

การประเมินค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินบนตัวเร่งปฏิกิริยา  
 $V_2O_5/TiO_2$  มาใช้ออกแบบสำหรับปฏิกิริยา SCR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Evaluation of Kinetics Parameters for Toluene Oxidation over  $V_2O_5/TiO_2$  Catalysts  
Designed for Selective Catalytic Reduction



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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โพลีอินบนตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ มาใช้ออกแบบสำหรับปฏิกิริยา SCR
โดย	น.ส.วราภรณ์ คิดการ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มงคลศรี

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพิทักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มงคลศรี)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณมานนท์)

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

วราภรณ์ คีตการ : การประเมินค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  มาใช้ออกแบบสำหรับปฏิกิริยา SCR. (Evaluation of Kinetics Parameters for Toluene Oxidation over  $V_2O_5/TiO_2$  Catalysts Designed for Selective Catalytic Reduction) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ธราธร มงคลศรี

งานวิจัยนี้ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันในการกำจัด โทลูอิน โดยตัวรองรับไทเทเนียได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันที่มีความเข้มข้น 0, 0.2 และ 0.5 M ตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ SEM-EDX, Nitrogen Physisorption, XRD และ  $NH_3$ -TPD ทำการทดสอบความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินที่ความเข้มข้นของโทลูอิน 300 - 400 ppm และความเข้มข้นของ  $O_2$  3, 12 และ 21 %vol ในช่วงอุณหภูมิ 150-350 °C จากการศึกษาพบว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นของ  $O_2$  เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Conversion ของการออกซิไดซ์โทลูอินดีขึ้นเล็กน้อย และตรวจพบ  $CO_2$  ในปริมาณที่ต่ำแสดงว่าโทลูอินอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดสูง จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  พบว่าในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน เมื่อความเข้มข้นของ  $O_2$  เพิ่มขึ้นค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าลดลง โดยค่าพลังงานกระตุ้นที่ความเข้มข้น  $O_2$  3 %vol อยู่ในช่วง 44-49 kJ/mol ที่ความเข้มข้น  $O_2$  12 %vol อยู่ในช่วง 45-49 kJ/mol และที่ความเข้มข้น  $O_2$  21 %vol อยู่ในช่วง 39-45 kJ/mol เมื่อเปรียบเทียบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินในสถานะที่มี NO ร่วมด้วยนั้น พบว่ามีปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นร่วมด้วย โดยจะเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นสองช่วงอย่างเด่นชัด คือ ช่วงอุณหภูมิ 150-200 °C มีพลังงานกระตุ้นที่ต่ำและช่วงอุณหภูมิ 250 °C ขึ้นไป ที่มีพลังงานกระตุ้น 45-50 kJ/mol และตรวจพบ  $CO_2$  อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่า NO มีบทบาทในการเปลี่ยนสารมัธยันต์ที่เกิดจากการสลายตัวของโทลูอินให้เปลี่ยนไปเป็น  $CO_2$

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170262321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD:

Waraporn Kidkarn : Evaluation of Kinetics Parameters for Toluene Oxidation over  $V_2O_5/TiO_2$  Catalysts Designed for Selective Catalytic Reduction. Advisor: Assoc. Prof. THARATHON MONGKHONSI, Ph.D.

This research tried to determine the kinetics parameters of the oxidation of Toluene over  $V_2O_5/TiO_2$  modified with  $H_2SO_4$ , The Titania support was modified with aqueous solutions of  $H_2SO_4$  having concentrations 0, 0.2 and 0.5 M. The catalysts were prepared using the conventional wet impregnation method. The obtained  $V_2O_5/TiO_2$  catalysts were characterized using SEM-EDX, Nitrogen Physisorption, XRD and  $NH_3$ -TPD techniques. The Toluene oxidation reaction was carried out in the temperature range 150-350°C, Toluene concentrations 300-400 ppm and  $O_2$  concentrations 3, 12 and 21%. The experimental results showed that the conversion of toluene increased with the increase in  $O_2$  concentration. The activation energy was found to be in the ranges 44-49 kJ/mol for 3%  $O_2$ , 45-49 kJ/mol for 12%  $O_2$  and 39-45 kJ/mol for 21%  $O_2$ . When compared with a previously reported result carried out the oxidation of Toluene with the presence of NO found that there was another reaction pathway of the disappearance of toluene. This pathway which appeared in the temperature range 150-200°C had lower activation energy than the reaction which appeared in the temperature above 250°C. In addition, the significant amounts of  $CO_2$  formed with the presence of NO suggested that NO played some important role for the conversion of intermediates formed from the oxidation of Toluene to  $CO_2$ .

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนในด้านการเรียนและขอบคุณ รศ.ดร.ดรธราธร มงคลศรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่คอยให้ความรู้คำ แนะนำรวมถึงการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์ให้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย ศ.ดร.อาทิวรรณ โชติพิทักษ์ เป็นประธานกรรมการการสอบ ผศ.ดร.ณัฐพร โทณานนท์ เป็นกรรมการการสอบและ ผศ.ดร.สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ เป็นกรรมการภายนอก ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนรวมถึงคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

วราภรณ์ คิตการ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 โครงสร้างของโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 สารอินทรีย์ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds : VOCs) .....	4
2.2 โทลูอีน (Toluene).....	4
2.3 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน (Toluene oxidation).....	4
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ .....	5
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.6 สรุปบททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	14
บทที่ 3 แบบจำลองจลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ .....	15
3.1 แบบจำลองจลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยา .....	15
3.1.1 แบบจำลอง Langmuir-Hinshelwood.....	15

3.1.2 แบบจำลอง Eley-Rideal .....	16
3.1.3 แบบจำลอง REDOX.....	19
บทที่ 4 วิธีการทดลอง .....	21
4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
4.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
4.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาอานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> ).....	21
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
4.2.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิค Nitrogen Physisorption.....	22
4.3 การทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน.....	24
4.3.1 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดสอบ .....	24
4.3.2 ระเบียบวิธีการทำการทดสอบ.....	24
4.3.3 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน .....	25
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	27
5.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	27
5.1.1 วิเคราะห์หาปริมาณของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา.....	27
5.1.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	29
5.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	30
5.1.4 การวัดปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	31
5.2 การทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอีน .....	32
5.3 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน.....	37
5.4 การเปรียบเทียบผลพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีนและการ ออกซิไดซ์โทลูอีนร่วมกับระบบ SCR .....	43
5.5 สรุปผลการทดลอง .....	48



บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	49
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	49
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	54
ภาคผนวก ข การคำนวณปริมาณโลหะออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM-EDX.....	55
ภาคผนวก ค การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve).....	56
ค.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับการสร้าง Calibration curve ของโทลูอีน.....	56
ค.2 กราฟมาตรฐานโทลูอีน (calibration curve of toluene).....	56
ภาคผนวก ง การคำนวณความเป็นกรดทั้งหมดบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> ด้วยเทคนิค NH <sub>3</sub> -TPD.....	59
ง.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค NH <sub>3</sub> -TPD.....	59
ง.2 ข้อมูล NH <sub>3</sub> -TPD pattern ของตัวรองรับ TiO <sub>2</sub> (0 M).....	60
ง.3 ข้อมูล NH <sub>3</sub> -TPD pattern ของตัวรองรับ TiO <sub>2</sub> (0.2 M).....	60
ง.4 ข้อมูล NH <sub>3</sub> -TPD pattern ของตัวรองรับ TiO <sub>2</sub> (0.5 M).....	61
ง.5 ข้อมูล NH <sub>3</sub> -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> (0 M).....	61
ง.6 ข้อมูล NH <sub>3</sub> -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> (0.2 M).....	62
ง.7 ข้อมูล NH <sub>3</sub> -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> (0.5 M).....	62
ภาคผนวก จ การคำนวณ %Toluene conversion.....	63
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> .....	64
ภาคผนวก ช การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	68

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยได้ (VOCs) โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน .....	8
ตารางที่ 2.2 ผลของความเข้มข้น $O_2$ ต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสาร VOCs..	12
ตารางที่ 2.3 ศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน .....	13
ตารางที่ 4.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ .....	21
ตารางที่ 4.2 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา .....	24
ตารางที่ 5.1 ปริมาณโลหะออกไซด์ $V_2O_5$ บนตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ .....	28
ตารางที่ 5.2 พื้นที่ผิวของตัวรองรับ $TiO_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ .....	30
ตารางที่ 5.3 ปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	31
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน .....	42
ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของการออกซิไดซ์โทลูอินและ การออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	47
ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ V ด้วยเทคนิค SEM-EDX .....	55
ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณของโทลูอินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ppm) .....	57
ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M).....	64
ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M).....	64
ตารางที่ ฉ.3 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M).....	65
ตารางที่ ฉ.4 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ในปฏิกิริยา การออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	65
ตารางที่ ช.1 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M).....	66

ตารางที่ ซ.2 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา	
$V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M).....	66
ตารางที่ ซ.3 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา	
$V_2O_5/TiO_2$ (0.5M).....	67
ตารางที่ ซ.4 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา	
$V_2O_5/TiO_2$ ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR .....	67



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในกรณีของ Langmuir-Hinshelwood.....	16
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในกรณีของ Eley-Rideal .....	18
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในกรณี REDOX .....	20
รูปที่ 4.1 แผนผังการทดสอบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน .....	26
รูปที่ 5.1 ภาพถ่าย SEM-EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ .....	29
รูปที่ 5.2 รูปแบบผลึกตัวรองรับ $TiO_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ด้วยเทคนิค XRD .....	30
รูปที่ 5.3 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ (ก) และได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน (ข) .....	31
รูปที่ 5.4 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินที่ความเข้มข้น $O_2$ 3 %vol ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน .....	33
รูปที่ 5.5 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินที่ความเข้มข้น $O_2$ 12 %vol ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน .....	33
รูปที่ 5.6 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินที่ความเข้มข้น $O_2$ 21 %vol ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน .....	34
รูปที่ 5.7 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M) ที่ความเข้มข้น $O_2$ 3, 12 และ 21 %vol.....	35
รูปที่ 5.8 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M) ที่ความเข้มข้น $O_2$ 3, 12 และ 21 %vol.....	35

รูปที่ 5.9 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 3, 12 และ 21 %vol.....	36
รูปที่ 5.10 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 3 %vol .....	37
รูปที่ 5.11 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 12 %vol.....	38
รูปที่ 5.12 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 21 %vol.....	38
รูปที่ 5.13 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 3 %vol .....	39
รูปที่ 5.14 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 12 %vol.....	39
รูปที่ 5.15 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 21 %vol .....	40
รูปที่ 5.16 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 3 %vol.....	40
รูปที่ 5.17 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M) ที่	
ความเข้มข้น $O_2$ 12 %vol.....	41
รูปที่ 5.18 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 21 %vol.....	41
รูปที่ 5.19 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	43
รูปที่ 5.20 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	
ที่ความเข้มข้น $O_2$ 15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	44

รูปที่ 5.21 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M) ที่ความเข้มข้น $O_2$ 15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	44
รูปที่ 5.22 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M) ที่ $O_2$ 15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	46
รูปที่ 5.23 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M) ที่ $O_2$ 15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	46
รูปที่ 5.24 ค่า $\ln(k)$ และ $(1/T)$ ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M) ที่ $O_2$ 15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR.....	47
รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานของโทลูอินที่มีความเข้มข้นในช่วง 30-1200 ppm .....	58
รูปที่ ง.1 กราฟ Calibration curve ของแอมโมเนีย .....	59
รูปที่ ง.2 กราฟ $NH_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ (0M).....	60
รูปที่ ง.3 กราฟ $NH_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ (0.2 M) .....	60
รูปที่ ง.4 กราฟ $NH_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ (0.5 M) .....	61
รูปที่ ง.5 กราฟ $NH_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0 M).....	61
รูปที่ ง.6 กราฟ $NH_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M).....	62
รูปที่ ง.7 กราฟ $NH_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M).....	62

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหามลพิษทางอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มาจากกระบวนการผลิต เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง ทำให้เกิดควันดำ ฝุ่นละออง และแก๊สเสียต่าง ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์รวมถึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

โพลูอิน เป็นหนึ่งในแก๊สเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสี กาว เรซิน ทินเนอร์ หรือสารทำความสะอาด โพลูอินที่เป็นสารอินทรีย์ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds: VOCs) สามารถระเหยเป็นไอและติดไฟได้ที่มีความดันอากาศและอุณหภูมิปกติ ถ้าเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ จะเป็นอันตรายต่อระบบสมองและประสาท หากโดนผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคือง [1] ซึ่งโพลูอินจากแก๊สปล่อยทิ้งหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการนั้น ยังมีปริมาณความเข้มข้นที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานกำหนด จึงจำเป็นต้องกำจัดหรือลดปริมาณความเข้มข้นของโพลูอินลง

เนื่องจากโพลูอินที่อยู่ในแก๊สปล่อยทิ้งนั้นมีความเข้มข้นและอุณหภูมิที่ต่ำ หากจะทำการกำจัดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิไดซ์นั้นจะต้องทำให้แก๊สปล่อยทิ้งมีอุณหภูมิสูงถึงช่วงที่ตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิไดซ์ทำงานได้ดีก่อน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง อีกแนวทางที่มีการทำคือการส่งแก๊สปล่อยทิ้งไปเผาแล้วกำจัด VOCs ด้วยระบบออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ด้วยระบบปฏิกิริยาการรีดักชันแบบเจาะจงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Selective catalytic reduction หรือ SCR) อยู่แล้ว จึงเป็นวิธีที่เหมาะสม อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายและลดความยุ่งยากในการปฏิบัติงานอีกด้วย [2]

นอกจากนี้ระบบ SCR ดังกล่าวยังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ ( $V_2O_5$ ) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดซึ่งสามารถออกซิไดซ์แบบเลือกเกิดได้ดี [3] จึงมีการทดลองนำมาใช้ในการออกซิไดซ์โพลูอินไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และยังเพิ่มความว่องไวโดยการกระจายตัวบนตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ , P25) ซึ่งถูกปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน [4] จากผลการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้าพบว่ามีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $V_2O_5/TiO_2$ ) ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โพลูอิน ซึ่งสามารถออกซิไดซ์โพลูอินได้ดี แต่ยังไม่มีการพิจารณาถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาและไม่มีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองการทำปฏิกิริยาดังกล่าวเพื่อศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา

อีกทั้งยังมีความสำคัญในการใช้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อีกด้วย โดยทำการทดสอบปฏิกิริยาดังกล่าวในสถานะที่มีความเข้มข้น  $O_2$  อยู่ในช่วง 3 %vol (ปริมาณ  $O_2$  ในการเผาไหม้ที่มีอากาศส่วนเกินน้อย) ถึง 21%vol (ปริมาณ  $O_2$  ในอากาศ) เพื่อศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่มีผลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ทางจลศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ออกแบบมาสำหรับปฏิกิริยา SCR

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน โดยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation method) โดยให้มีปริมาณ  $V_2O_5$  ประมาณ 4 %wt. อยู่บนตัวรองรับไทเทเนียม ( $TiO_2$ , P25) โดยใช้สารละลายกรดกำมะถันความเข้มข้น 0 M, 0.2 M และ 0.5 M ในอัตราส่วนสารละลายกรดกำมะถัน 4 ml ต่อตัวรองรับ  $TiO_2$  3 g

### 1.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค

1.3.2.1 Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Analysis (SEM-EDX) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.2.2 Nitrogen Physisorption เพื่อหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.3.3 X-ray Diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.3.4  $NH_3$  Temperature Programmed Desorption ( $NH_3$ -TPD) เพื่อวัดปริมาณความเป็นกรดบนพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

### 1.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน ในช่วงอุณหภูมิ 150-350 °C ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งอุณหภูมิคงที่ แก๊สผสมมีอัตราไหลรวม 200 ml/min (ไม่รวมไอน้ำ) ประกอบด้วย โทลูอิน 300-400 ppm,  $O_2$  3-21 %vol, ส่วนที่เหลือเป็น  $N_2$  หลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอิน ทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของโทลูอินด้านขาเข้าและขาออกของเครื่องปฏิกรณ์



### 1.3.4 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน

การหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ สำหรับปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน ทำโดยใช้สมมติฐานที่ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งอุณหภูมิคงที่ (Isothermal fixed-bed reactor) และเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากความเข้มข้นของโทลูอินต่ำกว่าความเข้มข้นของ  $O_2$  มาก ดังนั้นความเข้มข้นของ  $O_2$  จึงให้เป็นค่าคงที่

## 1.4 โครงสร้างของโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอ

โครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

- บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย
- บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 แบบจำลองจลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์
- บทที่ 4 วิธีการทดลอง
- บทที่ 5 ผลการทดลอง
- บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
- ภาคผนวก ประกอบด้วยตัวอย่างการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การคำนวณปริมาณโลหะออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM-EDX การคำนวณความเป็นกรดทั้งหมดบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค  $NH_3$ -TPD รวมทั้งตารางผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยา

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารอินทรีย์ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds : VOCs)

สารอินทรีย์ระเหยได้ คือ สารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีไฮโดรเจน ออกซิเจน ฟลูออไรด์ คลอไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจนประกอบกัน สารเหล่านี้อาจเป็นสารกลุ่มอะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) รวมถึงสารที่มีกลุ่มคาร์บอนิล (อัลดีไฮด์ คีโตน) และกลุ่มแอลกอฮอล์ที่สามารถระเหยกลายเป็นไอหรือแก๊สได้ สาร VOCs ในบรรยากาศอาจเกิดจากผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงฟอสซิล หรือเกิดจากการปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการของภาคอุตสาหกรรมผลิต ตัวอย่างสาร VOCs เช่น เบนซีน ไซลีน สไตรีน พอร์มัลดีไฮด์ เพอร์คลอโรเอทิลีน และโทลูอิน เป็นต้น [5]

#### 2.2 โทลูอิน (Toluene)

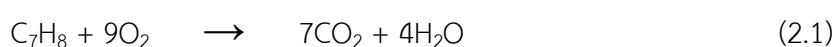
โทลูอิน หรือ เมทิลเบนซีน มีสูตรเคมี  $C_7H_8$  ( $C_6H_5CH_3$ ) เป็นสารอินทรีย์ระเหยได้ จัดอยู่ในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbons) เป็นของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ ไม่มีสี ระเหยเป็นไอและติดไฟได้ด้วยความดันบรรยากาศและอุณหภูมิปกติ มีจุดเดือด  $110.6^{\circ}C$  และจุดหลอมเหลว  $-93^{\circ}C$  นิยมใช้เป็นสารทำละลายในอุตสาหกรรมสี กาว เรซิน ทินเนอร์ สารทำความสะอาด และยังเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารเคมีอื่น ๆ โทลูอินเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ เป็นอันตรายต่อระบบสมองและประสาทส่วนกลาง เกิดอาการเวียนศีรษะ คลื่นไส้ และการดูดซึมผ่านผิวหนังทำให้เกิดการระคายเคือง โดยในประเทศไทยได้กำหนดค่ามาตรฐานในการปล่อยโทลูอินออกสู่บรรยากาศเฉลี่ยที่ยอมรับได้ คือ 200 ppm [6]

#### 2.3 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน (Toluene oxidation)

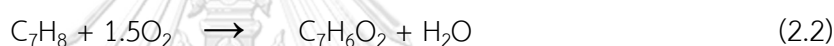
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และเรียกสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนว่า ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน มักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน [7]

ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน เป็นปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เช่นเดียวกับอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนทั่วไป แต่วงอะโรมาติกมีการแทนที่ด้วยหมู่เมทิล (Methyl group:  $-\text{CH}_3$ ) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยากว่าวงแหวน ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินจึงสามารถเกิดได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ (Total oxidation) และปฏิกิริยาการออกซิไดซ์บางส่วน (Partial oxidation)

ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์เป็นปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินกับออกซิเจนโดยการออกซิไดซ์โทลูอินที่ตำแหน่งวงแหวน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2.1



ส่วนปฏิกิริยาการออกซิไดซ์บางส่วนนั้น โทลูอินจะถูกออกซิไดซ์ที่ตำแหน่งหมู่เมทิล ( $-\text{CH}_3$ ) เนื่องจากตรงตำแหน่งหมู่เมทิลมีความว่องไวมากกว่าตำแหน่งวงแหวนของสารอะโรมาติก การออกซิไดซ์ที่ตำแหน่งหมู่เมทิลนั้นจะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบออกซิจีเนต (Oxygenates Compound) เช่น กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) และน้ำ [8] ดังในสมการที่ 2.2



## 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มักนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอได้ง่ายมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภทคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ (Transition metals based oxide) เช่น Mo, W หรือ V เป็นต้น และตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะมีตระกูล (Noble metals based) เช่น Pt, Pd หรือ Rh เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะมีตระกูลเหล่านี้สามารถกำจัดสารประกอบอะโรมาติกได้ดีกว่า แม้ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากมีราคาสูง และไม่เหมาะสมกับบรรยากาศที่มีออกซิเจนเข้มข้นสูง ดังนั้นในงานวิจัยที่ศึกษาในสถานะที่มีออกซิเจนเข้มข้นสูง จึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์มากกว่า [9]

