

การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ ด้วยกรดกำมะถันเพื่อใช้ในการกำจัดไนตริกออกไซด์
ร่วมกับโทลูอีน



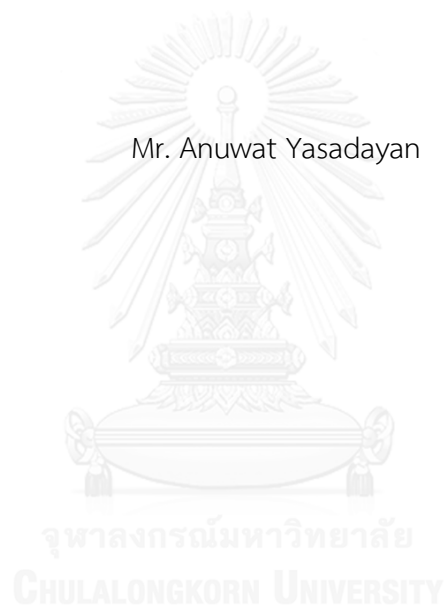
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODIFICATION of $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ CATALYST BY SULFURIC-
ACID TREATMENT FOR THE SIMULTANEOUS REMOVAL OF NITRIC OXIDE AND TOLUENE

Mr. Anuwat Yasadayan



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ ด้วยกรด
กัมมะถันเพื่อใช้ในการกำจัดไนตริกออกไซด์ร่วมกับโทลูอีน
โดย นายอนุวัฒน์ ยะสาทายัน
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรารัตน์ มงคลศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรารัตน์ มงคลศรี)

.....กรรมการ
(ดร. พิมพิพร พลเพชร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ)

อนุวัฒน์ ยะสาตายน : การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ ด้วยกรดกำมะถันเพื่อใช้ในการกำจัดไนตริกออกไซด์ร่วมกับโทลูอีน (MODIFICATION of $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ CATALYST BY SULFURIC-ACID TREATMENT FOR THE SIMULTANEOUS REMOVAL OF NITRIC OXIDE AND TOLUENE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ธีรธร มงคลศรี, 69 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนีย ($\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$) ในการกำจัดไนตริกออกไซด์ ร่วมกับโทลูอีนที่มีอยู่ร่วมกันในแก๊สปล่อยทิ้ง โดยตัวรองรับไทเทเนีย P25 ได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น 0, 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร ก่อนนำมาใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคต่างๆ ประกอบด้วย การวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption การวัดปริมาณโลหะออกไซด์ด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES) การศึกษาความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) การวัดความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Pyridine adsorption และ NH_3 Temperature Programmed Desorption (NH_3 -TPD) การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบการกำจัดไนตริกออกไซด์ โดยใช้ปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจงด้วยแอมโมเนีย ระบบการกำจัดโทลูอีนโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิไดซ์ และระบบการกำจัดไนตริกออกไซด์ ร่วมกับโทลูอีน (ปฏิกิริยารวม) โดยทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 120-450°C ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่ง สำหรับการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ พบว่าในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจงและปฏิกิริยารวม ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถันเข้มข้น 0.2 M เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่า %NO conversion สูงที่สุด ส่วนปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีนนั้นพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถันเข้มข้น 0.5 M มีค่า %Toluene conversion สูงที่สุด และยังสามารถเพิ่มปริมาณการเกิด CO_2 ได้มากขึ้น สำหรับระบบปฏิกิริยารวม พบว่าการมีโทลูอีนทำให้การกำจัดไนตริกออกไซด์ทำได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิสูงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการกำจัดไนตริกออกไซด์ที่ปราศจากโทลูอีน นอกจากนี้ยังมีการตรวจพบสารเบนโซโนไตรัลที่เกิดจากปฏิกิริยาแอมมอกซิเดชันของโทลูอีน ในช่วงอุณหภูมิ 250-450°C

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5870369221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS:

ANUWAT YASADAYAN: MODIFICATION of $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ CATALYST BY SULFURIC-ACID TREATMENT FOR THE SIMULTANEOUS REMOVAL OF NITRIC OXIDE AND TOLUENE. ADVISOR: ASSOC. PROF. THARATHON MONGKHONSI, Ph.D., 69 pp.

This research studies the possibility of using molybdenum oxide catalyst supported on titania P25 ($\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$) in removing nitric oxide and toluene co-exist in an exhausted gas. The TiO_2 support were treated with sulfuric acid aqueous solutions having concentrations 0, 0.2 and 0.5 M before catalyst preparation by wet impregnation method. The prepared catalysts were characterized by various techniques. Surface area was obtained by using Nitrogen Physisorption. Inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES) is used to identify percentage of metal oxide loading. The crystal structure of catalysts are determined by X-ray diffraction (XRD). Finally pyridine adsorption and NH_3 Temperature Programmed Desorption (NH_3 -TPD) are applied to find the total amount of acid sites. Catalytic performance evaluation was divided into three systems. The first system is nitric oxide removal system by selective catalytic reduction (SCR) using ammonia. The second system is the elimination of toluene through oxidation and the third system is the simultaneous nitric oxide and toluene removal system (mixed system). The reaction is carried out in the reaction temperature range 120-450°C in a fixed bed catalytic reactor. The results show that for the SCR system $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ catalyst treated with 0.2 M sulfuric acid has the highest NO reduction activity while $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ catalyst treated with 0.5 M sulfuric acid has the best performance for toluene removal and toluene converted to CO_2 . For the mixed system, it is found that the presence of toluene enhanced the NO reduction at high reaction temperature compared with the SCR system without toluene. In addition, a significant amount of benzonitrile formed from the ammoxidation of toluene is also observed in the reaction temperature range 250-450°C.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงครอบครัวของข้าพเจ้าที่ในการสนับสนุนทั้งด้านการเงิน การศึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์จะสำเร็จได้ หากขาดคำชี้แนะ และความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ธราธร มงคลศรี อาจารย์ที่ปรึกษา ที่เป็นผู้คอยในคำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาในการทำวิจัย มอบความรู้ความรู้อุปถัมภ์ต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิต

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุขภกร รองศาสตราจารย์ ดร. ธราธร มงคลศรี อาจารย์ ดร. พิมพ์พร พลเพชร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ ที่ให้คำแนะนำ ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี เพื่อน พี่และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัย และทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	2
บทที่ 1 บทนำ.....	5
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ปฏิกิริยาการรีดิวซ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเลือกเกิดของ NO โดยใช้ NH ₃	8
2.2 ปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (NH ₃ oxidation)	9
2.3 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน (Toluene oxidation).....	9
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	10
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน (Sulfated TiO ₂).....	10
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	19
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา	20
3.3 การทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	21
3.4 การทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยา	22

บทที่ 4 ผลการทดลอง	27
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา.....	27
4.2 ผลการทดสอบความเสถียรภาพตัวเร่งปฏิกิริยา	30
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา.....	34
4.4 สรุปผลการทดลอง	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับงานวิจัย	48
รายการอ้างอิง	49
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก การคำนวณในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53
ก.1 การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา MoO ₃ /TiO ₂	53
ภาคผนวก ข การคำนวณผลการวิเคราะห์ และการเตรียมวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	54
ข.1 การคำนวณการเตรียมวิเคราะห์เทคนิค ICP	54
ข.2 การคำนวณผลการวิเคราะห์เทคนิค Pyridine adsorption	54
ภาคผนวก ค การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve).....	55
ค.1 กราฟมาตรฐานโทลูอิน	55
ค.2 กราฟมาตรฐานคาร์บอนไดออกไซด์	56
ค.3 กราฟมาตรฐานเบนโซไนไตรล์ (Benzonitrile)	58
ค.4 กราฟมาตรฐาน NH ₃ -TPD.....	59
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา	61
ง.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค NH ₃ -TPD	61
ง.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค FTIR.....	64

ภาคผนวก จ ข้อมูลผลการทดลอง.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	69



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในปฏิกิริยา SCR	11
ตารางที่ 2.2	งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในการกำจัดสาร VOC.....	14
ตารางที่ 2.3	งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดเข้มข้น ในปฏิกิริยาต่างๆ	16
ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	19
ตารางที่ 3.2	สารเคมี และก๊าซที่ใช้ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา	22
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ BET.....	27
ตารางที่ 4.2	ผลการวัดความเป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับ และไม่ปรับสภาพด้วยกรดที่ความ เข้มข้นต่างๆ	29
ตารางที่ 4.3	แสดงปริมาณความเข้มข้นเบนโซไนไตรล์ (Benzonitrile) แต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิต่างๆ.....	42
ตารางที่ 5.1	แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในแต่ละระบบ	47
ตารางที่ ค.1	แสดงการคำนวณค่ากราฟมาตรฐานโทลูอิน	55
ตารางที่ ค.2	แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ ที่ช่วงความเข้มข้นสูง	56
ตารางที่ ค.3	แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ CO ₂ ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ.....	58
ตารางที่ ค.4	แสดงการคำนวณกราฟมาตรฐานเบนโซไนไตรล์	58
ตารางที่ ค.5	แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ NH ₃ และความเข้มข้นของ NH ₃ ที่ปริมาตรต่างๆ	59

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 กราฟแสดง %NO _x conversion ของช่วงที่เกิดปฏิกิริยา SCR กำจัด NO และปฏิกิริยา NH ₃ Oxidation	9
รูปที่ 3.1 แผนผังระบบในการกำจัดไนตริกออกไซด์.....	23
รูปที่ 3.2 แผนผังระบบในการกำจัดโทลูอิน	24
รูปที่ 3.3 แผนผังระบบการกำจัดไนตริกออกไซด์ ร่วมกับ โทลูอิน	25
รูปที่ 4.1 กราฟ XRD pattern ของตัวรองรับ และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์.....	28
รูปที่ 4.2 โครงสร้างแบบ polymeric structure ของ Sulfated TiO ₂	30
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ (0 M).....	30
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ (0.2 M).....	31
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ (0.5 M).....	31
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO ₃ /TiO ₂ (0 M).....	32
รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO ₃ /TiO ₂ (0.2 M).....	32
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO ₃ /TiO ₂ (0.5 M).....	33
รูปที่ 4.9 แสดงผล %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง	35
รูปที่ 4.10 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยา SCR.....	35
รูปที่ 4.11 แสดงผล %Toluene conversion ในปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอิน ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยา	36
รูปที่ 4.12 แสดงผล %Toluene convert to CO ₂ ในปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอิน ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
รูปที่ 4.13 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂ (0 M).....	38
รูปที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบการ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม TiO ₂ (0.2 M).....	39

รูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0.5 M).....	39
รูปที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0 M).....	40
รูปที่ 4.17 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2 M).....	40
รูปที่ 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5 M).....	41
รูปที่ 4.19 แสดงแผนผังการเกิดปฏิกิริยา ammoxidation ระหว่าง Toluene และ NH_3	42
รูปที่ 4.20 แสดงแผนผังเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาในระบบรวม [24].....	42
รูปที่ 4.21 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO_2 ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0 M).....	43
รูปที่ 4.22 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO_2 ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0.2 M)	44
รูปที่ 4.23 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO_2 ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0.5 M)	44
รูปที่ 4.24 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO_2 ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0 M).....	45
รูปที่ 4.25 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO_2 ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2 M)	45
รูปที่ 4.26 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO_2 ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5 M)	46
รูปที่ ค.1 แสดงกราฟ calibration curve toluene ความเข้มข้นระหว่าง 30-700 ppm	56
รูปที่ ค.2 Calibration curve ของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูง	57
รูปที่ ค.3 Calibration curve ของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ (180-620 ppm).....	57
รูปที่ ค.4 Calibrate curve ของเบนโซซีนไนด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	59

รูปที่ ค.5 Calibrate curve ของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	60
รูปที่ ง.1 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD	61
รูปที่ ง.2 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0.2M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD	61
รูปที่ ง.3 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0.5M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD	62
รูปที่ ง.4 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD	62
รูปที่ ง.5 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD	63
รูปที่ ง.6 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD	63
รูปที่ ง.7 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวรองรับ และตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเติบโตทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลทำให้เกิดการพัฒนาในภาคอุตสาหกรรมขึ้นไปพร้อมกัน ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือ มลภาวะทางอากาศ ซึ่งอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจัดอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมต้นๆที่ก่ออากาศที่เป็นพิษ และมีการปลดปล่อยก๊าซปล่อยทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยสารที่ถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่มีการควบคุมการปลดปล่อยออกสู่อากาศ จะได้แก่สารจำพวก สารประกอบอะโรมาติกส์ ที่ประกอบไปด้วย เบนซีน โทลูอิน และไซลีน สารจำพวกนี้เป็นตัวทำละลาย (Solvent) ที่มักถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการผสมสารต่างๆ รวมเข้าด้วยกันเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และปล่อยให้ระเหยออกไปในอากาศเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน เช่น สี สเปรย์ น้ำยาลบคำผิด เป็นต้น ในปัจจุบันสารโทลูอินนิยมนำมาใช้เป็นตัวกลางมากกว่าเบนซีน เนื่องจากเบนซีนมีปัญหาเรื่องความเป็นพิษที่เป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) สูง

ในการใช้สารโทลูอินเป็นตัวกลางสกัดหรือการทำปฏิกิริยานั้น จะมีการแยกตัวทำละลายออกจากสารตั้งต้นที่เหลือ และผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพื่อนำเอาตัวทำละลายกลับไปใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามก็มักจะเกิดปัญหาการสูญเสียตัวทำละลายในรูปไอระเหยที่ออกมาจากก๊าซปล่อยทิ้งในกระบวนการได้ โดยค่ามาตรฐานของประเทศไทยสำหรับการปลดปล่อยโทลูอินออกสู่อากาศกำหนดไว้ที่ TLV-TWA 200 ppm [1] ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดหรือเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ตัวอื่นที่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นอันตรายน้อยกว่าก่อนปล่อยออกสู่อากาศ

การกำจัดโทลูอิน หรือ สาร VOC มีหลายวิธี เช่น การดูดซับ การเผาไหม้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยวิธีการดูดซับจะใช้ระบบดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon- Adsorption Process) แต่ข้อเสียของการใช้กระบวนการดูดซับคือ สารที่ใช้ดูดซับเมื่อเกิดการอิ่มตัวก็ไม่สามารถดูดซับได้อีก จึงจำเป็นต้องใส่สารเคมีออกไปเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ [2] อีกทางตัวเลือกที่สามารถนำมาใช้กำจัดคือ การเผาไหม้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic combustion) หรือการออกซิไดซ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นออกซิเจนสูงคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

ในส่วนกรณีของโรงงานผลิตไฟฟ้าจากหน่วยการผลิตใกล้เคียงที่ใช้กระบวนการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติด้วยเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (gas turbine) มีการปลดปล่อยก๊าซปล่อยทิ้งเช่นกัน โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(SO₂) ซึ่งสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ส่วนใหญ่แล้วจะมีปริมาณของไนตริกออกไซด์ (NO) ในปริมาณที่สูง โดยค่ากำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยก๊าซปล่อยทิ้งจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงอยู่ที่ 120 ppm ประกาศโดยกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม บังคับใช้ ตั้งแต่ 15 มกราคม 2553 ซึ่งปกติแล้วการกำจัดหรือเปลี่ยนก๊าซไนตริกออกไซด์ไปเป็นสารที่อันตราย น้อยกว่านั้น จะใช้กระบวนการรีดักชันแบบเลือกเกิด (Selective Catalytic Reduction: SCR) ด้วย ก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) หนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าวคือตัวเร่งปฏิกิริยา โมลิบดีนัม ออกไซด์ (Molybdenum oxide: MoO₃) ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง (150-300°C) มีความเสถียรภาพสูง อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่มีความสามารถในการ ออกซิไดส์สารอินทรีย์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำก๊าซปล่อยทิ้งที่ประกอบไปด้วยไนตริกออกไซด์ และโทลูอิน ของทั้งสองระบบนำมากำจัดร่วมกัน เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เพราะไม่เพียงแต่จะ ใช้เวลาในการดำเนินงานลดลง แต่ยังทำให้ภาระงานของผู้ปฏิบัติงานในแต่ละกะก็ลดลงไปด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามระบบการกำจัดสารทั้งสองยังมีปัญหาคือ ช่วงการเกิดปฏิกิริยา SCR ได้ดีนั้นอาจทำ การออกซิไดส์โทลูอินได้ไม่สิ้นก แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูงนั้นสามารถ ทำปฏิกิริยาการออกซิไดส์ได้ดี ในกรณีของ TiO₂ (anatase) ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าการปรับสภาพด้วย สารละลายกรดกำมะถันสามารถเพิ่มความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ จากงานวิจัยที่รายงาน การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (anatase) ด้วยสารละลายกรดกำมะถัน (Sulfuric acid) แสดง ให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดสามารถเพิ่มความเป็นกรดของพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดอะซิติก และ นอร์มอล-บิวทานอล [3] ฉะนั้นสิ่งที่งานวิจัยนี้ต้องการทดสอบคือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ MoO₃ บนตัวรองรับ TiO₂ ที่ปรับสภาพด้วยกรดว่าจะสามารถเพิ่มความแรงตำแหน่งความเป็นกรดบน พื้นผิว anatase สามารถเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาในระบบร่วมระหว่างกระบวนการ รีดักชันแบบเจาะจง (SCR) กับกระบวนการออกซิไดส์โทลูอินได้มากน้อยเพียงใด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO₃) บนตัวรองรับ ไทเทเนียมออกไซด์ TiO₂ (P25) ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้นในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ ร่วมกับโทลู-อิน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) บนการตัวรองรับ TiO_2 (P25) ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation)

1.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ จะประกอบไปด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption, Inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES), NH_3 Temperature Programmed Desorption (NH_3 -TPD), Pyridine adsorption และ X-ray diffraction (XRD)

1.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.3.1 การทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (Selective Catalytic Reduction: SCR) ในการกำจัดไนตริกออกไซด์ ด้วยก๊าซแอมโมเนีย ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 120–450°C แก๊สผสมมีอัตราการไหลรวม 200 ml/min ไม่รวมไอน้ำ ประกอบด้วย ไนตริกออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แอมโมเนีย ออกซิเจน ไอน้ำ และไนโตรเจน

1.3.3.2 การทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจงทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 120–450°C แก๊สผสมมีอัตราการไหลรวม 200 ml/min ไม่รวมไอน้ำ ประกอบด้วย โทลูอิน ไนตริกออกไซด์ แอมโมเนีย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกซิเจน ไอน้ำ และไนโตรเจน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งเนื้อหาออกเป็นบทต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย

บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และ ขอบเขตงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา และการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ และโทลูอิน ของตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา และ ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์และ โทลูอิน ของตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

และส่วนท้ายของเล่มวิทยานิพนธ์ เป็นส่วนของภาคผนวกซึ่งรวบรวมการคำนวณและเนื้อหาส่วนที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไว้

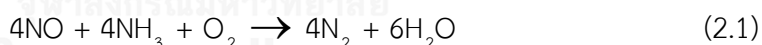
บทที่ 2

ทฤษฎีและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

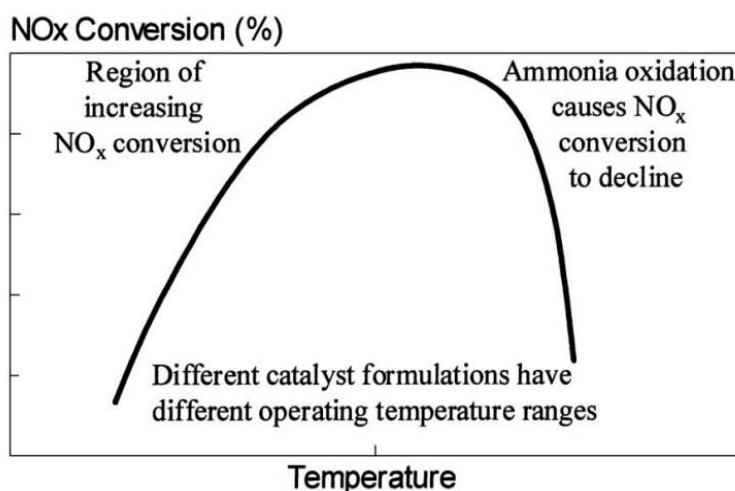
เนื้อหาในบทที่ 2 จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก ส่วนแรกจะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยาการออกซิไดส์โพลีอิน รวมถึงปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้น ในส่วนที่สองจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วย งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ในปฏิกิริยา SCR ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ในปฏิกิริยาออกซิเดชันไฮโดรคาร์บอน และงานวิจัยการเติม Sulfate ให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ TiO_2 เป็นตัวรองรับ

2.1 ปฏิกิริยาการรีดิวซ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเลือกเกิดของ NO โดยใช้ NH_3

ก๊าซในกลุ่มออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ประกอบไปด้วย ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไดไนโตรเจนไดรอกไซด์ (N_2O_3) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ (N_2O_4) และไดไนโตรเจนเพนตอกไซด์ (N_2O_5) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะ NO เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีปริมาณมากที่สุดที่อยู่ในก๊าซเสียจากโรงงานเช่น โรงงานผลิตไฟฟ้า โรงงานผลิตกรดไนตริก เป็นต้น อีกทั้งก๊าซนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตมากกว่าสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนตัวอื่นๆ ส่วนเทคนิคที่ได้รับความนิยมใช้ในการกำจัด NO คือ ปฏิกิริยาการรีดิวซ์ก๊าซไนตริกออกไซด์ แบบเลือกเกิดด้วยก๊าซแอมโมเนีย (Selective Catalytic Reduction: SCR) [4] ดังในสมการที่ 2.1 ข้างล่าง



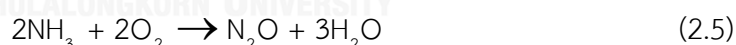
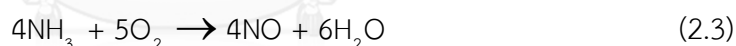
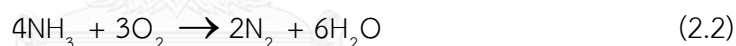
นอกจากนี้ในระหว่างการจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ได้ที่ช่วงอุณหภูมิสูง ($300\text{-}450^\circ\text{C}$) นั่นคือปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (Ammonia oxidation) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ลดลง โดยภายในระบบปฏิกิริยาการจัดไนตริกออกไซด์ จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่เกิดปฏิกิริยา SCR กำจัด NO และ ช่วงที่เกิดปฏิกิริยา NH_3 Oxidation ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1 [5]



รูปที่ 2.1 กราฟแสดง %NO_x conversion ของช่วงที่เกิดปฏิกิริยา SCR กำจัด NO และปฏิกิริยา NH₃ Oxidation

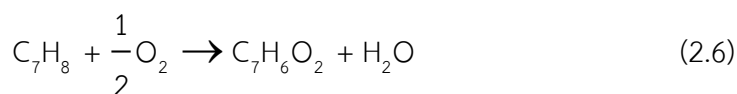
2.2 ปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (NH₃ oxidation)

ปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันคือ ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา SCR โดยแอมโมเนียทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O₂) ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ดังสมการที่ 2.2-2.5

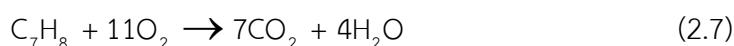


2.3 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน (Toluene oxidation)

