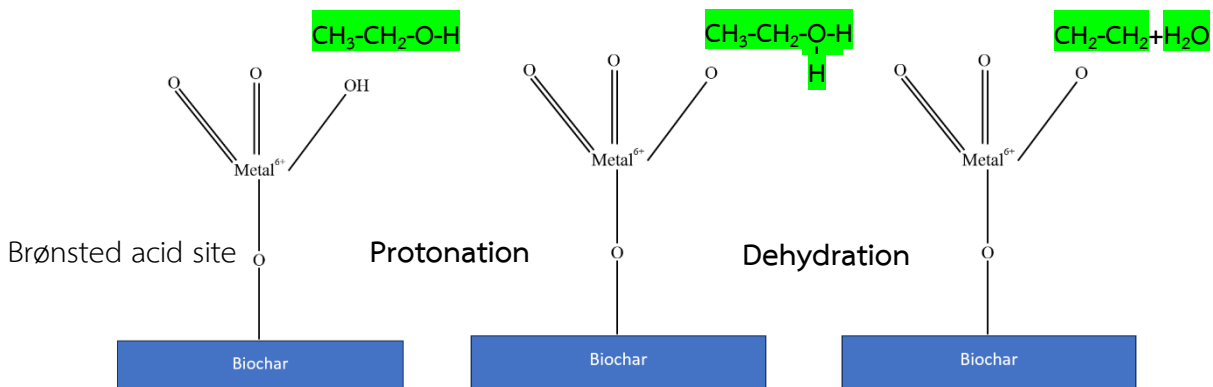


รูปที่ 19 กราฟแสดงค่าผลผลิตอะเซตัลดีไฮด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC



รูปที่ 20 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยา W/BOC

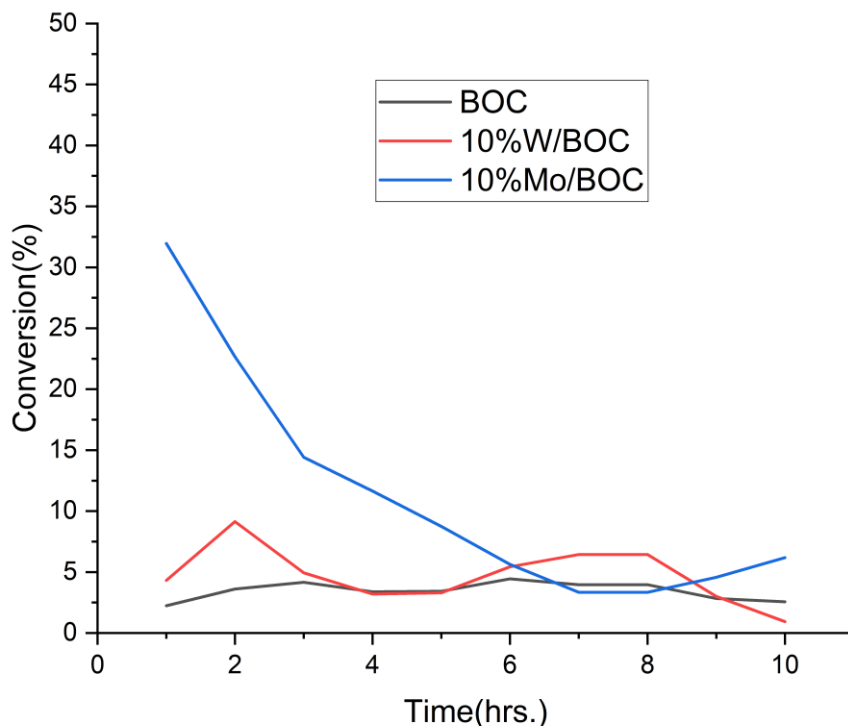
ซึ่งการปรับปรุงด้วยโมลิตินีมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ ลงไปบนตัวรองรับแล้ว โมลิตินีมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์นั้นจะสามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางได้ โดยการสร้างพันธะใหม่กับตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดกรดประเภทของเบรินสเตรด ซึ่งจะให้โปรตอน H^+ [15, 45] และเมื่อปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนนั้น เอทานอลจะรวมกับ H^+ และ เกิดเป็นเอทิลีนและน้ำ ซึ่งรูปที่ 21 ได้แสดงถึง แผนภาพการเกิดกรดและการเกิดเอทิลีน



รูปที่ 21 ภาพแสดงการเกิดกลไกปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

4.2.3 การทดสอบเสถียรภาพ

หลังจากที่ทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนแล้ว จะนำตัวเร่งปฏิกิริยา Mo/BOC และ W/BOC ที่ให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงที่สุดอย่างละ 1 ตัว มาทำการทดสอบเสถียรภาพหรือก็คือตัวแทนของ Mo/BOC คือ 10%Mo/BOC และของ W/BOC คือ 10%W/BOC ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ตัวนี้ให้ค่าคอนเวอร์ชันมากที่สุดเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์การใส่ที่ 2%, 5%, 7% และ 10% ทดสอบที่อุณหภูมิที่ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงที่สุดคือ 400 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมงและนำมาเปรียบเทียบกับ BOC ดังรูปที่ 22 แสดงให้เห็นถึงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC ค่าคอนเวอร์ชันจะต่ำลงเรื่อยๆจนถึง เวลา 7 ชั่วโมงแล้วเริ่มคงที่ แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC แต่เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยา 10%W/BOC และ BOC นั้น พบว่าค่าคอนเวอร์ชันค่อนข้างคงที่ตลอดทั้ง 10 ชั่วโมงเนื่องจาก ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดนี้ เดิมทีมีค่าคอนเวอร์ชันที่น้อยอยู่แล้ว จึงทำให้ไม่สามารถเห็นถึงความแตกต่างของการเสื่อมสภาพอย่างชัดเจนได้



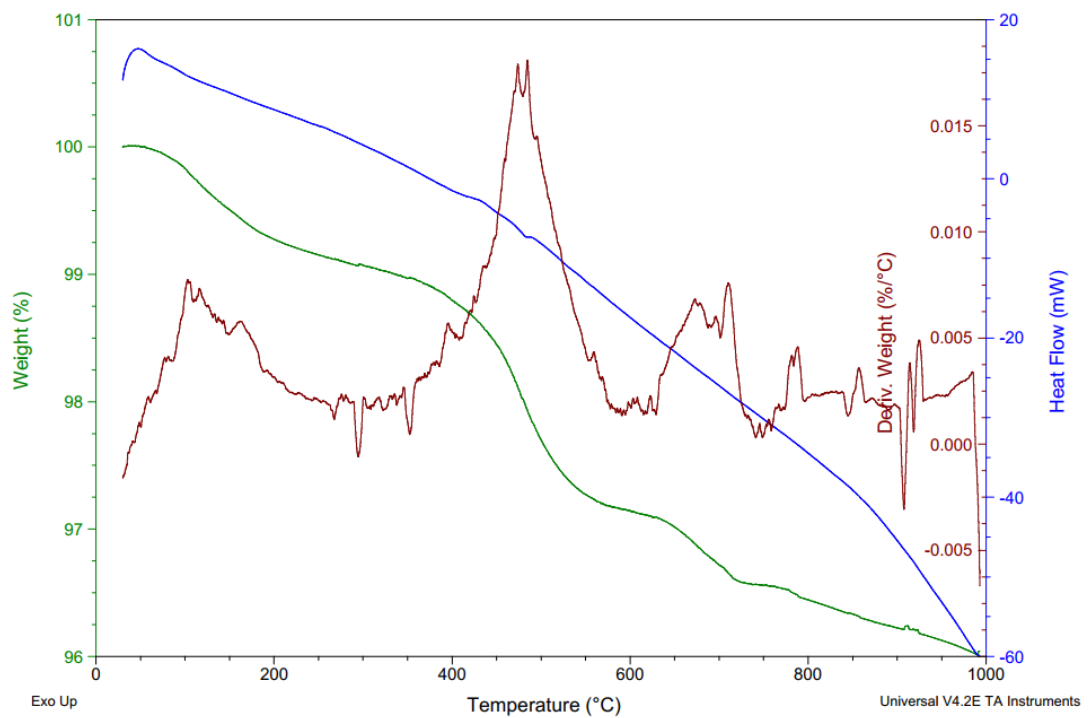
รูปที่ 22 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC, 10%W/BOC และ BOC ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง

4.2.4 สาเหตุของการเสื่อมสภาพ

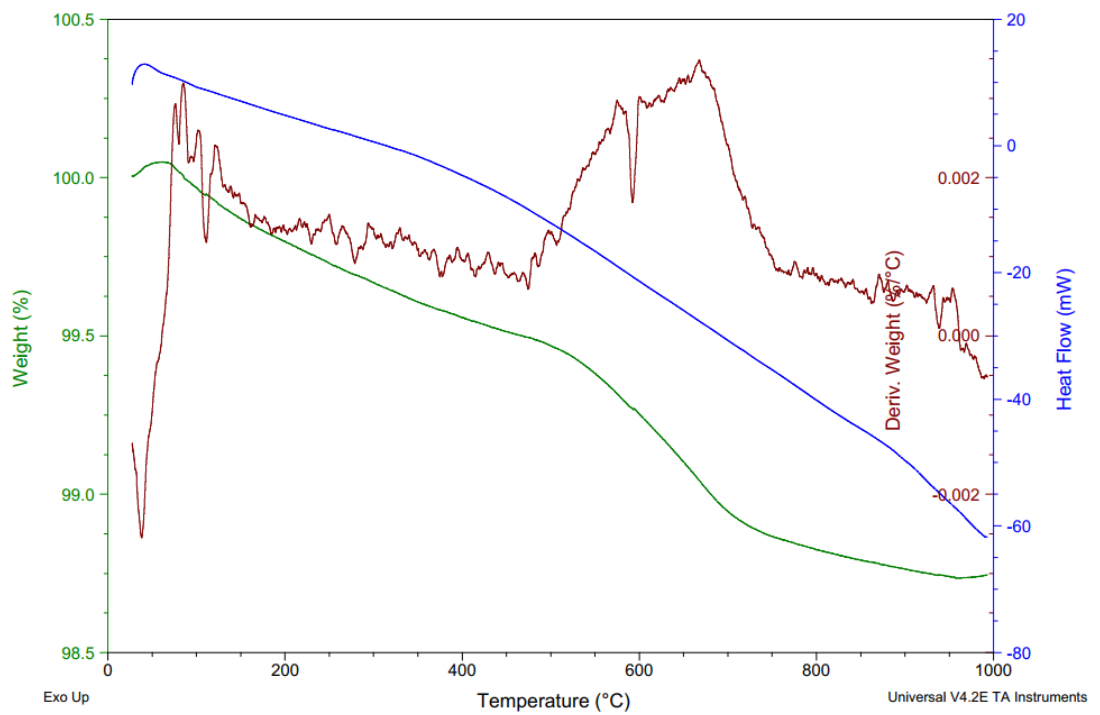
การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัยคือ การเสื่อมสภาพของโลหะหรือการเสื่อมสภาพจากตัวรองรับ ซึ่งจากการศึกษาจากหลาย ๆ งานวิจัยพบว่า โมลิตินัมออกไซด์นั้นไม่เสื่อมสภาพเมื่อเวลาผ่านไป โดยในงานวิจัยอื่นได้ใช้โมลิตินัมออกไซด์แต่เปลี่ยนตัวรองรับเช่น ซิลิกาหรืออะลูมินาเป็นต้น [15, 27, 29] แต่ในทางกลับกันงานวิจัยเกี่ยวข้องกับคาร์บอนและไบโอชาร์พบการเสื่อมสภาพของตัวรองรับมักจะเปลี่ยนไปใช้โลหะชนิดอื่นเช่น นิกเกิล, คอปเปอร์หรือโคบอลต์เป็นต้น [14, 17, 47] ดังนั้นในงานวิจัยนี้การเสื่อมสภาพจึงเกิดจากการเสื่อมสภาพของตัวรองรับ BOC เหตุผลในการเสื่อมสภาพสามารถอธิบายได้ด้วย

4.2.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

เทคนิค TGA วิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของ Coke ที่เกิดขึ้นหลังจากที่ตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันมาแล้ว โดยจากภาพที่ 23 ที่แสดงผล TGA ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC เมื่อพิจารณาที่กราฟแล้วพบว่าน้ำหนักของสารที่หายไป (เส้นสีเขียว) ในแต่ละช่วงอุณหภูมิมีความหมายดังนี้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส การสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาช่วงนี้เกิดจากการกำจัดน้ำ อย่างไรก็ตามพบว่าช่วงอุณหภูมิ 200 – 600 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวเนื่องจากโค้กอะตอมคาร์บอน (Soft Coke) และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวเนื่องจาก โค้กโพลีเมอร์ริก (Hard Coke) ซึ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดจาก Coke ที่เกิดขึ้นและมาบดบังในจุดที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ค่าคอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากเส้นสีเขียวพบว่า ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส น้ำหนักของสารเหลือเพียง 96.3% จาก 100% แสดงว่ามี Coke เกิดขึ้น 3.7% และเป็นเหตุผลของการเสื่อมสภาพอีกทั้งในตำแหน่งของ Soft Coke นั้นเป็นตำแหน่งที่ Coke มาเกาะในจุดที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาหรือก็คือหากมีการเกิด Soft Coke มากก็แสดงว่ามีจุดว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก [47] ซึ่งเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสแล้วพบว่า 10%Mo/BOC มีค่า Soft Coke อยู่ที่ 3% แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 24 ซึ่งเป็นผล TGA ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%W/BOC พบว่ามีค่า Soft Coke เพียง 1% ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC มีค่าคอนเวอร์ชันมากกว่า 10%W/BOC



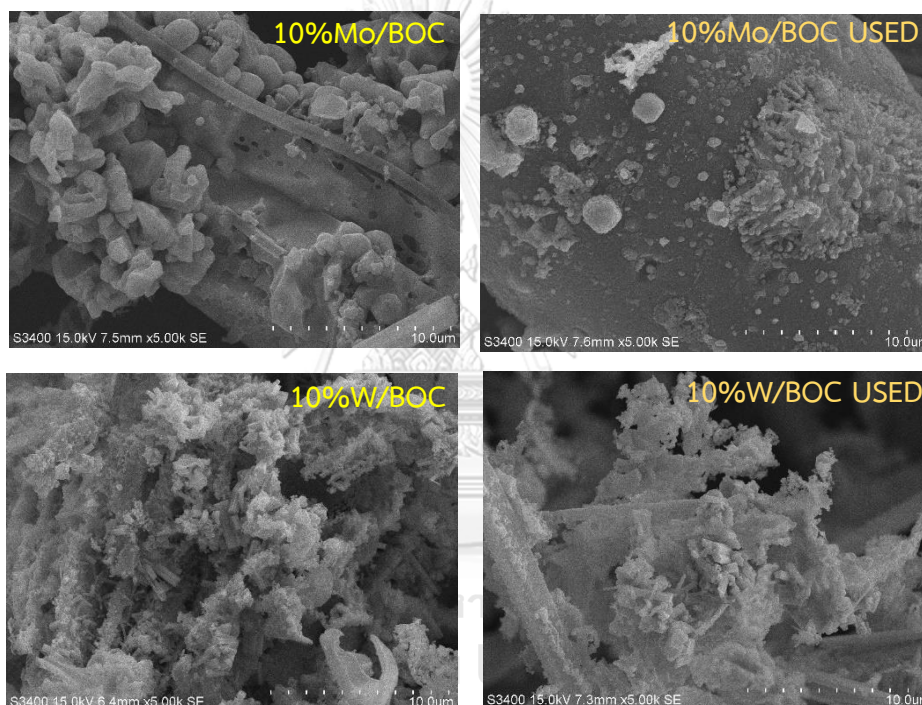
รูปที่ 23 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC



รูปที่ 24 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%W/BOC

4.2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) หลังการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

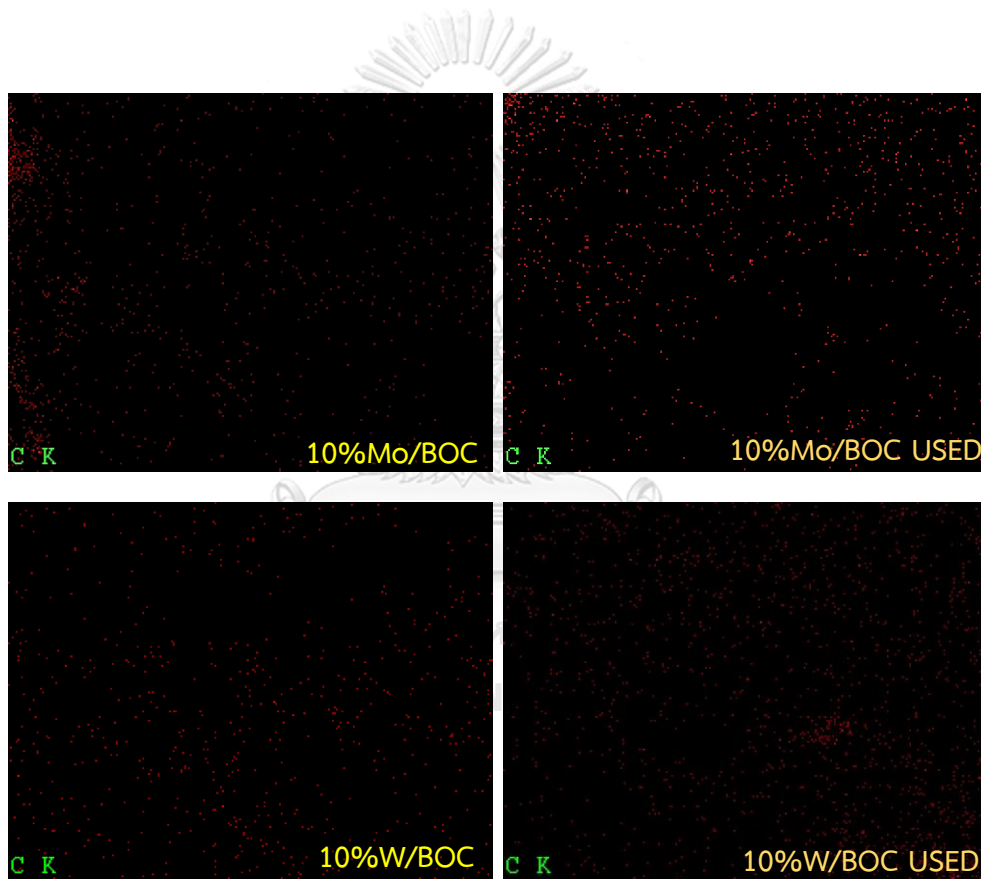
หลังจากทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนแล้ว นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานนั้นไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังภาพที่ 25 พบว่าที่ 10%Mo/BOC หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วจะเป็นลักษณะชั้นฟิล์มมาเคลือบอยู่ ซึ่งชั้นฟิล์มนั้นเป็นของ Coke ที่เกิดขึ้น แต่ในตัวเร่งปฏิกิริยา 10%W/BOC ที่ผ่านการใช้งานแล้วจะไม่มีหรือมีน้อยมาก ซึ่งก็สอดคล้องกับเทคนิค TGA ที่แสดงค่าของ Coke ที่เกิดขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC มากกว่า 10%W/BOC



รูปที่ 25 รูปกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC และ 10%W/BOC ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและใช้งานแล้ว

4.2.4.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) หลังการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX เพื่อหารูปการกระจายตัวของคาร์บอน จากรูป 26 เป็น แสดงการกระจายตัวของคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และ 10%Mo/BOC ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วมีธาตุคาร์บอน กระจายตัวเพิ่มมากขึ้น และ แสดงการกระจายตัวของคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%W/BOC ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และ 10%W/BOC ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าการกระจายตัวของคาร์บอนมีค่า ไกล่กัน ซึ่งสอดคล้องกับผล TGA



รูปที่ 26 ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOCและ 10%W/BOC ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและใช้งานแล้ว

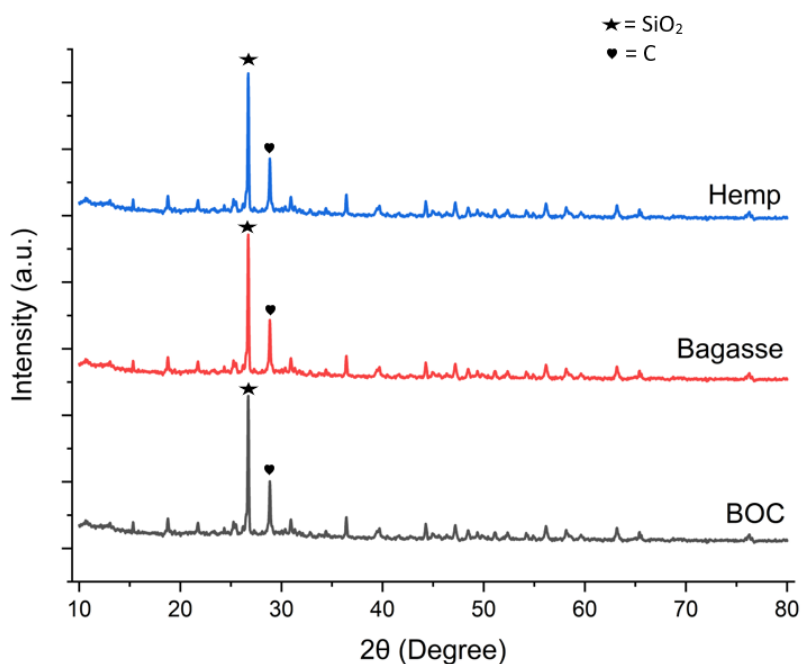
4.3 การศึกษาผลของตัวรองรับไบโอชาร์ที่มาจากวัสดุต่างชนิดกัน

หลังจากที่ทำการเปรียบเทียบผลของการเคลือบฝังโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์แล้ว จึงทำการเปรียบเทียบตัวรองรับไบโอชาร์เพื่อพิจารณาว่า หากนำไบโอชาร์ที่เป็นวัสดุต่างชนิดกันจะให้ผลเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร โดยไบโอชาร์ที่นำมาเปรียบเทียบมีดังนี้ ไบโอชาร์ที่ทำมาจากไม้ไผ่ (BOC) ไบโอชาร์ที่ทำมาจากขานอ้อย (Bagasse) และ ไบโอชาร์ที่ทำมาจากกัญชง (Hemp)

4.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

จากการศึกษาเทคนิค XRD ของทั้ง 3 ตัวรองรับ แสดงดังรูปที่ 27 พบว่าตัวรองรับ BOC, Bagasse, และ Hemp แสดงให้เห็นพีคของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ 2θ เท่ากับ 26 องศาดีกรี และแสดงให้เห็นพีคของ คาร์บอน (C) ที่ 2θ เท่ากับ 29 องศาดีกรี เหมือนกัน และจากตารางที่ 12 พบว่าค่าความเป็นผลึกของสารใกล้เคียงกัน