ตัวเร่งปฏิกิริยาวาเนเดียมออกไซด์ ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดไนโตรเจนออกไซด์ในระบบ SCR [10] เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดซึ่งสามารถออกซิไดซ์แบบเลือกเกิดได้ดีและยังทนต่อ  $\text{SO}_2$  ได้ อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนต่อ HCl และ  $\text{Cl}_2$  อีกด้วย [11] ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{V}_2\text{O}_5$  จึงมีการนำมาใช้ในการออกซิไดซ์  $\text{NO}_x$  หรือ สาร VOCs

ในการเกิดปฏิกิริยานั้น สารตั้งต้นจะเกิดการดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโลหะออกไซด์การดูดซับนี้จะเกิดที่ตำแหน่งที่เป็นไอออนที่อยู่บนพื้นผิวบนสุดเท่านั้น ซึ่งจำนวนไอออนที่จะเกิดปฏิกิริยาจะน้อยมากถ้าเทียบกับจำนวนไอออนของโลหะออกไซด์ทั้งหมด จึงต้องมีการเพิ่มพื้นที่ผิวของโลหะออกไซด์ โดยการให้โลหะออกไซด์ไปเกาะกระจายตัวอยู่บน

ตัวรองรับ (Support) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสูง ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของโลหะ ออกไซด์ให้มากขึ้น

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $\text{TiO}_2$ ) ถูกนำมาใช้เป็นตัวรองรับในหลาย กระบวนการเนื่องจากมีเสถียรภาพสูง ไม่มีพิษ และยังทนต่อแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) จึงได้มีการนำไปเป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในบรรยากาศที่มีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์รวมอยู่ โดยปกติไททาเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนีย ( $\text{P25}$ ) มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาหรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้อนาเทส ป็นตัวรองรับควร หลีกเลี่ยงกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้าง ผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูงยกตัวอย่างเช่น การเผาตัวรองรับ  $\text{TiO}_2$  ในอากาศที่อุณหภูมิเกินกว่า  $550^\circ\text{C}$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากอนาเทสไปเป็นรูไทล์ได้

เทคนิคการเคลือบฝัง เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิยมใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปเทคนิค การเคลือบฝังบนตัวรองรับมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ โดยใช้ปริมาณของสารละลายเทียบกับปริมาณของรู พรุนของตัวรองรับ แบบแรกคือ การเคลือบฝังแบบแห้ง (Dry impregnation), การเคลือบฝังแบบ เปียกพอตื้นรูพรุน (Incipient wetness) และการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) การ เคลือบฝังแบบแห้งและการเคลือบฝังแบบเปียกพอตื้นรูพรุนนั้น เหมาะแก่การเติมโลหะที่มีราคาสูง เช่น Pt Pd เนื่องจากโลหะที่เติมลงไปบนตัวรองรับที่อยู่ในสารละลาย จะสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัว รองรับได้เกือบทั้งหมด เหลืออยู่ในภาชนะน้อย แต่ทั้ง 2 วิธีมีข้อเสียในเรื่องของความสามารถในการ ละลายของเกลือโลหะ หากเกลือโลหะนั้นมีความสามารถในการละลายต่ำ จะไม่สามารถละลายเกลือ โลหะได้หมดภายในครั้งเดียว อาจต้องทำการเคลือบฝังหลายครั้ง ซึ่งการเตรียมในลักษณะนี้มีความ ยุ่งยากและใช้เวลานาน จึงมักจะเลือกใช้วิธีเคลือบฝังแบบเปียกเนื่องจากเตรียมได้ง่ายกว่า และยังสามารถปรับปริมาตรของตัวทำละลายให้เหมาะสมกับค่าการละลายของเกลือโลหะที่ต้องการเติมได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่คือ โลหะตกค้างอยู่บนผิวภาชนะ ไม่ได้เข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวรองรับ ดังนั้นจึงต้อง เตรียมปริมาณของโลหะมากกว่าปริมาณของโลหะที่ต้องการเติม เพื่อทดแทนปริมาณโลหะที่ ตกค้างอยู่บนผิวภาชนะ ด้วยเหตุผลเหล่านี้งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบ ฝังแบบเปียก [12]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องสามารถนำมาสรุปโดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยได้ (VOCs) โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของความเข้มข้น  $O_2$  ต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสาร VOCs และ ส่วนที่สาม ศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วนได้รวบรวมเอาไว้ในตารางที่ 2.1-2.3



ตารางที่ 2.1 การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยได้ (VOCs) โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	รายละเอียด	สรุป
Selective oxidation of toluene over $V_2O_5/TiO_2$ catalysts. Effect of vanadium loading and of molybdenum addition on the catalytic properties. [13]	$V_2O_5/TiO_2$ และ $V_2O_5-MoO_3/TiO_2$ ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ Toluene:O <sub>2</sub> :He = 1:1.3:38 ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 300-400°C	ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ มี Activity และมี Selectivity ในปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงซึ่งขึ้นตามปริมาณของวาเนเดียมที่เคลือบฝังลงไปบนตัวรองรับ $TiO_2$ แบบ Monolayer ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-MoO_3/TiO_2$ มีประสิทธิภาพ และการเลือกเกิดที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ เนื่องจากโมเลกุลินิมจะเข้าไปยังเกิดการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง $V_2O_5$ กับ $TiO_2$

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	รายละเอียด	สรุป
Gas-phase selective oxidation of toluene on TiO <sub>2</sub> -sepiolite supported vanadium oxides: Influence of vanadium loading on conversion and product selectivities [14]	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> (5-20 %wt) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบผงแบบเปียก	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ Toluene:O <sub>2</sub> :He = 1:13:33 โดยใช้นิวเคลียส 0.6 ml/mol ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 320-380°C	% conversion ของโทลูอินเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น และที่อุณหภูมิสูง (380°C) จะตรวจพบ CO <sub>2</sub> ด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณ V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวมากขึ้น ส่งผลให้ %Toluene conversion สูงขึ้น
Catalytic oxidation of 1, 2-dichlorobenzene over V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> -based catalysts [15]	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /TiO <sub>2</sub> (0.8,3.6 และ 5.8 %wt) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบผงแบบพอดี้	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ 1, 2-dichlorobenzene 600 ppm, O <sub>2</sub> 10% ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 100-500°C	การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ทำให้ %conversion ในการกำจัด 1, 2-dichlorobenzene สูงขึ้น แต่จะไม่ส่งผลในปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดในการกำจัด NO ด้วย NH <sub>3</sub>

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	รายละเอียด	สรุป
Catalytic oxidation of chlorinated benzenes over $V_2O_5/TiO_2$ catalysts. [16]	$V_2O_5/TiO_2$ (3.6 %wt) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ chlorobenzene 500ppmv, benzene 500 ppmv, 1, 3-dichlorobenzene 700 ppmv, $O_2$ 10% ใน He Total flow 222 ml/min Space velocity $53,000\ h^{-1}$ ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 200-400°C	การออกซิไดซ์สารคลอโรเบนซีน พบว่าไซโคลเฮกซิลคลอไรด์ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่าสารประกอบอะโรมาติกและขั้นตอนกำหนดปฏิกิริยาคือขั้นตอนการแตกวงแหวนอะโรมาติกเนื่องจากเกิดได้ช้ามาก โดย 1,3-dichlorobenzene จะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่า benzene ในขณะที่ chlorobenzene จะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่า 1,3-dichlorobenzene และตำแหน่งของอะตอมคลอรีนที่เกาะบนวงแหวนอะโรมาติกส่งผลต่อพฤติกรรมการออกซิไดซ์ของปฏิกิริยา



ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	รายละเอียด	สรุป
Enhanced selective catalytic reduction and toluene combustion actives of $V_2O_5/TiO_2$ Catalyst by sulfuric acid treatment. [2]	$V_2O_5/TiO_2$ (4 %wt) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝั่งแบบเปียก $TiO_2$ ปรับสภาพด้วยกรด กำมะถัน 0M, 0.2M และ 0.5M	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ Toluene 200 ppm, $O_2$ 15% ใน $N_2$ , $SO_2$ 30 ppm Total flow 200 ml/min ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 120-450°C	ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ปรับสภาพด้วยกรด กำมะถันเข้มข้น 0.5 M มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโทลูอีนเพราะมีปริมาณตำแหน่งความเป็นกรดที่อุดมภูมิสูงกว่า 500 °C สูงสุด ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ เข้มข้น 0 M และเข้มข้น 0.2 M มีประสิทธิภาพการกำจัดได้ใกล้เคียงกัน
Effects of $SO_2$ concentrations on the catalytic activity of $V_2O_5$ - $MgO/TiO_2$ during the simultaneous removal of NO and toluene in an effluent gas. [17]	โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5/TiO_2$ ที่ได้รับการเสริมด้วย MgO 0.64 %wt	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ $O_2$ 13 %vol $H_2O$ 11 %vol NO 104 ppm $NH_3$ 104 ppm Toluene 200 ppm และ $SO_2$ 26 ppm หรือ 78 ppm โดยส่วนที่เหลือคือ $N_2$ Total flow 230 ml/min ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 120-450°C	ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5$ - $MgO/TiO_2$ ในการกำจัด NO และโทลูอีนร่วมกัน โดยความเข้มข้น $SO_2$ ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การกำจัดโทลูอีนเพิ่มสูงขึ้น แต่ทำให้ค่าการเลือกเกิด $CO_2$ และการกำจัด NO ลดต่ำลงเล็กน้อย

ตารางที่ 2.2 ผลของความเข้มข้น  $O_2$  ต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสาร VOCs

ชื่องานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	รายละเอียด	สรุป
Effects of $SO_2$ on the activity of $V_2O_5/TiO_2$ catalyst modified with sulphuric acid in co-removal of NO and toluene. [18]	$V_2O_5/TiO_2$ (4 %wt) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก $TiO_2$ ปรับสภาพด้วยการด่าง กำมะถัน 0M, 0.2M และ 0.5M	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ $O_2$ 5% และ 15%, NO 120 ppm, $NH_3$ 120 ppm, ไอน้ำ, $SO_2$ 30 ppm, 90 ppm และ 150 ppm ส่วนที่เหลือเป็น $N_2$ อัตราการไหลรวม 200 ml/min ช่วงอุณหภูมิที่ทำการปฏิกิริยา 120-450°C	ในระบบการกำจัดโทลูอีน พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถกำจัดโทลูอีนได้สูงที่สุดถึง 100% ที่อุณหภูมิ 300°C ความเข้มข้น $SO_2$ ไม่ส่งผลต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดโทลูอีน แต่ส่งผลในทางลบเล็กน้อยต่อการเลือกเกิดของโทลูอีนไปเป็น $CO_2$ และความเข้มข้น $O_2$ ที่ลดลงส่งผลต่อการกำจัดโทลูอีนและการเลือกเกิดของโทลูอีนไปเป็น $CO_2$ ให้ต่ำลง

ตารางที่ 2.3 ศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิเดซีโพลีเอีน

ชื่อนานวิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	รายละเอียด	สรุป
Investigation of reaction mechanism and kinetic modelling for the toluene total oxidation in presence of CoAlCe catalyst. [19]	CoAlCe Mixed oxide เตรียมด้วยวิธี เคลือบฝังแบบเปียก	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ โพลีเอีน 500-2000 ppm, O <sub>2</sub> 0.3-20% ส่วนที่เหลือเป็น He อัตราการไหลรวม 100 ml/min Space velocity 30 L h <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 100-425°C	ศึกษาผลของ CoAlCe Mixed oxide ในปฏิกิริยาการออกซิเดซีโพลีเอีน โดยใช้แบบจำลองทั้งหมด 8 โมเดลพบว่าแบบจำลอง Mars Van Krevelen มีความเหมาะสมกับปฏิกิริยาดังกล่าวมากที่สุดจากแบบจำลองนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำงานได้ดีที่สภาวะความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ ส่วนค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าประมาณ 90 KJ/mol
Kinetics of the complete combustion of dilute propane and toluene over Iron-Doped ZrO <sub>2</sub> catalyst. [20]	Iron-Doped ZrO <sub>2</sub> catalyst เตรียมด้วยวิธี เคลือบฝังแบบเปียก	องค์ประกอบของแก๊สในระบบ โพลีเอีน 0.3% ในอากาศ ที่ความเข้มข้นของ O <sub>2</sub> ต่ำ Space velocity 25000-100000 cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 325-425°C	ศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิเดซีโพลีเอีน พบว่าเหมาะสมกับโมเดล power-law และ Mars Van Krevelen ซึ่งทำงานได้ดีอุณหภูมิต่ำ (350 °C) จากโมเดล power-law ทำให้ได้อันดับปฏิกิริยาเท่ากับ 0.77, ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่า 109.19 kJ/mol

## 2.6 สรุปบททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยพบว่า ในส่วนของการกำจัดสาร VOCs โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ปริมาณ 3-6 %wt โดย  $V_2O_5/TiO_2$  จะมีความว่องไวในการกำจัดสาร VOCs ได้สูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 200-350 °C ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และพบว่าความเข้มข้นของ  $O_2$  นั้นมีผลต่อการกำจัดสาร VOCs ดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ในการกำจัด VOCs หลายชนิดเช่น โทลูอิน เบนซีน และคลอโรเบนซีน ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยมี  $O_2$  เป็นตัวออกซิไดซ์ แต่ยังไม่พบงานวิจัยใดที่ทำการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาและหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  มีแต่เพียงการศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับระบบ SCR ดังแสดงในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้การปรับสภาพตัวรองรับ  $TiO_2$  ด้วยสารละลายกรดกำมะถันจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์โทลูอินเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเลือก  $V_2O_5/TiO_2$  ที่มีการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน โดยใช้ความเข้มข้น  $O_2$  อยู่ในช่วง 3 %vol (ปริมาณ  $O_2$  ในการเผาไหม้ที่มีอากาศส่วนเกินน้อย) ถึง 21%vol (ปริมาณ  $O_2$  ในอากาศ) และจะมีการทดลองเพิ่ม 1 จุดคือที่ความเข้มข้นของ  $O_2$  12 %vol (คุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่มีปริมาณ  $O_2$  ไม่เกิน 15 %vol ) มาศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาและหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์

### บทที่ 3

## แบบจำลองจลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

### 3.1 แบบจำลองจลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยา

โดยส่วนนี้จะแสดงถึงกลไกของการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกนำเสนอในรูปแบบของแบบจำลองทางจลนศาสตร์ต่างๆ ดังนี้

#### 3.1.1 แบบจำลอง Langmuir-Hinshelwood

แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาของ Langmuir-Hinshelwood เป็นแบบจำลองการทำปฏิกิริยาของโมเลกุลสองโมเลกุลที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกรณีนี้ทำการสมมติว่าเรามีสารตั้งต้นสองสาร (A และ B) โดยแต่ละสารจะต้องดูดซับลงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน จากนั้นสารที่ถูกดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการ



อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ A และ B ที่อยู่บนพื้นผิว สมการอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา คือ สมการ (3.3) จะมีรูปแบบ

$$-r_A = k \theta_A \theta_B \quad (3.4)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant)

ในกรณีของแก๊สสองชนิดที่แย่งกันดูดซับบนพื้นผิวเดียวกัน โดยไม่มีการแตกตัวของโมเลกุลที่ดูดซับ สัดส่วนพื้นที่ผิวที่ปกคลุมด้วยแก๊ส A ( $\theta_A$ ) และแก๊ส B ( $\theta_B$ ) ถูกนำไปหาค่าตามทฤษฎีการดูดซับของ Langmuir จะมีค่าดังนี้

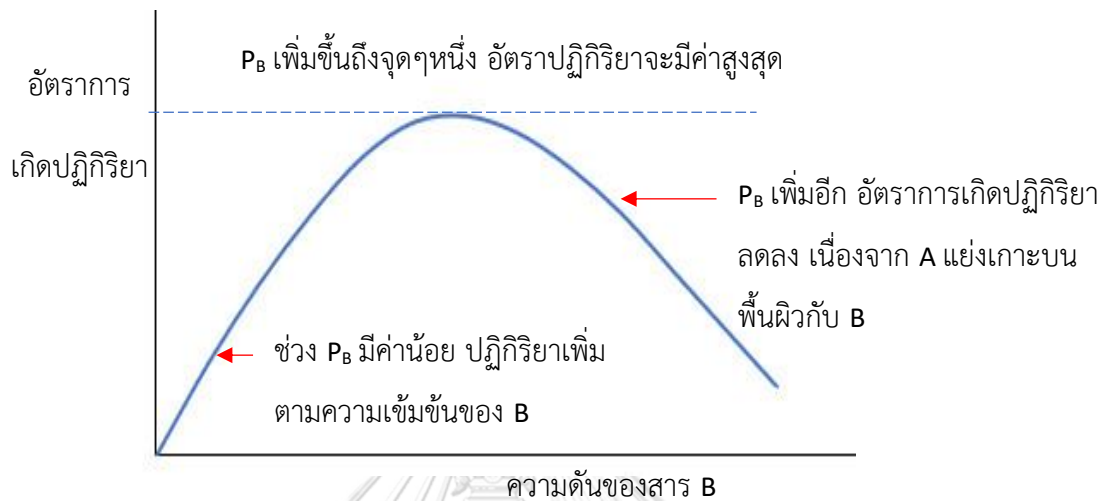
$$\theta_A = \frac{K_A P_A}{1 + K_A P_A + K_B P_B} \quad (3.5)$$

$$\theta_B = \frac{K_B P_B}{1 + K_A P_A + K_B P_B} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $K_A$  คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของสาร A และ  $K_B$  คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของสาร B แทนค่า  $\theta_A$  และ  $\theta_B$  จากสมการ (3.5) และ (3.6) ใน (3.4) จะได้

$$-r_A = \frac{kK_A P_A K_B P_B}{(1 + K_A P_A + K_B P_B)^2} \quad (3.7)$$

ถ้าเราควบคุมให้ความเข้มข้นของสาร A คงที่และค่อยๆเพิ่มความเข้มข้นของสาร B อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกรณีของ Langmuir-Hinshelwood

### 3.1.2 แบบจำลอง Eley-Rideal

แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยา Eley-Rideal เป็นแบบจำลองการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลสองโมเลกุล โดยโมเลกุลสารตั้งต้น A (ในกรณีนี้เป็นโทลูอีน) ดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และอีกสารตั้งต้น B จาก Fluid phase (โมเลกุลแก๊ส) จะเข้าชนกับ A ที่อยู่บนพื้นผิว เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ โดยที่ B ไม่จำเป็นต้องถูกดูดซับบนพื้นผิวเลย ดังสมการ



อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา คือ สมการ (3.9) ซึ่งจะขึ้นกับความเข้มข้นของ A บนพื้นผิว ( $\theta_A$ ) และความเข้มข้นของ B ที่อยู่ในเฟสของแก๊ส ( $P_B$ ) ดังสมการ

$$-r_A = k \theta_A P_B \quad (3.10)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant) ในกรณีของแก๊สดูดซับบนพื้นผิว โดยไม่มีการแตกตัวของโมเลกุลที่ดูดซับ สัดส่วนพื้นที่ผิวที่ปกคลุมด้วยแก๊ส A ( $\theta_A$ ) ถูกนำไปหาค่าตามทฤษฎีการดูดซับของ Langmuir จะมีค่าดังนี้

$$\theta_A = \frac{K_A P_A}{1 + K_A P_A} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $K_A$  คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของสาร A

แทนค่า  $\theta_A$  จากสมการ (3.11) ลงใน (3.10) จะได้

$$-r_A = \frac{kK_A P_A P_B}{1 + K_A P_A} \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) จะเห็นได้ว่า ถ้าหากเราคงความเข้มข้นของ A ( $P_A$ ) ให้คงที่ และเพิ่มความเข้มข้นของสาร B ( $P_B$ ) ที่อยู่ในเฟสแก๊สให้สูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นไปได้เรื่อยๆ โดยไม่มีขีดจำกัด