การออกซิไดซ์สารอะโรมาติก เช่นเบนซีนจะต้องเริ่มที่วงแหวนโดยตรงทำให้วงแหวนแตกออกหรือสลายตัว (เช่นการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรย) ในขณะที่การออกซิไดซ์โมเลกุลโทลูอินจะเกิดที่ตำแหน่งวงแหวนหรือเกิดที่ตำแหน่งหมู่เมทิล (methyl group: -CH₃) ก็ได้ แต่การออกซิไดซ์หมู่เมทิลจะเกิดง่ายกว่า เพราะโครงสร้างอะโรมาติก (aromatic) มีเสถียรภาพค่อนข้างสูง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิไดซ์โทลูอินที่หมู่เมทิลคือ กรดเบนโซอิก (Benzoic acid :C₇H₆O₂) เป็นหลักยังคงอะตอม C เท่าเดิม โดยไม่มีการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังสมการที่ 2.6 [6]



และในกรณีของการออกซิไดซ์โทลูอินที่ตำแหน่งวงแหวน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งที่เป็นกรดมีความแรงในระดับหนึ่งจะสามารถแตกวงแหวนออกได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะได้ออกซิไดซ์โทลูอินและน้ำ เรียกปฏิกิริยานี้ว่าการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Total combustion) แสดงดังสมการ 2.7



2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะออกไซด์ ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารจำพวกสารประกอบอะโรมาติก เช่น เบนซีน โทลูอิน ไซลีน นอกจากนี้ยังใช้ในการกำจัดไนตริกออกไซด์ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี โดยความสามารถในการออกซิไดซ์จะขึ้นอยู่กับความแรง (acid strength) ของตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา และปริมาณ (amount) ของตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์แต่ละชนิด งานวิจัยนี้จึงใช้โลหะออกไซด์ MoO_3 เพราะมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยา SCR ได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ ส่วนตัวรองรับที่ใช้เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ชนิด P25 ซึ่งช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิว และช่วยในการกระจายตัวของตัวรองรับ (active phase) และที่สำคัญคือทนต่อ SO_2 ในก๊าซ ทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น [7]

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน (Sulfated TiO_2)

ปัจจุบันมีการนำเอา TiO_2 ได้รับการปรับสภาพด้วยการเติมซัลเฟตมาใช้ทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา Sulfated TiO_2 ปัจจุบันมีการนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างๆ เช่น Friedel–Crafts acylation, Esterification, CFC decomposition, Photocatalytic oxidation, Hydrocarbon oxidation เป็นต้น เนื่องจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความเป็นกรดที่สูง เสถียรภาพทางความร้อนที่สูง เหมาะกับปฏิกิริยาที่ต้องการความเป็นกรดในการช่วยทำปฏิกิริยา

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องอธิบายเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ MoO_3 มาใช้ในการกำจัดสารจำพวก VOC และปฏิกิริยา SCR ที่ใช้กำจัด NO ด้วย NH_3 อีกทั้งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น ที่นำไปใช้ในปฏิกิริยาต่างๆ

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในปฏิกิริยา SCR

ผู้วิจัย/ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารที่กำจัด/ตัวแปรต่างๆ	สรุปผลการทดลอง
Characterization and Reactivity of V_2O_5 - MoO_3/TiO_2 De-NOx SCR Catalysts [8]	- V_2O_5 - MoO_3/TiO_2 โดย V_2O_5 loadings: 0.4, 0.8, 1.5, 2.3% w/w และ MoO_3 = 6% วิธีการเตรียม - Wet impregnation	-NO องค์ประกอบในระบบ - NH_3 800 ppm, NO 800 ppm, CO_2 9000 ppm, Ar 1500 ppm อัตราการไหลรวมของก๊าซผสม - Balance helium 200 mL/min (STP) อุณหภูมิในการทดลอง 150-400°C	- การเพิ่มปริมาณโลหะ V_2O_5 บนตัวรองรับ TiO_2 มากขึ้นทำให้ ค่า % N_2 selectivity ลดลง - ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ %NO conversion สูงที่สุดคือ 1.5% V_2O_5 -6% MoO_3/TiO_2 และ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ % N_2 selectivity สูงที่สุดคือ 0.8% V_2O_5 -6% MoO_3/TiO_2
Selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia using MoO_3/TiO_2 : Catalyst structure and activity [9]	วิธีการเตรียม - incipient wetness impregnation - MoO_3/TiO_2	- NO องค์ประกอบในระบบ - NO 0.1 vol.%, NH_3 0.106 vol%, O_2 3 vol% balance helium อัตราการไหลรวมของก๊าซผสม - 50 mL/min	- การเติมปริมาณโลหะ MoO_3 ที่เหมาะสม ลงบนตัวรองรับ TiO_2 ควรอยู่ที่ 10-15wt% เพื่อให้ได้ %NO conversion สูงที่สุด

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ผู้วิจัย/ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารที่กำจัด/ตัวแปรต่างๆ	สรุปผลการทดลอง
Molybdenum-titanium oxide catalysts: the influence of the preparation conditions on their activity for the selective catalytic reduction of NO by NH ₃ [10]	<p>วิธีการเตรียม</p> <ul style="list-style-type: none"> - Equilibrium deposition filtration (EDF) method - Non-dry impregnation (NDI) method - MoO₃/TiO₂ <p>โดย MoO₃ loading (NDI): 3.7wt% MoO₃ loading (EDF): 3.7, 2.8, 1.5wt%</p>	<p>-NO</p> <p>องค์ประกอบในระบบ</p> <ul style="list-style-type: none"> - NO 800 ppm - NH₃ 800 ppm - O₂ 4%vol <p>อัตราส่วนไหลรวมของก๊าซผสม</p> <ul style="list-style-type: none"> - Balance N₂ 150 ml/min <p>อุณหภูมิในการทดลอง</p> <p>250-450°C</p>	<p>- ค่า %NO conversion จะเพิ่มขึ้น เมื่อ %MO loading เพิ่มขึ้น ของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ ที่เตรียมด้วยวิธี equilibrium deposition filtration (EFD)</p> <p>- การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ ด้วยวิธี EDF ให้ความว่องไวกว่าวิธีการเตรียม non-dry impregnation (NDI) ที่ช่วงอุณหภูมิ 250-350°C</p>
A microwave-based method to monitor The ammonia loading of a vanadia-based SCR catalyst [11]	<ul style="list-style-type: none"> - V₂O₅-WO₃/TiO₂ <p>แบบ honeycomb monolith</p>	<p>- NO</p> <p>องค์ประกอบในระบบ</p> <ul style="list-style-type: none"> - NO 900 ppm, NH₃ 900 ppm, O₂ 7%vol <p>อัตราส่วนไหลรวมของก๊าซผสม</p> <ul style="list-style-type: none"> - Balance N₂ GHSV (60,000h⁻¹) <p>อุณหภูมิในการทดลอง</p> <p>150-450°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> - %NO conversion สูงถึง 90% ที่ 300°C แล้วจากนั้น %NO conversion ค่อยมีการลดลง สาเหตุเกิดจากการปฏิกิริยาการออกซิเดชั่นแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ผู้วิจัย/ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารที่กำจัด/ตัวแปรต่างๆ	สรุปผลการทดลอง
Promotional roles of ZrO ₂ and WO ₃ in V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ -ZrO ₂ catalysts for NOx reduction by NH ₃ : Catalytic performance, morphology, and reaction mechanism [12]	- V ₂ O ₅ -WO ₃ / TiO ₂ -ZrO ₂ โดย WO ₃ loadings: 6, 9, 12wt% วิธีการเตรียม - Wet impregnation - V ₂ O ₅ / TiO ₂ -ZrO ₂ โดย WO ₃ loadings: 9 wt%	- NO - NO 0.08%, NH ₃ 0.08%, O ₂ 5vol% อัตราการไหลรวมของก๊าซผสม - N ₂ balance 100 ml/min อุณหภูมิในการทดลอง 200-450°C	- ตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ -9%WO ₃ /TiO ₂ -ZrO ₂ ได้ค่า NOx conversion สูงที่สุดที่ อุณหภูมิ ระหว่าง 300 และ 450°C - การเคลือบผงโลหะ WO ₃ ที่ 9 wt% ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของตัวรองรับ และเพิ่มความเข้มเป็นกรดในตำแหน่ง Bronsted acid site ในส่วนผลของการเติมตัว promoter TiO ₂ -ZrO ₂ สามารถเพิ่มความเข้มเป็นกรดในตำแหน่ง Lewis acid site ซึ่งช่วยเพิ่มทางเลือกของ การกำจัด NO 2 ทางคือ [NH ₄ ⁺ -NO-Bronsted acid site], [NH ₂ -NO-Lewis acid site]

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในการกำจัดสาร VOC

ผู้วิจัย/ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารที่กำจัด/ตัวแปรต่างๆ	สรุปผลการทดลอง
Mo-modified Pd/Al ₂ O ₃ catalysts for benzene catalytic combustion [13]	- 1%Pd/Al ₂ O ₃ - Pd-5%MoO ₃ /Al ₂ O ₃ วิธีการเตรียม - Wet impregnation	- Benzene - เบนซีน 0.2 vol.%, O ₂ 20% ใน N ₂ อัตราไหลรวมของก๊าซผสม - 200 ml/min (GHSV: 4,800 hr ⁻¹) 150-450°C	- ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd-Mo/Al ₂ O ₃ มีความว่องไวและ มีความเสถียรที่สูง ซึ่งได้ค่า %benzene conversion ถึง 90% ที่อุณหภูมิ 190°C
Role of Singlet Oxygen in the Oxidation of Toluene on Vanadium Molybdenum Catalytic Systems [14]	- V ₂ O ₅ -MoO ₃ วิธีการเตรียม - Co-precipitation	-Toluene องค์ประกอบในระบบ -Toluene : oxygen = 1:10, 1:6 อัตราไหลรวมของก๊าซผสม - 90 ml/min	- ตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ -MoO ₃ ให้ค่า %Toluene conversion สูงสุดอยู่ที่ 100% ที่อุณหภูมิระหว่าง 500°C และ %yield ของ maleic anhydride ที่ 26.9
Production of Benzointrile [15]	- V ₂ O ₅ -MoO ₃	- Toluene องค์ประกอบในระบบ -Toluene, NH ₃ , O ₂ โดยเปลี่ยนความเข้มข้น อุณหภูมิในการทดลอง 300-550 °C	- %yield Benzointrile ที่สูงที่สุดคือ 79.5% โดยอัตราส่วน O ₂ ต่อ toluene อยู่ที่ 2.92 - Benzointrile yield ลดลงก็ต่อเมื่อความเข้มข้นออกซิเจนลดลง

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ผู้วิจัย/ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารที่กำจัด/ตัวแปรต่างๆ	สรุปผลการทดลอง
Selective oxidation of toluene over V_2O_5/TiO_2 catalysts. Effect of vanadium loading and of molybdenum addition on the catalytic properties [16]	- V_2O_5/TiO_2 - $V_2O_5-MoO_3/TiO_2$ วิธีการเตรียม - Wet impregnation	-Toluene องค์ประกอบในระบบ Toluene: oxygen: helium molar ratio 1: 13:38 อุณหภูมิในการทดลอง 300-400°C	- ในปฏิกิริยา selectivity partial oxidation ซึ่งต้องการผลิตภัณฑ์คือ (Benzoic Acid, Benzaldehyde) พบว่า V_2O_5 ที่ 4% loading บน TiO_2 ได้ค่า %yield และค่า %selectivity สูงที่สุด - การเคลือบฝังโลหะ Mo ทำให้การกระจายตัวของ V_2O_5 บนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แย่ลง
$V_2O_5-MoO_3$ catalysts for benzene oxidation [17]	- $V_2O_5-MoO_3$	- Benzene อุณหภูมิในการทดลอง 300-450°C	- $V_2O_5-MoO_3$ ให้ค่า %conversion Benzene สูงสุดที่ 100% ที่ 400°C และเบนซีนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ สูงสุด อยู่ที่ 75% ที่ 350°C
Hydrocarbon oxidation with nitric oxide and oxygen [18]	- ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	- Toluene องค์ประกอบในระบบ O ₂ 250 mL/min, NO 25 mL/min ในระบบ separation gases	- การใช้ NO ในปฏิกิริยา oxidation เกิดสาร benzoic acid, α -nitro toluene, benzaldehyde, benzyl nitrate ortho- และ para-nitrotoluenes

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายการตรึงชั้นในปฏิกิริยาต่างๆ

ผู้วิจัย/ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารที่กำจัด/ปฏิกิริยา/ตัวแปร	สรุปผลการทดลอง
Effect of sulfation on the photoactivity of TiO ₂ sol-gel derived catalysts [19]	<ul style="list-style-type: none"> - TiO₂ - TiO₂-SO₄²⁻ วิธีการเตรียม - Sol-gel method และ impregnation ด้วย ammonium sulfate 1mol/l 	<ul style="list-style-type: none"> - 2,4-dinitroaniline องค์ประกอบในระบบ - UV lamp Black-Ray model XX-15L $\lambda = 254 \text{ nm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂-SO₄²⁻ มีความไวในการสลายตัวของ 2,4-dinitroaniline มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ - การปรับสภาพ TiO₂ ด้วย sulfate ทำให้เกิดโครงสร้าง O=S=O ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการสลายตัวของ 2,4-dinitroaniline
Sol-gel derived V ₂ O ₅ -TiO ₂ mesoporous materials as catalysts for the total oxidation of chlorobenzene [20]	<ul style="list-style-type: none"> - 2%V₂O₅-TiO₂ - 2%V₂O₅-TiO₂/SO₄²⁻ วิธีการเตรียม - Sol-gel method และทำการเติม sulfuric acid molar ratio S/Ti=0.1 และ 0.2 ด้วยวิธี impregnation 	<ul style="list-style-type: none"> - Chlorobenzene องค์ประกอบในระบบ - Chlorobenzene 100 ppm, O₂ 20vol% อัตราการผลิตรวมของก๊าซผสม - Balance helium 200 ml/min (GHSV) =37,000 hr⁻¹) อุณหภูมิ 100-400°C 	<ul style="list-style-type: none"> - ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%V₂O₅-TiO₂/SO₄²⁻ ได้ค่า %Chlorobenzene conversion ของ สูงถึง 96% ที่อุณหภูมิ 400°C - หมู่ซัลเฟตทำปฏิกิริยากับ V₂O₅ species ทำให้เพิ่มตำแหน่งความเป็นกรดตำแหน่ง weak acid site ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ Chlorobenzene ได้ดีที่อุณหภูมิสูง

ตาราง 2.3 (ต่อ)

ผู้วิจัย/ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารที่กำจัด/ปฏิกิริยา/ตัวแปร	สรุปผลการทดลอง
Nanosized anatase TiO ₂ as precursor for preparation of sulfated titania catalysts [21]	<p>- TiO₂-SO₄⁻² วิธีการเตรียม</p> <p>- Sol-gel hydrothermal method และ immersing ด้วย H₂SO₄ 1 mol/l</p>	<p>- ปฏิกิริยา isopropanol dehydration และ cumene cracking</p> <p>อุณหภูมิในการทดลอง 150, 175, 200°C</p>	<p>- ผลการทดลองสรุปว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธี sol-gel hydrothermal ได้ %conversion สูงที่สุดทั้ง 2 ปฏิกิริยา</p> <p>- การใช้ TiO₂ มาปรับสภาพด้วย H₂SO₄ ช่วยเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา และทำให้ตำแหน่งที่แรงของกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเสถียรทางความร้อนที่สูง</p>

จากตารางที่ 2.1 ที่แสดงข้อมูลงานวิจัยตัวเร่งปฏิกิริยา MoO_3 และงานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ในปฏิกิริยา SCR พบว่าส่วนใหญ่แล้วอุณหภูมิในการทดลองอยู่ที่ประมาณ $150\text{-}450^\circ\text{C}$ โดยอุณหภูมิที่ให้ค่า %NO conversion สูงสุดจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิในช่วงต่ำในช่วงประมาณ $250\text{-}350^\circ\text{C}$ และจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงคือ ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์แอมโมเนีย ในส่วนของการเติมปริมาณโลหะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ได้สูงสุดอยู่ที่ $10\text{-}15\text{ wt}\%$ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการเติมปริมาณโลหะอยู่ที่ $8\text{ wt}\%$ เนื่องจากต้องการศึกษาผลของความเข้มข้นกรดกำมะถันที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยาออกซิไดส์สารประกอบไฮโดรคาร์บอน จึงต้องการให้ค่า %conversion ไม่สูงเกินไปจนเปรียบเทียบไม่ได้ และตัวแปรต่างๆที่มีความเหมือนในงานวิจัยนี้คือ การใช้ NO ต่อ NH_3 ในสัดส่วนที่เท่ากัน และใช้อัตราการไหลรวมที่ 200 ml/min แต่จะใช้สัดส่วนของ O_2 %vol ที่ต่ำกว่าจากงานวิจัยนี้ โดยจะอยู่ที่ O_2 15% vol

จากตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MoO_3 ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่รูปโลหะออกไซด์ผสมกับตัวอื่นๆ แล้วนำไปใช้กำจัดสาร VOC โดยจะให้ %conversion สูงที่สุด ต่างจากปฏิกิริยา SCR โดยอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ $400\text{-}500^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องบางส่วนจะไม่มีกล่าวถึง %selectivity ของ CO_2 ที่เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาออกซิไดซ์ และงานวิจัยที่มีการนำ NO หรือ NH_3 มาใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอินโทลูอินจะได้สารที่จะเป็นสารประกอบพวกเบนโซไนโตรล หรือ สารประกอบไนโตรเจน ตัวอื่นๆ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดกรณี 2 กรณีคือ 1) การทำปฏิกิริยา SCR ร่วมกับการออกซิไดซ์โทลูอิน ทำให้ %NO conversion เพิ่มขึ้น หรือ 2) การทำปฏิกิริยา SCR ร่วมกับการออกซิไดซ์โทลูอิน ทำให้เกิดสารประกอบจำพวกเบนโซไนโตรล หรือ สารประกอบไนโตรเจน ขึ้นมาในระบบ

จากตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลงานวิจัยในส่วนของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Sulfated TiO_2 จะเห็นได้ว่า sulfated TiO_2 ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความเสถียร และตำแหน่งที่มีความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ในตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาใช้ในปฏิกิริยาที่ต้องการความเป็นกรดในการช่วยทำปฏิกิริยา และใช้วิธีการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง (impregnation) ซึ่งงานวิจัยต่างๆ มีชนิดของกรดที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น (precursor) ที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามงานวิจัยข้างต้นที่ได้กล่าวมาเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยา MoO_3 ยังไม่พบว่ามีงานนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ ในปฏิกิริยา SCR ระบบการออกซิไดส์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา MoO_3 (โลหะออกไซด์แบบเดี่ยว) หรือระบบที่กำจัดไนตริกออกไซด์ ที่มีองค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) เข้ามาร่วมกับการกำจัดโทลูอิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงอยากจะพัฒนาในสิ่งที่ยานวิจัยอื่นไม่มีในส่วนนี้ เพื่อทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการศึกษาในงานวิจัยอื่นๆต่อไป

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

บทที่ 3 อธิบายเกี่ยวกับวัสดุ สารเคมี เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง กระบวนการเตรียมตัวรองรับ (TiO_2) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ($\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$) ที่ไม่ผ่าน และผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน เครื่องมือในการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา และขั้นตอนในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่างๆ การทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (Selective Catalytic Reduction: SCR) การทดสอบความเสถียรภาพ การทดสอบความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอีนร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ในการทำปฏิกิริยา รวมถึงแผนผังกระบวนการในการกำจัดไนตริกออกไซด์ และโทลูอีน

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
Titanium dioxide (P25)	Degussa/Evonik
Ammonium molybdatetetrahydrate ($(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$), $\geq 99.98\%$	Aldrich
Sulfuric acid (H_2SO_4) 95-97%	Merck
Oxalic acid ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$)	Fluka
Ammonium sulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	Aldrich

3.1.2 การเตรียมตัวรองรับที่ไม่ปรับ และปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน

วิธีการเตรียมจะใช้ผงตัวรองรับ TiO_2 ชนิด P25 และเตรียมสารละลายให้ได้ความเข้มข้น 0 M, 0.2 M และ 0.5 M จากนั้นหยดสารละลายลงบนตัวรองรับ เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 0 M โดยใช้อัตราส่วนของตัวรองรับปริมาณ 3 g ต่อสารละลายกรดกำมะถัน (Sulfuric acid) ปริมาตร 4 ml หลังจากนั้นให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อเป็นการไล่อากาศออกจากรูพรุนของตัวรองรับพร้อมกับระเหยสารละลายออกอย่างช้าๆ จนสารละลายแห้ง จากนั้นนำตัวรองรับไปอบให้แห้งในอากาศ ที่

อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังการอบแห้ง นำของแข็งที่ได้ไปบดให้ละเอียดก่อนนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (heating rate) 10°C/min

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นทำการเตรียมซ้ำเดิมตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดกำมะถันเป็น 0.2 M, 0.5 M

3.1.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ เตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (wet impregnation) เริ่มจากละลายสารตั้งต้น (Precursor) เกลือโลหะ คือ Ammonium molybdate tetrahydrate $((\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4)$ ด้วยน้ำกลั่นประมาณ 20 ml และเติม Oxalic acid เพื่อช่วยละลายสารตั้งต้น จากนั้นทำการเติมตัวรองรับ TiO_2 (P25) ที่ได้จากขั้นตอน 3.12 ลงไปในสารละลายเกลือที่เตรียมไว้ ปั่นกวนพร้อมให้ความร้อนแก่สารละลายดังกล่าวที่อุณหภูมิ 80°C เมื่อของเหลวระเหยจนหมดให้นำสารที่เหลืออยู่ไปอบที่อุณหภูมิ 110°C ในอากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปบดให้ละเอียด และเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซ้ำอีกครั้ง โดยใช้ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (heating rate) 10°C/min จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ จากนั้นทำซ้ำตามขั้นตอนเดียวกันกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$

3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ วัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลักการ Brunauer–Emmett–Teller (BET) คือ Micrometrics ASAP 2020 ใช้ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.1 g ใช้ก๊าซไนโตรเจนไล่น้ำออกจากร่างตัวอย่างโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 1°C/min การดูดซับแก๊สไนโตรเจนกระทำที่อุณหภูมิจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวคือ -196°C

3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณของโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ปริมาณของโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้เครื่อง ICP-OES Perkin Elmer Optima 7000DV สารตัวอย่างในการวิเคราะห์เตรียมได้โดยละลายตัวเร่งปฏิกิริยาในกรดกำมะถันเข้มข้น 95-97% ปริมาตร 20 ml และเกลือแอมโมเนียมซัลเฟตปริมาณ 15 g ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180°C พร้อมกับทำการปั่นกวนโดยใช้ความเร็วรอบ 300 rpm จนสารละลายมีความใส หลังจากนั้นจึงใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ครบ 100 ml

3.2.3 การวัดปริมาณตำแหน่งความเป็นกรด และความแรงของกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวัดปริมาณตำแหน่งความเป็นกรด และความแรงของกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เทคนิค NH_3 -TPD ด้วยเครื่อง Micrometrics chemisorb 2750 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g ให้ความร้อนในการไล่ก๊าซที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศก๊าซฮีเลียมที่อัตราการไหล 50 ml/min จากนั้นทำการป้อนก๊าซแอมโมเนียเข้มข้น 0.15% ที่อัตราการไหล 25 ml/min เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับที่อุณหภูมิ 120°C จนอิ่มตัว จากนั้นป้อนก๊าซฮีเลียมไล่ก๊าซแอมโมเนียที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาออกก่อนเพิ่มอุณหภูมิการคายซับไว้ที่ 500°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ สาเหตุที่จำกัดที่อุณหภูมิดังกล่าวเพราะป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างของ anatase ไปเป็น rutile