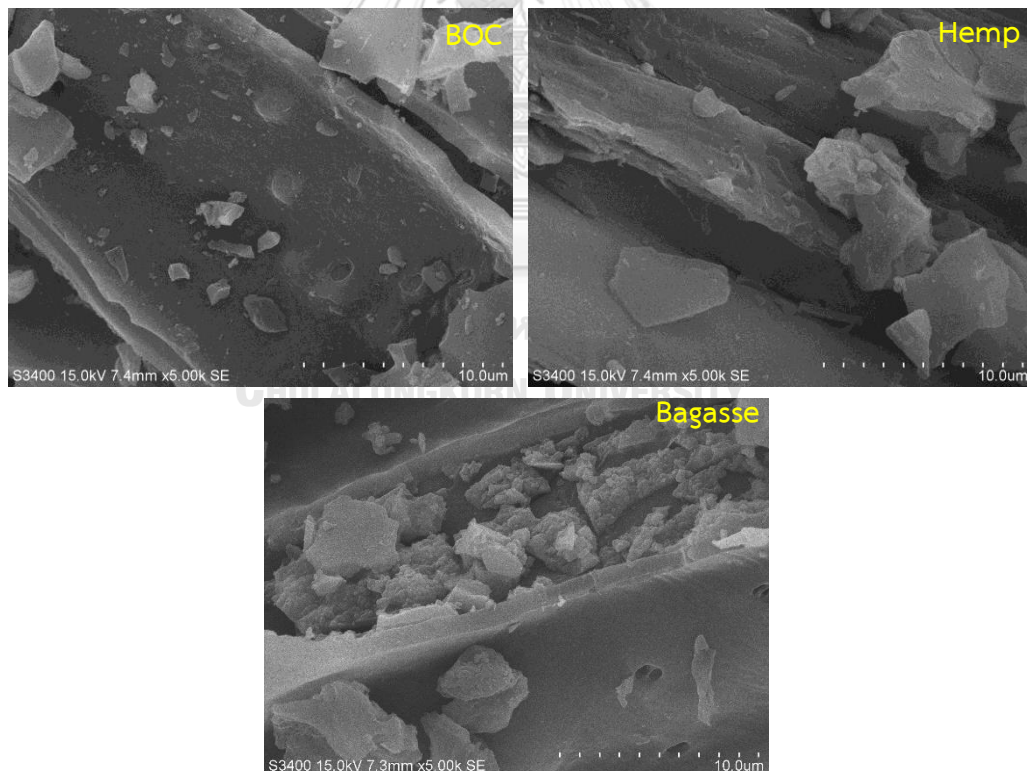
รูปที่ 27 กราฟ XRD ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp

ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่าความเป็นผลึกของตัวรองรับ BOC , Bagasse และ Hemp

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดผลึกซิลิคอนไดออกไซด์ (นาโนเมตร)
BOC	116.23
Bagasse	115.75
Hemp	116.23

4.3.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

จากรูปที่ 28 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโมเลกุลของตัวรองรับทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าลักษณะโมเลกุลของตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะคล้ายกัน



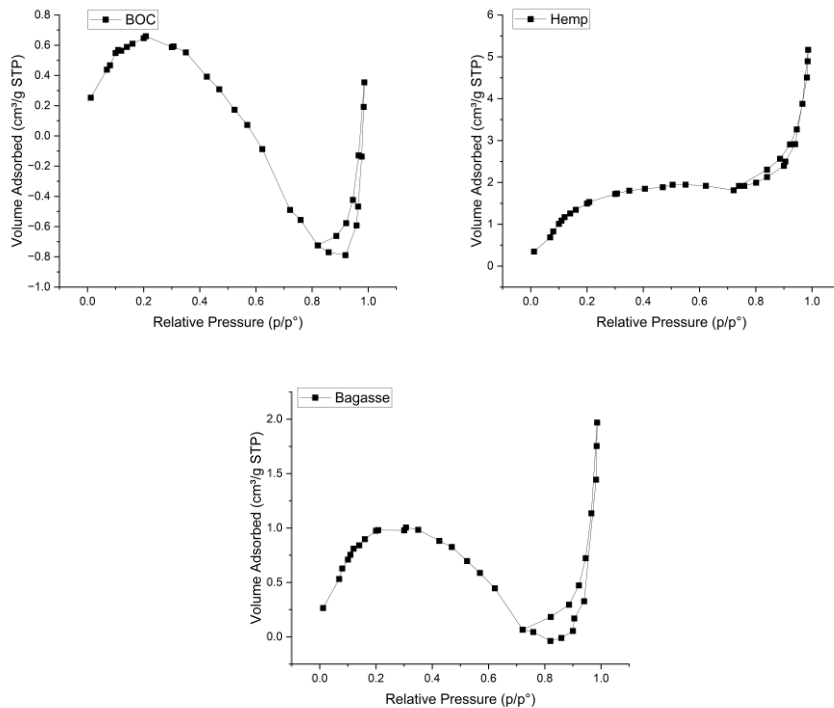
รูปที่ 28 ภาพ SEM ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp

4.3.1.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption (BET)

จากตารางที่ 13 แสดงค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและลักษณะรูพรุน พบว่าค่าตัวรองรับ BOC นั้นมีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ $2.56 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.0003 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน เท่ากับ 0.46 nm ตัวรองรับ Bagasse ค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ $2.67 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.0003 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน เท่ากับ 0.45 nm และตัวรองรับ Hemp มีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ $2.40 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.0002 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน เท่ากับ 0.47 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และจากรูปภาพที่ 29 พบลักษณะไอโซเทิร์มแบบที่ 4 แสดงลักษณะไอโซเทิร์มที่ปรากฏฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) เกิดขึ้นที่ $P/P_0 > 0.6$ ซึ่งบ่งชี้การมีอยู่ของโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (mesoporous) จากวงฮิสเทอรีซิสลูปของตัวรองรับทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 13 ตารางแสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว BET (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	ขนาดรูพรุน (nm)
BOC	2.56	0.0003	5.27
Bagasse	2.67	0.0003	5.13
Hemp	2.40	0.0002	5.39



รูปที่ 29 การดูดซับทางกายภาพของก๊าซไนโตรเจนของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp

4.3.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Ammonia-Temperature-Programmed Desorption (NH₃-TPD)

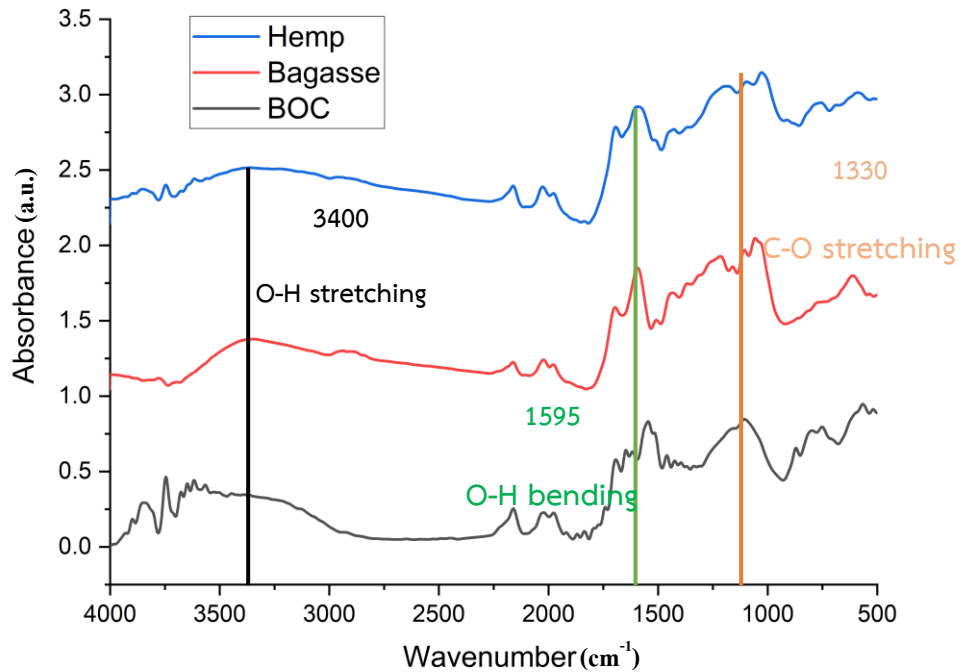
จากตารางที่ 14 แสดงค่าความเป็นกรดของตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดพบว่าตัวรองรับ BOC นั้นมีความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลาง เท่ากับ 10.7 $\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$ และมีความความเป็นกรดแก่เท่ากับ 335.1 $\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$ ส่วนตัวรองรับ Bagasse มีความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลาง เท่ากับ 11.1 $\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$ และมีความความเป็นกรดแก่เท่ากับ 340.7 $\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$ และตัวรองรับ Hemp มีความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลาง เท่ากับ 11.3 $\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$ และมีความความเป็นกรดแก่เท่ากับ 350.4 $\mu\text{mol NH}_3/\text{g}$ ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาเป็นอัตราส่วนแล้วพบว่าอัตราส่วน กรดอ่อนถึงปานกลางต่อกรดแก่ของตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดใกล้เคียงกันและมีค่าประมาณ 1 : 31 เท่า