ในทางกลับกันถ้าเราให้ความเข้มข้นของ B ( $P_B$ ) คงที่ และเพิ่มความเข้มข้นของ A ( $P_A$ ) ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ ไปจนถึงระดับที่ทำให้ค่า  $K_A P_A \gg 1$  จะทำให้ค่า  $1 + K_A P_A$  ประมาณได้เป็น  $K_A P_A$  ทำให้สมการ (3.12) ลดรูปเหลือ

$$-r_A = kP_B \quad (3.13)$$

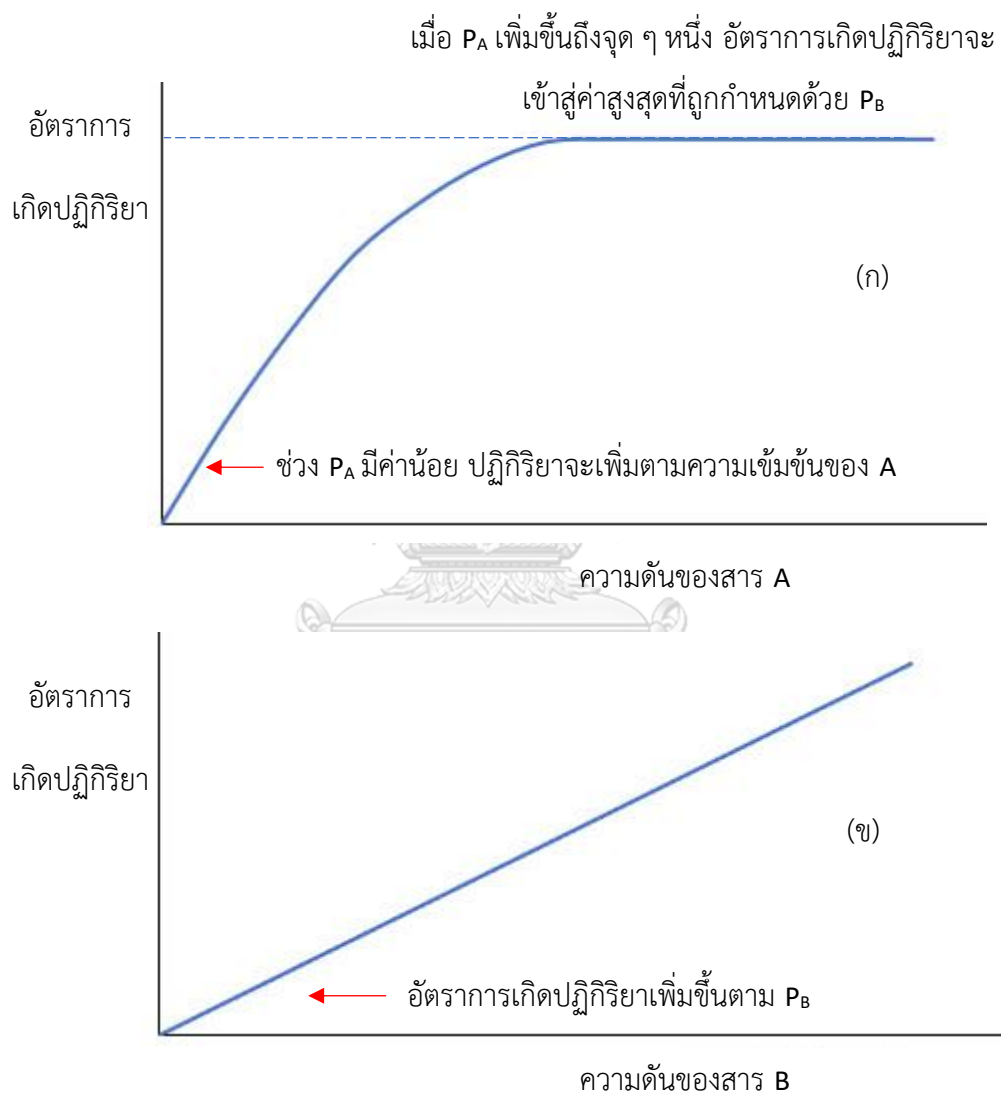
ซึ่งจะเข้าหาค่าที่ถูกกำหนดด้วยความดันของ B ในระบบ ดังรูปที่ 5 และในช่วงที่  $P_A$  มีค่า  $1 \gg K_A P_A$  จะทำให้ค่า  $1 + K_A P_A$  ประมาณได้เป็น 1 ทำให้สมการ (3.12) ลดรูปเหลือ

$$-r_A = kK_A P_A P_B \quad (3.14)$$

ในกรณีของเราสารตั้งต้น A คือ โทลูอิน และสารตั้งต้น B คือ ออกซิเจน ที่ถือได้ว่าความเข้มข้นคงที่ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (3.14) ก็จะแปรผันตามความเข้มข้นของโทลูอิน ยกกำลัง 1 สมการ (3.14) ลดรูปเหลือ

$$-r_A = kK_A P_A \quad (3.15)$$

จากรูปที่ 3.3 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร A กับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารที่ดูดซับบนพื้นผิว เมื่อความเข้มข้นของ B คงที่ และรูปที่ 3.3 (ข) ความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสาร B ซึ่งเป็นสารที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิว เมื่อความเข้มข้นของ A คงที่ โดยโมเลกุลของ B ในเฟสแก๊สวิ่งเข้ามาชนกับโมเลกุล A ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวและกลายเป็นผลิตภัณฑ์ไป

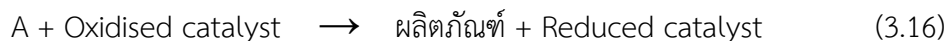


รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกรณีของ Eley-Rideal



### 3.1.3 แบบจำลอง REDOX

โดยแบบจำลอง REDOX ถูกนำเสนอโดย Mar-Van Krevelen ได้เสนอการเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่าแบบจำลอง Reduction-Oxidation หรือที่นิยมเรียกว่า REDOX ดังนี้



ซึ่งในแบบจำลองนี้สารตั้งต้น A จะไปตั้งออกซิเจนออกมาจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา กลายเป็นผลิตภัณฑ์ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกรีดิวซ์ จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกรีดิวซ์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปพร้อมกับสารตั้งต้น A จึงจะทำให้กลับคืนเป็นโครงสร้างเดิมอีกครั้ง

ตามกลไกนี้ อัตราการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น (ตัวอย่าง คือ ไฮโดรคาร์บอน) ที่เป็นตัวรีดิวซ์ และสัดส่วนของตำแหน่งที่ว่างไว้ที่อยู่ในสถานะออกซิไดซ์ ดังสมการ

$$r_{\text{red}} = k_r P_A (1 - \theta) \quad (3.18)$$

เมื่อ  $k_r$  คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยารีดักชัน,  $P_A$  คือ ความดันของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นสารรีดิวซ์ และ  $\theta$  คือ ตำแหน่งที่ว่างไว้ที่ถูกรีดิวซ์ไป

อัตราการออกซิไดซ์ตำแหน่งที่ว่างไว้ที่ถูกรีดิวซ์ไปนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน และตำแหน่งที่ว่างไว้ที่ถูกรีดิวซ์ไปดังสมการ

$$r_{\text{ox}} = \frac{k_0}{\beta} P_B \theta \quad (3.19)$$

เมื่อ  $k_0$  คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน,  $P_B$  คือ ความดันของออกซิเจน,  $\beta$  คือ ปริมาณออกซิเจน ที่ใช้ต่อโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาไป

ที่สภาวะสมดุล

$$\text{อัตราการรีดิวซ์} = \text{อัตราการออกซิไดซ์}$$

$$k_r P_A (1 - \theta) = \frac{k_0}{\beta} P_B \theta$$

$$k_r P_A - k_r P_A \theta = \frac{k_0}{\beta} P_B \theta$$

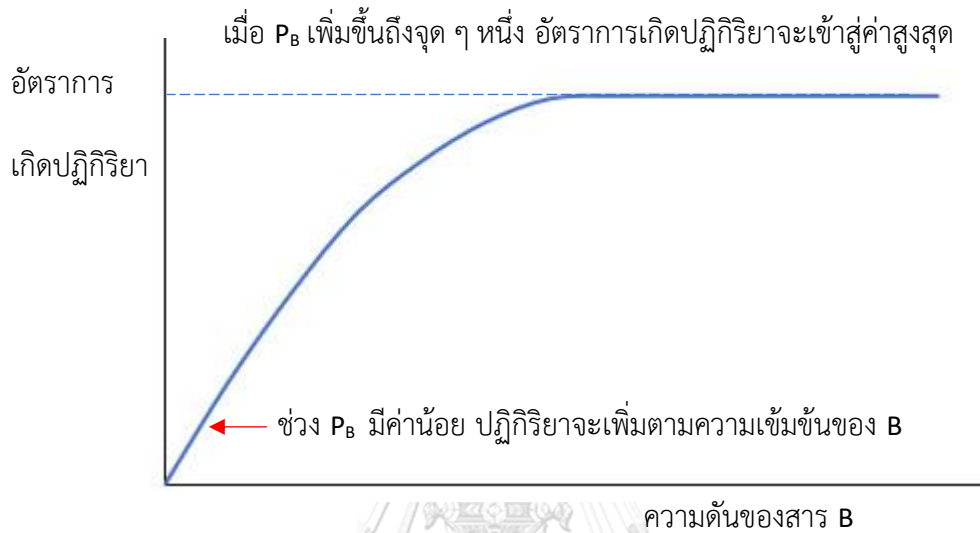
$$k_r P_A = \left( k_r P_A + \frac{k_0}{\beta} P_B \right) \theta$$

$$\theta = \frac{k_r P_A}{k_r P_A + \frac{k_0}{\beta} P_B} \quad (3.20)$$

แทน  $\theta$  จากสมการ (3.20) ในจะได้สมการแสดงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่มีรูปแบบดังนี้

$$-r_A = \frac{k_0 k_r P_A P_B}{\beta k_r P_A + k_0 P_B} \quad (3.21)$$

จากสมการ (3.21) เราจะพบว่าถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น แต่จะเข้าหาค่าสูงสุดที่ระดับหนึ่งและคงที่ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกรณี REDOX

สำหรับปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ในเฟสแก๊สนั้น เพื่อความปลอดภัยจากการระเบิด ในการออกซิไดซ์จึงใช้ไฮโดรคาร์บอนที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยมีออกซิเจนในเฟสแก๊สมากเกินพอสำหรับการทำปฏิกิริยามาก ดังนั้น จึงอาจถือได้ว่าความเข้มข้นของออกซิเจนในระบบนั้นคงที่

จะได้ว่า  $k_0 P_B \gg \beta k_r P_A$  ทำให้  $\beta k_r P_A + k_0 P_B$  ประมาณได้เป็น  $k_0 P_B$  ทำให้สมการ (3.21) ลดรูปเหลือ

$$-r_A = k_r P_A \quad (3.22)$$

ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน

## บทที่ 4

### วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือและวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่าง ๆ รายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมีและแก๊สที่ใช้การทดสอบระบบการทำปฏิกิริยา รวมทั้งระเบียบวิธีการทดสอบโดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- 4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
- 4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 4.3 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $V_2O_5/TiO_2$ ) แสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$

สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
ไทเทเนียมออกไซด์ Commercial grade ( $TiO_2, P25$ )	Aeroxide
แอมโมเนียเมทวานาเดท ( $NH_4VO_3$ ) 99.99%	Aldrich
กรดออกซาลิก ( $H_2C_2O_4$ )	Fluka
กรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ ) 95-97%	Merck

##### 4.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $V_2O_5/TiO_2$ )

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  จะวิธีการเตรียมโดยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet Impregnation Method) โดยให้มีปริมาณ  $V_2O_5$  ประมาณ 4 %wt อยู่บนตัวรองรับ  $TiO_2$  การเตรียมตัวเร่งจะเริ่มจากการเตรียมตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ โดยนำไปเผาในอากาศ (Calcination) เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนที่ไม่ต้องการออกไป ที่อุณหภูมิ 500 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปรับสภาพ  $TiO_2$  ด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น 0 M, 0.2 M และ 0.5 M โดยใช้สัดส่วนสารละลายกรดกำมะถัน 4 ml ต่อตัวรองรับ

TiO<sub>2</sub> 3 g หลังจากนั้นให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อไล่อากาศออกจากรูปพรุนและให้สารละลายกรดกำมะถันไปแทนที่ แล้วปล่อยให้สารละลายระเหยออกอย่างช้า ๆ จนแห้ง จึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตามด้วยการนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 500 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ทำการละลายสารตั้งต้น (Precursor) แอมโมเนียเมทตาอานาเดทปริมาณ 0.1286 g ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 20 ml หากพบว่า มีตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายเหลืออยู่ ให้ทำการเติมกรดออกซาลิกลงไปเล็กน้อยเพื่อให้สารตั้งต้นละลายได้ดีขึ้น จนได้สารละลายสีเหลืองใส จากนั้นเติมตัวรองรับ TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาณ 2.4 g นำไปปั่นจนพร้อมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 °C เพื่อให้ น้ำระเหยออกอย่างช้า ๆ จนแห้งแล้วนำสารละลายดังกล่าวไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำสารที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยโกรนบดสาร จากนั้นนำไปเผาในอากาศอีกครั้งด้วยอุณหภูมิ 500 °C โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนเกลือโลหะอานาเดทให้กลายเป็นโลหะออกไซด์

#### 4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 วิธี เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะดังต่อไปนี้

4.2.1 วิเคราะห์หาปริมาณของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Analysis (SEM-EDX) รุ่น Hitachi S3400N เพื่อทำการตรวจหาปริมาณโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิค Nitrogen Physisorption การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำโดยการตรวจวัดด้วยเครื่อง Micromeritics Smart VacPrep โดยอาศัยการดูดซับของ N<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ -196 °C การวิเคราะห์เริ่มด้วยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g ในหลอดแก้วบรรจุตัวอย่าง (Sample cell) ตามด้วยการไล่แก๊สที่ไม่ใช่ N<sub>2</sub> ออกจากพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้ความร้อนและทำสุญญากาศที่อุณหภูมิ 200 °C จนกระทั่งทำสุญญากาศได้ระดับ (ประมาณ 4 ชั่วโมง) จึงเริ่มวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยเครื่องจะเติมแก๊สไนโตรเจนไปยังตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างดูดซับเอาไว้จนอิ่มตัวก็จะทำการดูดเอาแก๊สออก และคำนวณพื้นที่ผิวจากปริมาตรแก๊สที่ถูกดูดซับไว้

4.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) วิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ด้วยเครื่อง BRUKER D8 ADVANCE X-ray Diffractometer ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Diffract ZT Version 3.3 โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น  $\text{CuK}\alpha$  radiation (ความยาวคลื่น  $\lambda = 0.154 \text{ nm}$ ) ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ 0.05 g วิเคราะห์ที่มุม  $2\theta$  ระหว่าง  $20\text{-}80^\circ$  โดยอัตราการเพิ่มครั้งละ  $0.02^\circ/\text{min}$  ความกว้างของช่องสลิต (Slit Width) 0.6 mm

4.2.4 การวัดปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิค  $\text{NH}_3$  Temperature Programmed Desorption ( $\text{NH}_3$ -TPD) วัดปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง Micromeritics Chemisorb 2750 ซึ่งวิเคราะห์ผลจากการดูดซับและการคายซับของ  $\text{NH}_3$  โดยใช้ตัวตรวจวัดชนิด Thermal Conductivity Detector (TCD) การวิเคราะห์เริ่มด้วยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 g ลงในหลอดแก้วรูปตัวยู จากนั้นทำการไล่แก๊สทุกชนิดที่ไม่ใช่ฮีเลียมออกจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแก๊สฮีเลียมที่อัตราการไหล 50 ml/min ที่อุณหภูมิ  $220^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปรับลดอุณหภูมิลงเป็น  $120^\circ\text{C}$  ก่อนให้ตัวอย่างทำการดูดซับ  $\text{NH}_3$  ด้วยการผ่าน  $\text{NH}_3$  เข้มข้น 0.15 % ในฮีเลียม ที่อัตราการไหล 25 ml/min เป็นเวลา 30 นาที จนตัวเร่งปฏิกิริยาอิ่มตัวไปด้วย  $\text{NH}_3$  เมื่อครบกำหนดเวลาก็ทำการไล่  $\text{NH}_3$  ที่ไม่ดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยแก๊สฮีเลียมบริสุทธิ์ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิตัวอย่างเป็น  $500^\circ\text{C}$  ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  และคงอุณหภูมิไว้ที่  $500^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 70 นาที เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการคายซับ  $\text{NH}_3$  แล้วทำการปรับลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง โดยสัญญาณที่แสดงการคายซับของ  $\text{NH}_3$  สามารถนำมาหาปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่คายซับ  $\text{NH}_3$  ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $500^\circ\text{C}$

### 4.3 การทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอิน

#### 4.3.1 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดสอบ

#### ตารางที่ 4.2 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมี/แก๊ส	บริษัทผู้ผลิต
Toluene (99.5%)	Aldrich
Compressor air	-
N <sub>2</sub> (99.999%)	Linde
H <sub>2</sub> (99.999%)	Linde
He (99.999%)	Linde

#### 4.3.2 ระเบียบวิธีการทำการทดสอบ

การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มจากการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 g ลงในท่อปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless, SS 304) ในช่วงอุณหภูมิ 150-350 °C แก๊สผสมที่ใช้ในการทดสอบมีอัตราการไหลรวม 200 ml/min

โทลูอิน (ของเหลว) ถูกบรรจุอยู่ใน Saturator ซึ่งควบคุมอัตราการระเหยกลายเป็นไอของโทลูอิน โดยรักษาอุณหภูมิของ Saturator ให้คงที่ โดยใช้ N<sub>2</sub> เป็น Carrier gas ในการพาไอโทลูอินออกจาก Saturator และใช้ Needle Valve ในการควบคุมอัตราการไหลของโทลูอินก่อนเข้าท่อปฏิกรณ์

การทดลองทำปฏิกิริยาจะกระทำที่ความเข้มข้น O<sub>2</sub> ไม่เกิน 15%vol (คุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์กั้นแก๊ส) [21] และจะมีการทดลองเพิ่ม 2 จุดคือความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> 21 %vol (ความเข้มข้น O<sub>2</sub> ในอากาศ) และเข้มข้นของ O<sub>2</sub> 3%vol (การเผาไหม้ที่มีอากาศส่วนเกินน้อย) ส่วนความเข้มข้นของโทลูอินจะอยู่ในช่วง 300-400 ppm โดยในการทดลองจะทำการวัดความเข้มข้น O<sub>2</sub> ต่ำสุดและสูงสุดก่อนเพื่อดูความแตกต่าง จากนั้นจึงพิจารณาจำนวนจุดระหว่างกลาง

ก่อนทำการทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาในอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่และเพื่อให้แน่ใจว่าเกลือสารประกอบโลหะที่เติมลงในตัวรองรับเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโลหะออกไซด์อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นทำให้ตัวรองรับอาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการเผาที่อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลองอีกครั้ง

ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากจุดเดือดของโทลูอีนมีค่า 110 °C ดังนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับโทลูอีนไว้ และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 25 °C ไปจนถึง 350 °C จากนั้นจึงลดอุณหภูมิกลับมาที่ 150 °C แล้วปรับความเข้มข้นของแก๊สให้ได้สัดส่วนที่ต้องการ ก่อนทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใหม่ แผนผังกระบวนการแสดงไว้ดังรูปที่ 4.1

การวัดความเข้มข้นของโทลูอีน ใช้การเก็บแก๊สตัวอย่างปริมาตร 2 ml ทางด้านขาเข้าและขาออกของเครื่องปฏิกรณ์ วัดความเข้มข้นโทลูอีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionization Detector (FID) และคอลัมน์ชนิด Chromosorb WAW อุณหภูมิคอลัมน์ที่ 130 °C โดยใช้ N<sub>2</sub> เป็น Carrier gas ความดันของแก๊สไนโตรเจนด้านขาเข้าคอลัมน์ 75 kPa ส่วนแก๊สไฮโดรเจนและอากาศจะใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยความดันขาเข้าคอลัมน์ของแก๊สไฮโดรเจนและอากาศอยู่ที่ 50 และ 100 kPa ตามลำดับ และพื้นที่ได้กราฟโทลูอีนสามารถนำมาคำนวณหา %Toluene conversion ดังสมการที่ 4.1

$$\%Toluene\ conversion = \frac{[Toluene]_{in} - [Toluene]_{out}}{[Toluene]_{in}} \times 100 \quad (4.1)$$

นอกจากนี้ยังทำการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นด้วยการเก็บตัวอย่างขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 2 ml ฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Thermal conductivity detector (TCD) โดยใช้คอลัมน์ชนิด molecular sieve 5A อุณหภูมิคอลัมน์ 230°C มีแก๊สฮีเลียมเป็น carrier gas ด้วยอัตราการไหล 40 ml/min พื้นที่ได้กราฟที่สามารถแปลงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโปรแกรม fityk นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเลือกเกิดของโทลูอีนไปเป็น CO<sub>2</sub> ดังสมการที่ 4.2

$$\% CO_2\ selectivity = \frac{[Concentration\ of\ CO_2]_{out}}{7 \times ([Toluene]_{in} - [Toluene]_{out})} \times 100 \quad (4.2)$$

#### 4.3.3 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน

การหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ สำหรับปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน ทำโดยใช้สมมติฐานที่ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดไอโซเทอร์มอล (Isothermal fixed-bed reactor) และเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเนื่องจากความเข้มข้นของโทลูอีนต่ำกว่าความเข้มข้นของออกซิเจนมาก ดังนั้นความเข้มข้นของออกซิเจนจึงให้เป็นค่าคงที่ จากสมมติฐานข้างต้นจึงได้สมการดังต่อไปนี้ :