3.2.4 การวิเคราะห์ความเป็นกรดทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ความเป็นกรดทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการดูดซับ pyridine สามารถตรวจวัดด้วยเครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ชนิดตัวตรวจวัด Flame Ionization Detector (FID) ทำการดูดซับบนอุณหภูมิ 150°C โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 25 ml/min เป็น carrier gas ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้ 0.1 กรัม และใช้ไพรีดีนปริมาตรเข้มข้น 0.2 μl ฉีดเข้า GC จนกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับไพรีดีนจนอิ่มตัว

3.2.5 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เทคนิค XRD ด้วยเครื่อง BRUKER D8 ADVANCE X-ray diffractometer ที่เชื่อมต่อกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Diffract ZT version 3.3) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น $\text{Cu K}\alpha$ radiation ซึ่งมีความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.54056 \AA ที่ช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 20° ถึง 80° โดยมีอัตราการเพิ่มทีละ 0.02° ความกว้างของช่องสลิต (slit width) เท่ากับ 0.6 mm ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ 0.05 g

3.3 การทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจำเป็นจะต้องทดสอบก่อนการทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยา เพราะในระหว่างการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอาจมี ปัญหาเกลือสารประกอบโลหะที่เติมไปบนตัวรองรับนั้นยังเปลี่ยนโครงสร้างเป็นรูปลูกไสต์ยังไม่สมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องให้ออกซิเจนในการเผาส่วนที่เป็นสารอินทรีย์หรือไนเตรทให้สลายตัวให้หมด และอีกหนึ่งปัญหาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้นนั้น ผู้ทดลองยังไม่มีข้อมูลว่าเมื่อได้ทำการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันนั้น ต้องใช้เวลานานเท่าใด

ในการทำปฏิกิริยา จึงจะเกิดโครงสร้างที่เสถียรภาพบนตัวรองรับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

3.3.1 ทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาในอากาศใหม่อีกครั้งก่อนการทดลอง โดยบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปใน fixed bed reactor แล้วใช้ก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 15%vol ที่อัตราการไหล 30 ml/min และไนโตรเจนไหลผ่านที่อุณหภูมิ 450°C

3.3.2 ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำด้วยปฏิกิริยาปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (SCR) ทำโดยหลังจากการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาใน fixed bed reactor แล้ว จากนั้นทำการทดลองโดยเริ่มอุณหภูมิการทดลองที่ 120°C ไปจนถึง 450°C จากนั้นลดอุณหภูมิในระบบลงเหลือ 120°C และทำการทดลองซ้ำเดิมอีกครั้งโดยไม่มีการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4 การทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยา

3.4.1 สารเคมี และก๊าซที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยา

สารเคมีและก๊าซที่ใช้ภายในระบบการกำจัดโพลูอิน และ NO เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 3.2

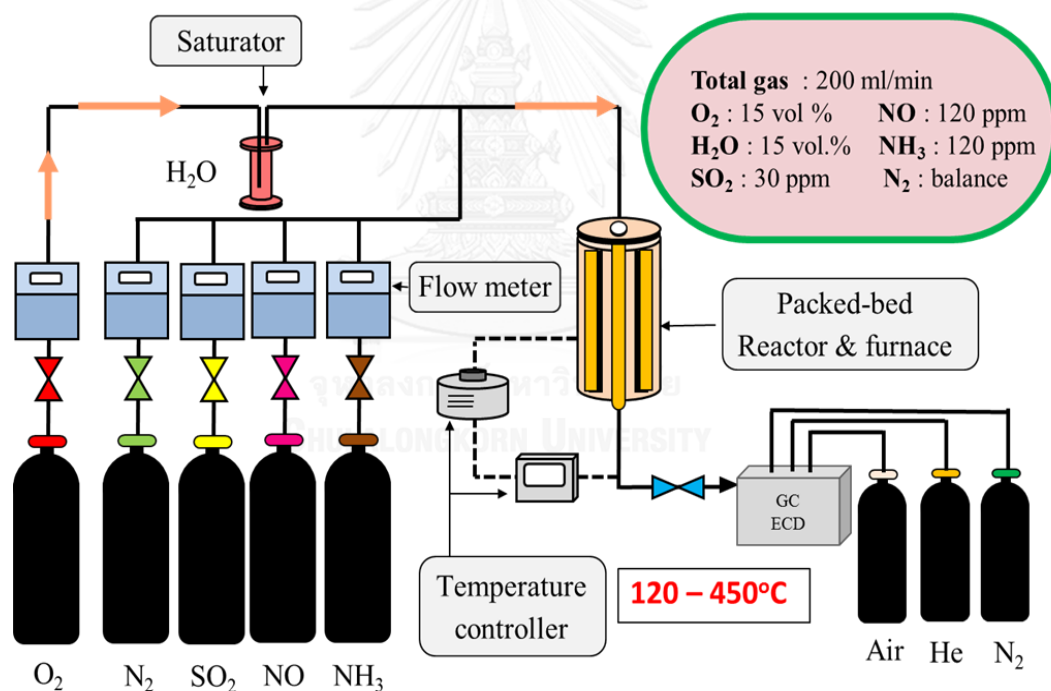
ตารางที่ 3.2 สารเคมี และก๊าซที่ใช้ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมี / ก๊าซ	บริษัทผู้ผลิต
Toluene 99.5%	Aldrich
NO (10000 ppm ใน N ₂)	BOC Scientific
SO ₂ (10000 ppm ใน N ₂)	BOC Scientific
NH ₃ (1000 ppm ใน N ₂)	Air liquide
O ₂ (≥99.9%)	Linde
N ₂ (99.999%)	Linde
He (99.999%)	Linde
Air Zero (Zero grade)	Linde
H ₂ (99.999%)	Linde

3.4.2 การทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง

(Selective Catalytic Reduction: SCR)

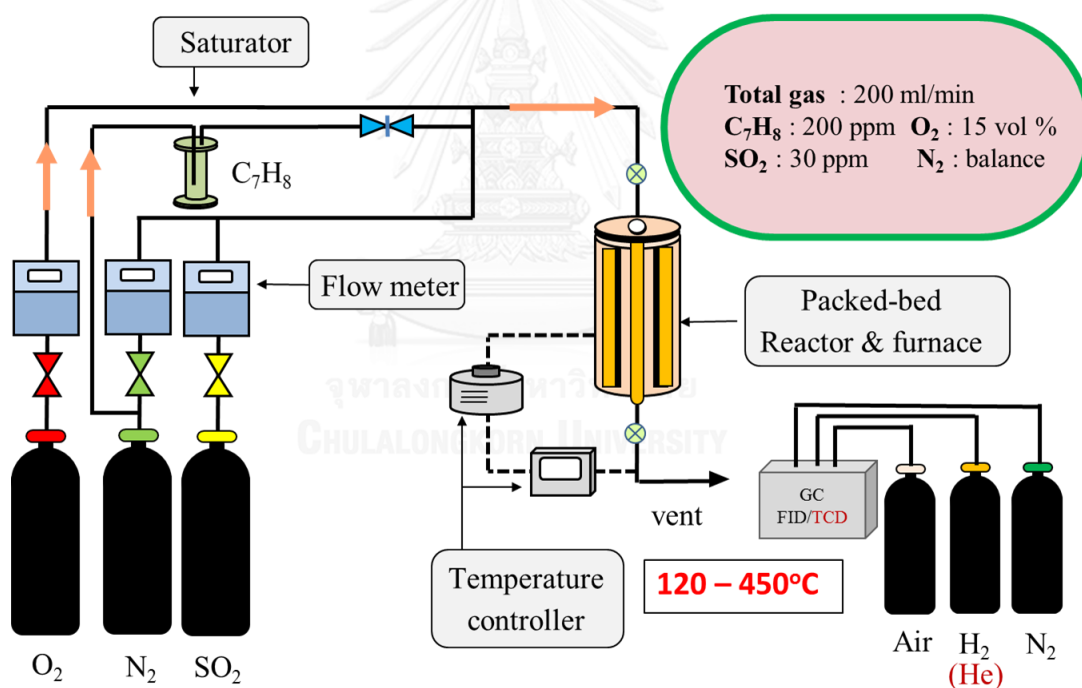
การทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจงจะทดสอบแบบเลือกเกิดไนตริกออกไซด์ด้วยก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยใช้ก๊าซผสมที่ประกอบด้วย ไนตริกออกไซด์ (NO) ความเข้มข้น 120 ppm แอมโมเนีย (NH_3) 120 ppm ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 30 ppm ออกซิเจน (O_2) 15 %vol ไอน้ำ (H_2O) 15%vol และส่วนที่เหลือคือ ไนโตรเจน (N_2) อัตราการไหลรวมเท่ากับ 200 ml/min (ไม่รวมไอน้ำ) ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g โดยให้ความร้อนตั้งแต่ 120°C ถึง 450°C และวัดความเข้มข้นไนตริกออกไซด์ (NO) ในก๊าซขาออกด้วยเครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-2014 ตัวตรวจวัด Electron Capture Detector (ECD) ใช้ packed column ชนิด Hyasep-DB อุณหภูมิคอลัมน์ 40°C ใช้ก๊าซไนโตรเจน เป็น carrier gas ความดันของก๊าซไนโตรเจนด้านขาเข้า detector 240 kPa รูปแผนผังการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังระบบในการกำจัดไนตริกออกไซด์

3.4.3 การทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอิน (Toluene Oxidation)

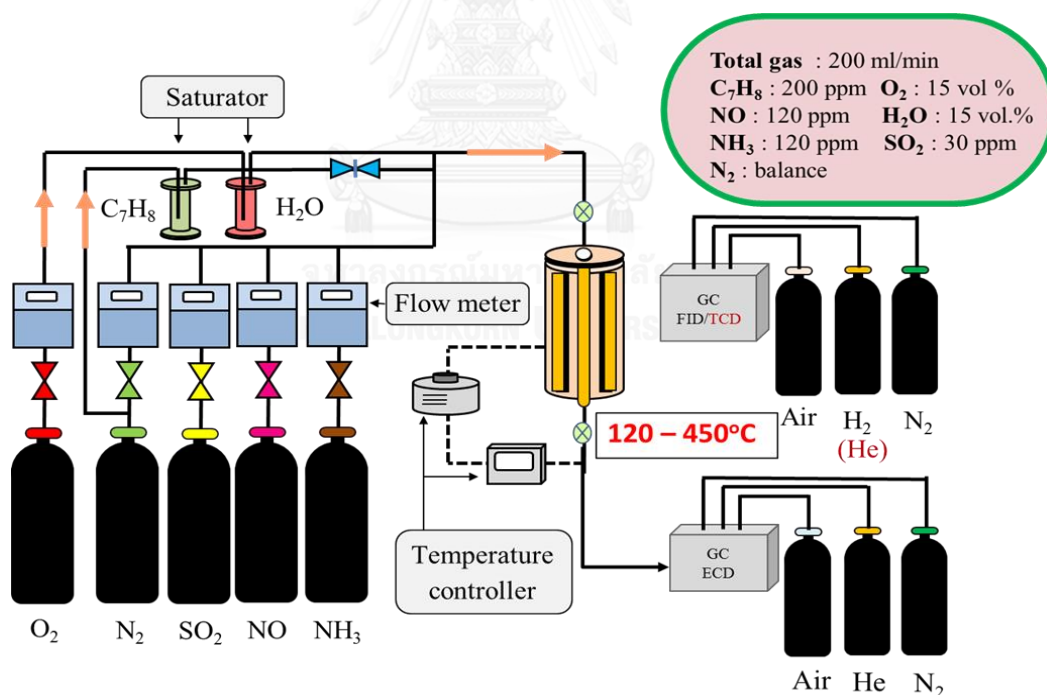
การทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอินจะทำให้ระบบที่มีก๊าซที่ประกอบไปด้วย โทลูอิน (C_7H_8) ความเข้มข้น 200 ppm ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 30 ppm ออกซิเจน (O_2) 15 %vol และส่วนที่เหลือเป็นก๊าซไนโตรเจน อัตราการไหลรวมในระบบรวมเป็น 200 ml/min ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g โดยให้ความร้อนตั้งแต่ $120^\circ C$ ถึง $450^\circ C$ วัดความเข้มข้นโทลูอินด้วยเครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionization Detector (FID) อุณหภูมิคอลัมน์ $130^\circ C$ และวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด TCD คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์คือ molecular sieve 5A อุณหภูมิคอลัมน์ $230^\circ C$ ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็น carrier gas อัตราการไหล 40 ml/min current เท่ากับ 120 mA โดยแสดงแผนผังดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังระบบในการกำจัดโทลูอิน

3.4.4 การทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์โพลูอินร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (ระบบรวม)

การทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจงใช้ก๊าซผสมที่ประกอบด้วยโพลูอิน (C_7H_8) ความเข้มข้น 200 ppm ไนตริกออกไซด์ (NO) 120 ppm แอมโมเนีย (NH_3) 120 ppm ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 30 ppm ออกซิเจน (O_2) 15 %vol ไอน้ำ (H_2O) 15%vol และส่วนที่เหลือคือ ไนโตรเจน (N_2) อัตราการไหลรวมเท่ากับ 200 ml/min (ไม่รวมไอน้ำ) ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดหนึ่งที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g โดยให้ความร้อนตั้งแต่ $120^\circ C$ ถึง $450^\circ C$ ตรวจวัดความเข้มข้นไนตริกออกไซด์ (NO) ในก๊าซขาออกด้วยเครื่อง GC-ECD เช่นเดียวกับระบบ SCR วัดความเข้มข้นโพลูอิน และเบนโซไนโตรล์ ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionization Detector (FID) อุณหภูมิคอลัมน์ $130^\circ C$ และวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ตัวตรวจวัดชนิด TCD คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์ชนิด molecular sieve 5A อุณหภูมิคอลัมน์ $230^\circ C$ ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็น carrier gas อัตราการไหล 40 ml/min current เท่ากับ 120 mA โดยแสดงแผนผังดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังระบบการกำจัดไนตริกออกไซด์ ร่วมกับ โพลูอิน

3.4.4 การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ในการทำปฏิกิริยา

การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion) สามารถคำนวณได้จาก การนำพื้นที่ใต้กราฟมาวิเคราะห์หาความเข้มข้น ในส่วนการกำจัดไนตริกออกไซด์ด้วยปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง แสดงดังสมการที่ 3.1 และการกำจัดโทลูอินในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอิน

การคำนวณหา %Toluene conversion คำนวณได้จากการนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่วัดได้จากเครื่อง GC ชนิดตัวตรวจวัด FID มาแปลงค่าเป็นความเข้มข้นโทลูอิน โดยใช้สมการจาก Calibration curve ของโทลูอิน จากนั้นนำค่าความเข้มข้นโทลูอินขาเข้าและออกมาคำนวณ %Toluene conversion โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\%Toluene\ conversion = \frac{(\text{inlet-outlet})\ \text{Concentration of toluene} \times 100}{\text{inlet concentration of toluene}} \quad (3.1)$$

การคำนวณหา %Toluene conversion to CO₂ คำนวณได้จากการนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่วัดได้จากเครื่อง GC ชนิดตัวตรวจวัด TCD มาแปลงค่าเป็นความเข้มข้น CO₂ โดยใช้สมการจาก Calibration curve ของ CO₂ ที่ความเข้มข้นสูง จากนั้นนำค่าความเข้มข้น CO₂ ทางด้านขาออกจากรวมคำนวณ %Benzene conversion to CO₂ โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\%Toluene\ convert\ to\ CO_2 = \frac{\text{Concentration of CO}_2 \times 100}{7 \times \text{inlet concentration of toluene}} \quad (3.2)$$

การหาค่าพื้นที่ใต้กราฟของ NO ที่วัดได้จากเครื่อง GC/ECD โดยใช้โปรแกรม Fityk เพื่อช่วยในการหาค่าพื้นที่ใต้กราฟ โดยจะกำหนดให้พื้นที่ใต้กราฟของ NO ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งจะนำค่าพื้นที่ใต้กราฟของ NO ที่อุณหภูมิสูงกว่า 120°C มาทำการเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\%NO\ Conversion = \frac{(\text{inlet-outlet})\ \text{Concentration of NO} \times 100}{\text{inlet concentration of NO}} \quad (3.3)$$

บทที่ 4

ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการอธิบายผลการทดลองที่ประกอบไปด้วย ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด NO และโทลูอีน ในระบบต่างๆ

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.2 ผลการวัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Nitrogen physisorption

ผลการวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้หลักการ BET แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นที่ผิวของตัวรองรับที่ยังไม่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้นอยู่ที่ 48.99 m²/g cat และใน ส่วนของตัวรองรับที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันพบว่าค่าพื้นที่ผิวไม่มีความต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าสารละลายกรดกำมะถันไม่ส่งผลทำลายโครงสร้างพื้นผิว และรูพรุนของตัวรองรับ เมื่อทำการเคลือบฝังโลหะออกไซด์ลงบน TiO₂ จะพบว่า ค่าพื้นที่ผิวลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากโลหะที่เคลือบฝังบนตัวรองรับไททานเนียมไปดบังรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวของตัวรองรับสูญเสียพื้นที่บางส่วนไป [22]

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ BET

Catalyst	Surface area m ² /g cat
TiO ₂ (0 M)	48.99
TiO ₂ (0.2 M)	49.77
TiO ₂ (0.5 M)	50.46
MoO ₃ /TiO ₂ (0 M)	47.05
MoO ₃ /TiO ₂ (0.2 M)	46.84
MoO ₃ /TiO ₂ (0.5 M)	46.06

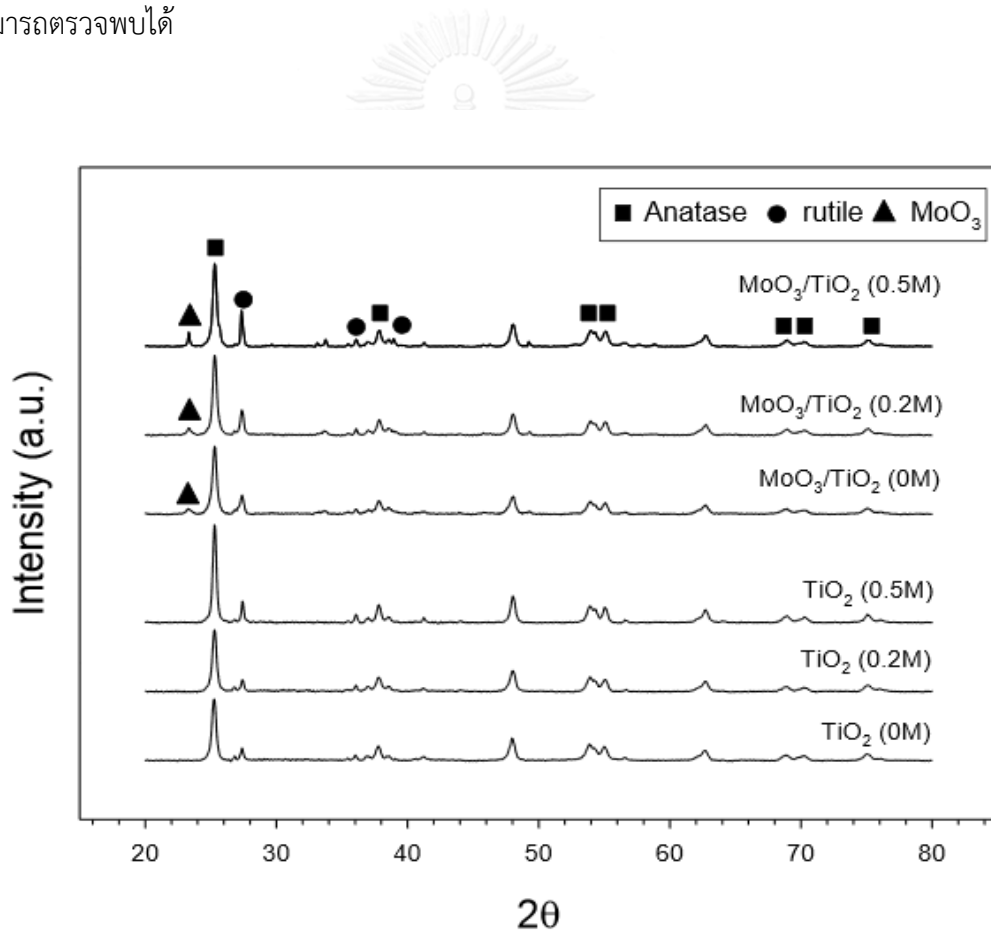
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค ICP

จากผลการทดลองในการหาปริมาณโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0 M), MoO₃/TiO₂ (0.2 M) และ MoO₃/TiO₂ (0.5 M) มีค่าปริมาณโลหะอยู่ที่ 8.2 % wt., 8.2 % wt. และ 8.3 % wt. ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าปริมาณโลหะที่ได้ทำการเคลือบฝังนั้นไม่มี

ความแตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ และโทลูอินได้

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา และเฟสตัวรองรับไททาเนียจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ตั้งแต่ $20-80^{\circ}$ โดยแสดงดังรูปที่ 4.1 ตัวรองรับไททาเนียจะแสดงพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 26° 38° 54° 55° 69° 70° 75° เป็นลักษณะเฉพาะของผลึก anatase ของตัวรองรับ TiO_2 ซึ่งลักษณะผลึกดังกล่าวมีความเสถียร และมีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ยังพบพีคของ MoO_3 ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ตำแหน่ง 23° [9] โดยเกิดจากโลหะโมลิบดินัมออกไซด์ที่เติมลงบนไทเทเนียมีปริมาณสูงพอที่ ทำให้เครื่อง XRD สามารถตรวจพบได้



รูปที่ 4.1 กราฟ XRD pattern ของตัวรองรับ และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

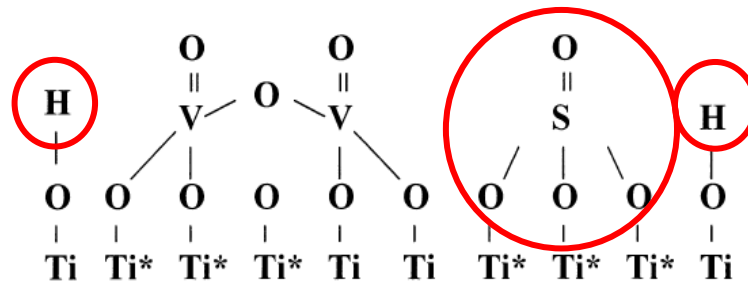
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับและไม่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยผลการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วย ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Pyridine adsorption โดยผลจะแสดงค่าปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดบนตัวเร่งปฏิกิริยา และในส่วนถัดมาคือ ผลของการทดสอบด้วยเทคนิค NH_3 -TPD ซึ่งจะแสดงผลปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดที่คายซับออกมาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ส่วนปริมาณความเป็นกรดที่คายซับที่อุณหภูมิมากกว่า 500°C ดูได้จากค่าผลต่างระหว่างปริมาณค่าความเป็นกรดทั้งหมดที่วัดได้ Pyridine adsorption กับปริมาณ NH_3 ที่คายซับออกมาจนถึงอุณหภูมิ 500°C (Δ) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความเป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับ และไม่ปรับสภาพด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ

Catalysts	Pyridine adsorption	NH_3 -TPD ($\mu\text{mol/g}$)	Δ ($\mu\text{mol/g}$)
	($\mu\text{mol/g}$)	< 500°C	> 500°C
TiO_2 (0M)	136.10	4.97	131.13
TiO_2 (0.2M)	159.00	7.55	151.45
TiO_2 (0.5M)	164.68	11.76	152.92
$\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0M)	76.92	30.24	46.68
$\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2M)	78.03	31.00	47.03
$\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5M)	81.40	22.18	59.22