ตารางที่ 14 ตารางแสดงค่าความเป็นกรดจากเทคนิค NH_3 -TPD ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด ($\text{umol NH}_3/\text{g}$)			ความหนาแน่นของกรด ($\text{umolNH}_3/\text{m}^2$)
	กรดอ่อนถึงปานกลาง	กรดแก่	ไซต์ที่เป็นกรดทั้งหมด	
BOC	10.7	335.1	345.8	131.11
Bagasse	11.1	340.7	351.8	131.53
Hemp	11.3	350.4	361.7	150.74

4.3.1.5 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

การวิเคราะห์หาค่าประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (FTIR) การดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงอินฟราเรดช่วง 500 ถึง 4000 cm^{-1} จากรูป 30 แสดงหมู่ฟังก์ชันของตัวรองรับทั้ง 3 ชนิด ดังนี้ จากภาพที่ 27 ที่ความยาวคลื่นประมาณ $3200 - 3600 \text{ cm}^{-1}$ พบหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่ประมาณ 1595 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน O-H bending ที่ประมาณ 1330 cm^{-1} C-O stretching [17] ซึ่งตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดมีหมู่ฟังก์ชันแบบเดียวกัน



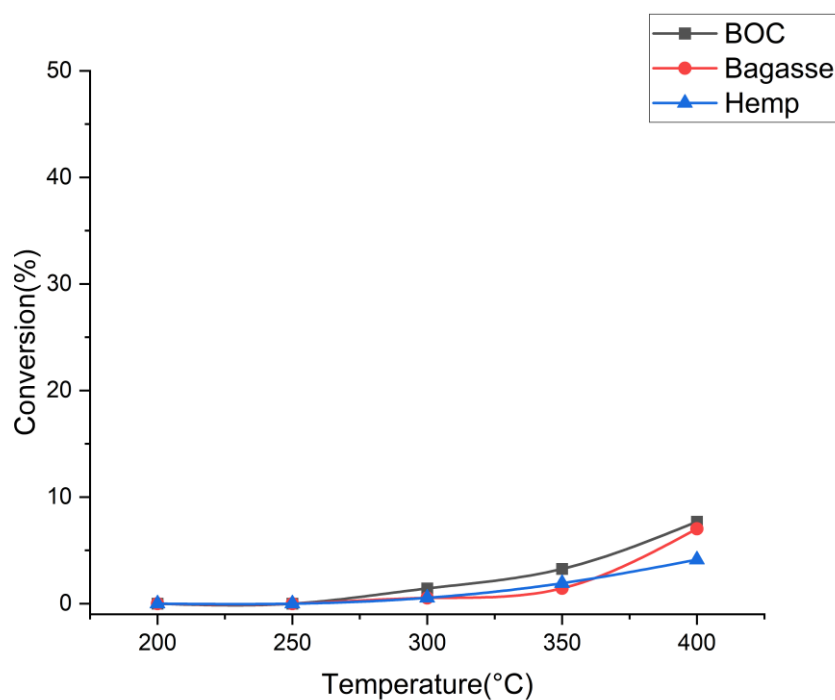
รูปที่ 30 กราฟ FTIR ของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp

จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp ที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า ตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดนั้นมีคุณสมบัติในด้านต่างๆที่เหมือนกัน ไม่ว่าจะเป็น ความเป็นผลึก ลักษณะโมเลกุล พื้นที่ผิว ความเป็นกรดหรือหมู่ฟังก์ชัน

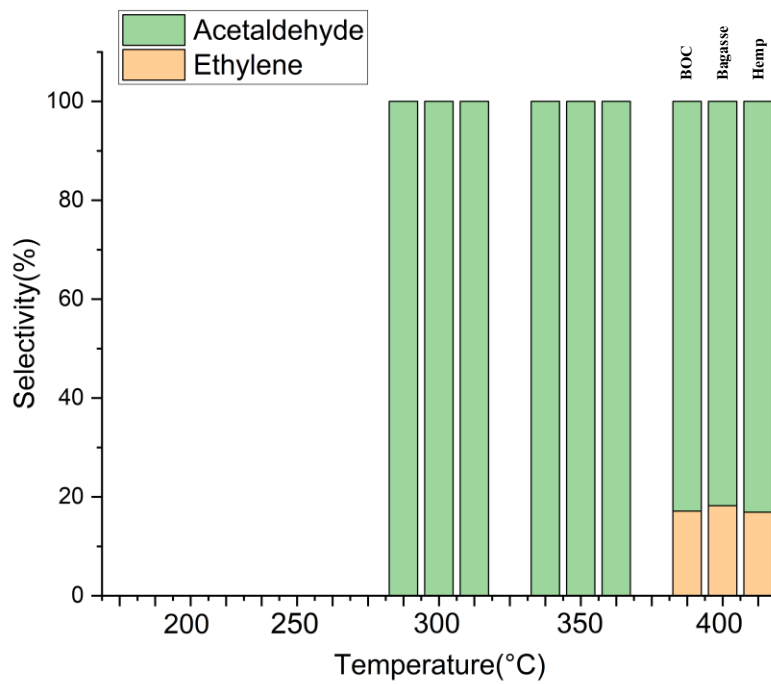
4.3.2 การศึกษาการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน

ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนจะทำการศึกษาก่อเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 – 400 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาจากค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลและค่าการเลือกเกิดของเอทิลีน โดยจะทำการเปรียบเทียบตัวรองรับที่ต่างชนิดกันดังนี้ เปรียบเทียบ BOC, Bagasse และ Hemp อีกทั้งยังเปรียบโดยทำการเคลือบฟิงโลหะที่ให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดในเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมที่สุดก็คือ 10% โมลิบดีนัมออกไซด์ เพราะฉะนั้นจะเปรียบเทียบ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp เช่นกัน จากการเปรียบเทียบ BOC, Bagasse และ Hemp จะได้ตามรูปภาพที่ 31 และ 32 พบว่าค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเท่ากับ 7.68%, 7.02% และ 4.11% ตามลำดับและค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเท่ากับ 17.1%, 18.2% และ 16.9% ตามลำดับ ซึ่งค่าของตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดนี้มีความใกล้เคียงกันและจากรูป 33 และ 34 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp แสดงผลค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเท่ากับ