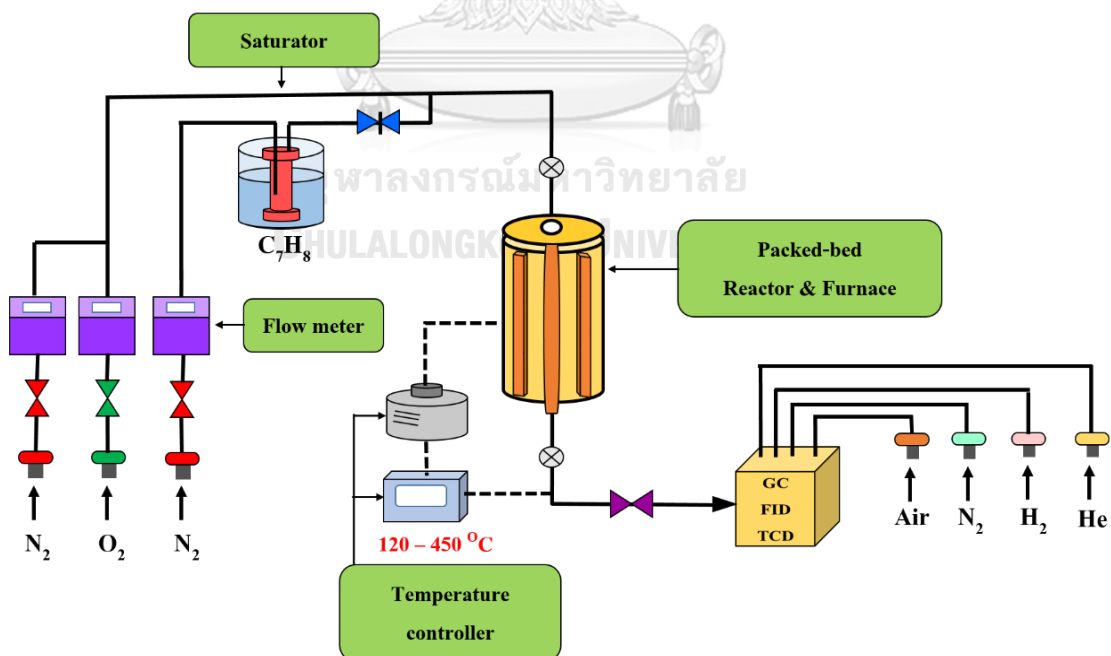
$$-FC_0 \frac{dx}{dw} = kC_0(1-x) \quad (4.3)$$

โดย F คืออัตราการไหลรวมของแก๊ส,  $C_0$  คือความเข้มข้นของโทลูอินขาเข้า, x คือ Toluene conversion, w คือน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา และ k คือ พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ จากผลการทดลองจะได้ค่า Conversion ณ อุณหภูมิต่าง ๆ เราจะสามารถคำนวณค่าคงที่ที่เกิดปฏิกิริยา k ที่แต่ละอุณหภูมิได้ จากการอินทิเกรตสมการ 4.3 ได้ดังสมการ :

$$k = -\frac{F \cdot \ln(1-x)}{w} \quad (4.4)$$

และ  $k = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}}$  เมื่อ  $k_0$  คือ ค่า Pre-exponential factor,  $E_a$  คือ Activation Energy (kJ/mol), R คือค่า Gas constant และ T คืออุณหภูมิ (K) เขียนกราฟโดยให้แกน y คือ  $\ln(k)$  และแกน x คือ  $(1/T)$  ได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน  $-(E_a/R)$  และตัดแกน y ที่ตำแหน่ง  $\ln(k_0)$  ตามสมการ:

$$\ln(k) = -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right) + \ln(k_0) \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.1 แผนผังการทดสอบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน



## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ตามด้วยผลการทดสอบความว่องไวในการทำปฏิกิริยาในสภาวะการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ และการวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยา โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

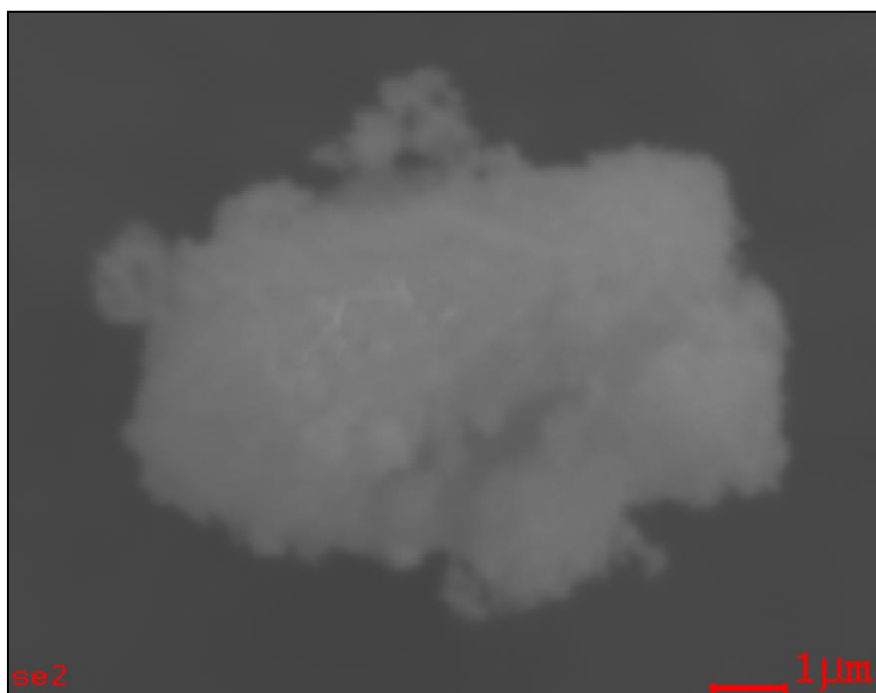
- 5.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 5.2 การทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน
- 5.3 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน
- 5.4 การเปรียบเทียบผลพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินและการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR

#### 5.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

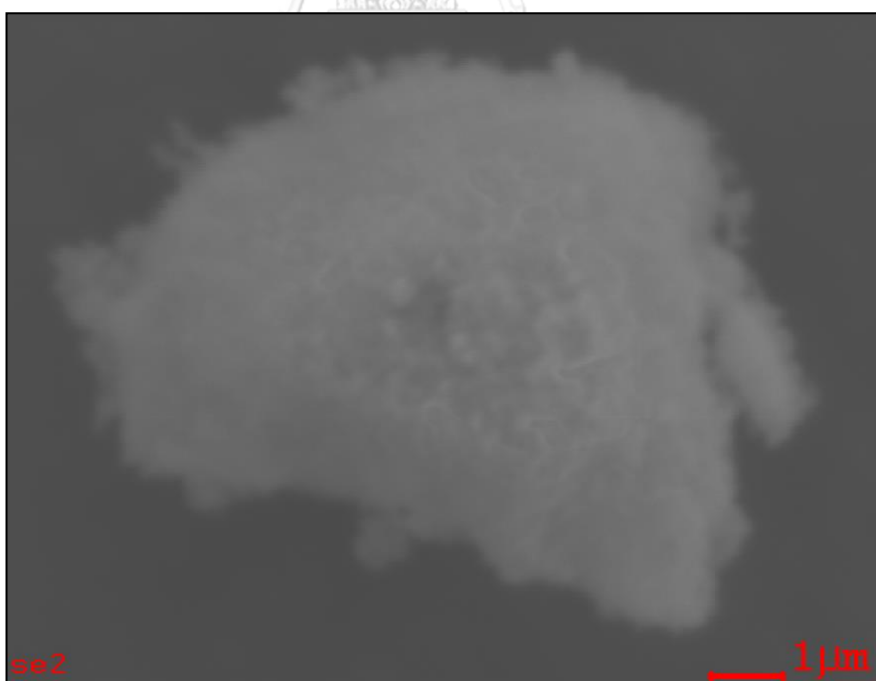
การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 วิธี ประกอบด้วย การหาปริมาณโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา และการวัดปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น 0.2 M และ 0.5 M แทนด้วย  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M),  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M) และ  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ตามลำดับ

##### 5.1.1 วิเคราะห์หาปริมาณของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณโลหะออกไซด์  $V_2O_5$  ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  คือ 4 %wt. เนื่องจากเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบ SCR [14] ผลการตรวจวัดหาปริมาณของโลหะออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 5.1 พบว่าปริมาณโลหะออกไซด์ มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 4 %wt. ดังนั้นสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินได้



(n) V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0 M)



(q) V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0.2 M)

(ค)  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M)รูปที่ 5.1 ภาพถ่าย SEM-EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$ ตารางที่ 5.1 ปริมาณโลหะออกไซด์  $V_2O_5$  บนตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$ 

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ $V_2O_5$ (%wt.)
$V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	4.27
$V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	4.03
$V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	3.59

#### 5.1.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

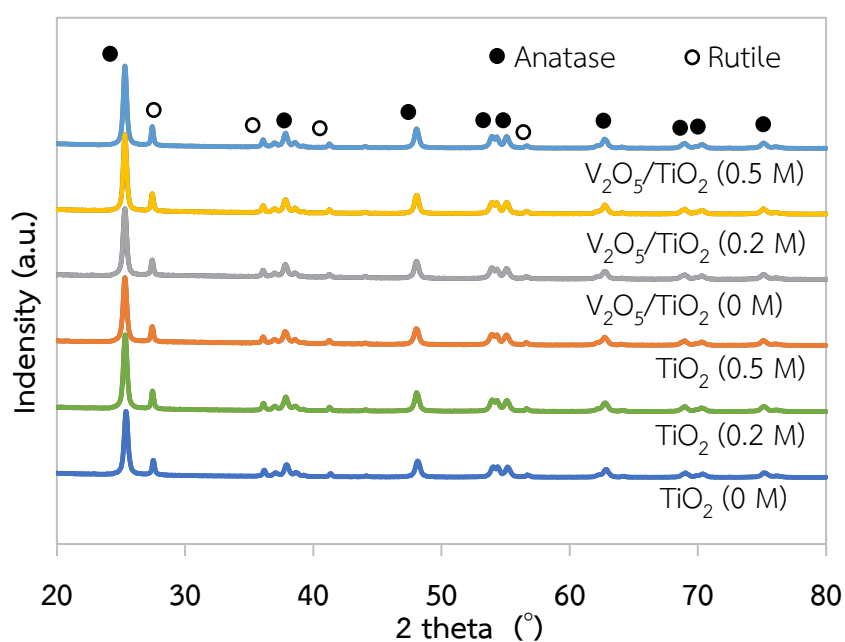
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวรองรับ  $TiO_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  แสดงในตารางที่ 5.2 พบว่า พื้นที่ผิวของตัวรองรับ  $TiO_2$  ทั้ง 3 ตัวมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่  $58 \text{ m}^2/\text{g}$  หลังจากมีการเคลือบฝังโลหะออกไซด์  $V_2O_5$  ลง ไปบนตัวรองรับ พบว่าพื้นที่ผิวทั้งหมดมีค่าลดลงอยู่ในช่วง  $42\text{-}44 \text{ m}^2/\text{g}$  เนื่องจาก  $V_2O_5$  ไปเกาะบนผิวหรืออุดรูพรุนบางส่วนของตัวรองรับทำให้พื้นที่ผิวของตัวรองรับลดลง

ตารางที่ 5.2 พื้นที่ผิวของตัวรองรับ  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$

ตัวรองรับ/ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวทั้งหมด ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
$\text{TiO}_2$ (0 M)	58.58
$\text{TiO}_2$ (0.2 M)	58.58
$\text{TiO}_2$ (0.5 M)	58.73
$\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ (0 M)	44.08
$\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ (0.2 M)	43.93
$\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ (0.5 M)	42.98

### 5.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

รูปแบบโครงสร้างผลึกของตัวรองรับ  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  ที่ได้รับการปรับสภาพและไม่ได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน แสดงในรูปที่ 5.2 พบว่าตัวรองรับ  $\text{TiO}_2$  ประกอบด้วยเฟสอนาเทสเป็นหลัก และพบเฟสรูไทล์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากตัวรองรับนี้เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีเฟสรูไทล์ผสมอยู่ในส่วนของผลวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  นั้นไม่พบตำแหน่งพิกของ  $\text{V}_2\text{O}_5$  เนื่องจาก  $\text{V}_2\text{O}_5$  มีการกระจายตัวได้ดีทำให้ไม่พบผลึกของ  $\text{V}_2\text{O}_5$  หรือผลึกของ  $\text{V}_2\text{O}_5$  มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยเทคนิค XRD



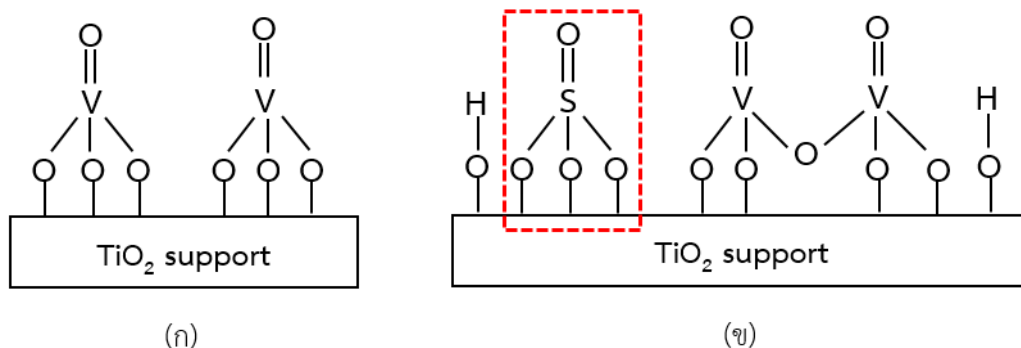
รูปที่ 5.2 รูปแบบผลึกตัวรองรับ  $\text{TiO}_2$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิค XRD

#### 5.1.4 การวัดปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดซึ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการออกซิไดซ์แบบเลือกเกิดได้ดี และยังสามารถออกซิไดซ์โทลูอินไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งจากผลการวัดปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรด แสดงดังตารางที่ 5.3 พบว่า ตัวรองรับที่ผ่านการเคลือบฝังด้วย  $V_2O_5$  จะมีปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดมากกว่าตัวรองรับที่ไม่ผ่านการเคลือบฝังด้วย  $V_2O_5$  นอกจากนี้ การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันที่มีซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) เป็นองค์ประกอบ จะไปเพิ่มปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดทำให้สามารถออกซิไดซ์โทลูอินได้เพิ่มขึ้น [2] โดยคาดว่าโครงสร้างดังรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าสารประกอบซัลเฟตที่มีความเป็นกรดจะไปเกาะอยู่บนตัวรองรับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ก็พบว่าปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน

ตารางที่ 5.3 ปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	จำนวนตำแหน่งที่เป็นกรด ( $\mu\text{mol H}^+/\text{g}$ )
$TiO_2$ (0 M)	41.85
$TiO_2$ (0.2 M)	45.19
$TiO_2$ (0.5 M)	47.94
$V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	67.32
$V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	68.71
$V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	70.04

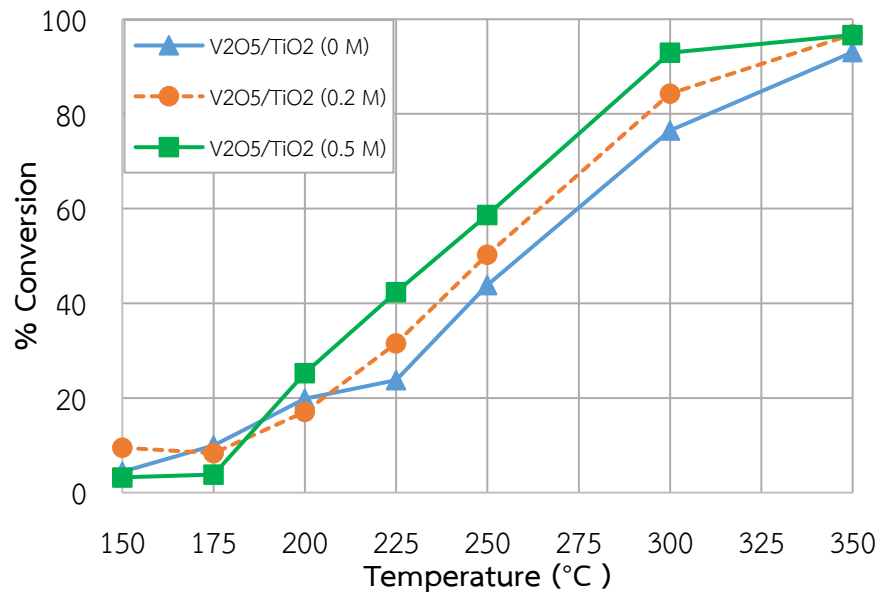


รูปที่ 5.3 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ (ก) และได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน (ข) [22]

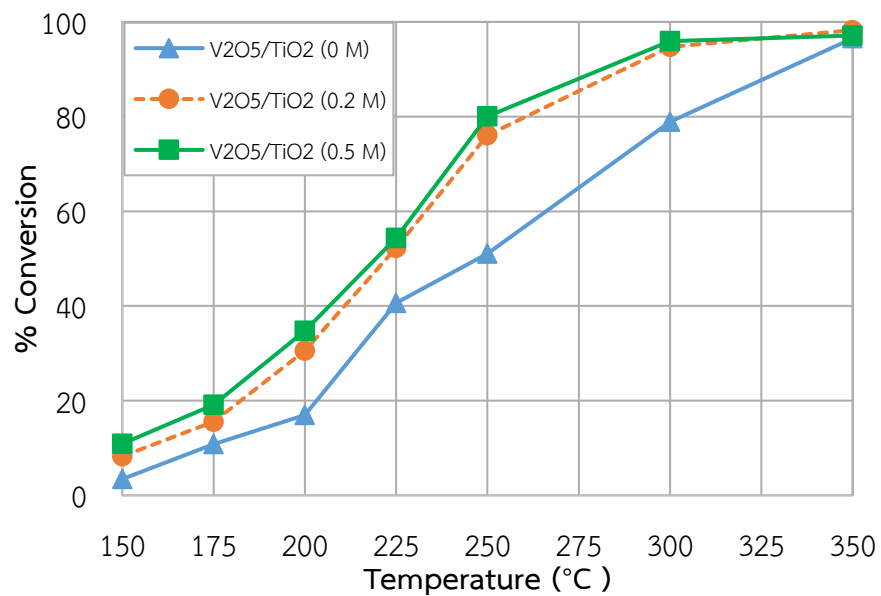
## 5.2 การทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกซิเดชันโทลูอีน

จากการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิเดชันโทลูอีน ที่แสดงดังรูปที่ 5.4-5.6 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำ (150 °C) % Toluene conversion จะน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องการพลังงานกระตุ้นที่สูงประมาณหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจากนั้น % Toluene conversion จะเริ่มสูงขึ้นและสูงขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 °C ไปจนถึง 300 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ทำงานได้ดีโดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวจะมี % Toluene conversion สูงสุดที่อุณหภูมิ 350 °C

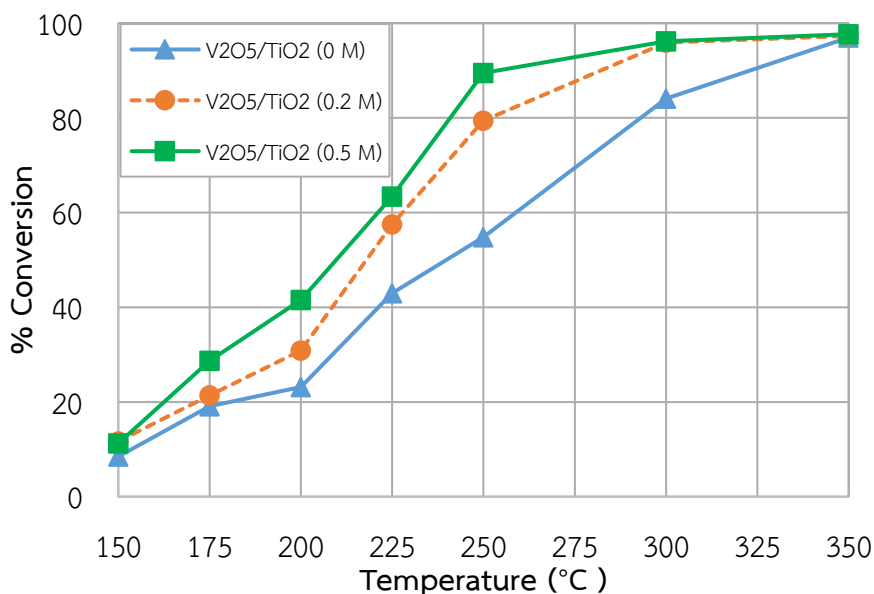
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิเดชันโทลูอีนของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่แสดงดังรูปที่ 5.4-5.6 จะเห็นว่า % Toluene conversion สูงขึ้นเมื่อมีการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน โดยการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันจะช่วยเพิ่มปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการออกซิเดชันหมู่แอลคิล (Alkyl group) ของสารอะโรมาติก (Aromatic compound) จะเกิดที่ตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นหากตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดมากและความแรงของกรดเพียงพอ ก็จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น % Toluene conversion ก็มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดในตารางที่ 5.3 ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ปรับสภาพด้วยกรดกำมะถันเข้มข้น 0.5 M มีค่าปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดสูงสุดตามด้วยความเข้มข้น 0.2 M และ 0 M ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินที่ความเข้มข้น  $O_2$  3 %vol ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน



รูปที่ 5.5 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินที่ความเข้มข้น  $O_2$  12 %vol ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน

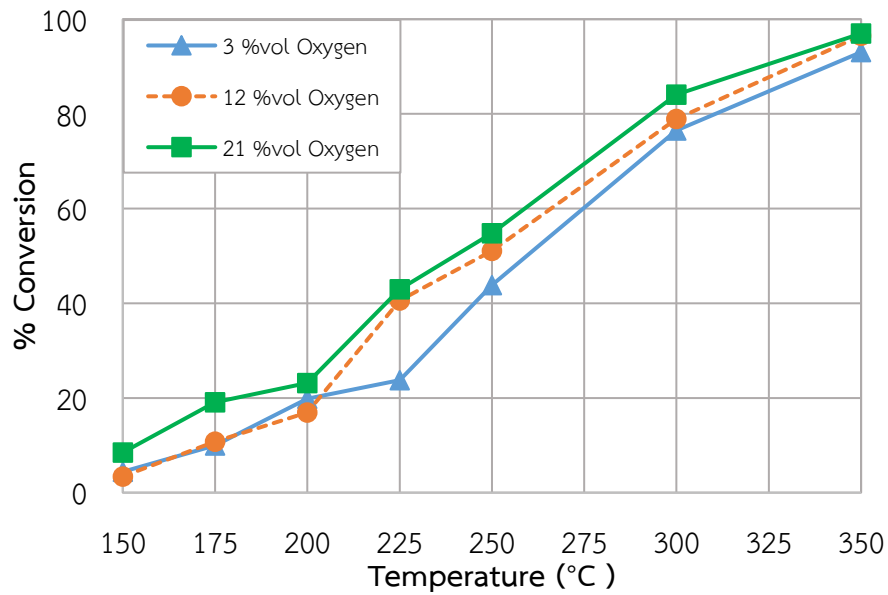


รูปที่ 5.6 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินที่ความเข้มข้น  $O_2$  21 %vol ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพและได้รับการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถัน

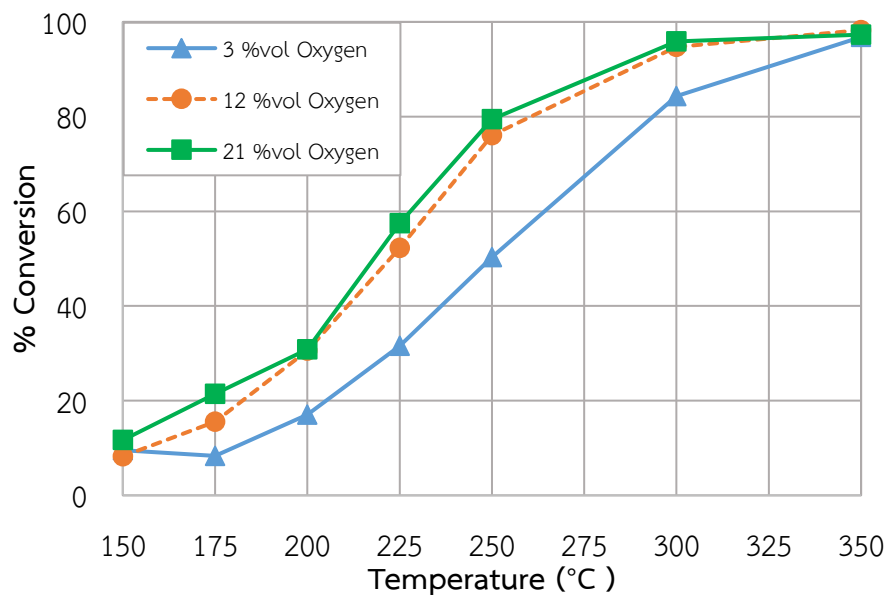
ผลของความเข้มข้นของออกซิเจนต่อ % Toluene conversion แสดงไว้ในรูปที่ 5.7–5.9 โดยใช้ความเข้มข้นของโทลูอินในช่วง 300–400 ppm ความเข้มข้นของ  $O_2$  ในช่วง 21%vol (ความเข้มข้น  $O_2$  ในอากาศ) ,  $O_2$  12 %vol และ  $O_2$  3%vol (การเผาไหม้ที่มีอากาศส่วนเกินน้อย) ในทางทฤษฎีกระบวนการเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์นั้นจะต้องมีสัดส่วนระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่เหมาะสมตามสมการ  $(C_7H_8 + 9O_2 \rightarrow 7CO_2 + 4H_2O)$  จึงจะสามารถถึงความร้อนสูงสุดจากเชื้อเพลิงได้ ปริมาณความเข้มข้น  $O_2$  ที่พอดีกับโทลูอินอยู่ที่ 0.3 %vol (3000 ppm) ดังนั้นความเข้มข้น  $O_2$  ต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองคือ 3 %vol จึงมากเกินไปสำหรับทำให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ได้

จากผลการทดลอง ความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการออกซิไดซ์โทลูอินไปเป็นสารอื่น เช่น กรดเบนโซอิก ถ้าหากปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ จะเกิดการออกซิไดซ์กรดเบนโซอิกต่อไปเป็น  $CO_2$  แต่จากการทดลองพบว่า  $CO_2$  ที่ด้านขาออกของท่อเกิดในปริมาณที่ต่ำ ไม่สามารถคำนวณออกมาเป็นปริมาณที่แน่นอนได้ แสดงว่าโทลูอินเกิดการสลายตัวไปเป็นกรดเบนโซอิก ซึ่งเราตรวจพบผงสีขาวสะสมบริเวณท่อด้านขาออกของเครื่องปฏิกรณ์หลังจากทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลานาน ผลการวิเคราะห์โดย FT-IR ก็ระบุว่าเป็นกรดเบนโซอิก

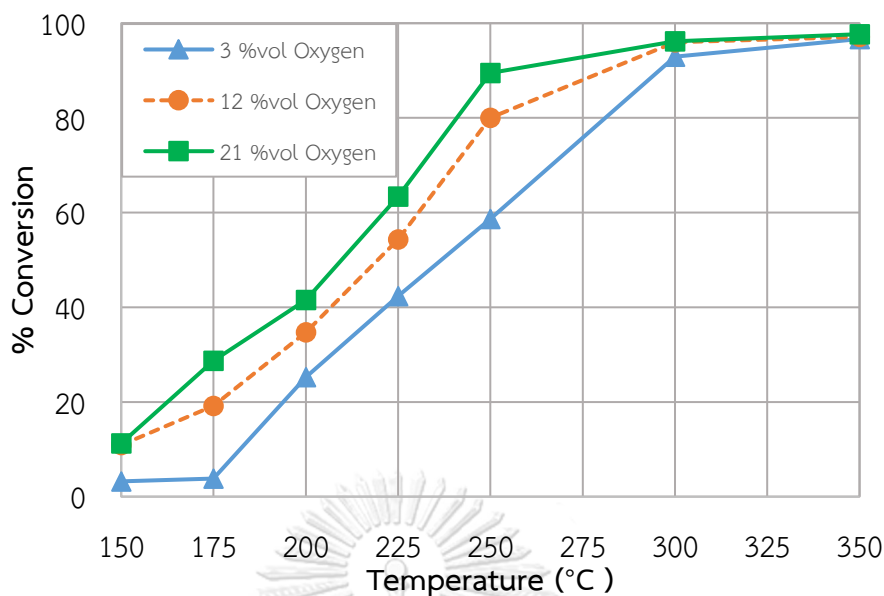




รูปที่ 5.7 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอีนของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  3, 12 และ 21 %vol



รูปที่ 5.8 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอีนของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  3, 12 และ 21 %vol



รูปที่ 5.9 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  3, 12 และ 21 %vol

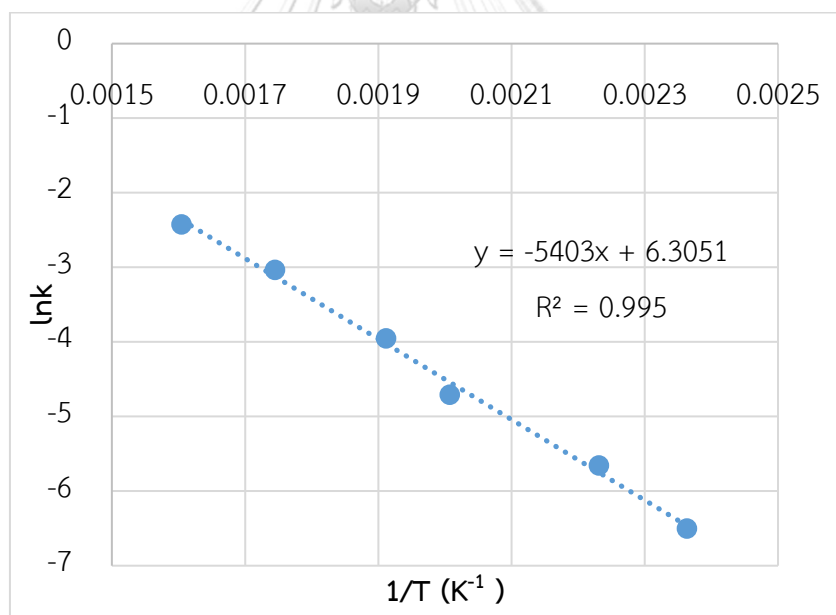
ในการออกซิไดซ์โทลูอินด้วยโมเลกุล  $O_2$  บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์นั้นมีแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอยู่ 3 แบบด้วยกันคือแบบจำลอง Langmuir-Hinshelwood, แบบจำลอง Eley-Rideal และแบบจำลอง Mars Van Krevelen (REDOX)

ในกรณีของแบบจำลอง Langmuir-Hinshelwood และ REDOX นั้นในช่วงแรกถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของ  $O_2$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้เพิ่มตามสัดส่วน  $O_2$  ที่เพิ่มขึ้นโดยจะวิ่งเข้าหาค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นเราจะเพิ่มความเข้มข้นของ  $O_2$  ขึ้นไปอีกจาก 12 %vol ไปเป็น 21%vol ถ้าอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง จะเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir-Hinshelwood โดยตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Langmuir-Hinshelwood นั้นถ้าสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งดูดซับบนพื้นผิวได้มากกว่าอีกตัวหนึ่งมากจะทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นอีกตัวบนพื้นผิวนั้นน้อยมากอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็จะลดต่ำลง ถ้าหากเป็นแบบจำลองของ Eley-Rideal ที่  $O_2$  3 %vol, 12 %vol และ 21%vol เมื่อเราเพิ่มความเข้มข้น  $O_2$  จาก 3%vol ไปเป็น 12%vol นั้นเพิ่มขึ้น 4 เท่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาก็ต้องเพิ่มขึ้น 4 เท่า ถ้าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นไม่มากหรือคงที่ จะเป็นไปตามแบบจำลอง REDOX

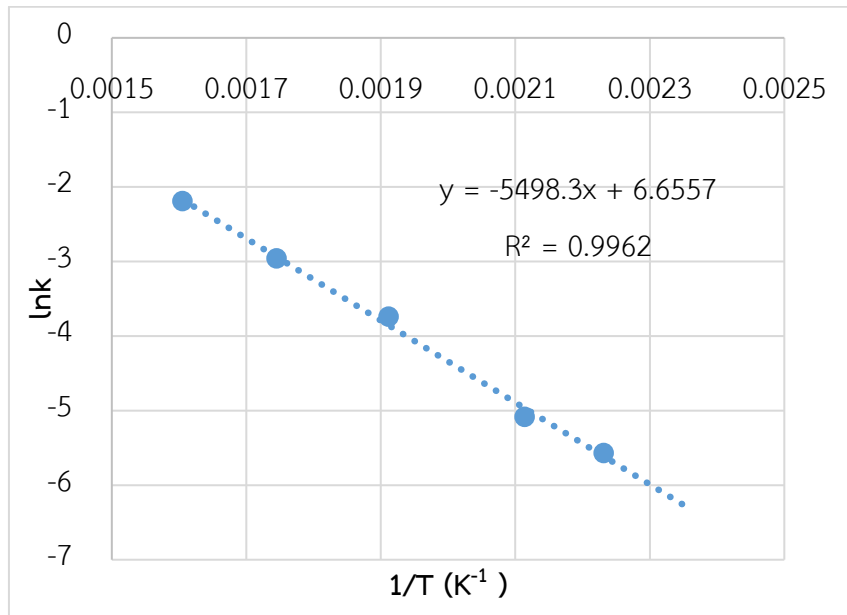
ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์นั้นโดยเฉพาะโลหะออกไซด์  $V_2O_5$  ที่สามารถถูกรีดิวซ์ได้ เป็นการยากที่จะแยกแยะว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นแบบ Langmuir-Hinshelwood หรือ REDOX เพราะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 รูปแบบร่วมกัน ในการทดลองของเรานั้น แสดงดังรูปที่ 5.7-5.9 เนื่องจากความเข้มข้นของ  $O_2$  สูงกว่าโทลูอินมาก แต่ที่ความเข้มข้น  $O_2$  21%vol เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้สูงกว่าที่ 12%vol มากก็มีความเป็นไปได้ว่ากลไกการเกิดน่าจะเป็นแบบ REDOX มากกว่า

### 5.3 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน

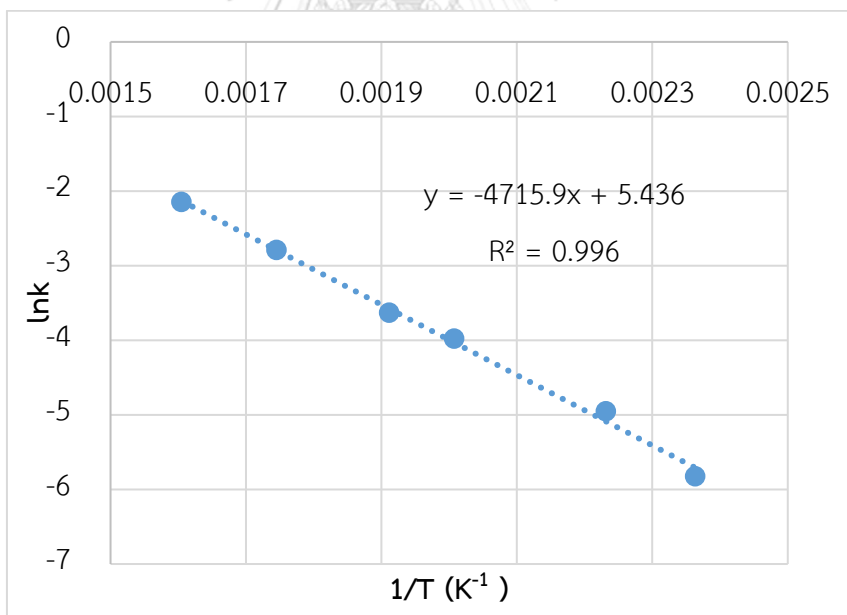
พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ สำหรับปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน ทำโดยใช้สมมติฐานที่ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งอุณหภูมิคงที่ (Isothermal fixed-bed reactor) และเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเนื่องจากความเข้มข้นของโทลูอินต่ำกว่าความเข้มข้นของ  $O_2$  มาก ดังนั้นความเข้มข้นของ  $O_2$  จึงให้เป็นค่าคงที่ กราฟระหว่าง  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  แสดงดังรูปที่ 5.10-5.18



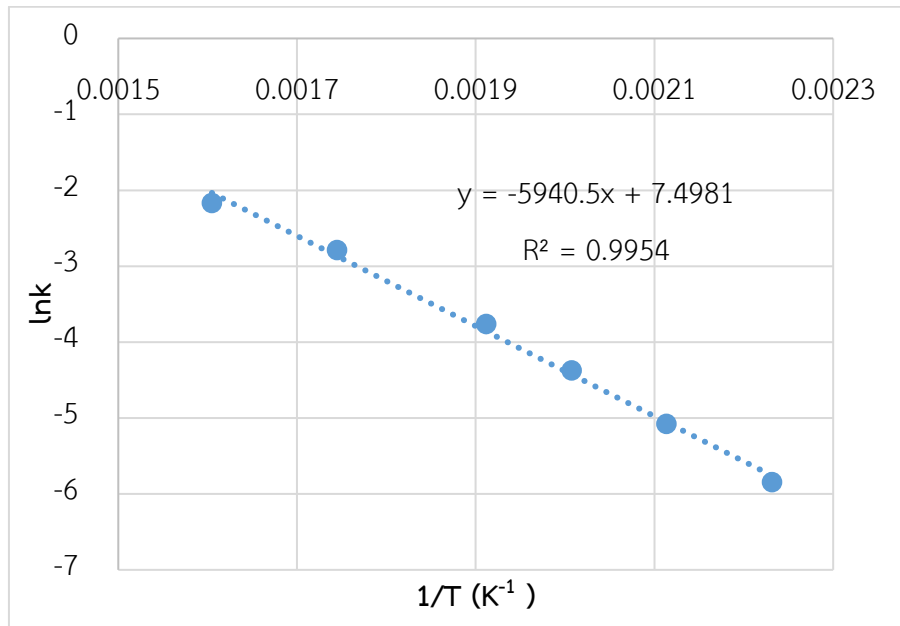
รูปที่ 5.10 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  3 %vol



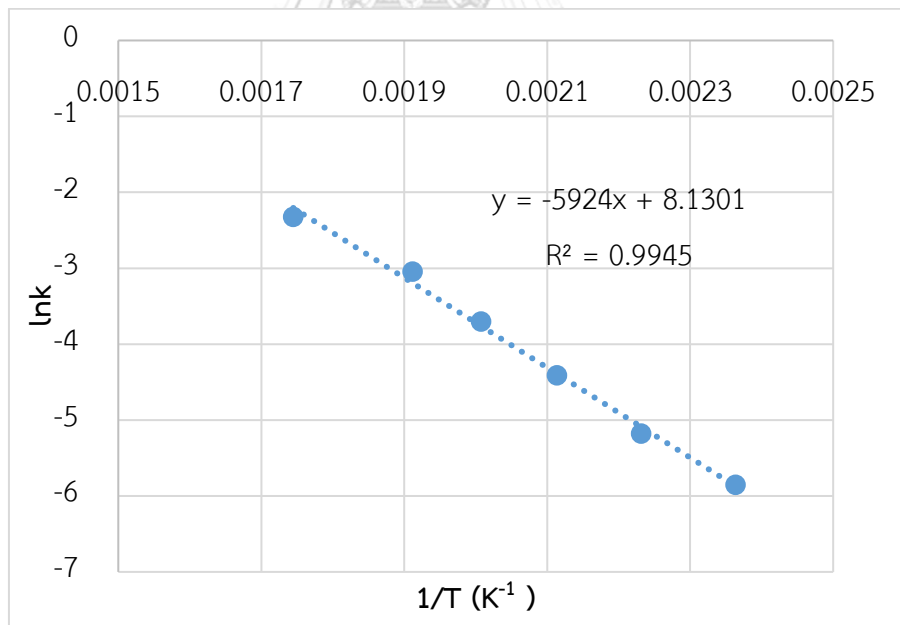
รูปที่ 5.11 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  12 %vol



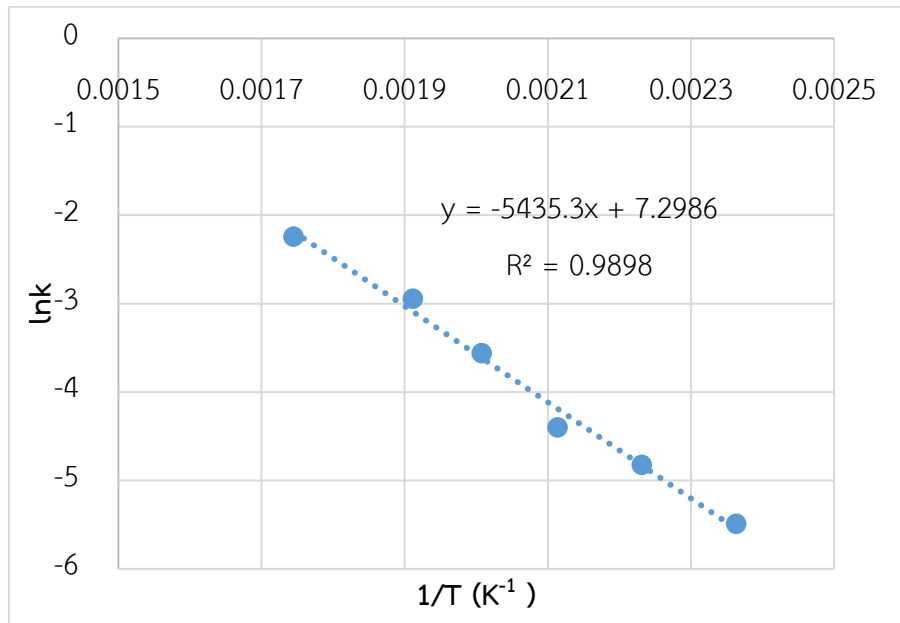
รูปที่ 5.12 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  21 %vol