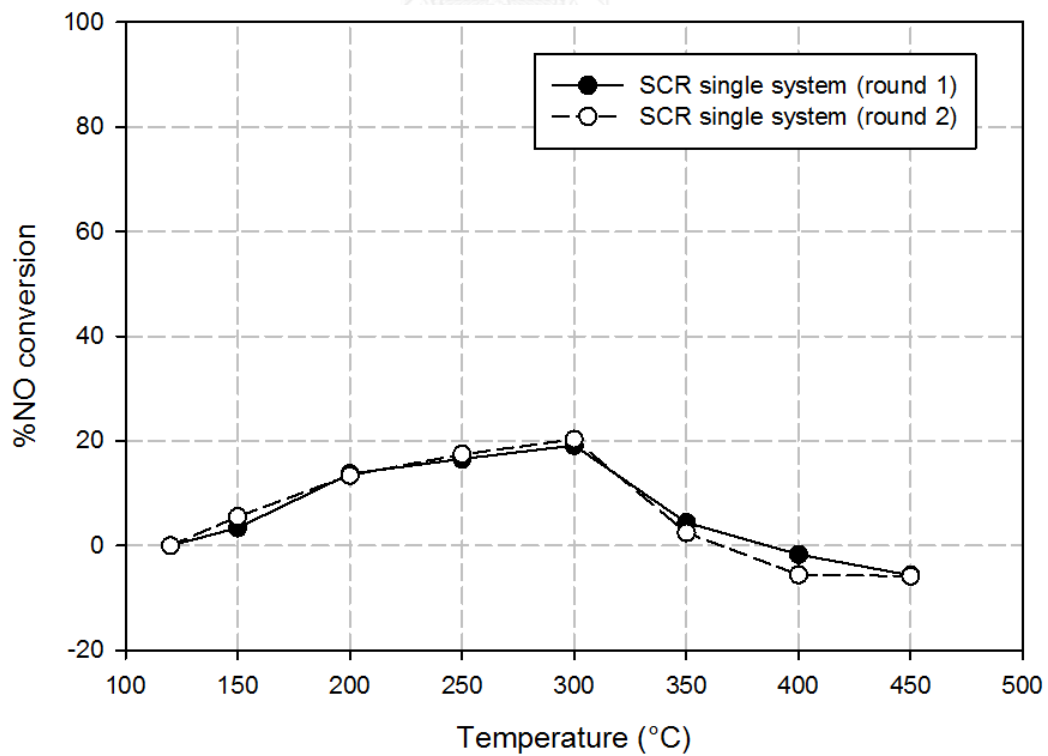
จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดของตัวรองรับ TiO_2 มีค่าสูงขึ้นเมื่อปรับสภาพด้วยกรดกำมะถันที่ความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งสาเหตุที่เป็นไปได้คือ ตัวรองรับ TiO_2 ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด ทำให้เกิดโครงสร้างที่เรียกว่า polymeric structure ดังรูปที่ 4.2 [23] โดยตำแหน่งวงกลมคือ ตำแหน่งที่กรดกำมะถันทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของตัวรองรับ TiO_2 จึงทำให้ความเป็นกรดทั้งหมดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ในส่วนความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ นั้นพบว่าค่าปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดลดลงต่ำกว่าของตัวรองรับ TiO_2 เนื่องจากผลึก MoO_3 มีขนาดไอออนที่ใหญ่กว่า และสัดส่วนของออกซิเจนอะตอมที่มากกว่า ทำให้เกิดการบดบังความเป็นกรดทั้งหมดบนพื้นผิว จึงทำให้เห็นปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดลดลง และจากผลของค่าปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดในเทคนิค NH_3 -TPD พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2M) มีค่าสูงที่สุด



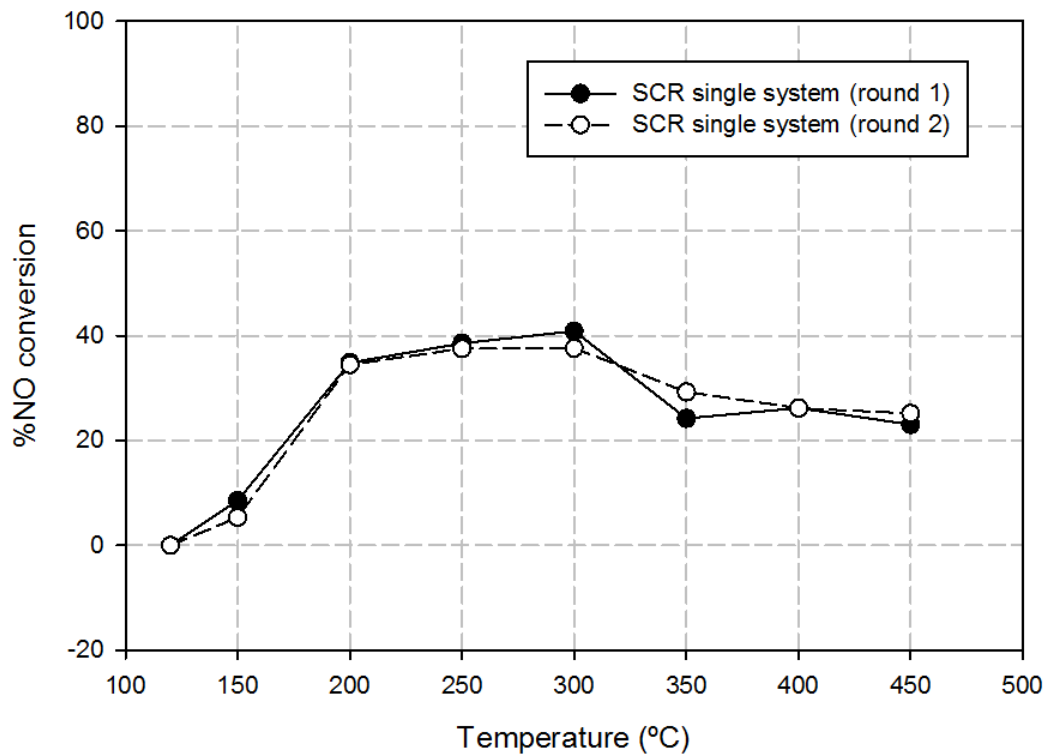
รูปที่ 4.2 โครงสร้างแบบ polymeric structure ของ Sulfated TiO₂

4.2 ผลการทดสอบความเสถียรภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

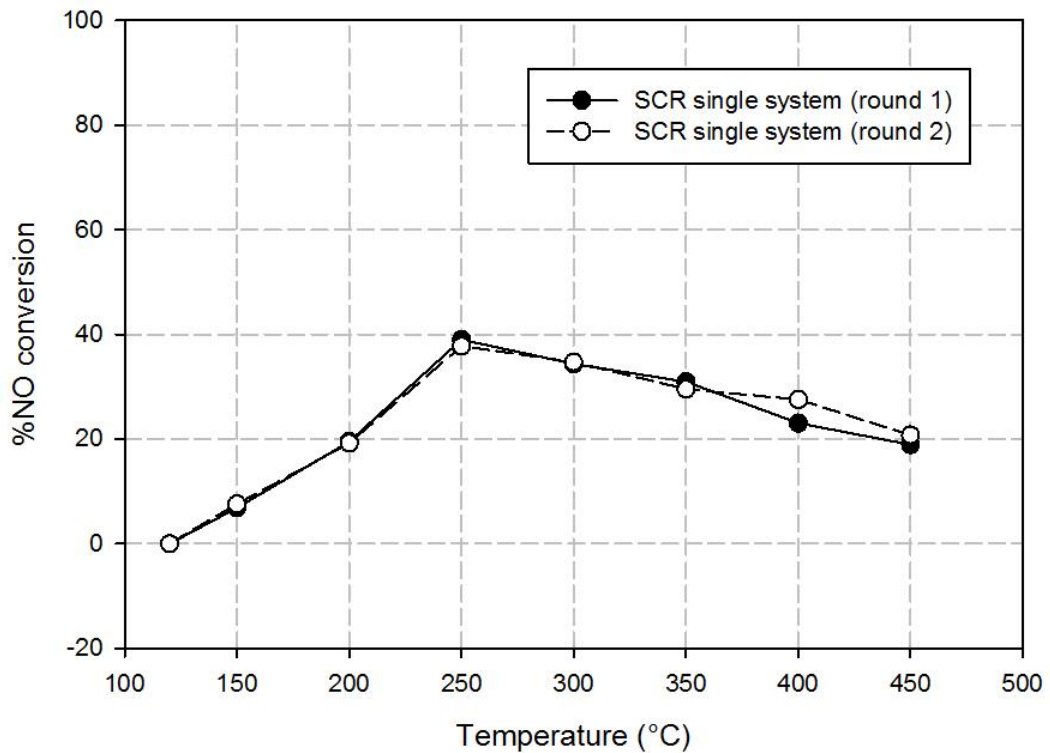
ในการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยงานวิจัยนี้จะเลือกปฏิกิริยาที่นำมาทดสอบคือ ปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง โดยทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง ให้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 120-450°C



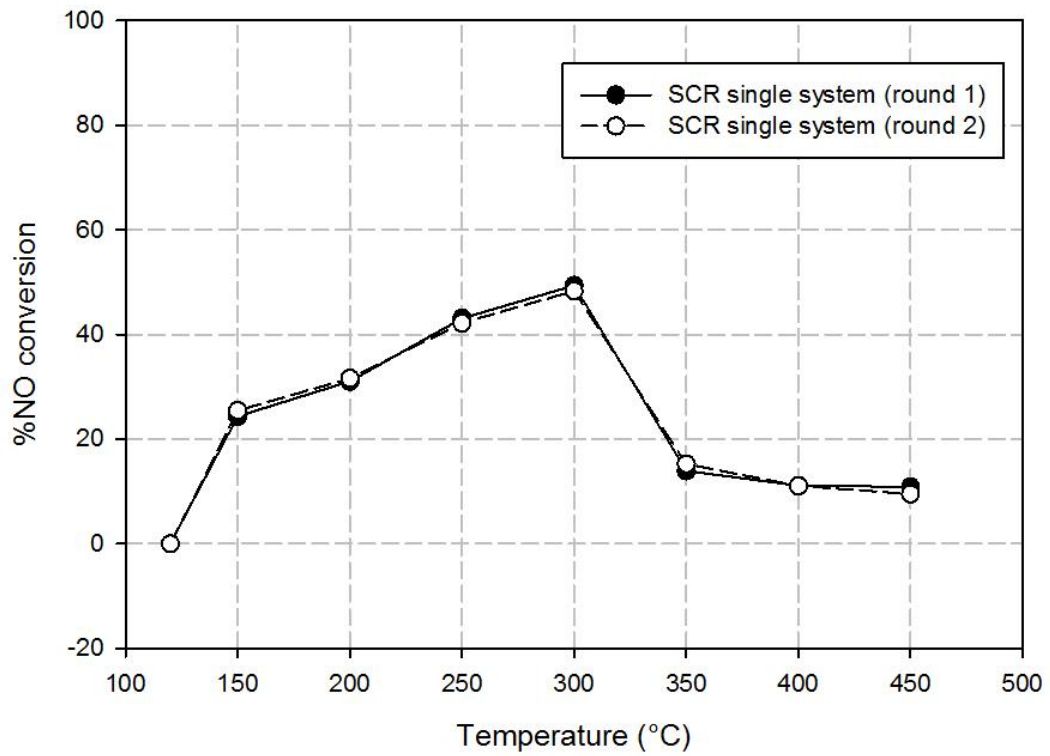
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0 M)



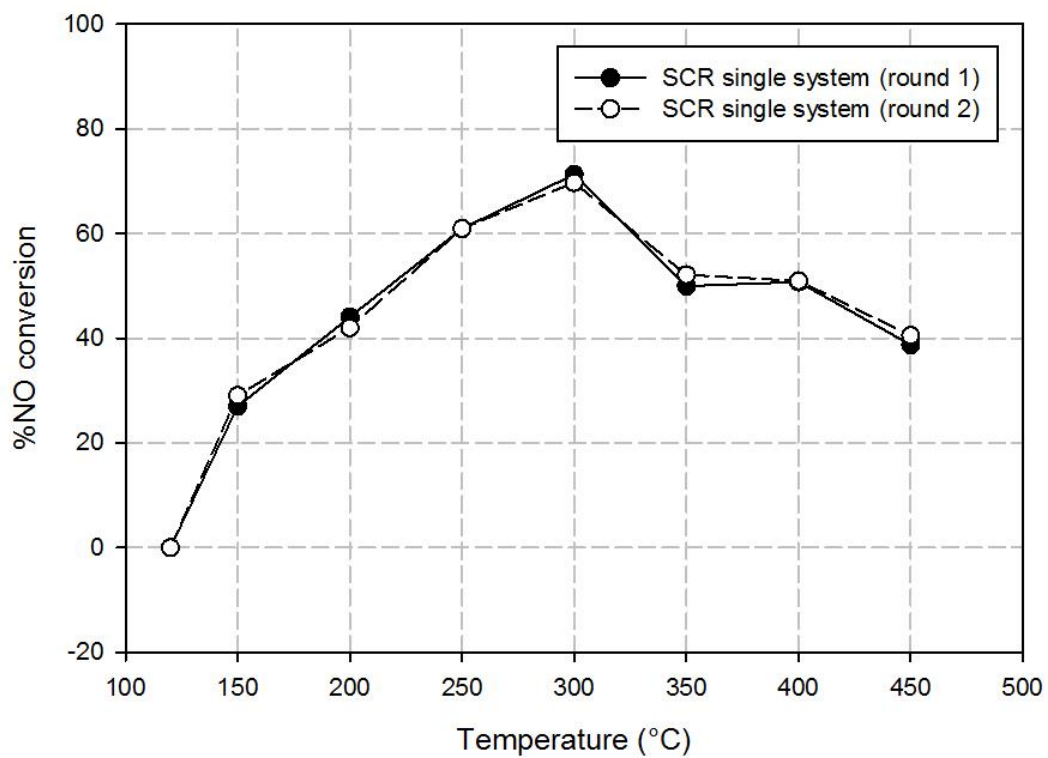
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0.2 M)



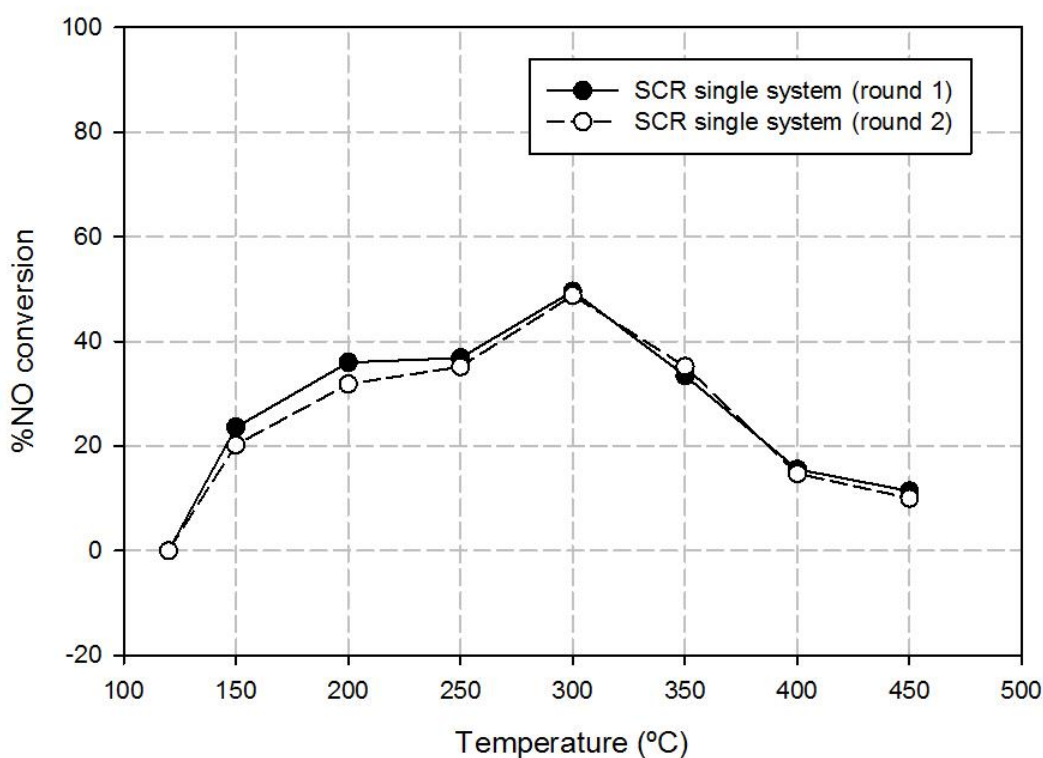
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0.5 M)



รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0 M)



รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0.2 M)



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5 M)

รูปที่ 4.3-4.8 แสดงผลการทดสอบความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0 M), TiO_2 (0.2 M), TiO_2 (0.5 M), $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0 M), $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2 M) และ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5 M) ภายใต้การทดสอบในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง ที่ผ่านการทดสอบทั้ง 2 ครั้งต่อเนื่องกัน สาเหตุที่ต้องทดสอบ 2 ครั้งก็เพื่อต้องการดูผลการทดสอบนั้นมีความใกล้เคียงกันหรือไม่ ถ้ามีความใกล้เคียงกันถือว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีเสถียรภาพแล้ว แต่ถ้าพบว่า %conversion จากการทดสอบ 2 ครั้งแตกต่างกันมาก จะถือว่าโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้นั้นไม่เสถียรภาพต้องทำการเตรียมใหม่ และทำการทดสอบใหม่เช่นกัน ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ผลการทดสอบของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาของครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้นั้น มีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพในการทำปฏิกิริยา และเสถียรต่อความร้อน ดังนั้นจึงสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทดสอบในปฏิกิริยาต่อไปคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน (Toluene Oxidation) และปฏิกิริยาในการออกซิเดชันโทลูอีนร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (ระบบรวม)

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวรองรับที่ไม่ผ่าน และผ่านการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน ซึ่งได้แก่ TiO_2 (0M), TiO_2 (0.2M), TiO_2 (0.5M), $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0M), $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2M) และ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5M) ใช้ในการกำจัด ไนตริกออกไซด์ ร่วมกับโทลูอิน ซึ่งระบบต่างๆที่ใช้ในการทดสอบคือ ปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง ของไนตริกออกไซด์ ด้วยแอมโมเนีย, ปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอิน ปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอินร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง โดยการทดสอบ จะทำการเก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์หา ก๊าซไนตริกออกไซด์ โทลูอิน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากเผาไหม้โทลูอิน การวิเคราะห์ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ GC-2014 ECD, GC-8A FID และ GC-8A TCD ตามลำดับ เป็นตัวตรวจวัด ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 120-450°C ซึ่งผลจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนดังนี้

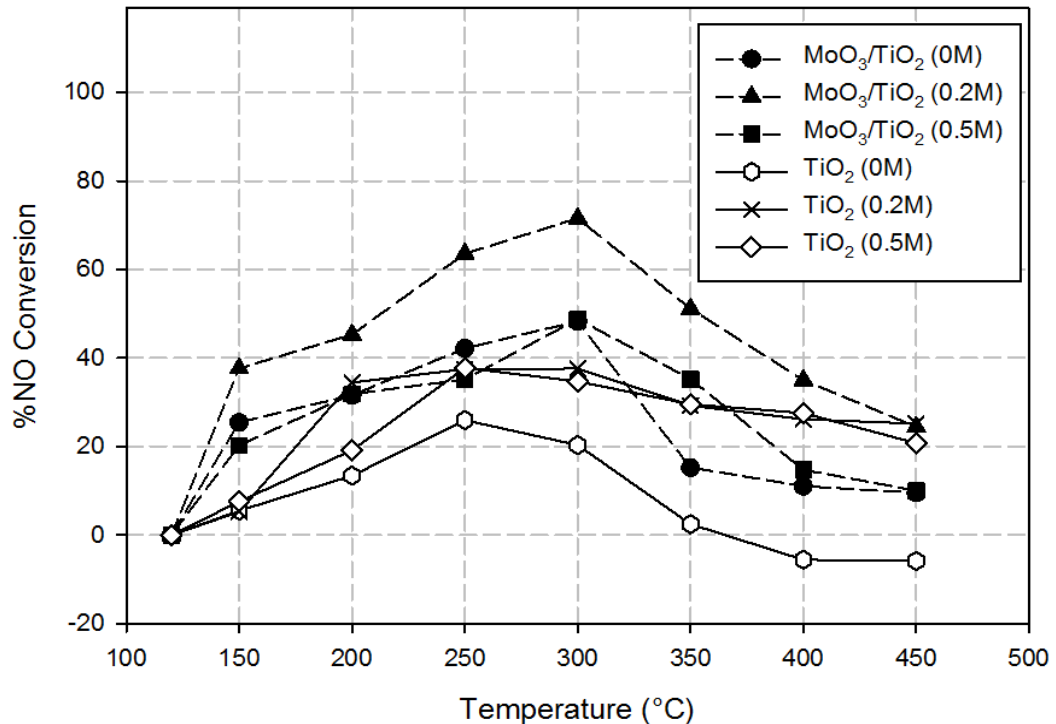
(ก) ผลการทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (Selective catalytic reduction: SCR)

(ข) ผลการทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอิน (Toluene oxidation)

(ค) ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ระหว่างปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง กับปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอินร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (ระบบรวม)

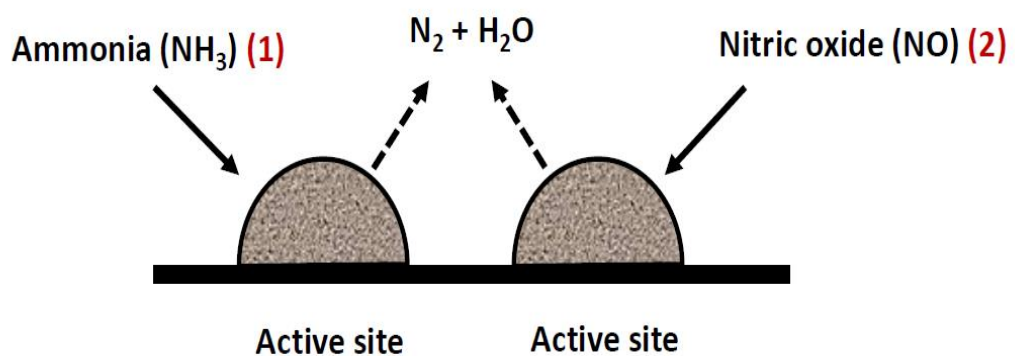
(ง) ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO_2 ระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอิน และปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอินร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (ระบบรวม)

4.2.1 ผลการทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง
(Selective catalytic reduction: SCR)