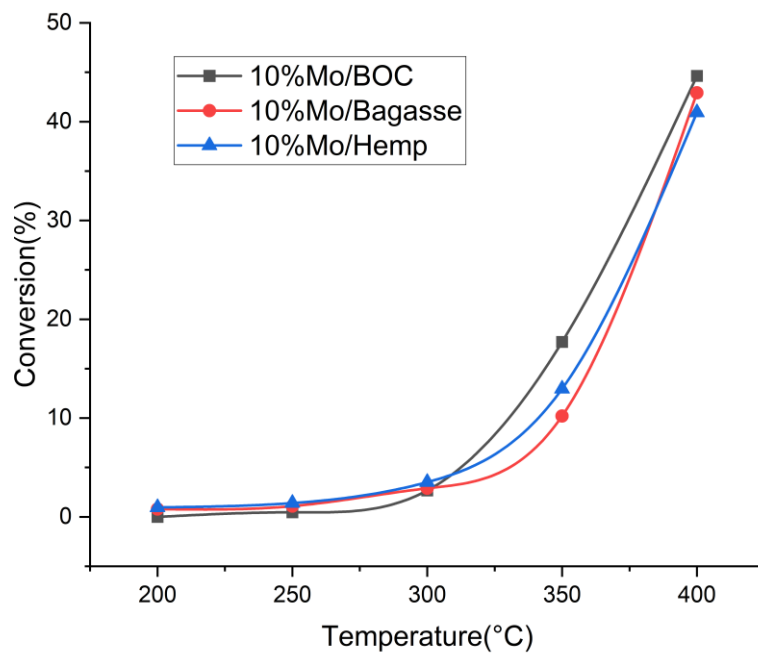
44.63%, 42.91% และ 40.10%ตามลำดับและค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนอูณหภูมิตั้งที่ 400 องศาเซลเซียสเท่ากับ 57.5%, 55.3%และ 56.3% ตามลำดับ โดยผลที่แสดงออกมานั้นใกล้เคียงกัน



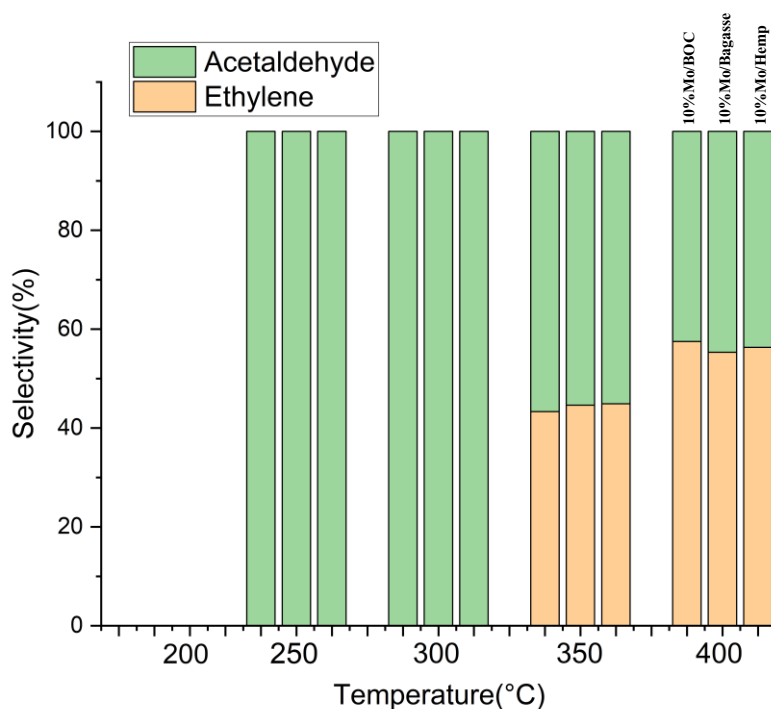
รูปที่ 31 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp



รูปที่ 32 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp



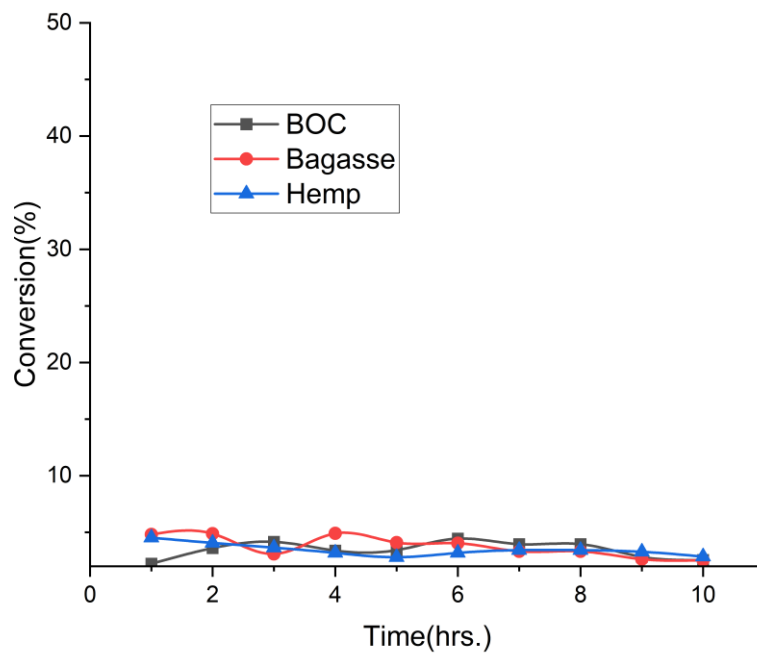
รูปที่ 33 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp



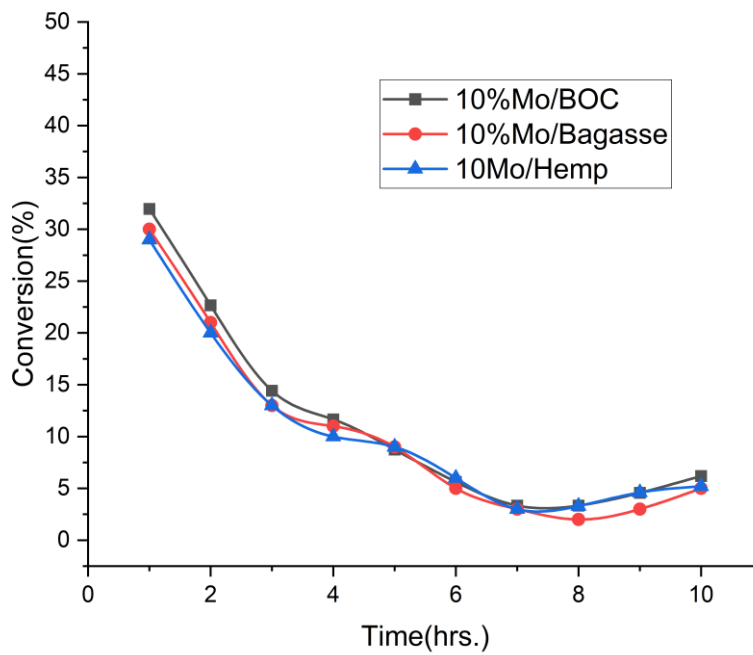
รูปที่ 34 กราฟแสดงค่าการเลือกเกิดของตัวรองรับ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp

4.3.3 การทดสอบเสถียรภาพ

การทดสอบเสถียรภาพนั้นจะเลือกทำปฏิกิริยาที่ไฮดรเจนของเอทานอลไปเป็นเอทิลีนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพราะเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงสุด ทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง โดยจะทำการเปรียบเทียบตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp ดังรูปที่ 35 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวรองรับทั้ง 3 ตัวนั้นที่ระยะเวลา 1 – 10 ชั่วโมงนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และรูปที่ 36 เป็นการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp จากภาพแสดงถึงค่าคอนเวอร์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดที่ 1 – 10 ชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 35 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ BOC, Bagasse และ Hemp ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 36 กราฟแสดงค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอลด้วยตัวรองรับ 10%Mo/BOC, 10%Mo/Bagasse และ 10%Mo/Hemp ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง

จากผลการทดลองข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถทำให้สรุปได้ว่า ตัวรองรับที่ทำมาจากต่างวัสดุกันซึ่งประกอบไปด้วย ไมไฟ ฆานอ้อย และ กัญชง ตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดนี้มีค่าต่างๆที่กล่าวมาใกล้เคียงหรือไม่แตกต่างกัน เพราะฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลของการเปรียบเทียบความต่างของวัสดุที่ใช้ทำตัวรองรับนั้น ไม่แตกต่างกันหรือก็คือสามารถใช้แทนกันได้เลย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา 2%Mo/BOC, 5%Mo/BOC, 7%Mo/BOC และ 10%Mo/BOC เปรียบเทียบกับ 2%W/BOC, 5%W/BOC, 7%W/BOC และ 10%W/BOC พร้อมทั้งได้ทำการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน อีกทั้งยังศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย และสุดท้ายทำการศึกษาเหมือนเดิมทุกประการ แต่เปลี่ยนการเปรียบเทียบเป็นการเปรียบเทียบชนิดของวัสดุที่ใช้ทำตัวรองรับ ซึ่งประกอบไปด้วย ไมไฟ ฆานอ้อย และ กัญชง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากการศึกษาคูณผลของการเคลือบฝังโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์บนตัวรองรับไปโอซาร์ที่ทำมาจากไมไฟ ที่เปอร์เซ็นต์การใส่เท่ากับ 2%, 5%, 7% และ 10% โดยน้ำหนักพบว่าโมลิบดีนัมออกไซด์ที่ทำการเคลือบฝังลงไปบนตัวรองรับไปโอซาร์นั้น สามารถช่วยเพิ่มค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอล ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนและค่าผลผลิตของเอทิลีนได้ เนื่องจากเอทิลีนนั้นจะเกิดขึ้นได้ดีในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางสูง ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางแล้วพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC มีค่ามากที่สุด และ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา10%Mo/BOC มีค่าพื้นที่ผิวมากที่สุด จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC ค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนดีที่สุด ค่าผลผลิตของเอทิลีนสูงสุดและค่าคอนเวอร์ชันมากที่สุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่อศึกษาทังสเตนออกไซด์แล้วพบว่า การใส่โลหะทังสเตนนั้นไม่ได้ช่วยพัฒนาหรือเพิ่มค่าคอนเวอร์ชันเพราะว่าเปอร์เซ็นต์ในการใส่ของทังสเตนออกไซด์นั้นน้อยเกินไปจึงทำให้ไม่สามารถช่วยพัฒนาค่าคอนเวอร์ชันได้ แต่การใส่ทังสเตนออกไซด์นั้นสามารถช่วยเพิ่มค่าการเลือกเกิดของเอทิลีนได้

ด้วยเหตุผลที่เอทิลีนนั้นจะเกิดขึ้นได้ดีในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางสูง และตัวเร่งปฏิกิริยา 10%W/BOC มีค่าความเป็นกรดอ่อนถึงปานกลางสูงสุด จึงทำให้ค่าการเลือกเกิดเอทิลีนมาที่สุด ส่วนการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะทำการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC , 10%W/BOC และ BOC พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Mo/BOC เริ่มมีการเสื่อมสภาพอย่างเห็นได้ชัดที่เวลา 1- 6 ชั่วโมง สาเหตุมาจากการเกิด Soft Coke ที่มาปกคลุมบนตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันส่วน 10%W/BOC และ BOC ไม่สามารถเห็นผลได้อย่างชัดเจนเนื่องจากค่าคอนเวอร์ชันที่น้อย เพราะฉะนั้นหากเปรียบเทียบโลหะระหว่างโมลิบดีนัมออกไซด์และทังสเตนออกไซด์แล้วพบว่า โมลิบดีนัมออกไซด์มีความเหมาะสมที่จะใช้เคลือบฝังบนตัวรองรับไอซอร์ที่มาจากไม้ไผ่มากกว่าทังสเตนออกไซด์

5.1.2 จากการศึกษาผลของตัวรองรับที่ทำมาจากวัสดุชนิดที่ต่างกันสรุปได้ว่าตัวรองรับที่ทำมาจาก ไม้ไผ่ ชานอ้อยและกล้วย พบว่าตัวรองรับทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญไม่ว่าจะเป็นด้าน สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี ผลของการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเอทานอลไปเป็นเอทิลีน ผลของการเคลือบฝังโลหะโมลิบดีนัมออกไซด์ 10%โดยน้ำหนัก และผลของการศึกษาเสถียรภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาผลของการเคลือบฝังทังสเตนออกไซด์ที่เปอร์เซ็นต์การใส่มากกว่า 15% โดยน้ำหนัก
- วิเคราะห์ความเป็นเบสด้วยเทคนิค CO₂-TPD
- วิเคราะห์หาชนิดของกรดว่าเป็นกรดแบบ เบรินสเตด-ลารรี หรือ ลิวอิส IR-NH₃-TPD
- นำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM เพื่อหาการกระจัดของธาตุ

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก การคำนวณความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ความสามารถในการเลือกเกิด และการคำนวณผลผลิตเอทิลีน

$$\text{ค่าคอนเวอร์ชันของเอทานอล} = \frac{\text{เอทานอลเข้า}(mol) - \text{เอทานอลออก}(mol)}{g_{\text{เอทานอลเข้า}}(mol)} \times 100$$

$$\text{ค่าการเกิดของ A} = \frac{A(mol)}{\text{ผลรวมผลิตภัณฑ์ทั้งหมด}(mol)} \times 100$$

โดยที่ ; A คือ ผลิตภัณฑ์ที่สนใจ เช่น เอทิลีน หรือ อะซีทัลดีไฮด์

$$\text{ค่าผลผลิตของ A} = \frac{\text{ค่าคอนเวอร์ชัน} \times \text{ค่าการเลือกเกิดของ A}}{100}$$

โดยที่ ; A คือ ผลิตภัณฑ์ที่สนใจ เช่น เอทิลีน หรือ อะซีทัลดีไฮด์

บรรณานุกรม

1. สมาคมการค้าผู้ผลิตเอทานอลไทย, กระบวนการผลิตเอทานอล. 2556.
2. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, ก.ก., รายงานสถานการณ์ การปลูกอ้อย ปีการผลิต 2563/64. 2564.
3. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, มั่นสำปะหลัง โรงงาน: เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิต ต่อไร่ ปี2563. 2564.
4. ธนาคารกรุงศรี, แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566: อุตสาหกรรมเอทานอล. 2564.
5. พลังวาบบางอย่าง., ทำไมถึงใส่เอทานอลลงในน้ำมันเชื้อเพลิง? 2564.
6. OIL, P.S., รู้จักกับต้นกำเนิดของน้ำมันแก๊สโซฮอล์. 2564.
7. กรมการขนส่งทางบก, ก.ก., รายงานการจดทะเบียนรถยนต์ใหม่. 2565.
8. จงสมจิตร, ศ.ด.บ., *Heterogeneous Catalyst*. 2565: p. 29.
9. จงสมจิตร, ศ.ด.บ., *Heterogeneous Catalyst*. 2565: p. 31.
10. สมาคมการค้าผู้ผลิตเอทานอลไทย, *PRICE STRUCTURE OF PETROLEUM PRODUCT IN BANGKOK*. 2566: p. 1.
11. SN-OXYGEN, ส.น., ราคาแก๊สเอทีลีน. 2566.
12. ถือเหมาะ, ม., อยู่ดีมีแสง : ถ่านไบโอชาร์จากเศษไม้ธรรมชาติ สู้ถ่านราคาสูง. 2565.
13. Zhao, Y., Y. Lu, H. Zhuang, and S. Shan, *In-situ retention of nitrogen, phosphorus in agricultural drainage and soil nutrients by biochar at different temperatures and the effects on soil microbial response*. *Science of The Total Environment*, 2023. **904**: p. 166292.
14. Wang, J., et al., *Investigation on deactivation progress of biochar supported Ni catalyst during biomass catalytic cracking process*. *Fuel Processing Technology*, 2023. **250**: p. 107897.
15. hei Nagasaki, Y., et al., *Dehydration of Amides to Nitriles over Heterogeneous Silica-Supported Molybdenum Oxide Catalyst*. *ChemCatChem*, 2022. **14**(9): p. e202101846.
16. Kerdnoi, P., C. Autthanit, N. Chitpong, and B. Jongsomjit, *Catalytic dehydration of ethanol over W/TiO₂ catalysts having different phases of titania support*. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2020. **15**(1): p. 96-103.
17. Hao, Y., et al., *Hierarchical leaf-like alumina-carbon nanosheets with ammonia water modification for ethanol dehydration to ethylene*. *Fuel*, 2023. **333**: p. 126128.
18. Khamkeaw, A., L. Phanthang, B. Jongsomjit, and M. Phisalaphong, *Activated carbon derived from bacterial cellulose and its use as catalyst support for ethanol conversion to ethylene*. *Catalysis Communications*, 2019. **129**: p. 105750.
19. Gong, H., et al., *Catalytic conversion of levulinic acid or furfural alcohol into ethyl levulinate using a sulfonic acid-functionalized coffee biochar*. *Fuel*, 2023. **352**: p. 129059.
20. Zeng, W., et al., *Simultaneous removal of Cd (II) and As (V) by ferrihydrite-biochar composite: Enhanced effects of As (V) on Cd (II) adsorption*. *Journal of Environmental Sciences*, 2024. **139**: p. 267-280.
21. Hu, S., et al., *Efficient reduction and adsorption of Cr (VI) using FeCl₃-modified biochar:*