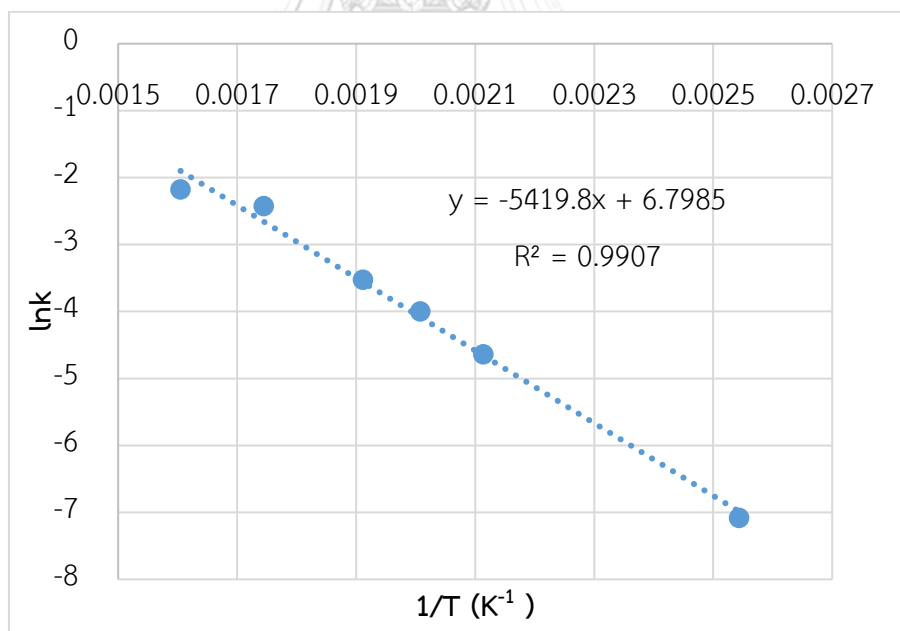
รูปที่ 5.13 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  3 %vol



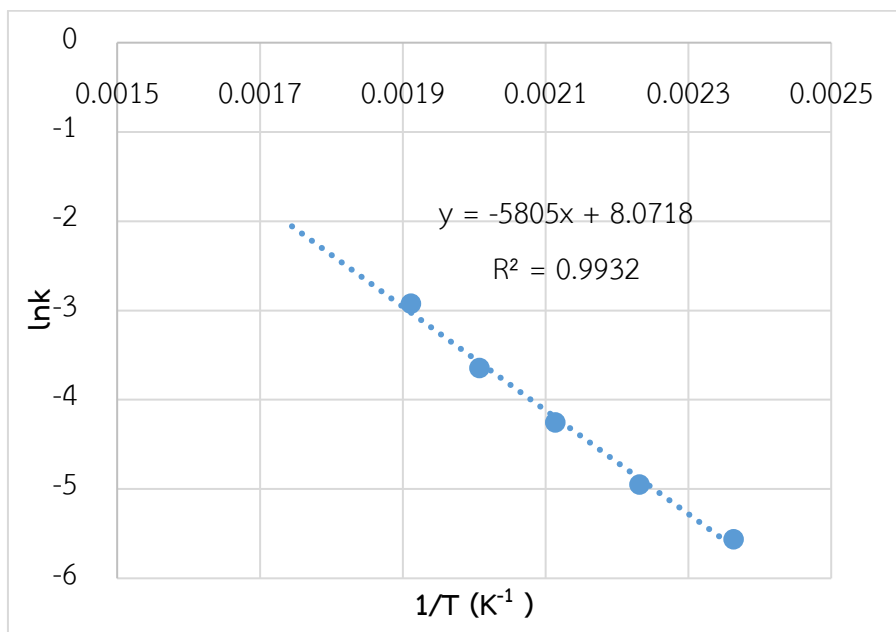
รูปที่ 5.14 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  12 %vol



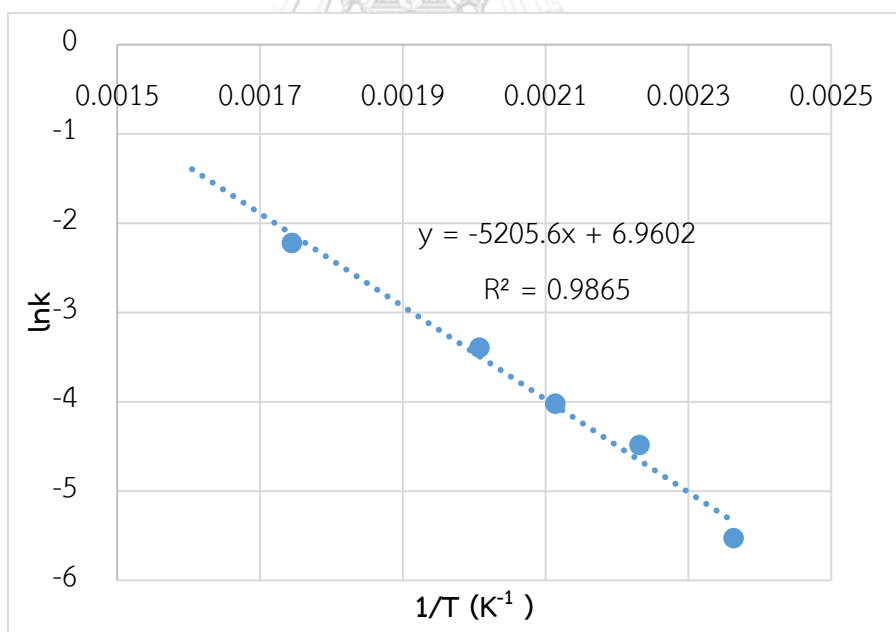
รูปที่ 5.15 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  21 %vol



รูปที่ 5.16 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  3 %vol



รูปที่ 5.17 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  12 %vol



รูปที่ 5.18 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  21 %vol

ผลการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) และค่า Pre-exponential factor ( $k_0$ ) แสดงดังตารางที่ 5.4 พบว่า  $E_a$  มีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าเป็นปฏิกิริยาเดียวกัน คือมีลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแบบเดียวกัน ส่วนค่า  $k_0$  เป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณตำแหน่งที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site)

ในกรณีที่มีการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถันพบว่า เมื่อความเข้มข้นกรดกำมะถันเพิ่มขึ้น ค่า  $k_0$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับสภาพด้วยกรดกำมะถันเป็นการเพิ่มปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา การที่  $k_0$  มีค่ามาก บ่งบอกว่ามีปริมาณตำแหน่งที่ว่างไวจำนวนมาก แต่บอกไม่ได้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาได้ทุกตำแหน่ง ดังนั้นคือ  $k_0$  ไม่ได้ส่งผลต่อลำดับการเกิดปฏิกิริยาหรือค่า  $E_a$

จากแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาแบบ REDOX จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกโทลูอินจะไปดึง  $O_2$  ออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  กลายเป็นผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนที่สองตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่ถูกรีดิวซ์จะทำปฏิกิริยากับ  $O_2$  ที่ป้อนเข้าไปพร้อมกับโทลูอิน ทำให้กลับคืนเป็นโครงสร้างเดิมอีกครั้ง ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่เพิ่มขึ้นจะไปช่วยให้เกิดการออกซิไดซ์โทลูอินได้ดีขึ้น จะเห็นว่าค่า  $E_a$  มีแนวโน้มที่ลดลง

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน

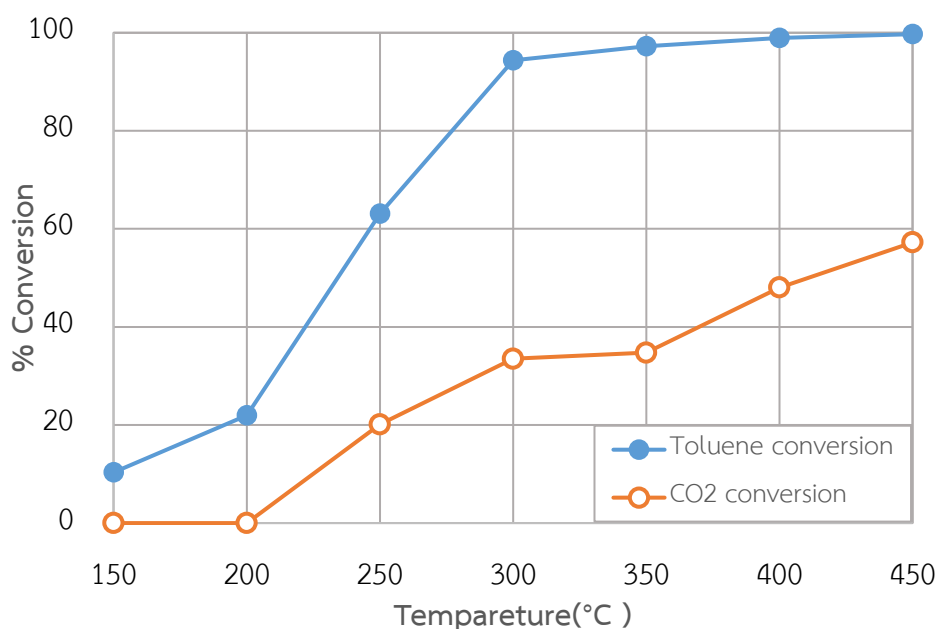
ตัวเร่งปฏิกิริยา	พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์					
	$O_2$ 3 %vol		$O_2$ 12 %vol		$O_2$ 21 %vol	
	$k_0$	$E_a$	$k_0$	$E_a$	$k_0$	$E_a$
$V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	547.36	44.92	777.20	45.72	229.52	39.21
$V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	1804.61	49.39	3395.14	49.26	1478.22	45.19
$V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	896.5	45.06	1937.01	48.27	1024.64	43.16

หมายเหตุ :  $E_a$  มีหน่วย kJ/mol

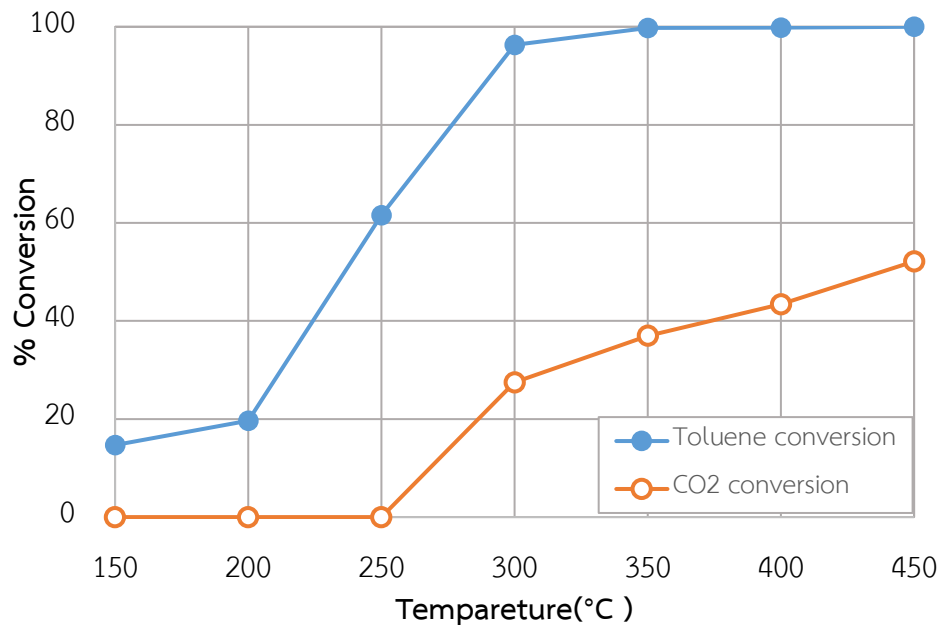


#### 5.4 การเปรียบเทียบผลพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินและการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR

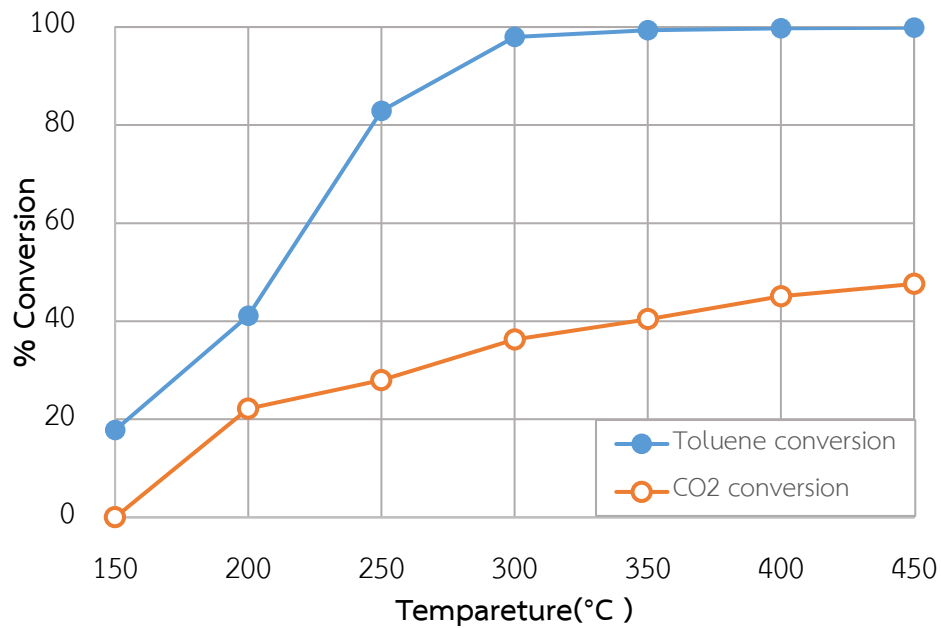
จากงานวิจัยของ Imprapantee [2] ได้มีการทดสอบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก  $TiO_2$  มีการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกรดกำมะถันเข้มข้น 0 M, 0.2 M และ 0.5 M คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ มีปริมาณโลหะออกไซด์  $V_2O_5$  บนตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  4 %wt. พื้นที่ผิวของตัวรองรับ  $TiO_2$  อยู่ในช่วง 49-51  $m^2/g$  และ พื้นที่ผิวของ  $V_2O_5/TiO_2$  อยู่ในช่วง 39-42  $m^2/g$  สภาวะในการทำปฏิกิริยา องค์ประกอบของแก๊สในระบบประกอบด้วย โทลูอิน 200 ppm,  $NH_3$  120 ppm,  $NO$  120 ppm,  $O_2$  15 %vol,  $H_2O$  15 %vol,  $SO_2$  30 ppm และส่วนที่เหลือเป็น  $N_2$  ใช้อัตราการไหลรวม 200 ml/min ช่วงอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา 150-450 °C โดย %Toluene conversion และ %  $CO_2$  conversion ของการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR แสดงดังรูปที่ 5.19-5.21 พบว่าในสภาวะที่มีการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับ SCR นั้นมีการเกิด  $CO_2$  อย่างเห็นได้ชัดในช่วงอุณหภูมิ 250-450 °C ในขณะที่สภาวะที่มีการออกซิไดซ์โทลูอินเพียงอย่างเดียวกลับมี  $CO_2$  เกิดในปริมาณที่ต่ำถึงแม้ว่าจะใช้  $O_2$  เข้มข้น 21 %vol แล้วก็ตาม แสดงให้เห็นว่าการมี  $NO$  นั้น น่าจะส่งผลต่อการสลายตัวของโทลูอินเกิดไปเป็น  $CO_2$



รูปที่ 5.19 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR



รูปที่ 5.20 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR

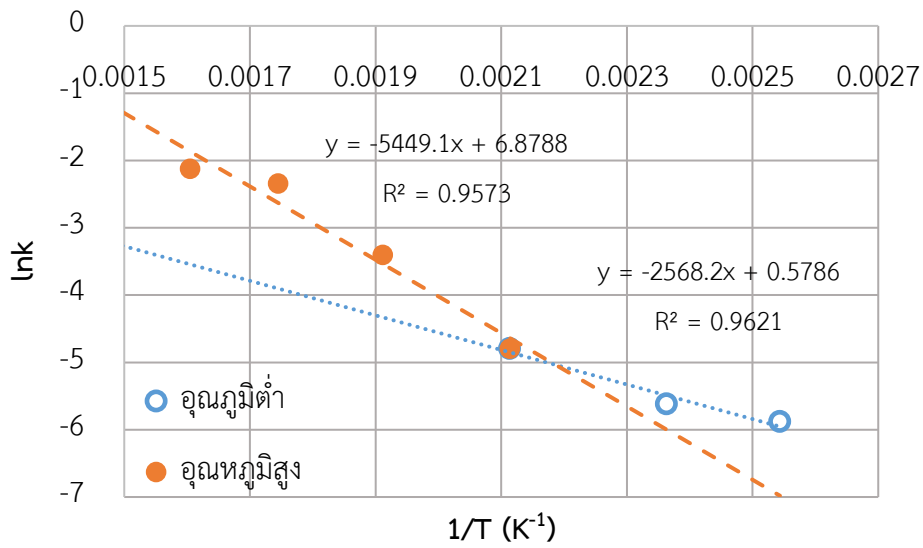


รูปที่ 5.21 ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR

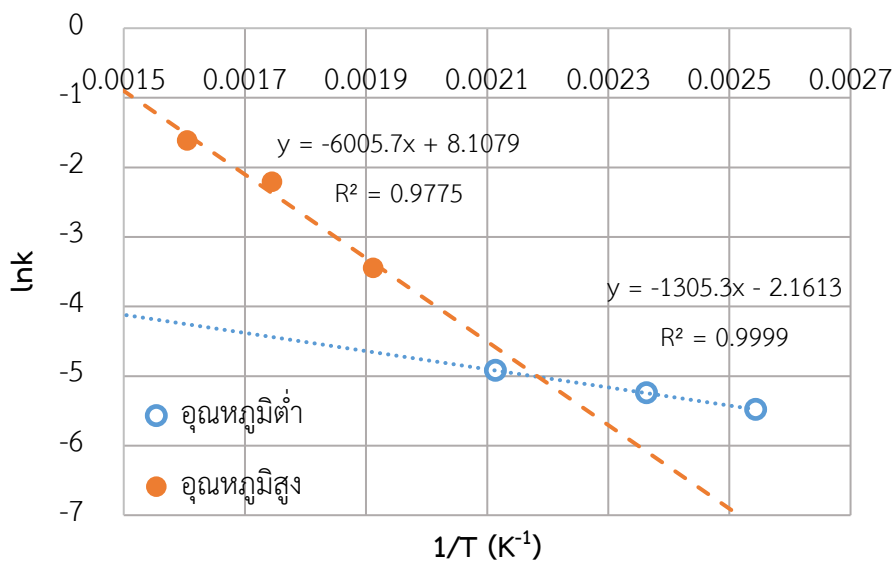
การเปรียบลักษณะการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินและการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR จากรูปที่ 5.10-5.18 จะเห็นว่าในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินเพียงอย่างเดียวจะพลอตกราฟระหว่าง  $\ln k$  และ  $(1/T)$  ออกมาได้เส้นตรงเพียงเส้นเดียว จะได้ค่า  $k_0$  และ  $E_a$  ออกมาค่าเดียว คือปฏิกิริยาจะเกิดผ่านกลไก REDOX คือโทลูอินจะไปดึง  $O_2$  ออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  โดยตรงได้สารผลิตภัณฑ์

ส่วนปฏิกิริยาการกำจัดโทลูอินร่วมกับระบบ SCR แสดงดังรูปที่ 5.22-5.24 จะเห็นว่ามีเส้นตรงเกิดขึ้นสองเส้น นั่นคือมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างน้อยสองปฏิกิริยา ปฏิกิริยาแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ (150-200 °C) จะเห็นค่า  $E_a$  ต่ำ แสดงดังตารางที่ 5.5 และปฏิกิริยาที่สองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (250-350 °C) จะเห็นว่า  $E_a$  สูงกว่า เมื่อพิจารณาที่ค่า  $k_0$  จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ มีค่า  $k_0$  ที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่เกิดที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากอาจจะมีตำแหน่งที่ว่างไวสองแบบ แบบแรกอาจจะทำปฏิกิริยาได้สูงมีความว่องไว ปฏิกิริยาจึงเกิดในช่วงแรก แต่มีปริมาณต่ำมาก (ค่า  $k_0$  ต่ำ) จึงไม่ได้ส่งผลชัดเจนต่อการออกซิไดซ์โทลูอิน แบบที่สองอาจจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไม่เท่าแบบแรก ปฏิกิริยาจึงเกิดในช่วงหลัง (อุณหภูมิสูง) แต่เพราะมีปริมาณสูงมากกว่า (ค่า  $k_0$  สูงกว่า) จึงส่งผลต่อการออกซิไดซ์โทลูอินได้อย่างชัดเจน จะเห็นว่า % Toluene conversion สูงขึ้นมากในช่วงนี้

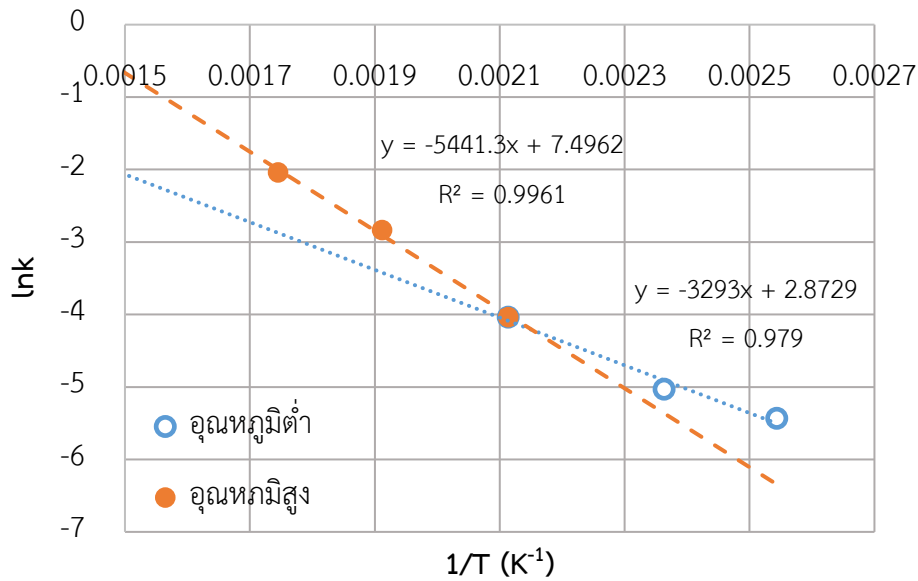
เมื่อเปรียบเทียบกราฟระหว่างปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอินเพียงอย่างเดียวกับปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR พบว่ากราฟปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินมีความชันใกล้เคียงกับความชันของกราฟที่เกิดในช่วงอุณหภูมิสูงของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR เมื่อพิจารณาค่า  $E_a$  ในตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าในระบบที่มีการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR มีค่า  $E_a$  ต่ำกว่าในระบบที่มีการออกซิไดซ์โทลูอินเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการออกซิไดซ์โทลูอินในระบบที่มี NO ร่วมด้วยนั้น อาจมีปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นร่วมด้วย นอกเหนือไปจากปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินผ่านกลไก REDOX นั่นก็คือปฏิกิริยาระหว่างโทลูอิน และ NO โดยตรงแล้วเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจะเห็นว่าการกำจัดโทลูอินร่วมกับระบบ SCR สามารถทำได้และกำจัดโทลูอินได้ดีขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 5.22 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M) ที่  $O_2$  15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR



รูปที่ 5.23 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M) ที่  $O_2$  15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR



รูปที่ 5.24 ค่า  $\ln(k)$  และ  $(1/T)$  ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ที่  $O_2$  15 %vol ในการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของการออกซิไดซ์โทลูอินและการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์					
	การออกซิไดซ์โทลูอิน		การออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR			
	$k_0$	$E_a$	150-200 °C		250 -350 °C	
			$k_0$	$E_a$	$k_0$	$E_a$
$V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	777.20	45.72	1.78	21.35	10884.55	47.25
$V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	3395.14	49.26	8.68	10.85	3320.60	49.93
$V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	1937.01	48.27	17.69	27.37	1801.18	45.24

หมายเหตุ :  $E_a$  มีหน่วย kJ/mol

### 5.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการออกซิไดซ์โทลูอินบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการปรับสภาพและความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในระบบ เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าลดลง โดยค่าพลังงานกระตุ้นที่ความเข้มข้น  $O_2$  3 %vol อยู่ในช่วง 44-49 kJ/mol สำหรับที่ความเข้มข้น  $O_2$  12 %vol พบว่าพลังงานกระตุ้น อยู่ในช่วง 45-49 kJ/mol และที่ความเข้มข้น  $O_2$  21 %vol ค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 39-45 kJ/mol

เมื่อเปรียบเทียบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินในสถานะที่มี NO รวมด้วยนั้นพบว่า มีปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นด้วยที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ และตรวจพบ  $CO_2$  ซึ่งบ่งชี้ว่าการเกิด  $CO_2$  น่าจะเกี่ยวข้องกับ การที่ NO เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารมัธยันต์ที่เกิดจากการออกซิไดซ์โทลูอิน



## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นการสรุปผลการทดสอบที่ได้บรรยายในบทที่ 5 และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้ศึกษาต่อในอนาคต

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $V_2O_5/TiO_2$ ) ที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถัน โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ที่เตรียมขึ้น โดยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของตัวรองรับ แต่เป็นการเพิ่มปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดสอบปฏิกิริยาออกซิไดซ์โทลูอิน ความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการออกซิไดซ์โทลูอินเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่เท่ากัน การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดกำมะถันนั้น ส่งผลให้ค่า % Toluene conversion เพิ่มขึ้น และ ตรวจพบ  $CO_2$  ในปริมาณที่ต่ำมาก แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกซิไดซ์โทลูอินน่าจะเป็นสารอินทรีย์ที่จุดเดือดสูง เช่น กรดเบนโซอิก ตกค้างอยู่ในระบบ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  สามารถออกซิไดซ์โทลูอินได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 250-350 °C

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามแบบจำลอง REDOX เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $O_2$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินกับการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR การที่มี  $NO$  ร่วมด้วยนั้นทำให้มีปฏิกิริยาอื่นเกิดขึ้นร่วมด้วยที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ทำให้ค่า  $E_a$  ที่ปรากฏให้เห็นในระบบที่มี SCR ร่วมด้วย มีผลของปฏิกิริยาอื่นร่วมนอกเหนือไปจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช่กลุ่มของโทลูอิน และตรวจพบ  $CO_2$  ที่เห็นได้ชัดเจนในช่วงอุณหภูมิสูง (250-350 °C) แสดงให้เห็นว่า  $NO$  อาจจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารมัธยันต์ที่เกิดจากการออกซิไดซ์โทลูอินกลายเป็น  $CO_2$  จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  สามารถใช้ในการกำจัดโทลูอินร่วมกันในระบบ SCR ได้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โพลูอิน ที่สภาวะอื่นๆ ด้วย เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของการออกซิไดซ์โพลูอิน
- ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นผงละเอียด ทำให้ต้องใช้ความดันลดของแก๊สที่สูง ดังนั้นจึงควรมีการใช้รูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝังบนพื้นผิวของโมนอลิท (Monolith) เพื่อช่วยลดความดันลดของการไหลของแก๊สภายในระบบได้





## บรรณานุกรม

1. Thetkathuek, A.T., สารโพลูอิน: การประเมินการรับสัมผัสและผลกระทบต่อสุขภาพ Toluene: Exposure Assessment and Health Effect. Naresuan University Journal: Science Technology, 2013. 20: p. 101-111.
2. Imprapantee N., Enhanced selective catalytic reduction and toluene combustion actives of  $V_2O_5/TiO_2$  Catalyst by sulfuric acid treatment. Master thesis (M.Eng), Chulalongkorn university 2016.
3. Liotta, L.F., Catalytic oxidation of volatile organic compounds on supported noble metals. Applied Catalysis B, Environmental, 2010. 100(3): p. 403-412.
4. Ma, Z., Yue, Y., Deng, X., and Gao, Nanosized anatase  $TiO_2$  as precursor for preparation of sulfated titania catalysts. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2002. 178(1): p. 97.
5. กรมควบคุมมลพิษ, นโยบายด้านสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ของประเทศไทย. 2550.
6. Devathanan and G., Complications of chronic glue (toluene) abuse in adolescents. Australian and New Zealand journal of medicine, 1984. 14(1): p. 39-43.
7. พ. พรเฉลิมพงศ์, Oxidation reaction (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน). ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร.
8. Ge, H., Gas phase catalytic partial oxidation of toluene in a microchannel reactor. Catalysis Today, 2005. 110(1): p. 171-178.
9. Cant, N.W., D.E. Angove, and D.C. Chambers, Nitrous oxide formation during the reaction of simulated exhaust streams over rhodium, platinum and palladium catalysts. Applied Catalysis B: Environmental, 1998. 17(1): p. 63-73.
10. Ihm, S.K.I.S.-K., Development of New Vanadium-Based Oxide Catalysts for Decomposition of Chlorinated Aromatic Pollutants. 2002.
11. Ross, J.J.a.J.R., The development of supported vanadia catalysts for the combined catalytic removal of the oxides of nitrogen and of chlorinated hydrocarbons from flue gases. Catalysis Today, 1997. 35(1): p. 97.

12. Shiju, N.R., Support vanadium oxide catalysts in oxidation and oxidative dehydrogenation reaction: structure and catalytic properties. 2004.
13. Matralis and H.K., Selective oxidation of toluene over  $V_2O_5/TiO_2$  catalysts. Effect of vanadium loading and of molybdenum addition on the catalytic properties. *Applied Catalysis A: General*, 1995. 126(2): p. 365-380.
14. Bautista and F.M., Gas-phase selective oxidation of toluene on  $TiO_2$ -sepiolite supported vanadium oxides: Influence of vanadium loading on conversion and product selectivities. *Catalysis Today*, 2007. 128(3): p. 183-190.
15. Krishnamoorthy, S., J.P. Baker, and M.D. Amiridis, Catalytic oxidation of 1,2-dichlorobenzene over  $V_2O_5/TiO_2$ -based catalysts. *Catalysis Today*, 1998. 40(1): p. 39-46.
16. Lichtenberger, J. and M.D. Amiridis, Catalytic oxidation of chlorinated benzenes over  $V_2O_5/TiO_2$  catalysts. *Journal of Catalysis*, 2004. 223(2): p. 296-308.
17. Sroysang N., Effects of  $SO_2$  concentrations on the catalytic activity of  $V_2O_5$ - $MgO/TiO_2$  during the simultaneous removal of NO and toluene in an effluent gas. Master thesis (M.Eng) Chulalongkorn university 2019..
18. Posungnoen L., Effects of  $SO_2$  on the simultaneously removal activity of NO and toluene of  $V_2O_5/TiO_2$  catalyst modified with sulphuric acid solution. Master thesis (M.Eng) Chulalongkorn university 2019..
19. Genty, E., S. Siffert, and R. Cousin, Investigation of reaction mechanism and kinetic modelling for the toluene total oxidation in presence of CoAlCe catalyst. *Catalysis Today*, 2019. 333: p. 28-35.
20. Choudhary, V.R., G.M. Deshmukh, and D.P. Mishra, Kinetics of the complete combustion of dilute propane and toluene over Fe-doped  $ZrO_2$  catalyst. 2004.
21. Technologies, C.o.C., Section 3. Technology Characterization – Combustion Turbines. 2015.
22. Choo, S.T., Lee, Y.G., Nam, I.-S., Ham, S.-W., and Lee, L.-B, Characteristics of  $V_2O_5$  Supported on sulfated Ti-pillared clay: reactivity and reducibility of catalysts. *Applied Catalysis A: General* 305(1), 2006: p. 7-14.



### ภาคผนวก ก

#### การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การคำนวณปริมาณของวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ( $V_2O_5/TiO_2$ ) ให้ได้ปริมาณของ  $V_2O_5$  เป็น 4 %wt. โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

#### สารตั้งต้นที่ใช้

1. ไทเทเนียมออกไซด์ Commercial grade ( $TiO_2$ , P25)
2. แอมโมเนียมเมทาวานาเดท ( $NH_4VO_3$ )
3. กรดออกซาลิก ( $H_2C_2O_4$ )

#### มวลโมเลกุลของสาร

1. สารตั้งต้น  $NH_4VO_3$  มีมวลโมเลกุล 116.98
2. โลหะออกไซด์  $V_2O_5$  มีมวลโมเลกุล 181.88

#### วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ให้มีปริมาณโลหะออกไซด์  $V_2O_5$  4 %wt. โดยจะใช้ตัวรองรับ  $TiO_2$  ปริมาณ 2.4 กรัม และต้องใช้สารตั้งต้น  $NH_4VO_3$  ปริมาณ

$$\frac{x}{2.4 + x} = 0.04$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  $x = 0.1$  กรัม เมื่อ X คือ ปริมาณ  $V_2O_5$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ถ้า  $V_2O_5$  มวล 181.88 กรัม ต้องใช้  $NH_4VO_3 = 2 \times 116.98 = 233.86$  กรัม

ถ้าต้องการ  $V_2O_5$  มวล 0.1 กรัม ต้อง  $NH_4VO_3 = 0.1286$  กรัม

ดังนั้นต้องใช้  $NH_4VO_3$  ปริมาณ 0.1286 กรัม ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  4 %wt.

### ภาคผนวก ข

#### การคำนวณปริมาณโลหะออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM-EDX

การคำนวณปริมาณ V สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณ  $V_2O_5$  ด้วยเทคนิค SEM-EDX ทำได้ดังนี้ จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง  $V_2O_5$  ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ พบปริมาณ V เท่ากับ 2.39 %wt

มี  $V = 2 \times 50.94 = 101.88$  กรัม อยู่ใน  $V_2O_5$  181.88 กรัม

ถ้ามี  $V = 2.39$  กรัม จะอยู่ใน  $V_2O_5 = (181.88 \times 2.39)/101.88$   
 $= 4.26$  กรัม

ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  มีปริมาณ  $V_2O_5$  เท่ากับ 4.26 %wt.

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ V ด้วยเทคนิค SEM-EDX

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ V (%wt.)	ปริมาณ $V_2O_5$ (%wt.)
$V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	2.39	4.27
$V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	2.26	4.03
$V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)	2.01	3.59

## ภาคผนวก ค

### การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

#### ค.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับการสร้าง Calibration curve ของโทลูอีน

ต้องการเตรียมความเข้มข้นโทลูอีนเข้า 300 ppm และเก็บตัวอย่างชนิด 2 mL (0.002 L) ที่ความดันบรรยากาศ (P) 1 atm โดยกำหนด ค่าคงที่ของแก๊ส (R) = 0.08206 L atm K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup> อุณหภูมิแก๊สที่ทำการเก็บ T(K) = 303.16 K โมลโมเลกุลโทลูอีน = 92.141

$$\begin{aligned} \text{แก๊สเข้า 2 ml คิดเป็นโมลจาก Mole of gas} &= \frac{PV}{RT} \\ &= \frac{1 \text{ (atm)} \times 0.002 \text{ (L)}}{0.08206 \text{ ((L. atm) / (K .mol))} \times 303.16 \text{ K}} \\ &= 8.0395 \times 10^{-5} \text{ mol} \end{aligned}$$

ดังนั้นจำนวนโมลโทลูอีน (N<sub>T</sub>) ในแก๊ส 2 mL = 8.0395 × 10<sup>-5</sup> × (300/10<sup>6</sup>) = 2.4118 × 10<sup>-8</sup> mol ถ้าในการสร้าง Calibration curve ปริมาตรสูงสุดที่จะทำการฉีดคือ 1 μL ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายโทลูอีนที่ต้องเตรียมคือ ( 2.4118 × 10<sup>-8</sup>)/(1 × 10<sup>-6</sup>) = 0.0241189 mol/L หรือคิดเป็นน้ำหนักโทลูอีน 0.0241189 × 92.141 = 2.222 g/L ถ้าต้องการเตรียมสารละลายเพียงแค่ 100 mL ดังนั้นจะต้องชั่งโทลูอีนประมาณ 2.222 × (100/1000) = 0.222 g แล้วละลายน้ำให้ได้ปริมาตร 100 mL

#### ค.2 กราฟมาตรฐานโทลูอีน (calibration curve of toluene)

การสร้างกราฟมาตรฐานโทลูอีน (calibration curve of toluene) โดยการชั่งโทลูอีน 0.2331 กรัม ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นเติมน้ำลงไปเล็กน้อย เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมเมทิลแอลกอฮอล์ลงไปเล็กน้อย เพื่อช่วยให้โทลูอีนสามารถละลายในน้ำได้ จากนั้นใช้น้ำกลั่นปรับปริมาณเป็น 100 mL โดยความเข้มข้นของโทลูอีนในสารละลายสามารถคำนวณได้จาก สมการ ค.1 และผลการคำนวณของโทลูอีน ที่ความเข้มข้น 30-1200 ppm แสดงในตารางที่ ค.1

$$\text{Toluene concentration (ppm)} = \frac{\text{Mass of toluene} \times \text{Inject volume} \times 10^6}{\text{M.W. of toluene} \times \text{Solution volume} \times \text{Mole of gas}} \quad (\text{สมการ ค.1})$$

ตัวอย่าง การคำนวณการฉีดโทลูอีนปริมาตร 0.1 μL

$$\text{Toluene concentration} = \frac{0.2331 \times 0.1 \times 10^{-6} \times 10^6}{92.14 \times (100/1000) \times 8.0395 \times 10^{-5}} = 31.47 \text{ ppm}$$

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณของโทลูอินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ppm)

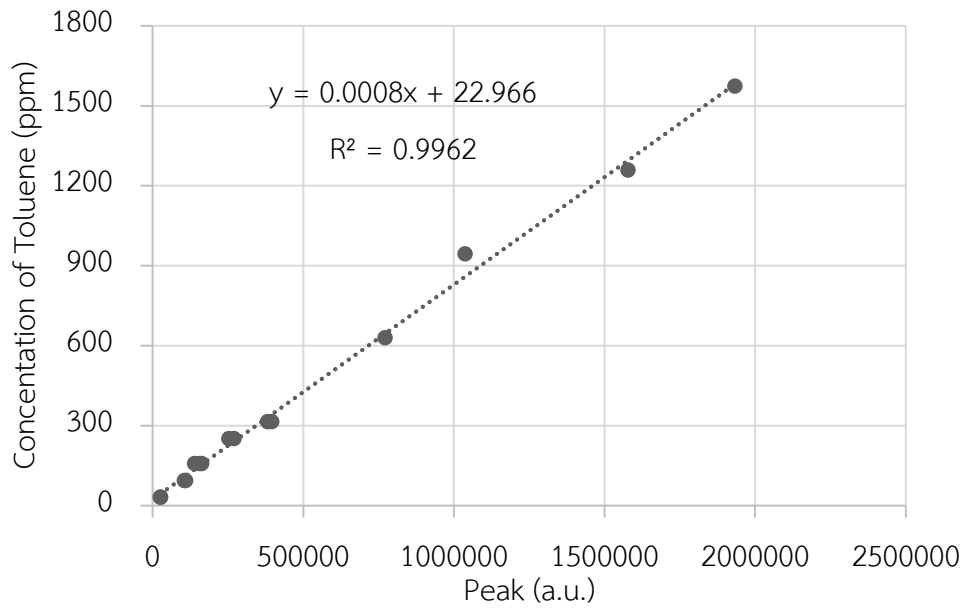
Toluene (g)	Volume (mL)	$C_t$ (mol/L)	$V_{t_{inj}}$ ( $\mu$ L)	$N_T$ (mol)	Mole of Gas (mol)	Toluene (ppm)
0.2331	100	0.0253	0.1	$2.5298 \times 10^{-9}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	31.47
0.2331	100	0.0253	0.3	$7.5895 \times 10^{-9}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	94.40
0.2331	100	0.0253	0.5	$1.2649 \times 10^{-8}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	157.34
0.2331	100	0.0253	0.8	$2.0239 \times 10^{-8}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	251.74
0.2331	100	0.0253	1	$2.5298 \times 10^{-8}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	314.68
0.2331	100	0.0253	2	$5.0596 \times 10^{-8}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	629.35
0.2331	100	0.0253	3	$7.5895 \times 10^{-8}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	944.03
0.2331	100	0.0253	4	$1.0119 \times 10^{-7}$	$8.0395 \times 10^{-5}$	1258.70

ความเข้มข้นของโทลูอิน ;  $C_t$  (mol/L) =  $\frac{\text{g of toluene}}{\text{M.W. of toluene} \times V}$

ปริมาณโทลูอินที่ฉีด ;  $V_{t_{inj}}$

จำนวนโมลของโทลูอินทั้งหมด ;  $N_T$  (mol) =  $C_T \times V_{t_{inj}}$

เมื่อนำค่าพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง Gas Chromatograph ที่มีตัวตรวจวัดเป็น FID มาพล็อตเป็นกราฟระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและปริมาณของโทลูอินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะได้กราฟมาตรฐานของโทลูอิน ดังแสดงในรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานของโทลูอีนที่มีความเข้มข้นในช่วง 30-1200 ppm

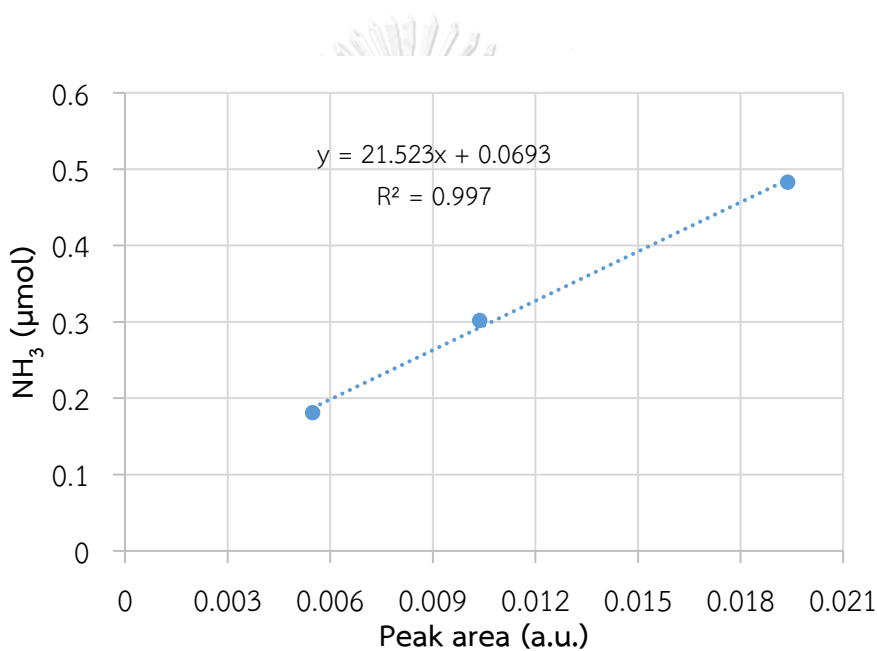




## ภาคผนวก ง

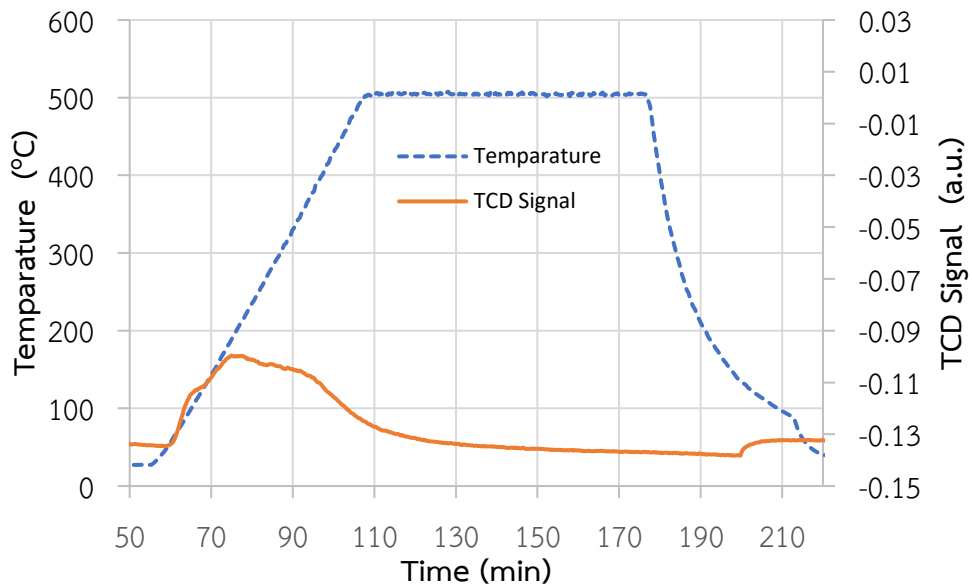
การคำนวณความเป็นกรดทั้งหมดบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ด้วย  
เทคนิค  $NH_3$ -TPDง.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค  $NH_3$ -TPD

การคำนวณปริมาณการคายซับของแอมโมเนีย เพื่อใช้หาปริมาณที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนพื้นที่ใต้กราฟที่วัดได้จากเทคนิค  $NH_3$ -TPD ให้เป็นปริมาณความเป็นกรด โดยใช้ Calibration curve ของแอมโมเนีย แสดงดังรูปที่ ง.1



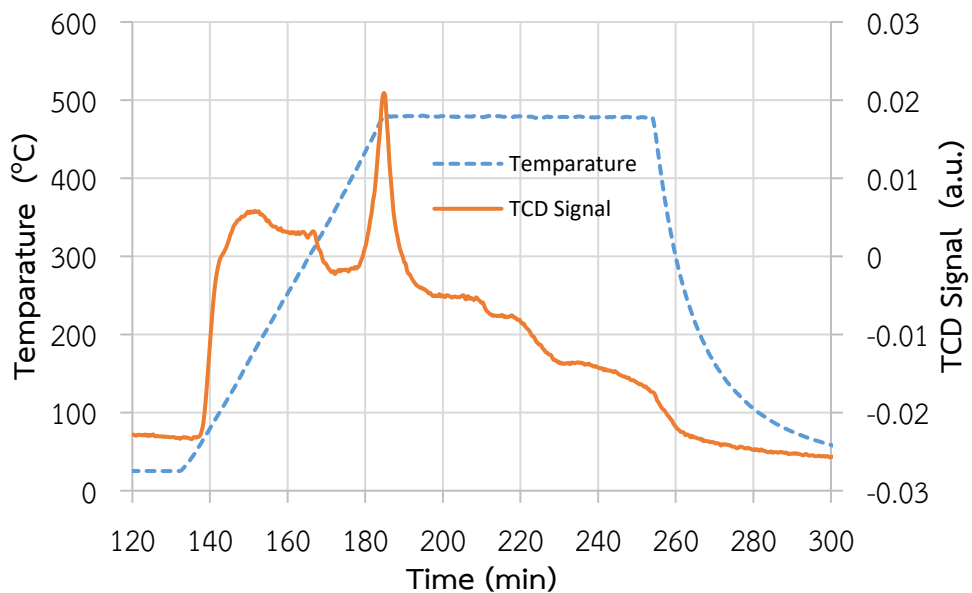
รูปที่ ง.1 กราฟ Calibration curve ของแอมโมเนีย

ง.2 ข้อมูล  $\text{NH}_3$ -TPD pattern ของตัวรองรับ  $\text{TiO}_2$  (0 M)



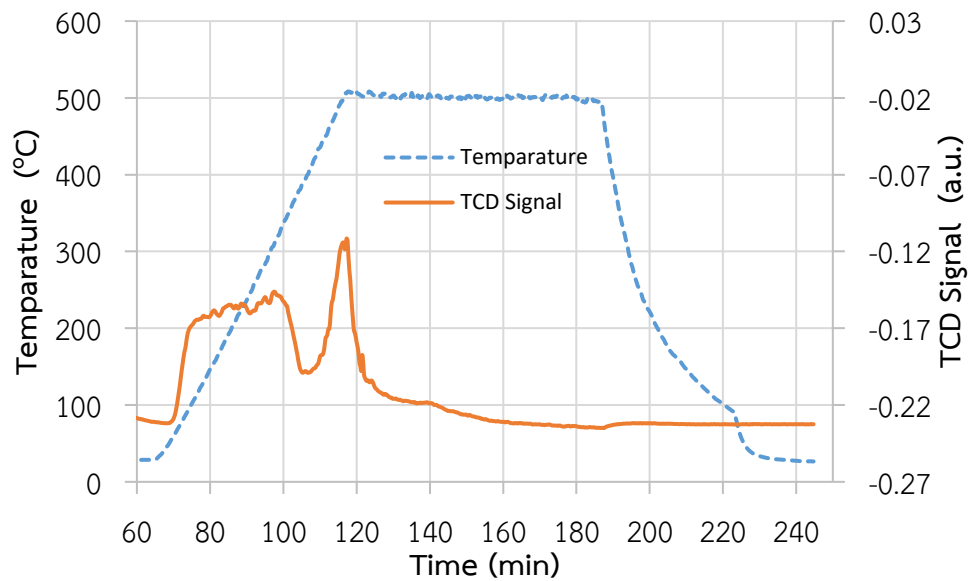
รูปที่ ง.2 กราฟ  $\text{NH}_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  (0M)

ง.3 ข้อมูล  $\text{NH}_3$ -TPD pattern ของตัวรองรับ  $\text{TiO}_2$  (0.2 M)



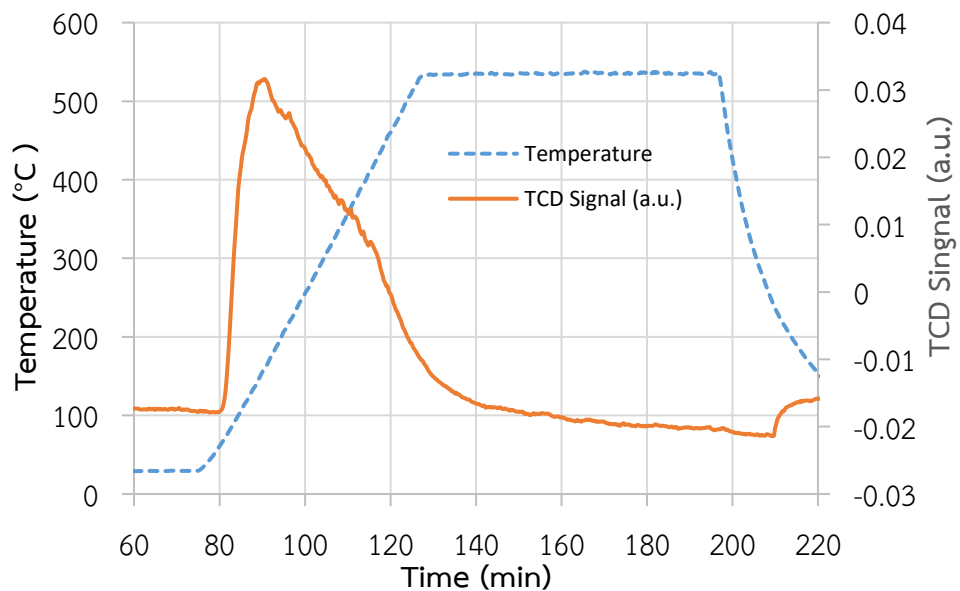
รูปที่ ง.3 กราฟ  $\text{NH}_3$ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$  (0.2 M)

ง.4 ข้อมูล NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวรองรับ TiO<sub>2</sub> (0.5 M)



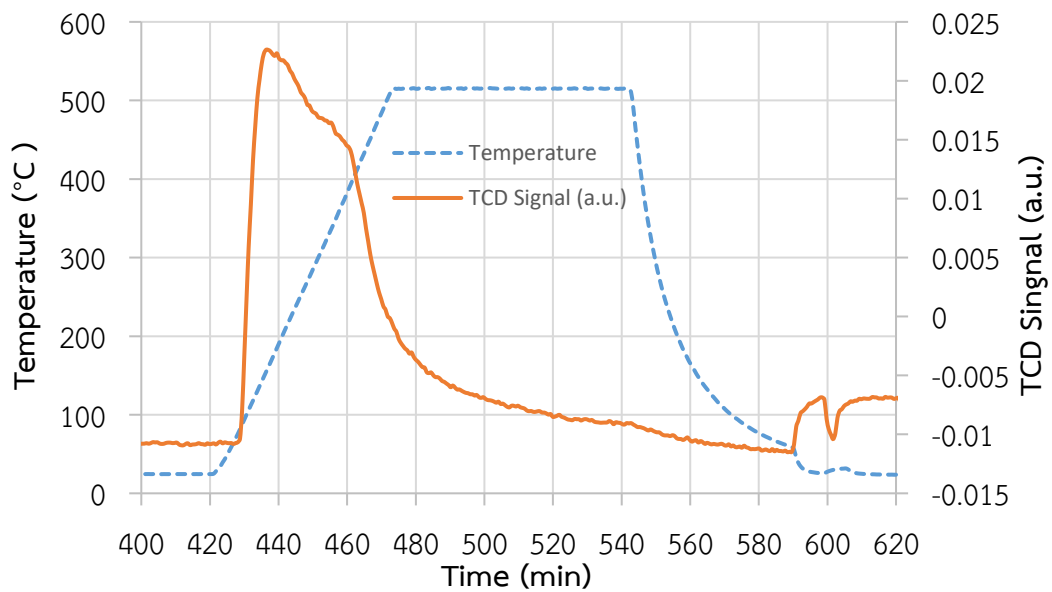
รูปที่ ง.4 กราฟ NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub> (0.5 M)

ง.5 ข้อมูล NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0 M)



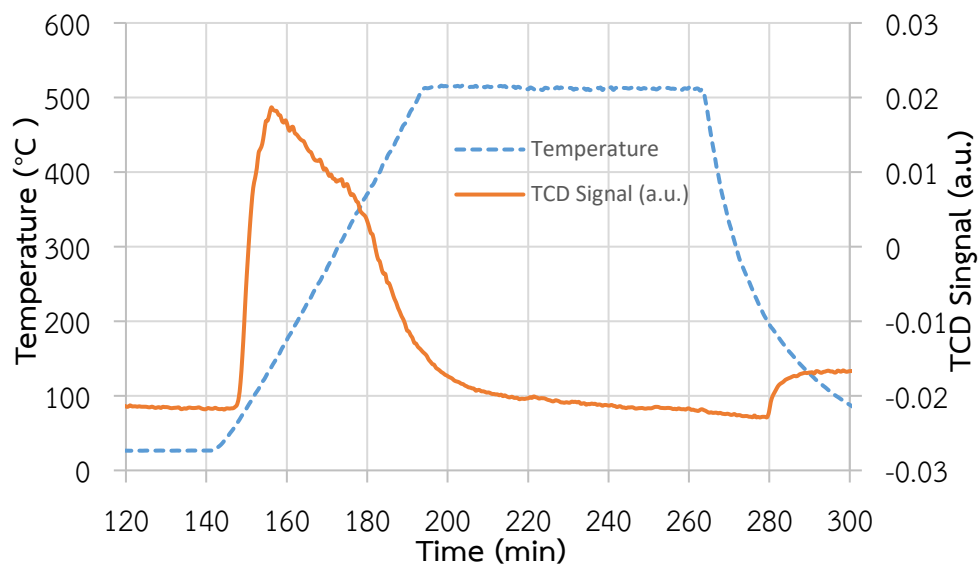
รูปที่ ง.5 กราฟ NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0 M)

ง.6 ข้อมูล NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0.2 M)



รูปที่ ง.6 กราฟ NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0.2 M)

ง.7 ข้อมูล NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0.5 M)



รูปที่ ง.7 กราฟ NH<sub>3</sub>-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> (0.5 M)

## ภาคผนวก จ

### การคำนวณ %Toluene conversion

การคำนวณ %Toluene conversion ต้องการวัดความเข้มข้นของโทลูอีน ใช้การเก็บแก๊สตัวอย่างปริมาตร 1 ml ทางด้านขาเข้าและขาออกของเครื่องปฏิกรณ์ วัดความเข้มข้นโทลูอีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionisation Detector (FID) พื้นที่ใต้กราฟโทลูอีนสามารถนำมาคำนวณความเข้มข้นของโทลูอีนได้ โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานโทลูอีน จากนั้นนำความเข้มข้นของโทลูอีนใช้หา %Toluene conversion จากสมการ จ.1

$$\%Toluene\ conversion = \frac{[Toluene]_{in} - [Toluene]_{out}}{[Toluene]_{in}} \times 100 \quad (\text{สมการ จ.1})$$

กราฟมาตรฐานโทลูอีน    ความชัน = 0.0004

จุดตัดแกน = -16.469

ความเข้มข้นของโทลูอีน = (พื้นที่ใต้กราฟ  $\times$  0.0004) - 16.469

ตัวอย่างการคำนวณ %Toluene conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M) ที่ความเข้มข้น  $O_2$  21 %wt. อุณหภูมิ 250 °C

พื้นที่ใต้กราฟโทลูอีนขาเข้า = 366587 a.u.

พื้นที่ใต้กราฟโทลูอีนขาออก = 38650 a.u.

$$\begin{aligned} \%Toluene\ conversion &= \frac{[366587]_{in} - [38650]_{out}}{[366587]_{in}} \times 100 \\ &= 89.46\% \end{aligned}$$

ดังนั้น %Toluene conversion ที่ 250°C มีค่าเท่ากับ 89.46%

## ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$ ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M)

Temperature	3 %vol.O <sub>2</sub>	12 %vol O <sub>2</sub>	21 %vol O <sub>2</sub>
120	7.87	7.98	12.91
150	4.41	3.43	8.48
175	9.96	10.81	19.07
200	19.84	16.97	23.19
225	23.76	40.62	42.96
250	43.83	51.07	54.83
300	76.49	78.92	84.10
350	93.04	96.53	96.98

ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M)

Temperature	3 %vol O <sub>2</sub>	12 %vol O <sub>2</sub>	21 %vol O <sub>2</sub>
120	17.50	11.54	0.56
150	9.53	8.25	11.66
175	8.34	15.55	21.42
200	17.05	30.58	30.84
225	31.54	52.26	57.49
250	50.29	76.06	79.41
300	84.31	94.72	95.90
350	96.81	98.26	97.31

ตารางที่ ๓.3 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5 M)

Temperature	3 %vol $O_2$	12 %vol $O_2$	21 %vol $O_2$
120	2.49	2.23	5.54
150	3.23	10.90	11.25
175	3.81	19.15	28.70
200	25.22	34.73	41.55
225	42.35	54.35	63.41
250	58.66	80.05	89.46
300	92.96	95.95	96.15
350	96.66	97.12	97.68

ตารางที่ ๓.4 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินร่วมกับระบบ SCR

Temperature	% Toluene conversion		
	$V_2O_5/TiO_2$	$V_2O_5/TiO_2$	$V_2O_5/TiO_2$
	(0 M)	(0.2 M)	(0.5 M)
120	8.04	11.72	12.28
150	10.33	14.67	17.83
200	21.95	19.64	41.12
250	63.08	61.58	82.9
300	94.39	96.29	98
350	97.22	99.74	99.33
400	98.95	99.85	99.74
450	99.71	100	99.87

## ภาคผนวก ข

## การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0 M)

Temperature	1/T (K <sup>-1</sup> )	ln (k)		
		3 %vol O <sub>2</sub>	12 %vol O <sub>2</sub>	21 %vol O <sub>2</sub>
120	0.00254	-5.90	-5.89	-5.38
150	0.00236	-6.50	-6.76	-5.82
175	0.00223	-5.66	-5.57	-4.95
200	0.00211	-4.91	-5.08	-4.73
225	0.00201	-4.71	-4.05	-3.98
250	0.00191	-3.95	-3.74	-3.63
300	0.00174	-3.03	-2.96	-2.79
350	0.00160	-2.42	-2.19	-2.15

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.2 M)

Temperature	1/T (K <sup>-1</sup> )	ln(k)		
		3 %vol O <sub>2</sub>	12 %vol O <sub>2</sub>	21 %vol O <sub>2</sub>
120	0.00254	-5.05	-5.50	-8.59
150	0.00236	-5.70	-5.85	-5.49
175	0.00223	-5.84	-5.18	-4.82
200	0.00211	-5.08	-4.41	-4.40
225	0.00201	-4.37	-3.70	-3.56
250	0.00191	-3.76	-3.04	-2.94
300	0.00174	-2.78	-2.32	-2.24
350	0.00160	-2.16	-2.00	-2.12



ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  (0.5M)

Temperature	1/T (K <sup>-1</sup> )	ln(k)		
		3 %vol O <sub>2</sub>	12 %vol O <sub>2</sub>	21 %vol O <sub>2</sub>
120	0.00254	-7.08	-7.19	-6.27
150	0.00236	-6.82	-5.56	-5.53
175	0.00223	-6.65	-4.95	-4.49
200	0.00211	-4.64	-4.25	-4.02
225	0.00201	-4.00	-3.64	-3.40
250	0.00191	-3.53	-2.92	-2.59
300	0.00174	-2.43	-2.24	-2.22
350	0.00160	-2.18	-2.13	-2.08

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $V_2O_5/TiO_2$  ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีนร่วมกับระบบ SCR

Temperature	1/T (K <sup>-1</sup> )	ln(k)		
		$V_2O_5/TiO_2$ (0 M)	$V_2O_5/TiO_2$ (0.2 M)	$V_2O_5/TiO_2$ (0.5 M)
120	0.00254	-5.88	-5.48	-5.43
150	0.00236	-5.62	-5.24	-5.03
200	0.00211	-4.80	-4.92	-4.04
250	0.00191	-3.40	-3.45	-2.83
300	0.00174	-2.34	-2.21	-2.04
350	0.00160	-2.13	-1.62	-1.79
400	0.00148	-1.88	-1.53	-1.62
450	0.00138	-1.64	-1.19	-1.51

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วราภรณ์ คิดการ
วัน เดือน ปี เกิด	1 กุมภาพันธ์ 2539
วุฒิการศึกษา	จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนประทาย อำเภอบึงสามพัน จังหวัดนครราชสีมา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนคณะราษฎรบำรุง ปทุมธานี อำเภอบึงสามพัน จังหวัดปทุมธานี และได้สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี พ.ศ.2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	111/106 หมู่ 1 ตำบลสามโคก อำเภอสสามโคก จังหวัดปทุมธานี 12160





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**