รูปที่ 4.9 แสดงผล %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง

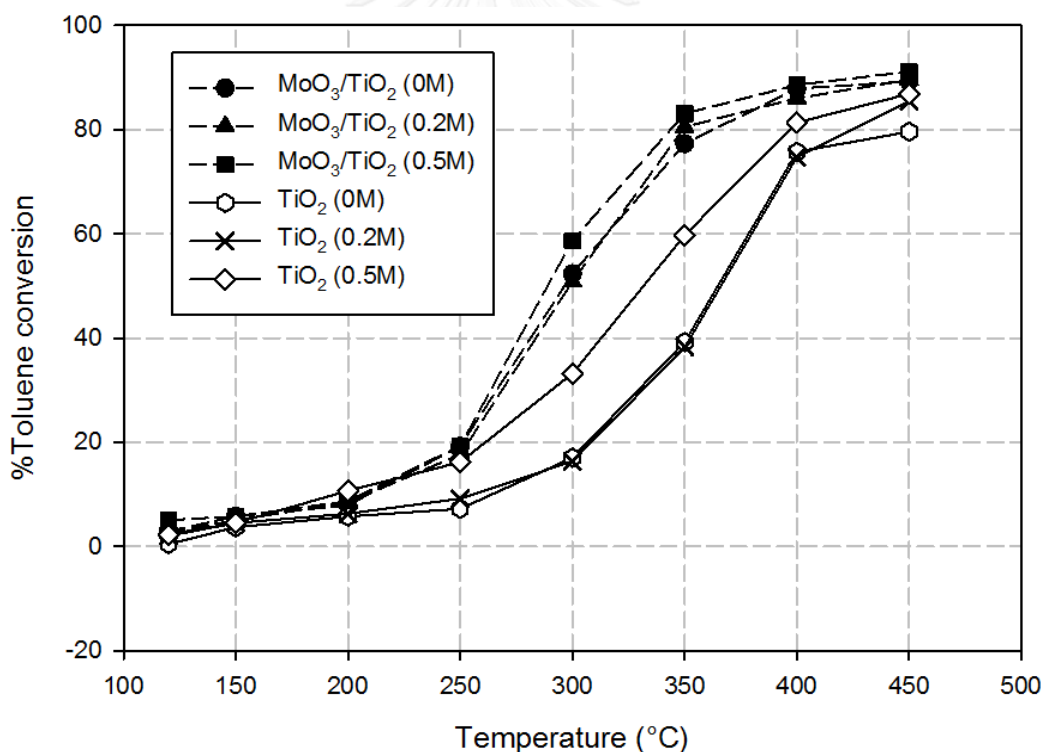
กระบวนการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ โดยใช้ปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (SCR) ปฏิกิริยาดังกล่าวจะใช้ NH_3 เข้าไปยึดเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไว ซึ่งตำแหน่งที่มีความว่องไว จะทำให้ NH_3 สามารถยึดเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นก๊าซไนตริกออกไซด์ และ O_2 จะเข้าทำปฏิกิริยา SCR กับ NH_3 ที่เกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยา และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป โดยแสดงดังรูปที่ 4.10



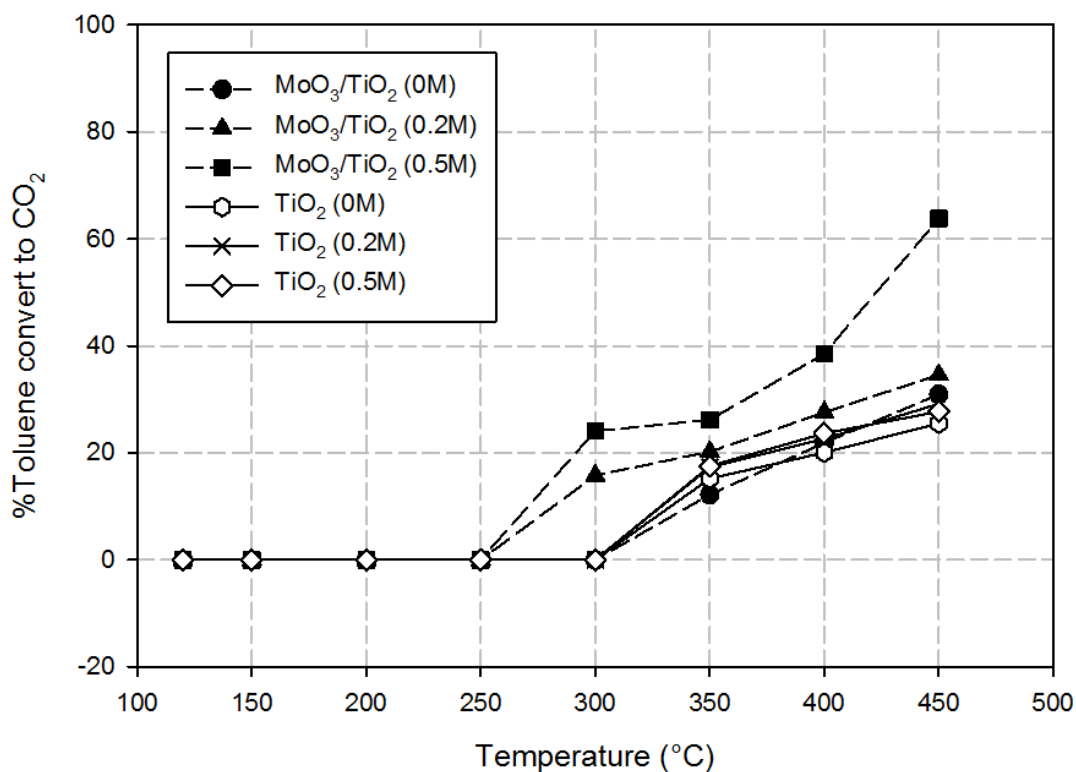
รูปที่ 4.10 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยา SCR

รูปที่ 4.9 แสดงผล %NO Conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะโมลิบดีนัมออกไซด์จะทำปฏิกิริยา SCR ได้ดีที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของโลหะออกไซด์ดังกล่าว ในส่วนของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2M) มีค่าการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ สูงที่สุดที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าเท่ากับ 71.53 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความเป็นกรดในตำแหน่งที่ไม่แรงเกินไปที่สูง (NH_3 คายซับที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C อ้างอิงข้อมูลจากตารางที่ 4.2) จึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2M) เกิดปฏิกิริยาได้ดี และเมื่ออุณหภูมิการทดลองมีค่าสูงกว่า 300°C ค่าการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (NH_3 oxidation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยา SCR โดยจะทำให้ปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และจากผลการทดลองจะสังเกตอีกได้ว่า [24]

4.2.2 ผลการทดสอบความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน (Toluene oxidation)



รูปที่ 4.11 แสดงผล %Toluene conversion ในปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอิน ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยา



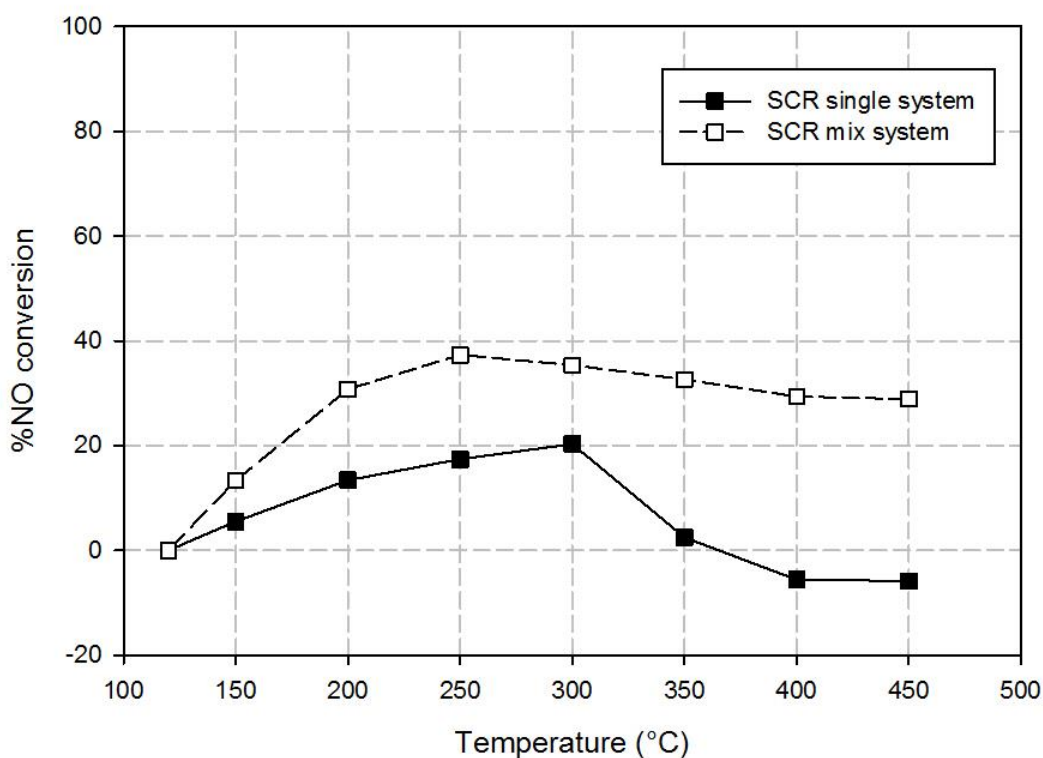
รูปที่ 4.12 แสดงผล %Toluene convert to CO₂ ในปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอีน ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.11-4.12 ที่แสดงผลของ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอีน พบว่าค่า %Toluene conversion เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในทดลอง โดยค่า %conversion ของโลหะออกไซด์ ทั้งปรับสภาพ และไม่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน มีค่าที่ไม่ต่างกัน โดยตัวรองรับ และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ที่มีการกำจัดโทลูอีนได้สูงที่สุด คือ TiO₂ และ MoO₃/TiO₂ ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดที่ความเข้มข้น 0.5M มีเท่ากับ 86.86, 91.05 ตามลำดับ ส่วนผลของ %Toluene convert to CO₂ พบว่าตัวรองรับ และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ช่วยให้ได้ CO₂ ที่มากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ค่า %Toluene convert to CO₂ ที่สูงที่สุดคือ MoO₃/TiO₂ (0.5M) มีค่าเท่ากับ 63.78 เนื่องด้วย (Δ) ที่บ่งบอกถึงความเป็นกรดทั้งหมดที่คายซับที่อุณหภูมิมากกว่า 500°C (ผลจากตารางที่ 4.2) ซึ่งจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนของตัวรองรับ TiO₂ มีค่าที่สูงกว่า MoO₃/TiO₂ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณที่มากไม่ได้หมายความว่าความแรงของกรดจะมากขึ้นตาม ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าความแรงในตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ มีค่ามากกว่าตัวรองรับ TiO₂ และค่าความแรงของกรดจะมีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นของกรดกำมะถัน ซึ่งความแรงของกรดดังกล่าวมีความสามารถในการสลายพันธะตำแหน่งวงแหวนได้ และทำปฏิกิริยา

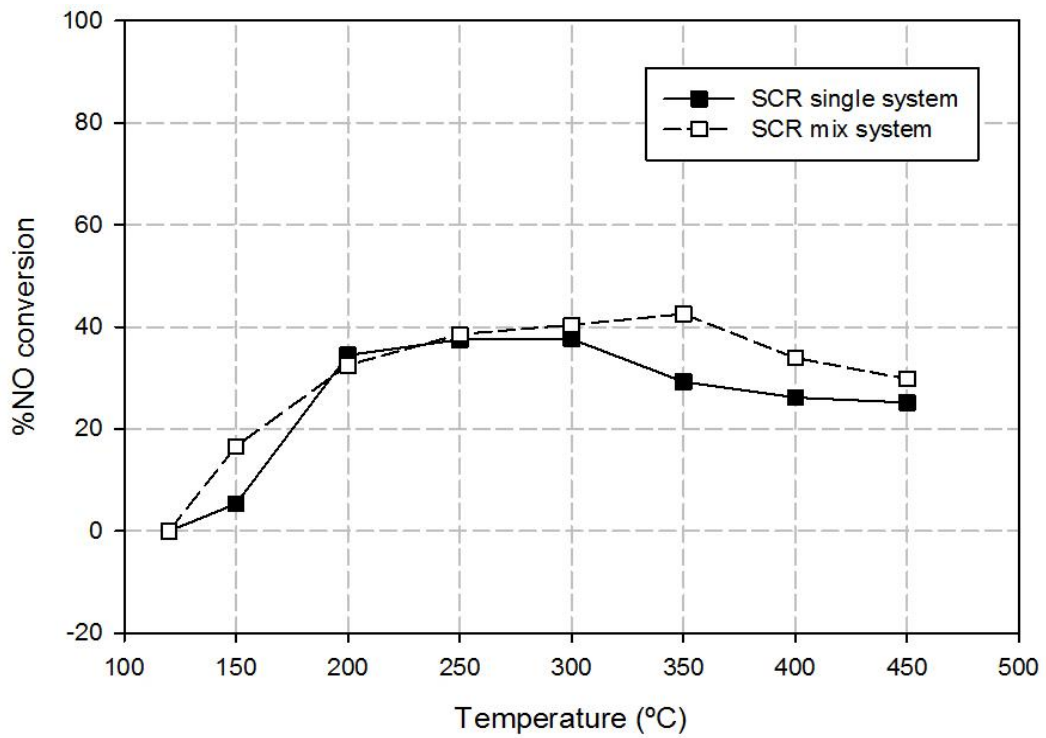
ออกซิไดส์กับกรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ที่เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงเปลี่ยนไปเป็น CO_2 ได้มากขึ้น จึงทำให้เห็น %Toluene convert to CO_2 ที่เพิ่มมากขึ้น

4.2.3 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ระหว่างปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง กับ ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีนร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (ระบบรวม)

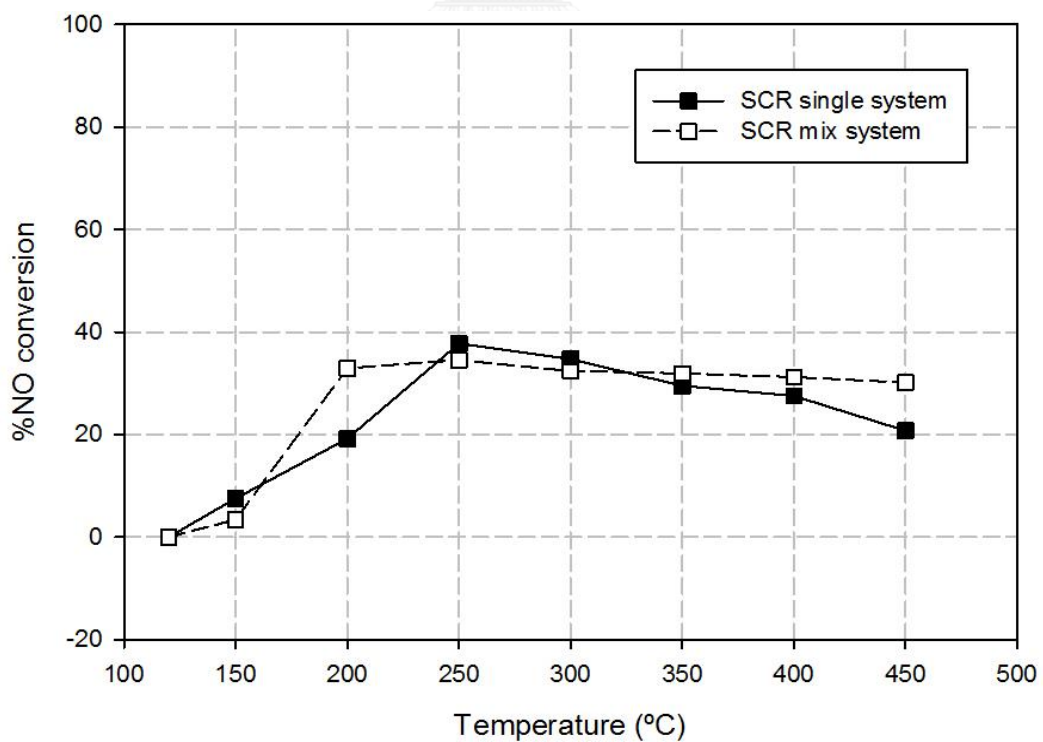
ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ โดยปกติแล้วช่วงที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาได้ดีจะอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ และเป็นที่น่าทึ่งว่าในปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอีน ให้กลายเป็น CO_2 นั้นจะเกิดได้ดีขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองนำระบบการกำจัดโทลูอีน เข้ากับระบบกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ ซึ่งช่วงอุณหภูมิการกำจัดโทลูอีนได้ดีนั้น อาจเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมในปฏิกิริยา SCR



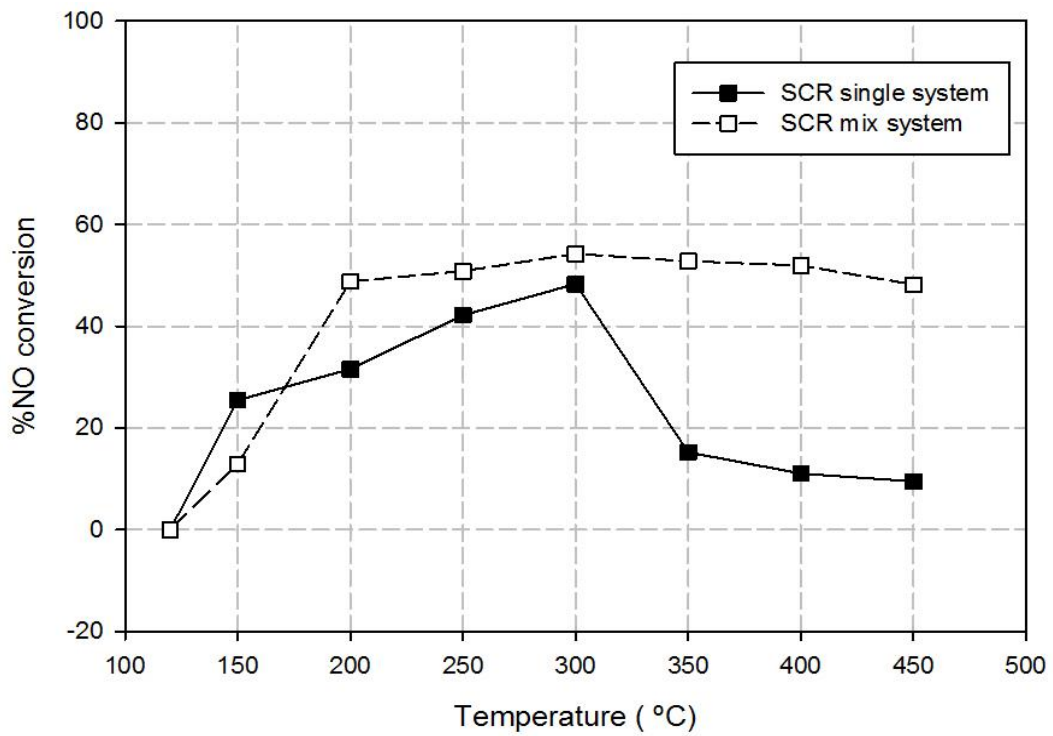
รูปที่ 4.13 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และ ปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0 M)



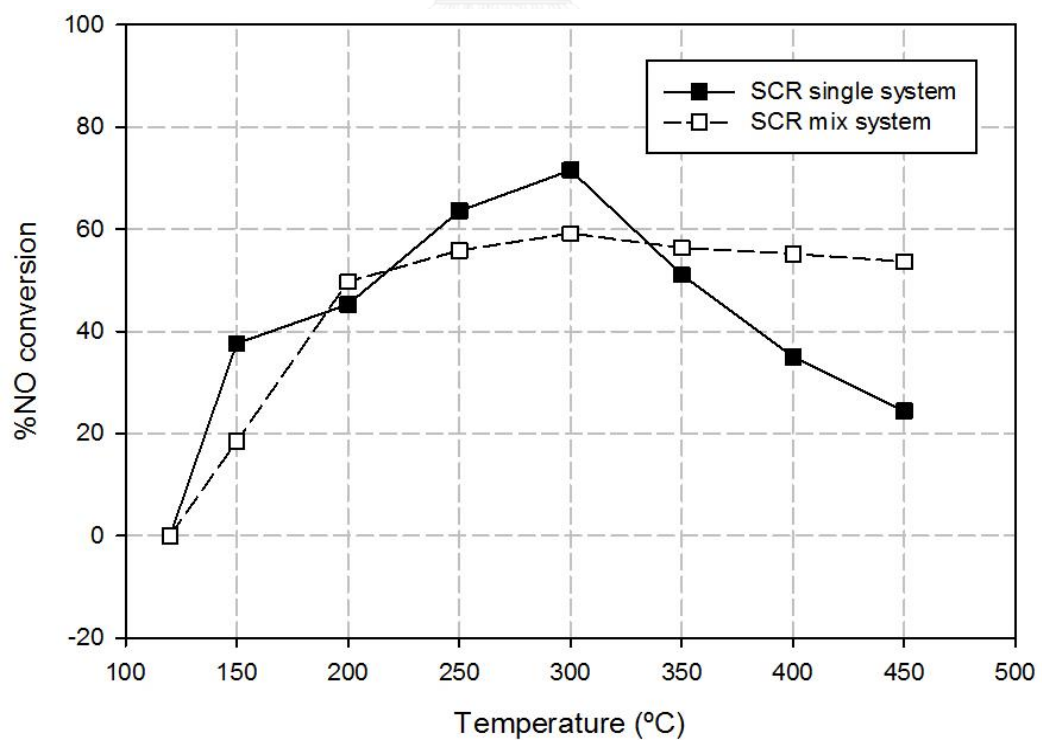
รูปที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบการ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม TiO_2 (0.2 M)



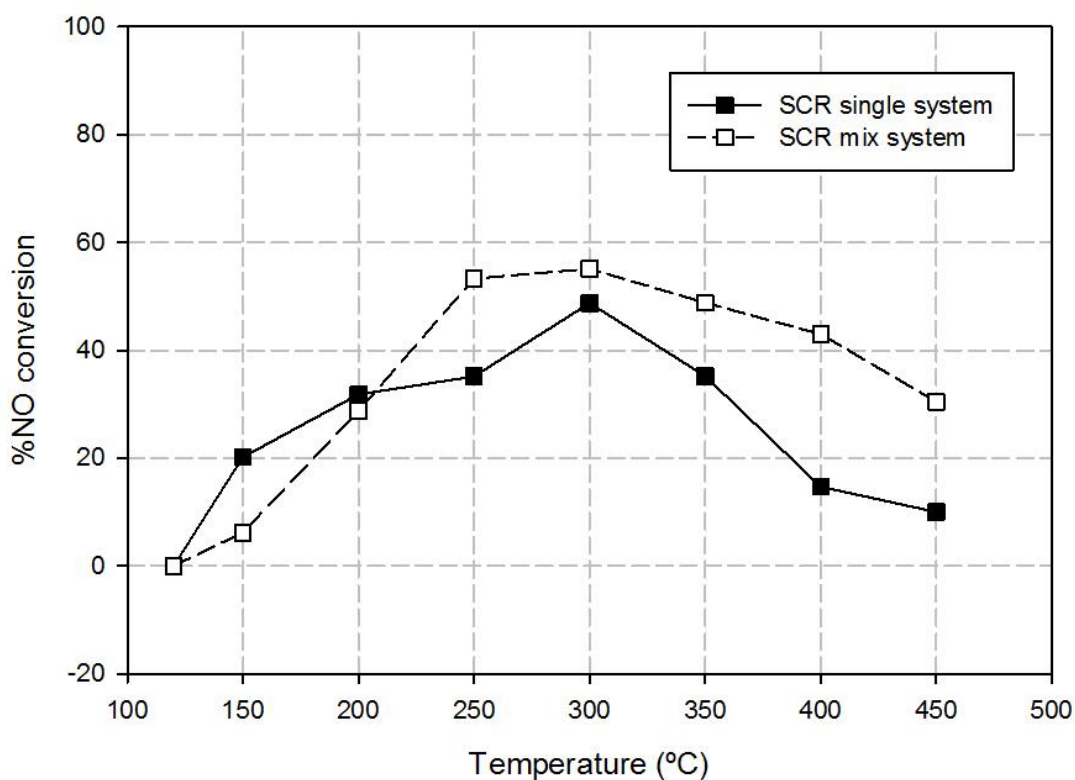
รูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0.5 M)



รูปที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0 M)



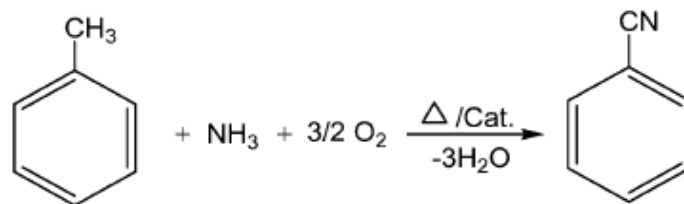
รูปที่ 4.17 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2 M)



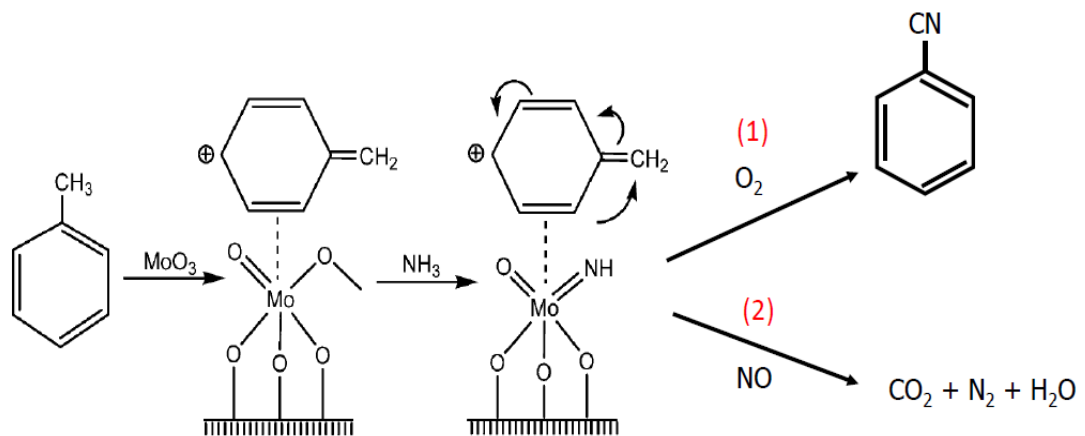
รูปที่ 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5 M)

จากรูปที่ 4.13-4.18 เป็นการเปรียบเทียบ %NO conversion ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง กับปฏิกิริยาการไนตริกออกไซด์ ร่วมกับโทลูอีน (ระบบรวม) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ค่า %NO conversion สูงสุดคือ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2 M) ซึ่งเป็นผลจากความเป็นกรดในตำแหน่งที่ไม่แรงเกินไปที่คายซับที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C มีในปริมาณที่สูง และจะพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น %NO conversion จะค่อนข้างสูงกว่าระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในระบบรวม ในช่วงอุณหภูมิต่ำมีปริมาณของ NH_3 มากเกินไปในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ดังนั้นอาจจะเสีย NH_3 บางส่วนในปฏิกิริยาแอมมอกซิเดชัน (ammoxidation) เกิดเป็นเบนโซไนไตรล์ (Benzonitrile) ซึ่งจะพบตั้งแต่อุณหภูมิ 250°C เป็นต้นไป แต่อย่างไรก็ตามปริมาณ NH_3 ยังเพียงพอต่อการกำจัด NO และในช่วงอุณหภูมิสูง ปกติแล้วปฏิกิริยา NH_3 oxidation จะเริ่มเกิด แต่การที่มี toluene เข้ามาในระบบทำให้ เกิดเป็นโครงสร้างสารมัธยันต์ (intermediate) ในรูปที่ 4.20 โครงสร้างดังกล่าวไม่เพียงแต่จะช่วยป้องกันไม่ให้ NH_3 ถูกออกซิไดซ์ด้วย O_2 ในปฏิกิริยา NH_3 oxidation แล้ว อีกทั้งยังลดการเกิดปฏิกิริยาแอมมอกซิเดชัน ในเส้นทางที่ 1 ที่อุณหภูมิสูงไปพร้อมกัน (ปริมาณความเข้มข้นของ Benzonitrile ที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.3) ทำให้ NO สามารถเข้าทำปฏิกิริยา SCR กับ NH_3 ได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิสูง (รูปที่ 4.18) จึงเห็น %NO conversion ที่อุณหภูมิ

สูง และนำไปสู่การเกิดการสลายวงแหวนไฮโดรคาร์บอนทำให้เกิด combustion product ที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงเห็น %Toluene convert to CO₂ ที่สูงขึ้นจากระบบปฏิบัติการออกซิไดซ์โทลูอิน แต่ในขณะเดียวกัน %Toluene conversion ของทั้ง 2 ระบบ มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งผลดังกล่าวจะแสดงในหัวข้อที่ 4.2.4



รูปที่ 4.19 แสดงแผนผังการเกิดปฏิกิริยา ammoxidation ระหว่าง Toluene และ NH₃

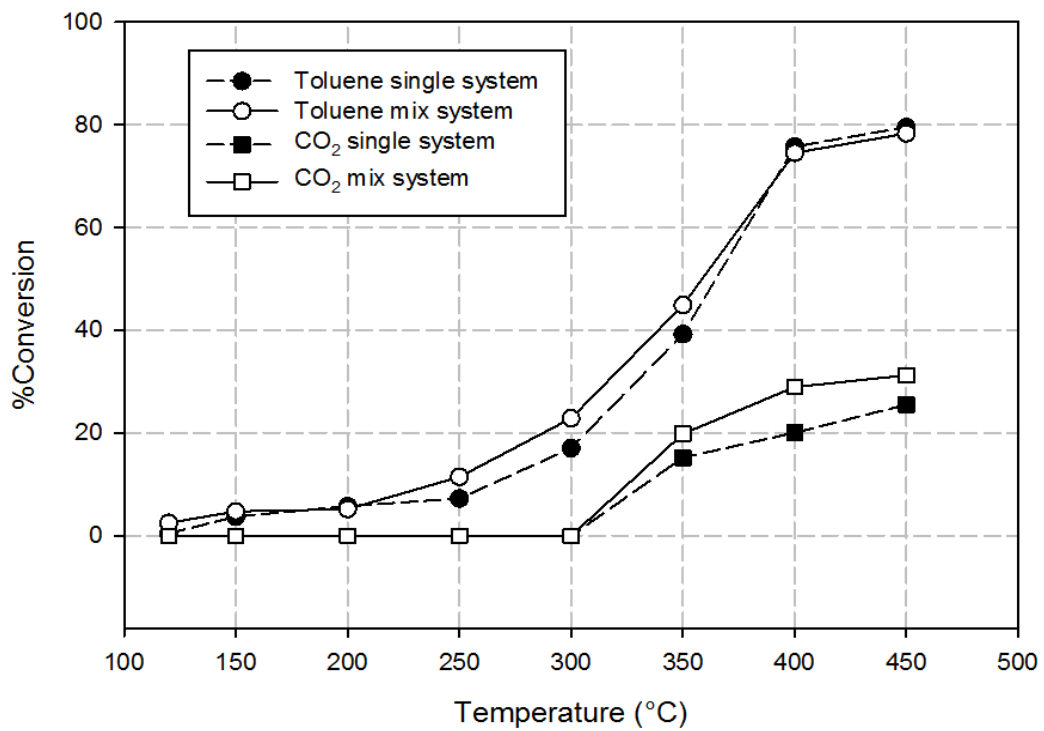


รูปที่ 4.20 แสดงแผนผังเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาในระบบรวม [25]

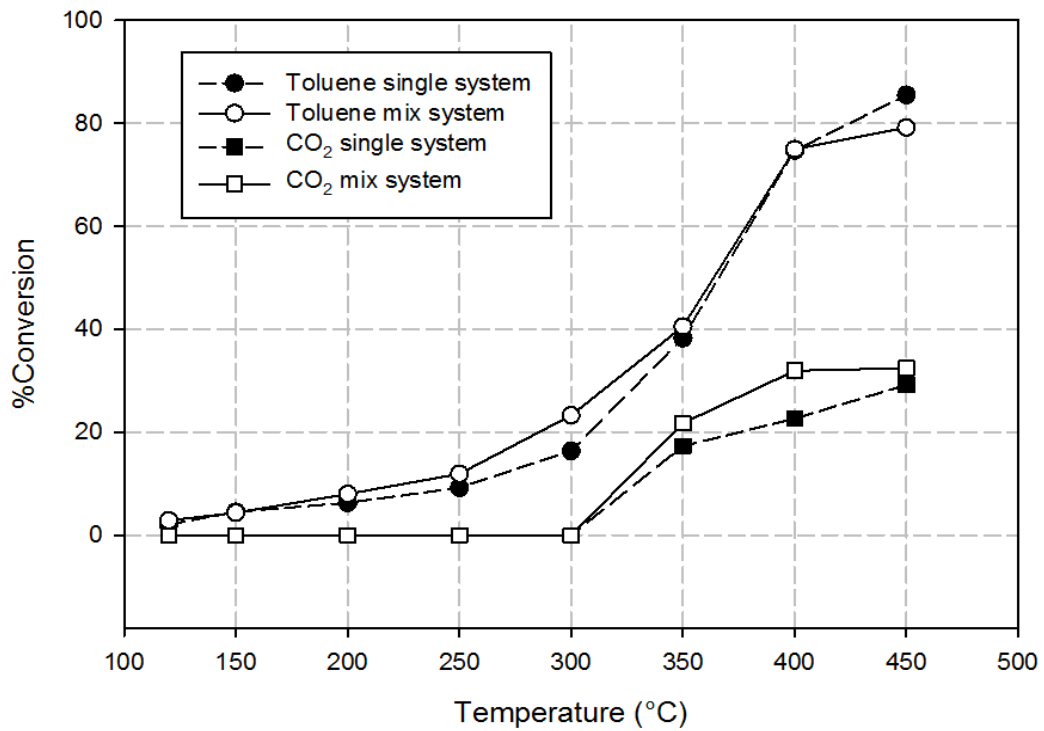
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณความเข้มข้นเบนโซไนไตรล์ (Benzonitrile) แต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

Temp. (°C)	Sample (Benzonitrile concentration (ppm))		
	MoO ₃ /TiO ₂ (0 M)	MoO ₃ /TiO ₂ (0.2 M)	MoO ₃ /TiO ₂ (0.5 M)
250	22.64	20.65	27.21
300	28.13	23.20	65.49
350	43.66	41.75	90.76
400	36.97	26.42	35.84
450	17.26	6.13	15.72

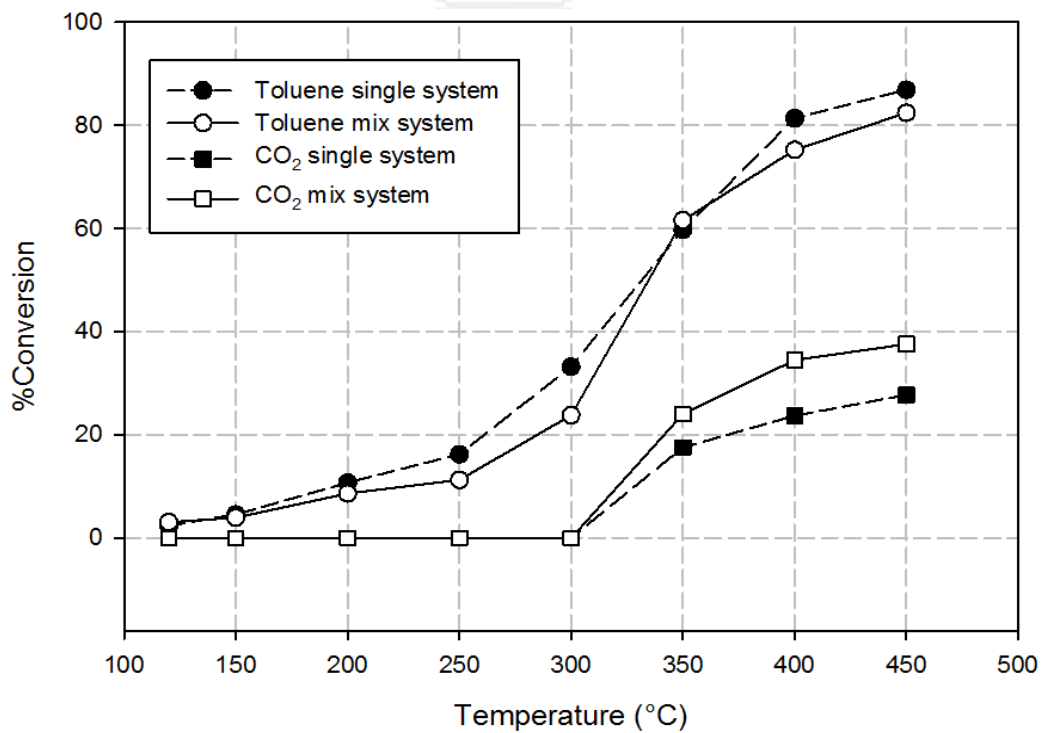
4.2.4 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอีนร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (ระบบรวม)



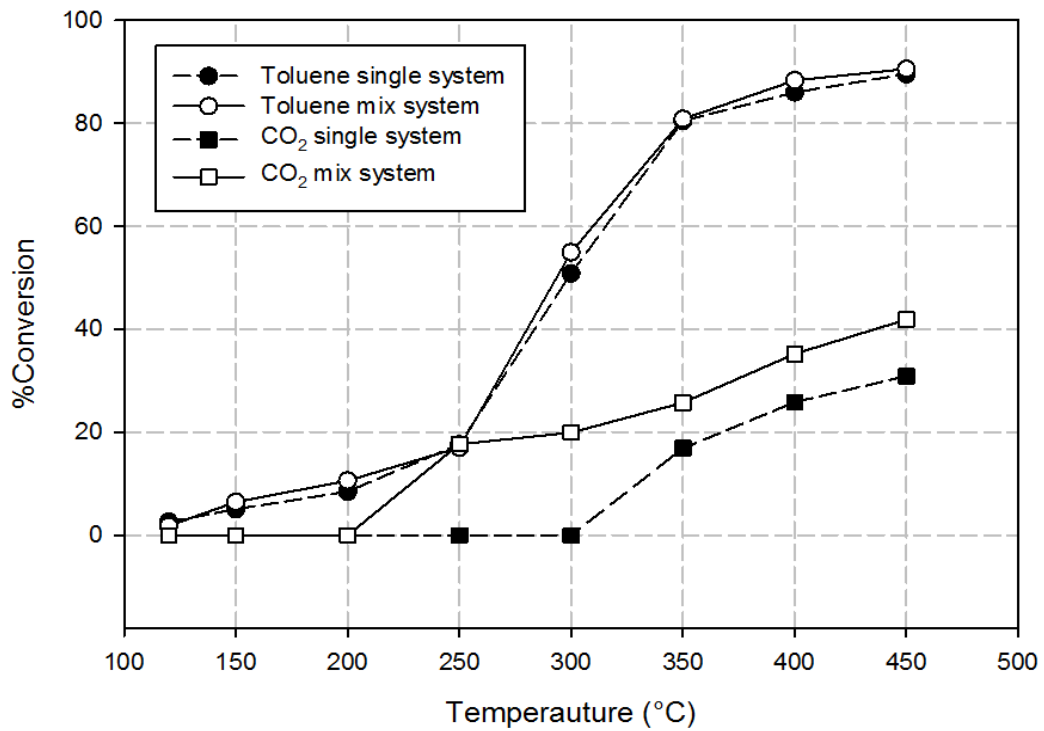
รูปที่ 4.21 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0 M)



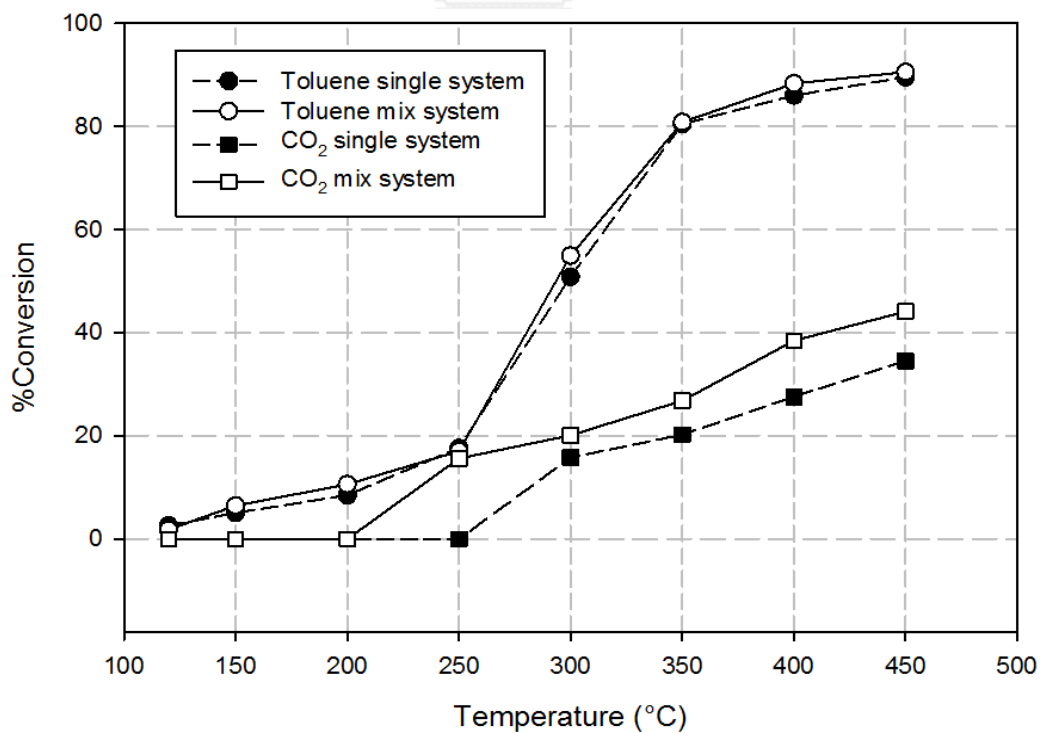
รูปที่ 4.22 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0.2 M)



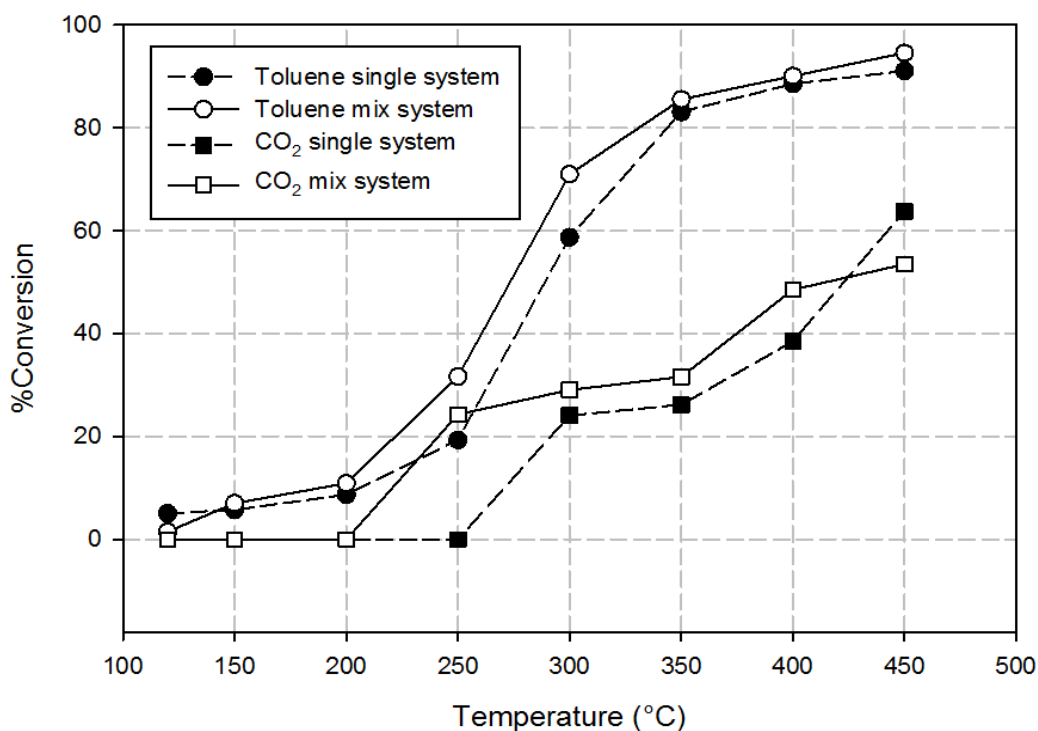
รูปที่ 4.23 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0.5 M)



รูปที่ 4.24 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0 M)



รูปที่ 4.25 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0.2 M)



รูปที่ 4.26 แสดงผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ในปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอิน และปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0.5 M)

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่นำเสนอมานั้น พบว่าการปรับสภาพตัวรองรับ TiO₂ ชนิด P25 ด้วยกรด กำมะถันที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ สามารถเพิ่มปริมาณ ตำแหน่งความเป็นกรดที่มีความแรงที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว นำมากำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ และโทลูอินได้ แต่ทั้งนี้ในระบบการกำจัดแบบ รวมจะมีการเกิดสารเบนโซโนไตรล์ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในระบบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 5 นี้เป็นบทสรุปของงานวิจัยนี้ และข้อเสนอแนะวิธีการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาผลของการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยสารละลายกรดกำมะถัน เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ และโทลูอิน โดยในส่วนของเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด ในระบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในแต่ละระบบ

System/Catalysts	MoO ₃ /TiO ₂ (0 M)	MoO ₃ /TiO ₂ (0.2 M)	MoO ₃ /TiO ₂ (0.5 M)
ปฏิกิริยาเดี่ยว			
- SCR	Moderately	Good	Not good
- Toluene oxidation	Not good	Moderately	Good
ปฏิกิริยารวม			
- SCR system	Not good	Good	Good
- Toluene system	Not good	Moderately	Good

จากตารางที่ 5.1 สรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดที่ความเข้มข้น 0.2 M มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ที่ดีที่สุด ทั้งในระบบ SCR และปฏิกิริยารวม เนื่องจากความเป็นกรดในเทคนิค NH₃-TPD เข้ามามีบทบาทในปฏิกิริยา SCR และตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0.5 M) จะมีความโดดเด่นไปทางด้านปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน ซึ่งได้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความเป็นกรดในตำแหน่งที่มีความแรงในปริมาณที่สูง จึงมีความสามารถในการสลายพันธะในส่วนของวงแหวน ให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือ CO₂ ได้เพิ่มมาก

นอกจากนี้การมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโพลีอินเข้ามาในระบบการกำจัดร่วมกับก๊าซไนตริกออกไซด์ ส่งผลในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันสามารถเพิ่มปริมาณของ CO₂ ได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับงานวิจัย

- ควรมีการวัดปริมาณซัลเฟตบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อยืนยันการความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถันจริง

- ควรวิเคราะห์สารที่คาดว่าเป็นเบนโซไนโตรล์ด้วยเทคนิคอื่น ๆ เพื่อยืนยันว่าสารที่เกิดขึ้นนั้นเป็นเบนโซไนโตรล์จริง



รายการอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ. 2554. Available from: <https://goo.gl/qzQJhQ> สืบค้นเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2560
- [2] กรมควบคุมมลพิษ. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/l3toluene.htm สืบค้นเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2560
- [3] Ropero-Vega, J.L., Aldana-Pérez, A., Gómez, R., and Niño-Gómez, M.E. Sulfated titania [TiO₂/SO₄²⁻]: A very active solid acid catalyst for the esterification of free fatty acids with ethanol. *Applied Catalysis A: General* 379(1-2) (2010): 24-29.
- [4] Larrubia, M.A. and Busca, G. An FT-IR study of the conversion of 2-chloropropane, o-dichlorobenzene and dibenzofuran on V₂O₅-MoO₃-TiO₂ SCR-DeNOx catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental* 39(4) (2002): 343-352.
- [5] Heck, R.M. Catalytic abatement of nitrogen oxides—stationary applications. *Catalysis Today* 53(4) (1999): 519-523.
- [6] Ge, H., Chen, G., Yuan, Q., and Li, H. Gas phase catalytic partial oxidation of toluene in a microchannel reactor. *Catalysis Today* 110(1-2) (2005): 171-178.
- [7] Kamal, M.S., Razzak, S.A., and Hossain, M.M. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs) – A review. *Atmospheric Environment* 140 (2016): 117-134.
- [8] Lietti, L., et al. Characterization and Reactivity of V₂O₅-MoO₃/TiO₂ De-NOx SCR Catalysts. *Journal of Catalysis* 187(2) (1999): 419-435.
- [9] Matralis, H., Theret, S., Bastians, P., Ruwet, M., and Grange, P. Selective catalytic reduction of nitric oxide with ammonia using MoO₃/TiO₂: Catalyst structure and activity. *Applied Catalysis B: Environmental* 5(4) (1995): 271-281.
- [10] Fountzoula, C., Spanos, N., Matralis, H., and Kordulis, C. Molybdenum-titanium oxide catalysts: the influence of the preparation conditions on their activity for the selective catalytic reduction of NO by NH₃. *Applied Catalysis B: Environmental* 35(4) (2002): 295-304.

- [11] Rauch, D., Albrecht, G., Kubinski, D., and Moos, R. A microwave-based method to monitor the ammonia loading of a vanadia-based SCR catalyst. Applied Catalysis B: Environmental 165 (2015): 36-42.
- [12] Zhang, Y., et al. Promotional roles of ZrO₂ and WO₃ in V₂O₅-WO₃/TiO₂-ZrO₂ catalysts for NO_x reduction by NH₃: Catalytic performance, morphology, and reaction mechanism. Chinese Journal of Catalysis 37(11) (2016): 1918-1930.
- [13] He, Z., He, Z., Wang, D., Bo, Q., Fan, T., and Jiang, Y. Mo-modified Pd/Al₂O₃ catalysts for benzene catalytic combustion. Journal of Environmental Sciences 26(7) (2014): 1481-1487.
- [14] Vishnetskaya, V.M., Role of Singlet Oxygen in the Oxidation of Toluene on Vanadium-Molybdenum Catalytic Systems. Chemistry for Sustainable Development 19 (2011): 321-325.
- [15] Klinitas, F.A. and Rasmussen, H.E. Process for the production of benzonitrile. 1951, Google Patents, US2540788 A.
- [16] Matralis, H., Papadopoulou, C., Kordulis, C., Elguezabal, A.A., and Corberan, V.C. Selective oxidation of toluene over V₂O₅/TiO₂ catalysts. Effect of vanadium loading and of molybdenum addition on the catalytic properties. Applied Catalysis A: General 126(2) (1995): 365-380.
- [17] Bielafiski, A. V₂O₅-MoO₃ catalysts for benzene oxidation. Applied Catalysis A: General 157 (1997): 223-261.
- [18] Chafetz, H., et.al. Hydrocarbon oxidation with nitric oxide and oxygen. in Google Patents, Office, U.S.P., Editor. 1972, US3649665 A.
- [19] Gómez, R., et al. Effect of sulfation on the photoactivity of TiO₂ sol-gel derived catalysts. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 193(1) (2003): 217-226.
- [20] Gannoun, C., Delaigle, R., Eloy, P., Debecker, D.P., Ghorbel, A., and Gaigneaux, E.M. Sol-gel derived V₂O₅-TiO₂ mesoporous materials as catalysts for the total oxidation of chlorobenzene. Catalysis Communications 15(1) (2011): 1-5.
- [21] Ma, Z., Yue, Y., Deng, X., and Gao, Z. Nanosized anatase TiO₂ as precursor for preparation of sulfated titania catalysts. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 178(1) (2002): 97-104.

- [22] Reddy, B.M., Reddy, E.P., and Mehdi, S. Phase transformation study of titania in $V_2O_5TiO_2$ and MoO_3TiO_2 catalysts by X-ray diffraction analysis. Materials chemistry and physics 36(3-4) (1994): 276-281.
- [23] Choo, S.T., Lee, Y.G., Nam, I.-S., Ham, S.-W., and Lee, J.-B. Characteristics of V_2O_5 supported on sulfated TiO_2 for selective catalytic reduction of NO by NH_3 . Applied Catalysis A: General 200(1) (2000): 177-188.
- [24] K. Adelman, N.S., T. Pauly. Advanced Metal-Oxide based SCR Catalysts. Umicore AG & Co.KG. 8.
- [25] Haber, J. and Wojciechowska, M. Surface structure and catalytic properties of the MoO_3 MgF_2 system. Journal of Catalysis 110(1) (1988): 23-36.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในงานวิจัยนี้โดยจะเตรียมปริมาณโลหะโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ที่ 8% wt. บนตัวรองรับ TiO_2 (P25)

ข้อมูลที่จำเป็นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา มีดังต่อไปนี้

1. สารตั้งต้น $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ มวลโมเลกุล 196.02 g/mol
2. โลหะออกไซด์ MoO_3 มวลโมเลกุล 143.94 g/mol

ก.1 การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$

การเตรียม $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ 8% wt. โดยใช้ตัวรองรับไทเทเนียปริมาณ 2.5 กรัม

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad \frac{X}{2.5+X} = 0.08$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad X = 0.2173 \text{ กรัม}$$

การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้

ต้องการเตรียม MoO_3 143.94 กรัม ต้องใช้สารตั้งต้น $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ 196.02 กรัม

ถ้าต้องการเตรียม MoO_3 0.2173 กรัม ต้องใช้สารตั้งต้น $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ 0.2959 กรัม

ต้องใช้สารตั้งต้นในการเตรียม $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ คือ 0.2959 กรัม

ภาคผนวก ข

การคำนวณผลการวิเคราะห์ และการเตรียมวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ข.1 การคำนวณการเตรียมวิเคราะห์เทคนิค ICP

การเตรียมสารละลาย ICP สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ Mo ในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ โดย Standard Mo ที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีความเข้มข้น 100 ppm (100 mg/1000ml) ตัวเร่งปฏิกิริยามี MoO_3 8% wt.

MoO_3	144 กรัม	มี Mo	95 กรัม
MoO_3	0.08 กรัม	มี Mo	0.0527 กรัม
Mo	0.0527 กรัม (53.30 mg)	ต้องใช้ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$	1 กรัม
Mo	100 mg/1000ml	ต้องใช้ $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$	18.77 กรัม

ต้องการเตรียมสารละลาย ICP ปริมาตร 100 ml

ดังนั้น ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.876 กรัม ละลายในสารละลาย H_2SO_4 และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

ข.2 การคำนวณผลการวิเคราะห์เทคนิค Pyridine adsorption

การวิเคราะห์นี้จะใช้เครื่อง GC ชนิดตัวตรวจวัด FID ในการวิเคราะห์ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 25 ml/min อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 50 kPa อุณหภูมิคอลัมน์ และตัวตรวจวัด 150°C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 ฉีดไพริดีนที่เข้าเครื่อง GC ครั้งละ 0.2 μl ทำการฉีดซ้ำจนกระทั่งสารตัวอย่างดูดซับไพริดีนจนอิ่มตัว จากนั้นจึงกำหนดให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟตำแหน่งที่ดูดซับไพริดีนได้ อิ่มตัวเป็นค่ามาตรฐาน แล้วนำค่าผลรวมของผลต่างระหว่างพื้นที่ใต้กราฟของตำแหน่งที่เกิดการดูดซับไพริดีนจนอิ่มตัวแล้ว มาทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์กับค่ามาตรฐาน

ปริมาณของไพริดีนที่ฉีดแต่ละเข็ม คัดจาก

$$\text{Amount of pyridine} = \frac{(\text{Density of pyridine} \times \text{Inject volume})}{\text{Mw of pyridine}}$$

ดังนั้น ปริมาณของไพริดีนที่ฉีดแต่ละเข็ม = 24.60 μmol

ภาคผนวก ค

การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

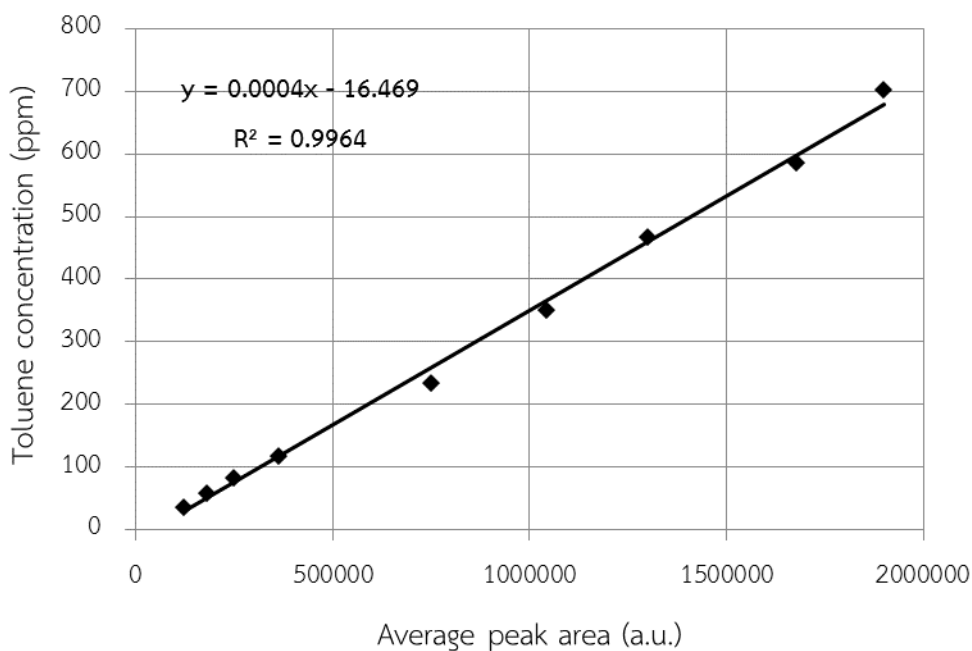
ค.1 กราฟมาตรฐานโทลูอิน

การสร้างกราฟมาตรฐานโทลูอินทำได้โดยเริ่มจากการเตรียม ใน volumetric flask เติมโทลูอินปริมาณ 0.1204g แล้วเติมเมทิลแอลกอฮอล์ลงไปเล็กน้อย เพื่อช่วยให้โทลูอินละลายในน้ำ จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำได้ตีสขึ้นกลั่นให้ได้ 100 ml ผลการคำนวณของโทลูอินที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงในตารางที่ ค.1 โดยความเข้มข้นของเบนซีน (ppm) คัดจาก

ตารางที่ ค.1 แสดงการคำนวณค่ากราฟมาตรฐานโทลูอิน

Toluene (g)	Volumn (ml)	C_{tt} (mol/ml)	Vt_{inj} (ml)	Mole total	N_T %	ppm
0.1204	250	5.2268E-06	0.0003	1.568E-09	0.0035124	35.1243
0.1204	250	5.2268E-06	0.0005	2.613E-09	0.005854	58.5405
0.1204	250	5.2268E-06	0.0007	3.659E-09	0.0081957	81.9567
0.1204	250	5.2268E-06	0.001	5.227E-09	0.0117081	117.081
0.1204	250	5.2268E-06	0.002	1.045E-08	0.0234162	234.162
0.1204	250	5.2268E-06	0.003	1.568E-08	0.0351243	351.243
0.1204	250	5.2268E-06	0.004	2.091E-08	0.0468324	468.324
0.1204	250	5.2268E-06	0.005	2.613E-08	0.0585405	585.405
0.1204	250	5.2268E-06	0.006	3.136E-08	0.0702486	702.486

นำค่าพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง GC นำมาพล็อตกับความเข้มข้นต่างๆของโทลูอิน



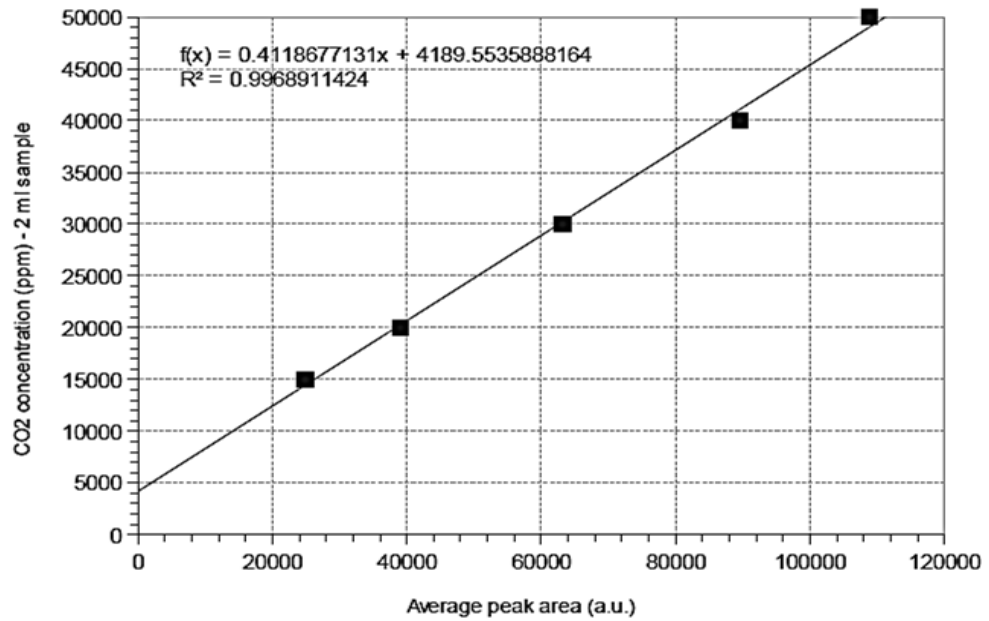
รูปที่ ค.1 แสดงกราฟ calibration curve toluene ความเข้มข้นระหว่าง 30-700 ppm

ค.2 กราฟมาตรฐานคาร์บอนไดออกไซด์

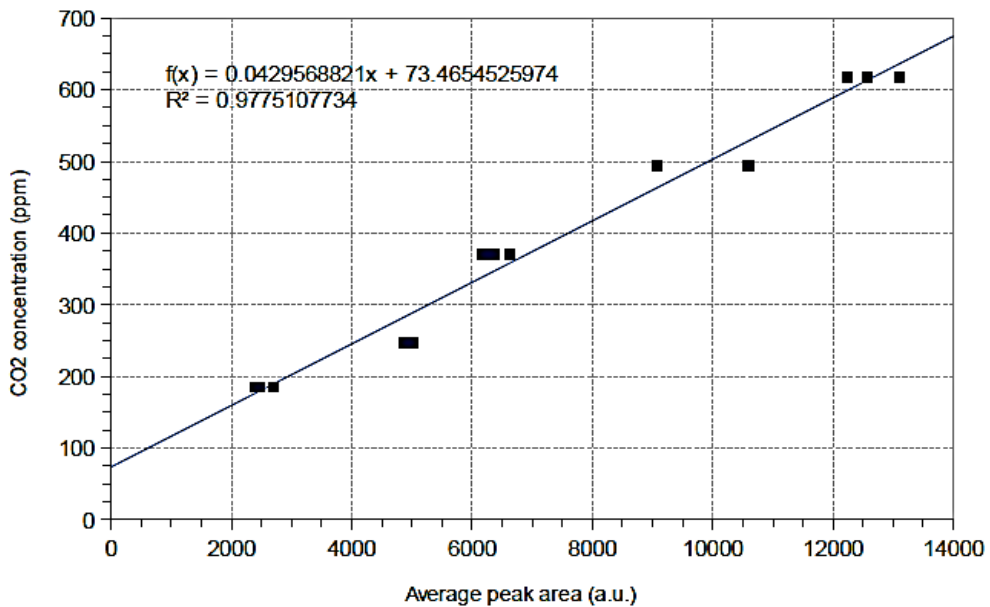
การทำ calibration curve ของคาร์บอนไดออกไซด์ ทำโดยการฉีดก๊าซ CO_2 (ความเข้มข้น 100%) ที่ปริมาตรต่าง ๆ โดยใช้เข็มขนาด 100 μl แล้วคำนวณว่าปริมาณ CO_2 ที่ฉีดไปเมื่อเทียบกับ กรณีสั่งด้วยเข็ม 2 ml จะเทียบความเข้มข้นเป็น ppm โดยค่าพื้นที่ใต้กราฟของ CO_2 ที่ช่วงความเข้มข้นสูง แสดงในตารางที่ ค.2 และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟ และ ความเข้มข้นของ CO_2 ที่ช่วงความเข้มข้นสูงและต่ำ แสดงในรูปที่ ค.2 และ ค.3 ตามลำดับ

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ CO_2 ที่ช่วงความเข้มข้นสูง

CO_2 concentration (ppm)	15000	20000	30000	40000	50000
Peak area (average)	26247	38387	62667	86947	111226

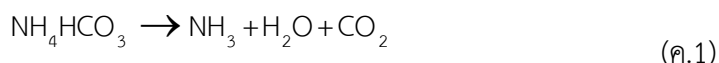


รูปที่ ค.2 Calibration curve ของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูง



รูปที่ ค.3 Calibration curve ของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ (180-620 ppm)

จากรูปที่ ค.2 เป็นการสร้าง calibration curve ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ ทำโดยการนำสารละลาย ammonium bicarbonate (NH_4HCO_3 M.W. 79.056) ความเข้มข้น 0.1mol/L ฉีดเข้าไปในคอลัมน์ GC ชนิดตัวตรวจวัด TCD ปริมาตร 0.3 – 1.0 μl เมื่อได้รับความร้อน (สูงกว่า 50°C) สารตั้งต้นจะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ ค.1 และผลการแสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ CO_2 ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แสดงในตารางที่ ค.3



ตารางที่ ค.3 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ CO_2 ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ

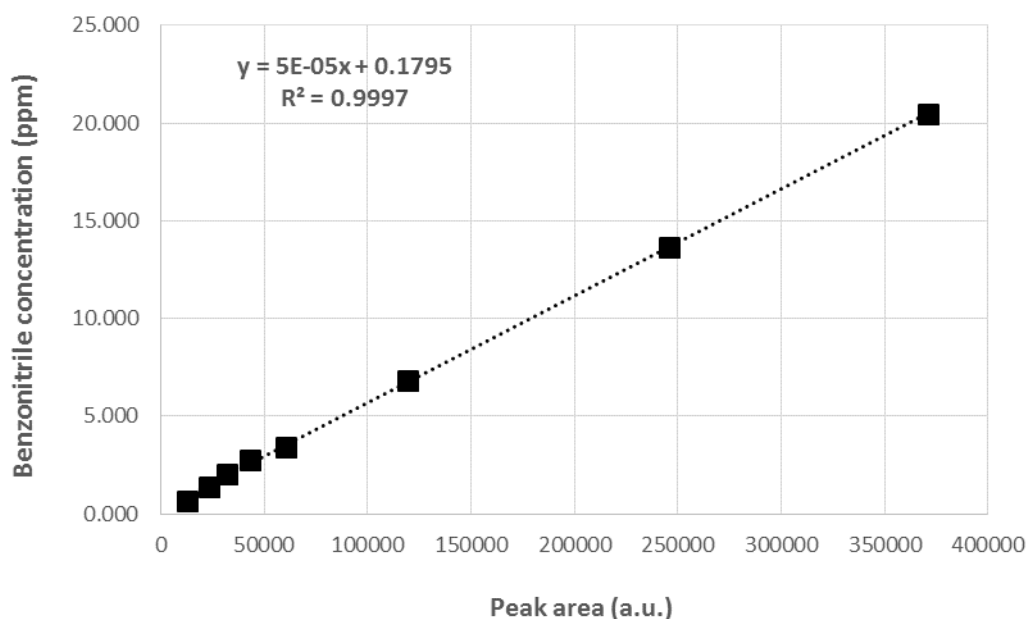
Peak area	CO_2 concentration (ppm)				
	180	245	370	490	620
1	2302	4520	6243	9041	12234
2	2311	4496	6375	10563	12602
3	2524	4489	6532	10684	13129
average	2379	4502	6383	10096	12655

ค.3 กราฟมาตรฐานเบนโซไนไตรล์ (Benzonitrile)

การสร้างกราฟมาตรฐานโทลูอินทำได้โดยเริ่มจากการเตรียม ใน volumetric flask เติมเบนโซไนไตรล์ ปริมาณ 0.0393g แล้วเติมกลั่นให้ได้ 100 ml ผลการคำนวณของเบนโซไนไตรล์ที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงในตารางที่ ค.3 โดยความเข้มข้นของโทลูอิน (ppm) คัดจาก

ตารางที่ ค.4 แสดงการคำนวณกราฟมาตรฐานเบนโซไนไตรล์

Benzonitrile (g)	Volumn (ml)	C_B (mol/ml)	VB_{inj} (ml)	Mole total	N_T %	ppm
0.0393	250	1.52444E-06	0.00002	3.04888E-11	6.83E-05	0.682948
0.0393	250	1.52444E-06	0.00004	6.09775E-11	0.000137	1.365896
0.0393	250	1.52444E-06	0.00006	9.14663E-11	0.000205	2.048844
0.0393	250	1.52444E-06	0.00008	1.21955E-10	0.000273	2.731792
0.0393	250	1.52444E-06	0.0001	1.52444E-10	0.000341	3.41474
0.0393	250	1.52444E-06	0.0002	3.04888E-10	0.000683	6.82948
0.0393	250	1.52444E-06	0.0004	6.09775E-10	0.001366	13.65896
0.0393	250	1.52444E-06	0.0006	9.14663E-10	0.002049	20.48844



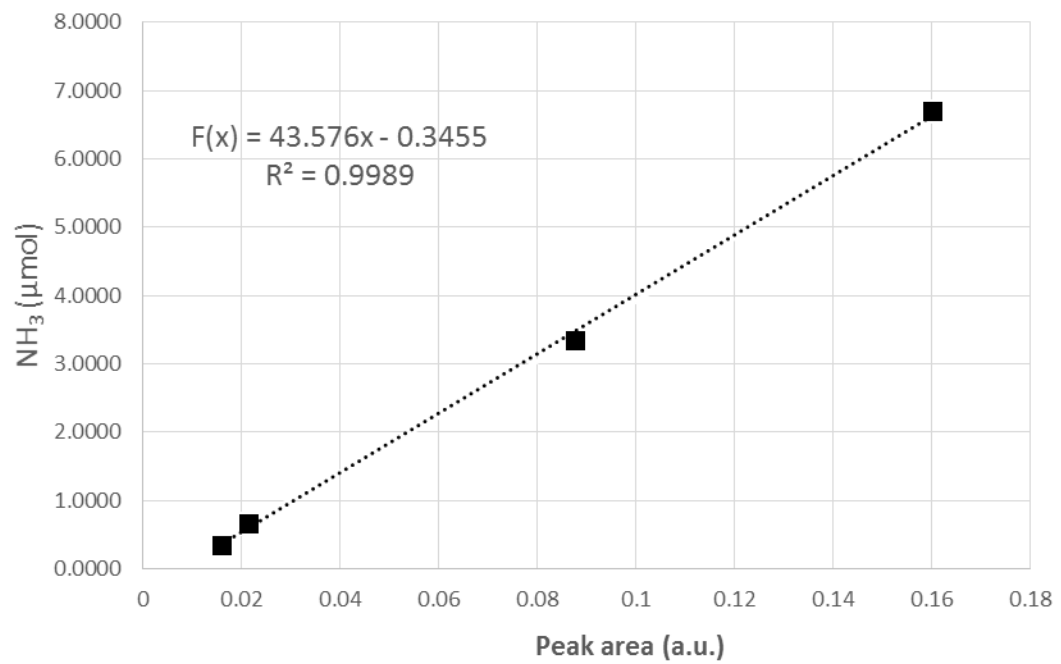
รูปที่ ค.4 Calibrate curve ของเบนโซไนไตรล์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ค.4 กราฟมาตรฐาน NH₃-TPD

กราฟ Calibration curve ของ NH₃ ใช้เพื่อหาปริมาณและความแรงของตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลการแสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟ และความเข้มข้นของ NH₃ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ ค.4 และกราฟพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟ และความเข้มข้นของ NH₃ แสดงในรูปที่ ค.4

ตารางที่ ค.5 แสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของ NH₃ และความเข้มข้นของ NH₃ ที่ปริมาตรต่างๆ

Peak area	NH ₃ Concentration (μmol)				
	0.2009	0.3348	0.6696	3.3482	6.6964
Volume (μl)	30	50	100	500	1000
Average area	0.014696	0.015901	0.021434	0.087758	0.160183

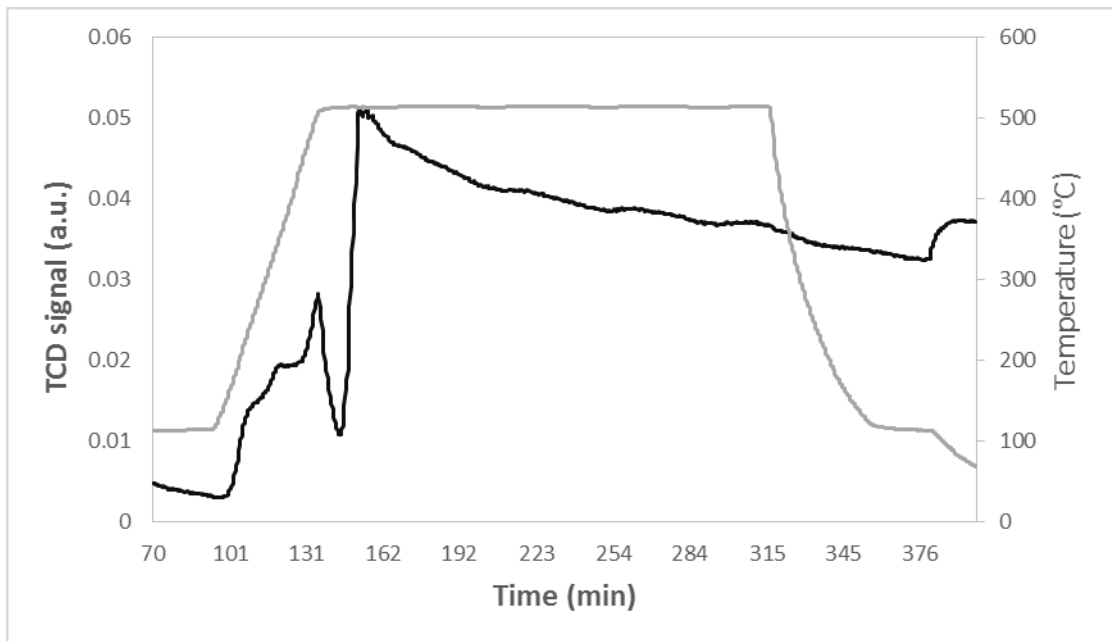


รูปที่ ค.5 Calibrate curve ของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

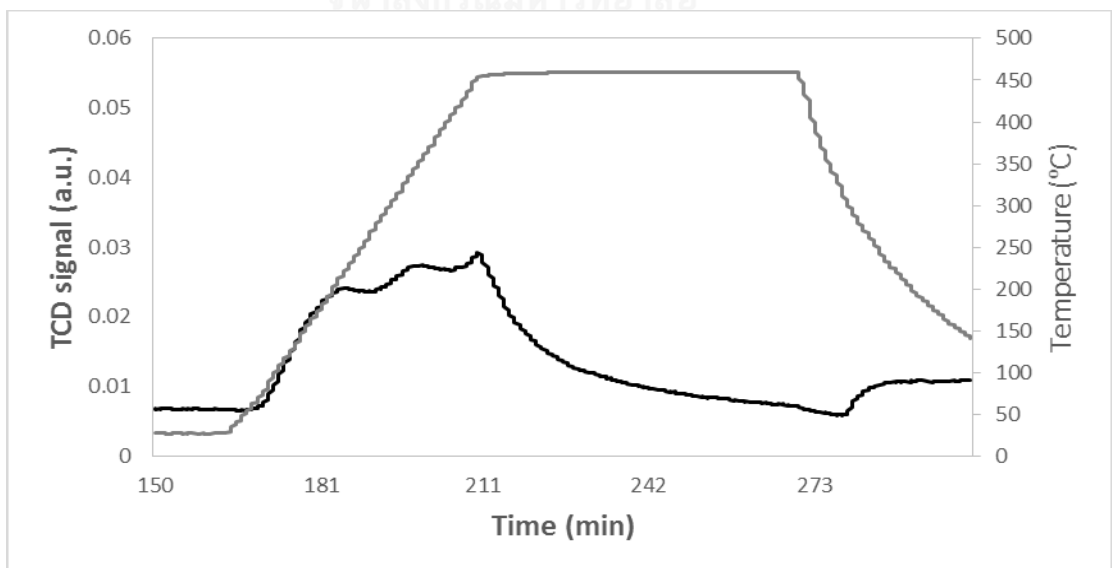


ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

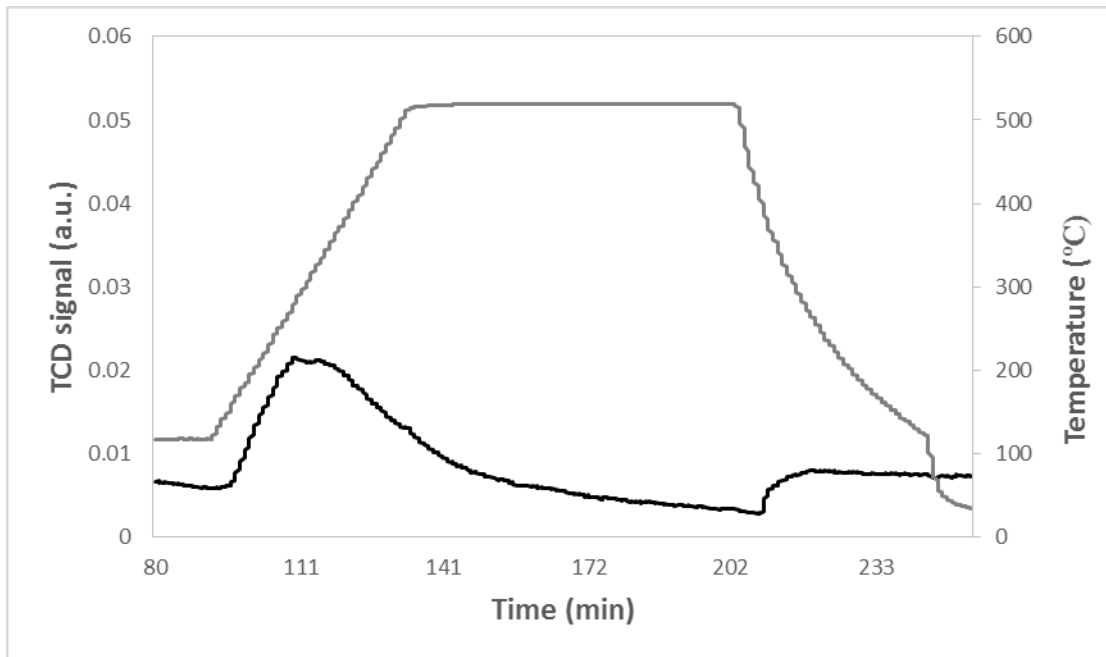
ง.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค NH_3 -TPD



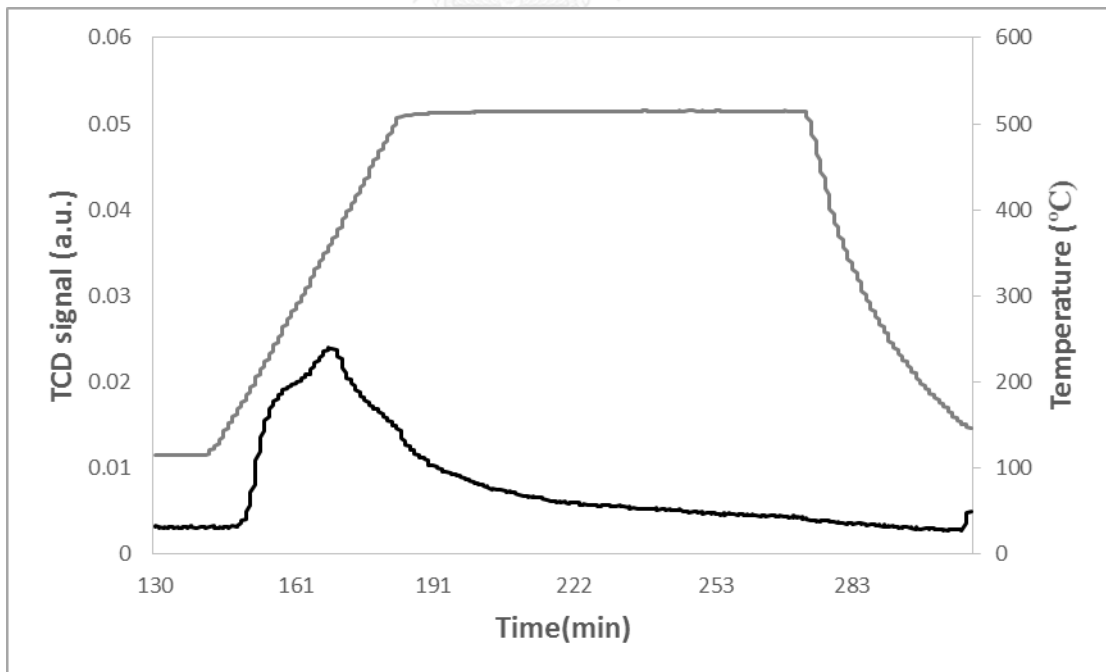
รูปที่ ง.1 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD



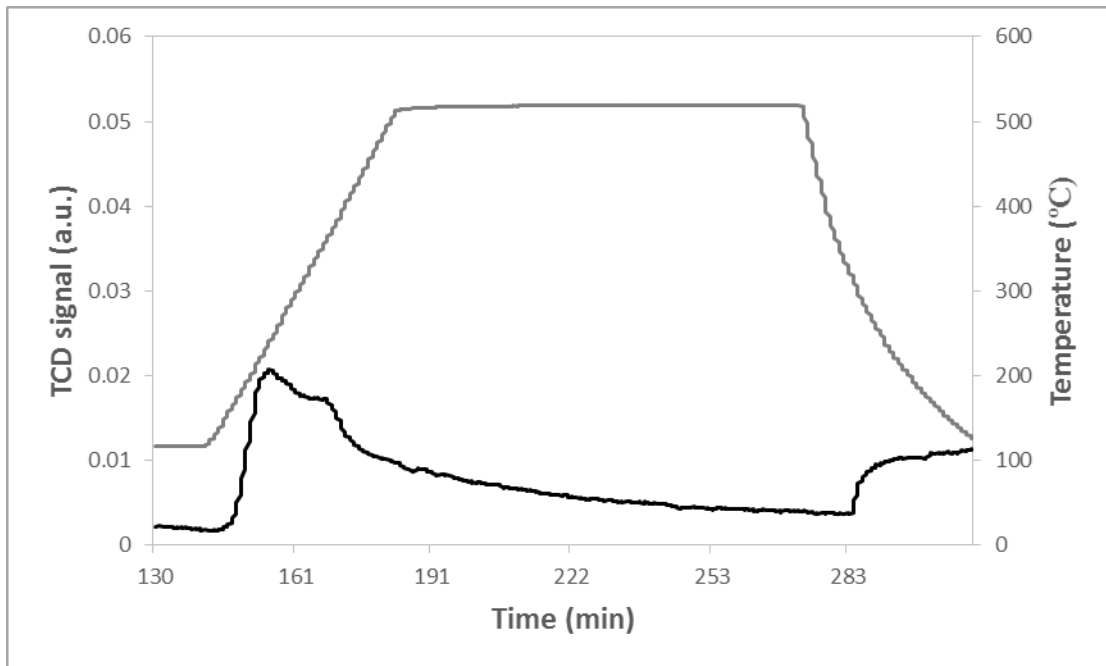
รูปที่ ง.2 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (0.2M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD



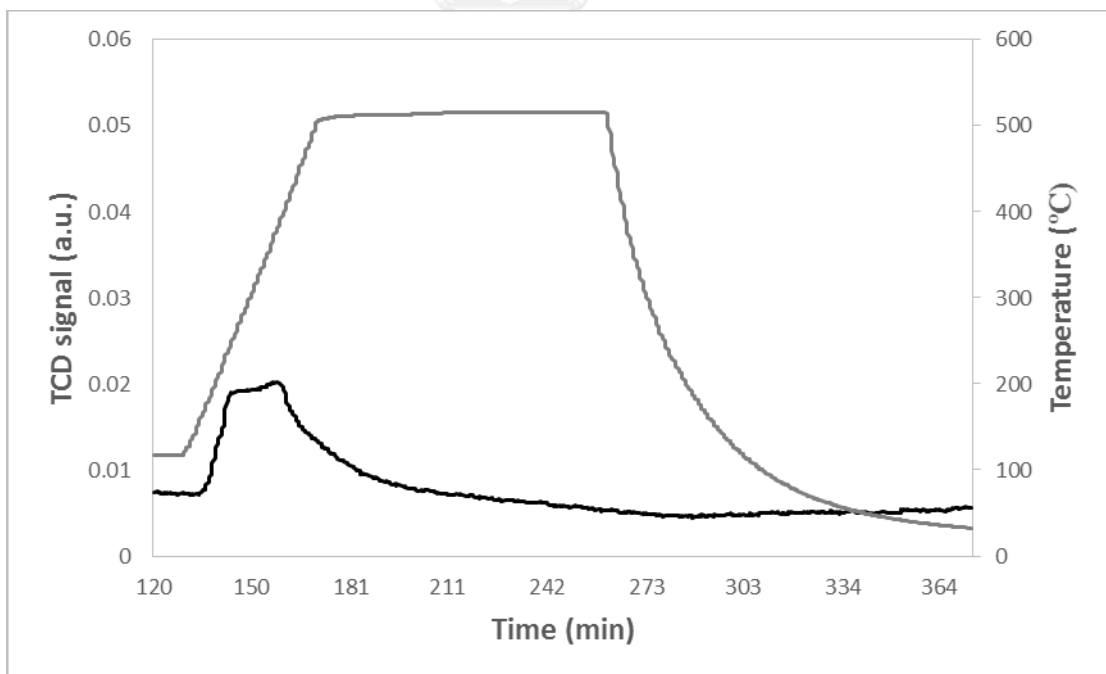
รูปที่ ๓.3 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0.5M) ด้วยเทคนิค NH₃-TPD



รูปที่ ๓.4 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0M) ด้วยเทคนิค NH₃-TPD

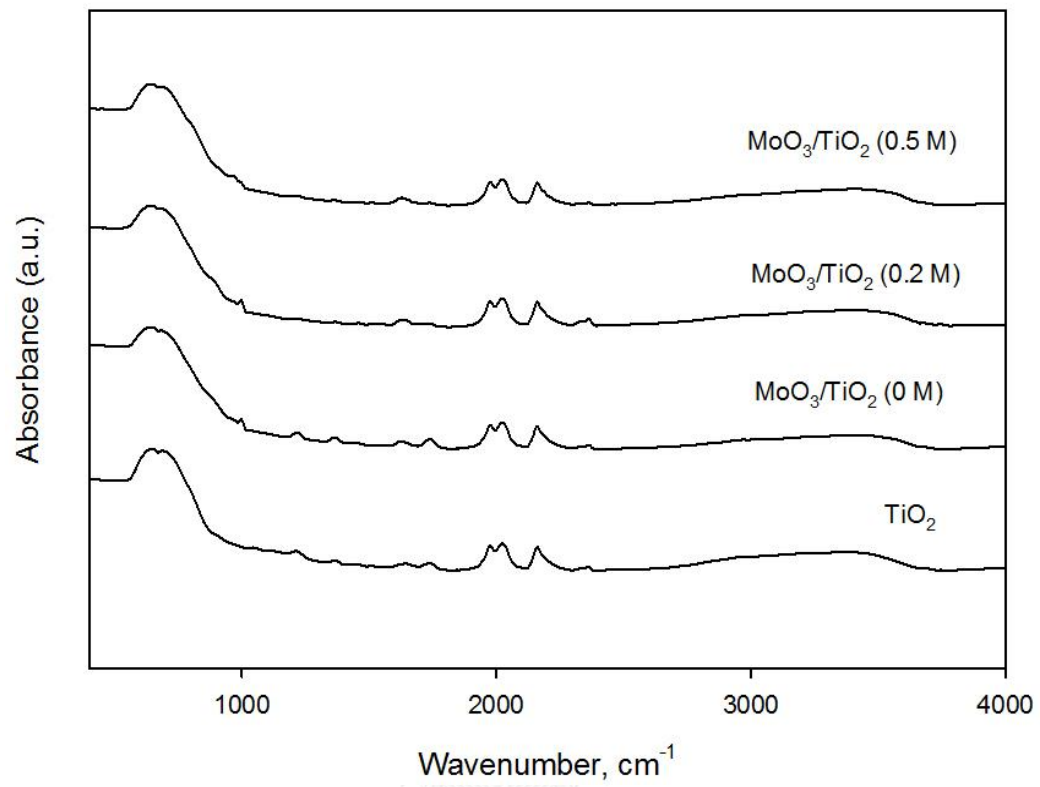


รูปที่ ๕.5 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.2M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD



รูปที่ ๕.6 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5M) ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD

ง.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค FTIR



รูปที่ ง.7 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวรองรับ และตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR

ภาคผนวก จ
ข้อมูลผลการทดลอง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (SCR) ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน (Toluene Oxidation) ปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์โทลูอีนร่วมกับปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง (ระบบรวม) โดยรายละเอียดข้อมูลอธิบายเป็นค่า %NO conversion %Toluene conversion และ %Toluene convert to CO₂ ตั้งแต่อุณหภูมิ 120-450°C โดยข้อมูลจะแสดงดัง ตารางที่ จ.1-จ.6

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0 M) ของแต่ละระบบ

Temp.	Reaction (%Conversion)					
	SCR	SCR (ปฏิกิริยา รวม)	Toluene oxidation	Toluene (ปฏิกิริยา รวม)	CO ₂ (oxidation)	CO ₂ (ปฏิกิริยา รวม)
120	0.00	0.00	0.50	2.52	0	0
150	5.51	13.34	3.71	4.74	0	0
200	13.40	30.76	5.76	5.17	0	0
250	17.41	37.32	7.24	11.45	0	0
300	20.32	35.37	17.03	22.87	0	0
350	2.47	32.61	39.23	44.88	15.18	19.84
400	-5.57	29.37	75.70	74.55	20.05	28.95
450	-5.82	28.88	79.57	78.29	25.51	31.23

ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0.2 M) ของแต่ละระบบ

Temp.	Reaction (%Conversion)					
	SCR	SCR (ปฏิกิริยา รวม)	Toluene oxidation	Toluene (ปฏิกิริยา รวม)	CO ₂ (oxidation)	CO ₂ (ปฏิกิริยา รวม)
120	0.00	0.00	2.08	2.90	0	0
150	5.31	16.61	4.53	4.39	0	0
200	34.46	32.52	6.30	8.01	0	0
250	37.50	38.55	9.21	11.93	0	0
300	37.60	40.39	16.37	23.27	0	0
350	29.26	42.51	38.25	40.54	17.32	21.77
400	26.18	33.93	74.71	74.96	22.65	31.95
450	25.17	29.82	85.48	79.17	29.2	32.46

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ (0.5 M) ของแต่ละระบบ

Temp.	Reaction (%Conversion)					
	SCR	SCR (ปฏิกิริยา รวม)	Toluene oxidation	Toluene (ปฏิกิริยา รวม)	CO ₂ (oxidation)	CO ₂ (ปฏิกิริยา รวม)
120	0.00	0.00	2.33	3.07	0	0
150	7.56	3.39	4.54	3.92	0	0
200	19.19	32.93	10.69	8.63	0	0
250	37.75	34.54	16.19	11.25	0	0
300	34.70	32.37	33.20	23.80	0	0
350	29.54	31.94	59.74	61.57	17.51	24.01
400	27.55	31.20	81.33	75.23	23.68	34.47
450	20.76	30.16	86.86	82.41	27.7	37.58

ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0 M) ของแต่ละระบบ

Temp.	Reaction (%Conversion)					
	SCR	SCR (ปฏิกิริยา รวม)	Toluene oxidation	Toluene (ปฏิกิริยา รวม)	CO ₂ (oxidation)	CO ₂ (ปฏิกิริยา รวม)
120	0.00	0.00	2.62	1.83	0	0
150	25.46	12.89	5.06	6.46	0	0
200	31.57	48.80	8.47	10.60	0	0
250	42.16	50.81	17.65	17.05	0	17.7
300	48.30	54.21	50.83	54.95	0	19.95
350	15.24	52.78	80.48	80.82	16.88	25.74
400	11.05	51.92	85.99	88.31	25.86	35.21
450	9.52	48.17	89.52	90.54	30.89	41.91

ตารางที่ จ.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา MoO₃/TiO₂ (0.2 M) ของแต่ละระบบ

Temp.	Reaction (%Conversion)					
	SCR	SCR (ปฏิกิริยา รวม)	Toluene oxidation	Toluene (ปฏิกิริยา รวม)	CO ₂ (oxidation)	CO ₂ (ปฏิกิริยา รวม)
120	0.00	0.00	2.62	1.83	0	0
150	37.64	18.46	5.06	6.46	0	0
200	45.26	49.73	8.47	10.60	0	0
250	63.52	55.84	17.65	17.05	0	15.63
300	71.53	59.16	50.83	54.95	15.78	20.1
350	51.10	56.34	80.48	80.82	20.2	26.81
400	35.00	55.13	85.99	88.31	27.58	38.45
450	24.43	53.65	89.52	90.54	34.56	44.11

ตารางที่ จ.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MoO}_3/\text{TiO}_2$ (0.5 M) ของแต่ละระบบ

Temp.	Reaction (%Conversion)					
	SCR	SCR (ปฏิกิริยา รวม)	Toluene oxidation	Toluene (ปฏิกิริยา รวม)	CO ₂ (oxidation)	CO ₂ (ปฏิกิริยา รวม)
120	0.00	0.00	5.08	1.51	0	0
150	20.21	6.21	5.76	7.03	0	0
200	31.83	28.73	8.69	10.91	0	0
250	35.14	53.28	19.32	31.67	0	24.31
300	48.76	55.08	58.70	70.99	24.08	29.04
350	35.21	48.81	83.06	85.52	26.18	31.6
400	14.72	42.97	88.52	90.06	38.5	48.55
450	10.02	30.45	91.05	94.54	63.78	53.5

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนุวัฒน์ ยะสาตายน เกิดวันที่ 1 กันยายน 2536 ภูมิลำเนาอยู่ที่ 125 หมู่ 10 ต.ป่าแฝก อ.แม่ใจ จ.พะเยา เคยศึกษาในระดับชั้น ระดับมัธยมต้นที่โรงเรียนวัฒนศึกษา จ.เชียงราย ระดับมัธยมปลายที่โรงเรียนดำรงราษฎร์สงเคราะห์ จ.เชียงราย และได้สำเร็จศึกษาในระดับปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยศิลปากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมเคมี ในปี พ.ศ. 2558 จากนั้นได้เข้ารับการศึกษาคือต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2558 -2560