- Synergistic roles of persistent free radicals and Fe (II)*. Journal of Environmental Sciences, 2024. **137**: p. 626-638.
22. Yin, Y., et al., *Effect of biochar application on rice, wheat, and corn seedlings in hydroponic culture*. Journal of Environmental Sciences, 2024. **135**: p. 379-390.
 23. Wei, Z., et al., *Biochar-based materials as remediation strategy in petroleum hydrocarbon-contaminated soil and water: performances, mechanisms, and environmental impact*. J. Environ. Sci, 2024. **138**: p. 350-372.
 24. El-Nemr, M.A., M. Yilmaz, S. Ragab, and A. El Nemr, *Biochar-SO prepared from pea peels by dehydration with sulfuric acid improves the adsorption of Cr6+ from water*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022: p. 1-19.
 25. Deng, P., et al., *Effect of dewatering conditioners on phosphorus removal efficiency of sludge biochar*. Environmental Technology, 2023. **44**(20): p. 3131-3139.
 26. Du, J., et al., *Study on thermochemical conversion of triglyceride biomass catalyzed by biochar catalyst*. Energy, 2023. **277**: p. 127733.
 27. Rasrendra, C.B., et al., *Bifunctional NiMo/HY- γ -Al₂O₃ catalysts for an effective production of ultra-low sulfur diesel*. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2023. **8**: p. 100427.
 28. Bao, W., et al., *Construction of high content CoMoS active sites through the combination of Co₅Mo₁₀ molecular precursors and inert carbon matrix support for deep hydrodesulfurization*. Journal of Catalysis, 2023. **426**: p. 71-85.
 29. Liu, G., et al., *CO_x hydrogenation to methanol and other hydrocarbons under mild conditions with Mo₃S₄@ ZSM-5*. Nature Communications, 2023. **14**(1): p. 513.
 30. Peng, G., et al., *Crystal Structures of Molybdenum Borides Dictate Electrocatalytic Ammonia Synthesis Efficiency*. Applied Catalysis B: Environmental, 2023: p. 123020.
 31. Yu, Z., et al., *Formic Acid as a Bio-CO Carrier: Selective Dehydration with γ -Mo₂N Catalysts at Low Temperatures*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020. **8**(37): p. 13956-13963.
 32. Bellè, A., et al., *Carbon-supported WO_x-Ru-based catalysts for the selective hydrogenolysis of glycerol to 1, 2-propanediol*. Catalysis Science & Technology, 2022. **12**(1): p. 259-272.
 33. Verdes, O., et al., *Catalytic activity of heteropoly tungstate catalysts for ethanol dehydration reaction: Deactivation and regeneration*. Catalysis Today, 2021. **366**: p. 123-132.
 34. Boz, I., M.S. Boroglu, Y. Zengin, and B. Kaya, *WO₃-based porous MCM-48 catalysts for renewable acrolein synthesis by the dehydration of glycerol*. Inorganic Chemistry Communications, 2023. **147**: p. 110240.
 35. González-Navarrete, P., M. Schlangen, and H. Schwarz, *Gas-phase reactions of cationic molybdenum and tungsten monoxide with ethanol: a combined experimental/computational exercise*. Structural Chemistry, 2017. **28**: p. 403-413.
 36. Masih, D., S. Rohani, J.N. Kondo, and T. Tatsumi, *Catalytic dehydration of ethanol-to-ethylene over Rho zeolite under mild reaction conditions*. Microporous and Mesoporous Materials, 2019. **282**: p. 91-99.
 37. Said, S., D. Aman, M. Riad, and S. Mikhail, *MoZn/AlPO₄-5 zeolite: Preparation, structural characterization and catalytic dehydration of ethanol*. Journal of Solid State Chemistry, 2020. **287**: p. 121335.
 38. Sagadevan, S. and K. Pal, *A facile synthesis of TiO₂/SiO₂/CdS-nanocomposites 'optical and electrical' investigations*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017. **28**: p. 9072-9080.
 39. Sibirian, R., et al., *New route to synthesize of graphene nano sheets*. 2018.

40. Kang, J.S., et al., *Electrochemically synthesized nanoporous molybdenum carbide as a durable electrocatalyst for hydrogen evolution reaction*. *Advanced Science*, 2018. **5**(1): p. 1700601.
41. Thommes, M., et al., *Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)*. *Pure and applied chemistry*, 2015. **87**(9-10): p. 1051-1069.
42. Moon, S., H.-J. Chae, and M.B. Park, *Dehydration of bioethanol to ethylene over H-ZSM-5 catalysts: A scale-up study*. *Catalysts*, 2019. **9**(2): p. 186.
43. คง, เ.ส., การ สังเคราะห์ ฟิล์ม บาง ของ วัสดุ ผสม ที่ มี ทั้งสเดน ออกไซด์ เป็น องค์ประกอบ เพื่อ ใช้ ใน อุปกรณ์ อิเล็ก โทร โคร มิ ก. มหาวิทยาลัย สงขลา นครินทร์.
44. เลิศ, โ.ว.ช., การ พัฒนาการ สร้าง ขั้ว ไฟฟ้า ทั้งสเดน ออกไซด์ สำหรับ ประยุกต์ ใช้ กับ ปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ภายใต้ กระบวนการ โฟ โด อิเล็ก โคร คะ ตะไล ดิก. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี ราช มงคล ธิญบุรี. คณะ วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี. สาขา วิชา เคมี
45. Kaya, B., Y. Zengin, M.S. Boroglu, and I. Boz, *Selective dehydration of glycerol to acrolein over mesoporous WO₃-KIT-6: effects of mesoporosity and acidity*. *Journal of Porous Materials*, 2023. **30**(3): p. 835-845.
46. Aihara, T., K. Asazuma, H. Miura, and T. Shishido, *Highly active and durable WO₃/Al₂O₃ catalysts for gas-phase dehydration of polyols*. *RSC advances*, 2020. **10**(61): p. 37538-37544.
47. Ob-eye, J., P. Praserthdam, and B. Jongsomjit, *Dehydrogenation of ethanol to acetaldehyde over different metals supported on carbon catalysts*. *Catalysts*, 2019. **9**(1): p. 66.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปณต ปิ่นสุภา
วัน เดือน ปี เกิด	16 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	ภาควิชา เคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	842/2 ซอย เทอดไท 26 ถนน ตลาดพลู แขวงตลาดพลู เขต ธนบุรี กทม. 10600



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY