

ผลของความเข้มข้น SO_2 ต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$ ใน
การกำจัด NO ร่วมกับโทลูอินในแก๊สปล่อยทิ้ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of SO₂ concentrations on the catalytic activity of V₂O₅-MgO/TiO₂ during the simultaneous removal of NO and toluene in an effluent gas



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 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของความเข้มข้น SO_2 ต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$ ในการกำจัด NO ร่วมกับโทลูอินในแก๊สปล่อยทิ้ง
โดย	น.ส.ณัฐชยาภักตร์ สร้อยแสง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มงคลศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒน์กุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ)

ณัฐชยาภัคค์ตรี สร้อยแสง : ผลของความเข้มข้น SO_2 ต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$ ในการกำจัด NO ร่วมกับโทลูอินในแก๊สปล่อยทิ้ง . (Effects of SO_2 concentrations on the catalytic activity of $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$ during the simultaneous removal of NO and toluene in an effluent gas) อ.
ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ธรรธร มงคลศรี

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$ ที่ออกแบบมาสำหรับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 30 ppm และ O_2 15%vol. ในการกำจัดโทลูอินร่วมกับ NO โดยปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด เพื่อนำมาใช้กับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ที่สูงขึ้นและความเข้มข้นของ O_2 ที่ต่ำลง โดยพบว่า ก่อนการรวมระบบ ในส่วนของ %Toluene conversion % CO_2 selectivity และ % NO conversion ที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลมากต่อสามค่าที่กล่าว แต่การที่ O_2 มีความเข้มข้นที่ลดลงจะส่งผลให้ทั้งสามค่าที่กล่าวมามีค่าที่ลดลง โดย %Toluene conversion จะลดลงแตกต่างกันได้ชัดที่อุณหภูมิ 250°C แสดงให้เห็นว่าสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้ไปใช้กับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ในช่วง 30-150 ppm และ O_2 15 vol.% เพื่อการกำจัดโทลูอินและ NO ในเวลาเดียวกัน

หลังจากการรวมระบบ ทั้งระบบที่มี O_2 15 และ 5 vol.% ในส่วนของ %Toluene conversion และ % CO_2 selectivity พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย แต่ในส่วนของ % NO conversion ที่ O_2 5% ไม่ได้แตกต่างจากระบบก่อนรวม แต่ในระบบที่ O_2 15 vol.% ค่า% NO conversion ลดลงจากก่อนรวมระบบอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการที่มีโทลูอินอยู่ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด จะมีโทลูอินและกรดเบนโซอิกที่แย่งการดูดซับบนพื้นผิวจึงทำให้โอกาสที่ NH_3 จะถูกดูดซับบนพื้นผิวลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดลดลง จึงมองเห็น % NO conversion มีค่าลดลง ภาพโดยรวมคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถทำงานได้ในระบบแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 สูงขึ้นและความเข้มข้นของ O_2 ต่ำ

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070179921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: SCR, Toluene oxidation, Sulfur dioxide

Nutchayapak Sroysang : Effects of SO₂ concentrations on the catalytic activity of V₂O₅-MgO/TiO₂ during the simultaneous removal of NO and toluene in an effluent gas. Advisor: Assoc. Prof. THARATHON MONGKHONSI, Ph.D.

This research studied the feasibility of using V₂O₅-MgO/TiO₂ catalyst, designed for an exhaust gas containing SO₂ 30 ppm and O₂ 15 vol.% in the simultaneous removal of toluene and NO, with an exhaust gas having higher SO₂ and lower O₂ concentrations. The research found that before combining both reactions, the increased SO₂ concentration does not affect %Toluene conversion, %CO₂ selectivity and %NO conversion, but the lower O₂ concentration decreased all parameters. The difference of %Toluene conversion can be seen clearly at a temperature around 250°C. The results indicated that the catalyst can be utilized with the exhaust gas containing SO₂ in the range of 30-150 ppm and O₂ around 15 vol.% for the simultaneous removal of toluene and NO. In the combined system having concentrations of O₂ 15 and 5 vol.%, it was founded that both %Toluene conversion and %CO₂ selectivity slightly increased. %NO conversion at O₂ 5 vol.% was not different from the single reaction system. In the system with O₂ 15 vol.%, however, %NO conversion significantly reduced. The reason is in the combined system, both toluene and benzoic acid competitively adsorbed with NH₃ on the catalyst surface. Thus, chance of NH₃ to be absorbed on the surface decreases. This phenomenon decreased the removing of NO. The overall conclusion is the catalyst studied in this research can be utilized with any exhaust gas with high SO₂ concentrations and low O₂ concentrations.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดา มารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความสนับสนุนในด้านการเรียน และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มลคลศรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่เป็นผู้คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยหาทางแก้ปัญหาต่าง ๆ ในระหว่างการทำวิจัย อีกทั้งยังสอนความรู้ทั้งทางวิชาการ การดำเนินชีวิตและความรู้รอบตัวในด้านอื่น ๆ

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ โทณานนท์ อาจารย์ ดร. ชุติมณฑน์ สติรพิพัฒนกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ ง้าวสุวรรณ ที่ให้คำแนะนำและชี้แนวทางที่เป็นประโยชน์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ณัฐชยาภักตร์ สร้อยแสง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 สารที่ต้องการกำจัด	6
2.1.1 โทลูอีน (Toluene).....	6
2.1.2 แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO).....	7
2.2 ปฏิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน.....	7
2.2.1 กระบวนการออกซิไดซ์แบบสมบูรณ์ (Total oxidation หรือ Combustion).....	7
2.2.2 กระบวนการออกซิไดซ์แบบบางส่วน (Partial oxidation).....	7
2.3 ปฏิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด (Selective catalytic reduction : SCR).....	8

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	9
2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททานี (V ₂ O ₅ /TiO ₂).....	9
2.4.2 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO).....	10
2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททานีที่ได้รับการเสริมด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (V ₂ O ₅ -MgO/TiO ₂).....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.5.1 การกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย	11
2.5.2 การกำจัดไนโตรเจนมอนอกไซด์.....	12
2.5.3 ผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์	12
2.5.4 ผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และออกซิเจนต่อปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด	13
2.5.5 สรุปการทบทวนวรรณกรรม	14
บทที่ 3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณลักษณะ	15
3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
3.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ -MgO/TiO ₂	15
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
3.2.1 การหาปริมาณของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	17
3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction(XRD) 17	
3.2.3 การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Nitrogen physisorption	18
3.2.4 วิเคราะห์ปริมาณความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	19
3.3 การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์	21
บทที่ 4 การทดสอบสมรรถภาพและผลการทดสอบของตัวเร่งปฏิกิริยา	22
4.1 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดลอง	22

4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
4.3 การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน	23
4.3.1 ระเบียบวิธีการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน	23
4.3.2 ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน	24
4.4 การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด	28
4.4.1 ระเบียบวิธีการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด	28
4.4.2 ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด	29
4.5 การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวม	30
4.5.1 ระเบียบวิธีการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวม.....	30
4.5.2 ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวม.....	31
4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการรวมระบบ	35
4.6.1 ผลของ NO และ NH ₃ ต่อสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน.....	35
4.6.2 ผลของโทลูอินต่อสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด	42
4.7 สรุปผลการทดลอง	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
ก.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ /TiO ₂	51

ก.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 - MgO / TiO_2	51
ภาคผนวก ข การคำนวณการเตรียมสารละลายวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP	52
ภาคผนวก ค การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve).....	53
ค.1 กราฟมาตรฐานโทลูอิน.....	53
ค.2 กราฟมาตรฐานคาร์บอนไดออกไซด์	55
ค.3 กราฟมาตรฐานการคายซับของแอมโมเนีย (NH_3) จากเทคนิค NH_3 -TPD.....	57
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการคายซับของแอมโมเนีย จากเทคนิค NH_3 -TPD	58
ภาคผนวก จ ข้อมูลผลการทดลอง	60
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	64



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของแก๊สที่ใช้ในการทดสอบสมรรถภาพตัวเร่งปฏิกิริยา	4
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 - MgO / TiO_2	15
ตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption	18
ตารางที่ 3.3 ปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณไทลูอินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ppm).....	53
ตารางที่ ค.2 พื้นที่ได้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูง	55
ตารางที่ ค.3 พื้นที่ได้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ	56
ตารางที่ ค.4 พื้นที่ได้กราฟของ NH_3 และความเข้มข้นของ NH_3 ที่ปริมาตรต่าง ๆ.....	57
ตารางที่ จ.1 %Toluene conversion ในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ไทลูอิน	60
ตารางที่ จ.2 % CO_2 selectivity ในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ไทลูอิน	60
ตารางที่ จ.3 %NO conversion ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด	61
ตารางที่ จ.4 %Toluene conversion ในระบบปฏิกิริยารวม.....	61
ตารางที่ จ.5 % CO_2 selectivity ในระบบปฏิกิริยารวม	62
ตารางที่ จ.6 %NO conversion ในระบบปฏิกิริยารวม	62

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโทลูอิน (Toluene).....	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับ %NO conversion [6].....	9
รูปที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD	18
รูปที่ 4.1 แผนผังระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน	24
รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion	25
รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion	25
รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity ผ่านปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินด้วย O ₂ 15 vol.%.....	27
รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity ผ่านปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินด้วย O ₂ 5 vol.%.....	27
รูปที่ 4.6 แผนผังปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด	28
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O ₂ 15 vol.%	29
รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O ₂ 5 vol.%.....	30
รูปที่ 4.9 แผนผังกระบวนการกำจัดไนโตรเจนมอนอกไซด์ร่วมกับโทลูอิน	31
รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O ₂ 15 vol.%.....	32
รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O ₂ 5 vol.%	32
รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O ₂ 15 vol.%.....	33

รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O ₂ 5 vol.%	34
รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O ₂ 15 vol.%	34
รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O ₂ 5 vol.%.....	35
รูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 30 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	36
รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 90 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	36
รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 150 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	37
รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 30 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%.....	37
รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 90 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%.....	38
รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 150 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%	38
รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบ %CO ₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 30 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	39
รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบ %CO ₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 90 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	39
รูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบ %CO ₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 150 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	40
รูปที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบ %CO ₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 30 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%.....	40

รูปที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบ %CO ₂ Selectivity	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 90 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%.....	41
รูปที่ 4.27 ผลการเปรียบเทียบ %CO ₂ Selectivity	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 150 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%	41
รูปที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 30 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	42
รูปที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 90 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	43
รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 150 ppm ด้วย O ₂ 15 vol.%	43
รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 30 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%.....	44
รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 90 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%.....	44
รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion	
ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO ₂ 150 ppm ด้วย O ₂ 5 vol.%	45
รูปที่ ค.1 กราฟ calibration curve ของโทลูอินที่ความเข้มข้น 30-700 ppm	54
รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูง	55
รูปที่ ค.3 กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ (180-620 ppm).....	56
รูปที่ ค.4 กราฟมาตรฐานของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	57
รูปที่ ง.1 กราฟ NH ₃ -TPD pattern ของตัวรองรับ TiO ₂	58
รูปที่ ง.2 กราฟ NH ₃ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ /TiO ₂	58
รูปที่ ง.3 กราฟ NH ₃ -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ -MgO/TiO ₂	59
รูปที่ ฉ.1 ความสามารถการทำซ้ำในการกำจัดโทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ (0.64)Mg.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมในปัจจุบันที่มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยแก๊สไอเสีย ออกมาเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และสารอินทรีย์ที่ระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) เป็นต้น ซึ่งแก๊สไอเสียเหล่านี้ส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดสารเหล่านี้ให้มีปริมาณที่น้อยลงตามค่ามาตรฐานที่กำหนดหรือเปลี่ยนไปเป็นสารตัวอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีพิษก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ [1]

สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ใช้อากาศเป็นตัวเผาไหม้เชื้อเพลิง เนื่องจากอากาศมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ในบรรดาสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์จะพบ NO มากที่สุด ในการกำจัด NO จะใช้กระบวนการรีดักชันแบบเลือกเกิด (Selective catalytic reduction, SCR) NO จะถูกรีดิวซ์ด้วยแอมโมเนียโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย และเปลี่ยนไปเป็น N_2 และไอน้ำ สำหรับการกำจัด SO_2 จะใช้กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การดูดซับด้วยสารละลายเพื่อทำให้เกิดเป็น CaSO_4 เป็นต้น ในส่วนของการกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์แต่ละชนิด สารอินทรีย์ตัวหนึ่งที่ถูกปล่อยมากับแก๊สปล่อยทิ้งและมีความอันตรายคือ โทลูอิน ซึ่งจัดเป็นสารระเหยง่ายที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟได้ง่ายที่มีความดันบรรยากาศและอุณหภูมิปกติ ทั้งยังสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจและผิวหนัง หากถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำจะเป็นมลพิษต่อระบบนิเวศในน้ำ

เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยเป็นไอได้ง่าย ที่มาจกแก๊สปล่อยทิ้งนั้นมีความเข้มข้นและอุณหภูมิต่ำ การที่จะแยกออกมาแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) จึงไม่คุ้มค่า ซึ่งวิธีการกำจัดมีหลายวิธี เช่น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งวิธีการดูดซับโทลูอินจะพบปัญหาคือ หลังจากการดูดซับจนตัวดูดซับ (Adsorbent) อิ่มตัวแล้ว จะต้องมีการนำตัวดูดซับไปกำจัดหรือเข้ากระบวนการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีก ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องมีเพิ่มเติมเข้ามา หรือการกำจัดด้วยวิธีการชะล้าง (Scrubber) แต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดน้ำเสียในระบบ เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกย้ายจากวัฏภาคหนึ่งไปยังอีกวัฏภาคหนึ่งเท่านั้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการกำจัดที่กล่าวมาข้างต้นจึงไม่ใช่กระบวนการสุดท้ายในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย อีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัย คือ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งในที่นี้คือโทลูอิน ให้เปลี่ยนเป็น CO_2 และไอน้ำ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าโทลูอิน

วิธีการนี้มีประสิทธิภาพเนื่องจากใช้อุณหภูมิในการเผาไม่สูงมากและยังสามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นต่ำได้ดี

ในการแยกกำจัด NO และโทลูอิน มีข้อดี คือการแยกกำจัด NO ผ่านกระบวนการรีดักชันแบบเลือกเกิดและการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไอเสียที่ดี แต่วิธีการกำจัดแบบแยกจากกันก็มีข้อเสียในส่วนของกระบวนการที่ต้องมีหน่วยปฏิบัติการที่เพิ่มเข้ามา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดสารทั้งสองตัวรวมเข้าด้วยกัน เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นองค์ประกอบในแก๊สไอเสียที่มาจากแหล่งกำเนิดที่อุณหภูมิต่ำและมีปริมาณน้อย แต่ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง จึงต้องมีระบบให้ความร้อนแก่แก๊สไอเสีย เพื่อที่จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดได้ดีขึ้น ในขณะที่ NO ซึ่งเป็นองค์ประกอบในแก๊สไอเสียที่มีแหล่งกำเนิดมาจากแก๊สเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงและมีปริมาณมาก จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาความร้อนของแก๊สไอเสียที่จะกำจัด NO ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดไปใช้ในการให้ความร้อนแก่แก๊สไอเสียที่จะมีการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะส่งผลให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มระบบให้ความร้อนแก่การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบเดียว

เชื้อเพลิงประเภท ถ่านหินและน้ำมันเตา นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ โดยในการเผาจะควบคุมสัดส่วนของอากาศให้ได้อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุด ดังนั้นจึงต้องใช้อากาศที่มากเกินพอเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เหลือ O_2 อยู่ไม่มาก (ประมาณ 3-5%) ที่ภาวะการเผาดังกล่าวจะทำให้สามารถเกิด NO_x ได้ในปริมาณมาก อีกทั้งยังมี SO_x ที่เกิดจากการเผาไหม้สารประกอบกำมะถันและซัลเฟอร์ที่เกิดจากสารประกอบโลหะที่อยู่ในน้ำมัน

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้าของคณะผู้วิจัยได้จำลองแก๊สปล่อยทิ้งที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์กังหันแก๊สซึ่งมีปริมาณ SO_2 ที่ค่อนข้างต่ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ที่ได้รับการเสริมด้วย MgO 0.64 wt.% พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถกำจัดทั้ง NO และโทลูอินในเวลาเดียวกันได้ [2] ในงานวิจัยนี้จึงต้องการขยายขอบเขตการศึกษาโดยจำลองแก๊สปล่อยทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล (ซึ่งมีความเข้มข้นของ SO_2 ที่สูงขึ้นและปริมาณของ O_2 ที่ต่ำลง) เพื่อศึกษาผลกระทบจากการมี SO_2 และ O_2 ที่เปลี่ยนแปลงไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 - MgO/TiO_2 ที่เหมาะสมสำหรับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ต่ำและ O_2 เข้มข้นสูง (ไอเสียจากเครื่องยนต์กังหันแก๊ส) มาใช้สำหรับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ที่สูงและความเข้มข้นของ O_2 ต่ำ โดยการจำลองแก๊สปล่อยทิ้งที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เช่น น้ำมันและถ่านหินในเตาเผา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา วานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททาเนียที่ได้รับการเสริมด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (V_2O_5 - MgO/TiO_2) ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้วิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) โดยจะมีการเติมปริมาณของวานาเดียมออกไซด์ 3 wt.% บนตัวรองรับ TiO_2 (P-25) จากนั้นทำการเคลือบฝัง MgO 0.64 wt.%

1.3.2 การทดสอบสมรรถภาพตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 - MgO/TiO_2 ในการกำจัด NO ร่วมกับโทลูอิน ประกอบด้วย 3 ระบบปฏิกิริยา ได้แก่

1) ปฏิกิริยาโทลูอินออกซิเดชัน (Toluene oxidation)

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอินของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 120-450°C และใช้แก๊สผสมที่ประกอบด้วยโทลูอิน, SO_2 , O_2 และ N_2 โดยมีอัตราการไหลรวม 200 mL/min ทำการวัดความเข้มข้นของโทลูอินทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Gas chromatograph ที่มีตัวตรวจวัดชนิด Flame ionization detector (FID) ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์และใช้เครื่อง Gas chromatograph ที่มีตัวตรวจวัดชนิด Thermal conductivity detector (TCD) ในการตรวจวัดการเกิด CO_2

2) ปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด (Selective catalytic reduction)

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 120-450°C และใช้แก๊สผสมที่ประกอบด้วย NO , NH_3 , SO_2 , O_2 , N_2 และไอน้ำ โดยมีอัตราการไหลรวม 200 mL/min (ไม่รวมไอน้ำ) ทำการวัดความเข้มข้นของ NO ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เครื่อง Gas chromatograph ที่มีตัวตรวจวัดชนิด Electron capture detector (ECD)

3) ปฏิกริยารีดักชันแบบเลือกเกิดร่วมกับโทลูอินออกซิเดชันหรือปฏิกริยารวม

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO และโทลูอินผ่านปฏิกริยารีดักชันแบบเลือกเกิดร่วมกับการกำจัดโทลูอินผ่านปฏิกริยาโทลูอินออกซิเดชัน ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 120-450°C แก๊สผสมที่ใช้ในปฏิกริยานี้มีอัตราการใช้แบบเดียวกันกับในปฏิกริยารีดักชันแบบเลือกเกิด โดยมีการเพิ่มความเข้มข้นของโทลูอิน 200 ppm เข้ามาในระบบ ทำการวัดประสิทธิภาพในการกำจัด NO พร้อมกับ โทลูอินโดยใช้เครื่อง Gas chromatograph ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้าในหัวข้อ 1 และ 2

องค์ประกอบของแก๊สที่ใช้ในการทดสอบสมรรถภาพตัวเร่งปฏิกริยา ทั้ง 3 ระบบปฏิกริยาได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของแก๊สที่ใช้ในการทดสอบสมรรถภาพตัวเร่งปฏิกริยา

แก๊สตั้งต้น	ความเข้มข้น		
	Toluene oxidation	SCR	Mix
โทลูอิน	200 ppm	-	200 ppm
ออกซิเจน	15 และ 5 vol.%	15 และ 5 vol.%	15 และ 5 vol.%
ไนโตรเจนมอนอกไซด์	-	120 ppm	120 ppm
แอมโมเนีย	-	120 ppm	120 ppm
ไอน้ำ	-	15 และ 5 vol.%	15 และ 5 vol.%
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	30 90และ150 ppm	30 90และ150 ppm	30 90และ150 ppm
ไนโตรเจน	balance	balance	balance

1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 ซึ่งจะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอในส่วนของทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยา เทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะและผลการวิเคราะห์

บทที่ 4 การทดสอบสมรรถภาพและผลการทดสอบของตัวเร่งปฏิกริยา

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในส่วนของการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การคำนวณการเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเทคนิค ICP การสร้างกราฟมาตรฐานของไทเทเนียมและ CO_2 รวบรวมไว้ภาคผนวกท้ายเล่ม



บทที่ 2

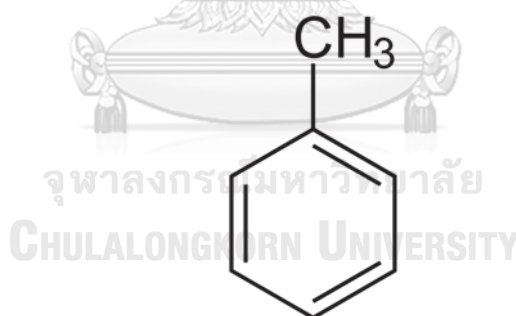
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสารที่ต้องการกำจัดและความ เป็นพิษ ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินและปฏิกิริยารีดักชันแบบ เลือกเกิด รวมถึงปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้น ที่มาของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ใช้ และส่วน สุดท้ายจะอธิบายถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วย การกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยกลายเป็นไอ ได้ง่าย งานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ในปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด ผลของการเติม แมกนีเซียมออกไซด์ ผลของ SO_2 และ O_2 ต่อกระบวนการรีดักชันแบบเลือกเกิด

2.1 สารที่ต้องการกำจัด

2.1.1 โทลูอิน (Toluene)

โทลูอินหรือเมทิลเบนซีนมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 มีลักษณะเป็นของเหลวไม่ละลายน้ำที่ อุณหภูมิห้อง ไม่มีสี ระเหยเป็นไอและติดไฟได้ง่ายที่ความดันอากาศและอุณหภูมิปกติ มีจุดเดือด 110.6°C และจุดหลอมเหลว -93°C



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโทลูอิน (Toluene)

โทลูอินเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นสารตั้งต้นและสารตัวกลางทั้งใน อุตสาหกรรมเคมีอินทรีย์และสังเคราะห์เคมีอื่น ๆ และยังใช้ในผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น พลาสติก สีทาบ้าน น้ำยาฟอกสี ตัวทำละลายในพิมพ์จากอู่พ่นสีรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ประโยชน์ของโทลูอิน ที่มีมากมายแล้ว โทลูอินยังมีอันตรายต่อผู้สัมผัสหรือสูดดมเข้าไป อาจทำให้เกิดอาการมึนงง เวียนหัว หากสัมผัสกับผิวหนังจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง พิษของโทลูอินมีทั้งแบบเฉียบพลันและแบบ เรื้อรังขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไปในร่างกาย [3, 4]

2.1.2 แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO)

แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์มีสูตรทางเคมีเป็น NO มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวเท่ากับ -152°C และ -164°C ตามลำดับ NO เป็นผลพลอยได้ของการเผาไหม้สารอินทรีย์ในที่มีอากาศ เช่น เครื่องยนต์สันดาปภายใน โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล เป็นต้น

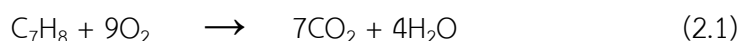
อันตรายของแก๊ส NO จะส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้สูดดมหรือได้รับการสัมผัส โดยประชากรกลุ่มเสี่ยงต่อการรับผลกระทบได้แก่ เด็ก คนชรา ผู้ที่เป็นโรคปอดหรือหลอดเลือด เช่น โรคหอบหืด และผู้ที่สัมผัสสารอยู่เป็นประจำหรือระยะเวลาอันนานก็จะทำให้มีการทำลายของเนื้อปอด ส่งผลให้การทำงานของปอดลดลง นอกจากนี้ NO สามารถถูกพัดพาไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิดมลพิษ ส่งผลเสียต่อประชากรหรือสิ่งแวดล้อมที่อยู่ห่างไกลออกไปได้ รวมไปถึงส่งผลต่อการลดผลผลิตทางการเกษตรอีกด้วย

2.2 ปฏิกริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน

ปฏิกริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน คือ ปฏิกริยาที่แตกโมเลกุลของโทลูอินโดยทำปฏิกริยากับ O_2 สามารถเกิดการออกซิไดซ์ได้ทั้งที่ตำแหน่งหมู่เมทิลและตำแหน่งของวงแหวน โดยการออกซิไดซ์ที่ตำแหน่งหมู่เมทิลเกิดได้ง่ายกว่าส่วนโครงสร้างที่เป็นวงแหวน โดยทั่วไปกระบวนการออกซิไดซ์จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

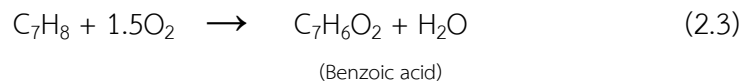
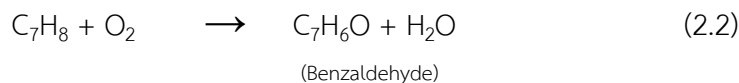
2.2.1 กระบวนการออกซิไดซ์แบบสมบูรณ์ (Total oxidation หรือ Combustion)

เป็นกระบวนการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยใช้ O_2 ในออกซิไดซ์โทลูอินผ่านตำแหน่งวงแหวน เมื่อวงแหวนแตกออกจะได้สารผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2.1



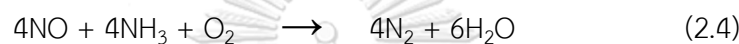
2.2.2 กระบวนการออกซิไดซ์แบบบางส่วน (Partial oxidation)

เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นสารประกอบประเภทอื่นที่ไม่ใช่ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือบางครั้งเรียกว่าสารประกอบออกซิจีเนต (Oxygenated Compound) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มี O_2 อยู่ในโครงสร้าง สำหรับตัวเร่งปฏิกริยา $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ จะมาสามารถเกิดปฏิกริยาได้ดังนี้ แสดงในสมการที่ 2.2-2.3

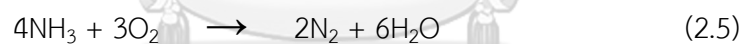


2.3 ปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด (Selective catalytic reduction : SCR)

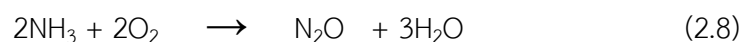
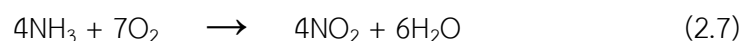
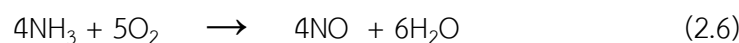
เป็นปฏิกิริยาการรีดิวซ์แบบเลือกเกิดของ NO โดยใช้ NH_3 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการกำจัด NO โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ซึ่งได้แก่ N_2 และไอน้ำ ดังสมการที่ 2.4

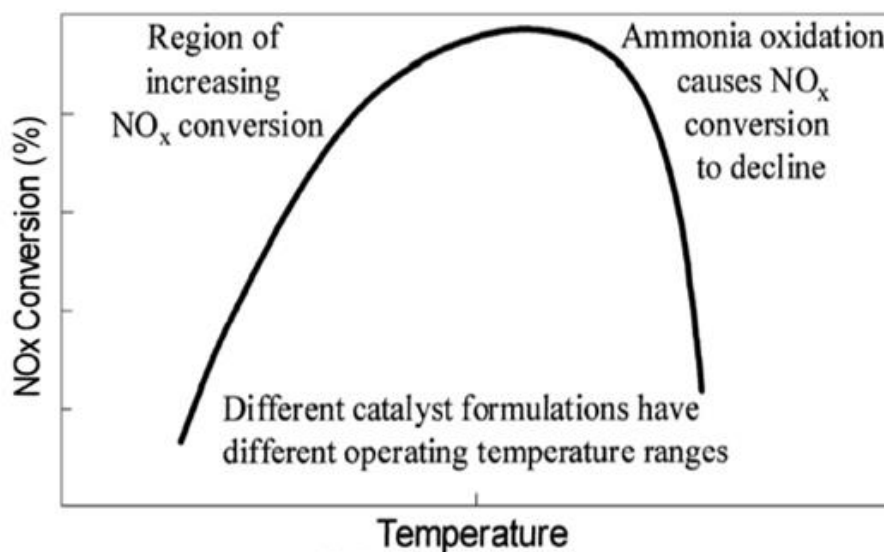


นอกจากนี้ ในระหว่างการกำจัด NO ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 300-450°C คือปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (Ammonia oxidation) แสดงที่สมการ 2.5 ซึ่งเกิดจาก NH_3 ทำปฏิกิริยากับ O_2 โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้การกำจัด NO มีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากสูญเสีย NH_3 ส่วนหนึ่งไป [5] ดังรูปที่ 2.2 และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกำจัด NO จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ในส่วนของ V_2O_5 จะกำจัด NO ได้ดีที่อุณหภูมิปานกลาง (250-350°C)



อีกทั้งยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ เช่น แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และแก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ดังแสดงในสมการที่ 2.6-2.8





รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับ %NO conversion [6]

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์มีตำแหน่งว่างอยู่ในรูปไอออนของโลหะ นิยมใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอได้ง่ายผ่านกระบวนการออกซิเดชัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์มีราคาถูก ทนต่อการเสื่อมสภาพได้ดีและมีอายุการใช้งานนาน

2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททาเนีย (V_2O_5/TiO_2)

ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์มีสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิไดซ์ โดยสามารถทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์แบบเลือกเกิดได้ดี (Selective oxidation) และตัวรองรับไททาเนีย (Anatase phase) สามารถทนต่อสภาวะที่มี SO_2 ได้ดีและมี Strong interaction กับ V_2O_5 ทำให้ V_2O_5 กระจายตัวได้ดีบนตัวรองรับไททาเนีย [6] โครงสร้างผลึกของไททาเนียมี 3 แบบ คือ อนาเทส (Anatase phase) รูไทล์ (Rutile phase) และบรูคไคท์ (Brookite phase) โดยที่โครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูง เช่น การเผาในอากาศ (Calcination) ที่อุณหภูมิสูงกว่า $550^\circ C$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้อุณหภูมิสำหรับการเผาในอากาศที่ $500^\circ C$ เนื่องจากไม่ต้องการให้ไททาเนียเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาเทสไปเป็นรูไทล์

2.4.2 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

แมกนีเซียมออกไซด์มีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งสีขาว มีพื้นที่ผิวสูงจึงสามารถดูดซับสารได้ดี ทำให้แมกนีเซียมถูกนำมาใช้เป็นตัวสนับสนุน (Promoter) ในหลายงานวิจัย ซึ่งจากงานวิจัยของ Alipour และคณะพบว่าแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) จะช่วยเพิ่มความว่องไวบนตัวเร่งปฏิกิริยา [7] นอกจากนี้ยังมีการนำเอาแมกนีเซียมออกไซด์มาใช้เป็นตัวรองรับในปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงและเป็นสารที่มีความเป็นเบสไม่แรงมาก [8]

2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททาเนียที่ได้รับการเสริมด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (V_2O_5 -MgO/TiO₂)

ผลจากงานวิจัยก่อนหน้าได้ศึกษาปริมาณการเติม MgO ที่เหมาะสมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 /TiO₂ และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติม MgO 0.64 wt% จะสามารถกำจัด NO ได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 200-300°C และให้ค่า %CO₂ selectivity ที่สูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว [2]



2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย การกำจัดไนโตรเจนมอนอกไซด์ ผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์และผลของ SO_2 น้ำและ O_2 ต่อกระบวนการรีดักชันแบบเลือกเกิด โดยจะขอกกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อต่อไปนี้

2.5.1 การกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย

Mongkhonsi และคณะทำการศึกษาปฏิกิริยาการเลือกเกิดของเอทานอลและ 1-โพรพานอล บนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$ พบว่าเมื่อมีการเสริมด้วย MgO ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ จะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง V-O-V ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเลือกเกิดได้ดี ซึ่งในอุณหภูมิสูงตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$ สามารถไปจับสารประกอบแอลดีไฮด์ ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาในการเลือกเกิดได้ดีกว่าสารตั้งต้นที่เป็นแอลกอฮอล์ จากนั้นสารประกอบแอลดีไฮด์จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็น CO_2 ส่งผลให้ปริมาณการเกิดเป็น CO_2 เพิ่มขึ้น และส่งผลให้แอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์ลดลง [9]

Tomskii และคณะทำการศึกษาการออกซิเดชันแบบบางส่วนของโทลูอิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 MoO_3 และออกไซด์ผสมระหว่าง V_2O_5 กับ MoO_3 โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 300-500°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาหลักคือ maleic anhydride benzaldehyde และ CO_x เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ค่า toluene conversion จะเพิ่มขึ้นและสูงถึง 100% ที่อุณหภูมิ 500°C ในทุกตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเติม V_2O_5 ลงไปเป็นโลหะผสม จะเพิ่ม ค่า toluene conversion เมื่อเติม V_2O_5 ลงไปเพียงเล็กน้อยจะได้ %yield ของ maleic anhydride จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ %yield ของ benzaldehyde จะลดลงเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น [10]

Santos และคณะทำการศึกษาการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ของโทลูอิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะมีตระกูล copper oxide และ vanadium oxide ตัวรองรับที่ใช้คือ ไททาเนียและแกรมมาอะลูมินา พบว่าการใช้ตัวรองรับเป็นแกรมมาอะลูมินาจะให้พื้นที่ผิวที่มากกว่าไททาเนีย แต่การใช้ตัวรองรับเป็นไททาเนียจะให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า และยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะมีตระกูลจะให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะออกไซด์ พบว่า $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ ให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาสูง ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการออกซิไดซ์โทลูอินส่วนใหญ่คือ CO และเบนซีน เนื่องจากการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นน้อย [11]

2.5.2 การกำจัดไนโตรเจนมอนอกไซด์

Fushun และคณะได้ทำการศึกษาผลของการกระจายตัวของวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททาเนียในปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดของ NO โดยใช้แอมโมเนียเป็นตัวรีดิวซ์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 สามารถกำจัด NO ได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 250-300°C และปริมาณวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททาเนียที่เหมาะสมประมาณ 3-6 wt% ซึ่งทำให้การกระจายตัวของวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไททาเนียเป็นแบบ monolayer และการกระจายตัวของวานาเดียมออกไซด์ที่มากเกินไปนั้นจะไปลดความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการรีดิวซ์ NO [12]

Huang และคณะทำการเปรียบเทียบการเติม V_2O_5 บนตัวรองรับที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบตัวรองรับ TiO_2 และ Al_2O_3 ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจงเพื่อกำจัด NO จากผลการทดลองพบว่า V_2O_5/TiO_2 มี NO conversion มากกว่า V_2O_5/Al_2O_3 ในช่วงอุณหภูมิ 120 ถึง 390°C เนื่องจาก V_2O_5 เกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับ TiO_2 และ Al_2O_3 อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนจากตัวรองรับไปยัง V_2O_5 จึงส่งผลกับความสามารถในการรีดิวซ์ของ V_2O_5 บนตัวรองรับทั้งสอง [13]

2.5.3 ผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์

Thyssen และคณะทำการศึกษาผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา $Ni/MgO-SiO_2$ ผ่านปฏิกิริยาสตรีมรีฟอร์มมิ่งของกลีเซอรอล (Steam reforming of glycerol) พบว่าเมื่อทำการเติม MgO ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ Ni กระจายตัวบนพื้นผิวของตัวรองรับได้ดีขึ้น เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์จะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่าง Ni และตัวรองรับได้แข็งแรงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการเติมแมกนีเซียมออกไซด์แล้วจะทำให้เกิดคาร์บอนสะสม (Coke) ลดน้อยลงด้วย [14]

Cho และคณะทำการศึกษาผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัม พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัมที่มีการเติมแมกนีเซียมออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าในปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์เพิ่มความเข้มข้นของเบสให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของแพลทินัมเพิ่มขึ้น และ $Pt-Mg/Al_2O_3$ มีอันตรกิริยา (Interaction) กับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อ่อนกว่า Pt/Al_2O_3 ทำให้ไปเพิ่มความสามารถในการดูดซับ (Absorption) ของ O_2 บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [15]

Mongkhonsi และคณะทำการศึกษาผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการออกซิเดชันของ Phthalic anhydride และ maleic anhydride ซึ่งพบว่าการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ช่วยให้ Phthalic anhydride และ maleic anhydride เกิดการ

ออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์มีสมบัติเป็นเบสที่ไม่สูงและต่ำจนเกินไป ซึ่งถ้าใช้เบสที่มีความแรงจนเกินไปจะทำให้เกิด CaCO_3 ในระบบ โดยเมื่อแมกนีเซียมออกไซด์ถูกเติมลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CoO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ จะเพิ่มการดูดซับของสารประกอบที่มีความเป็นกรด ในที่นี้คือ anhydride เพื่อให้เกิดการออกซิเดชันต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่า แมกนีเซียมออกไซด์ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการออกซิเดชัน เพียงแต่ช่วยเพิ่มความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CoO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ ในการออกซิเดชัน anhydride ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เพียงเท่านั้น [16]

2.5.4 ผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และออกซิเจนต่อปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

Yao และคณะทำการศึกษาผลของตัวรองรับที่ต่างกันผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเลือกใช้ คือ $\text{CeO}_2/\text{SiO}_2$, $\text{CeO}_2/\text{V-Al}_2\text{O}_3$, $\text{CeO}_2/\text{ZrO}_2$ และ $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและความทนต่อ $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CeO}_2/\text{V-Al}_2\text{O}_3$ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด NO ดีที่สุด ส่วนการทดสอบผลของ $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 400°C พบว่าเมื่อป้อน $5\% \text{H}_2\text{O} + 100 \text{ ppm SO}_2$ เข้าไปในขาเข้าของระบบจะทำให้ %NO conversion มีค่าลดลง และเมื่อหยุดการป้อน $5\% \text{H}_2\text{O} + 100 \text{ ppm SO}_2$ พบว่า %NO conversion มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม แต่จะไม่เท่าช่วงแรกก่อนที่จะป้อน $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$ เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 แบบ คือ แบบที่เกิดแคชัวร์และแบบถาวร [17]

Shan และคณะทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสม Ce-W-Ti ด้วยปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดและศึกษาผลของ SO_2 ที่ 100 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า %NO conversion ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อมีการเพิ่ม $5\% \text{H}_2\text{O}$ ร่วมด้วย %NO conversion ลดลงจาก 100% เป็น 60% และเมื่อหยุดการป้อน $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$ พบว่า %NO conversion มีค่าที่ 100% เท่าเดิม [18]

2.5.5 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 สามารถทำการออกซิไดซ์โครงสร้างอะโรมาติกได้ และการเติม MgO สามารถเพิ่มการดูดซับสารอินทรีย์ที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการเติม MgO จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์แบบสมบูรณ์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจาก MgO มีความเป็นเบสที่ไม่สูงและต่ำจนเกินไป

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของ SO_2 พบว่ามีเพียงการศึกษาระบบที่มี หรือ ไม่มี SO_2 เท่านั้น ยังไม่มีการศึกษาผลของ SO_2 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 ที่ได้รับการเสริมด้วย MgO มาทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยา SCR ร่วมกับการกำจัดโทลูอิน ในแก๊สที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ที่ต่างกัน



บทที่ 3

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณลักษณะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะและผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่าง ๆ และการคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์

3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 -MgO/TiO₂ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 -MgO/TiO₂

สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
ไททาเนียมไดออกไซด์ Commercial grade (TiO ₂ , P25)	Aeroxide
แอมโมเนียมเมทาวานาเดท (NH ₄ VO ₃) 99.99%	Aldrich
แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต (Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O) ≥ 99.0%	Aldrich
กรดออกซาลิก (H ₂ C ₂ O ₄)	Fluka

3.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 -MgO/TiO₂

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 -MgO/TiO₂ จะใช้วิธีการเตรียมแบบเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) โดยการเตรียมจะถูกแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมตัวรองรับไททาเนีย (TiO₂, P25)

นำตัวรองรับไททาเนียไปเผาในอากาศ (Calcination) ที่อุณหภูมิ 500 °C เพื่อกำจัดสารปนเปื้อน ที่อาจปนมากับสารตั้งต้นด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (heating rate) 10°C/min และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวรองรับไททาเนียไม่ควรสูงกว่า 550°C เนื่องจาก จะทำให้ไททาเนียเปลี่ยนเฟสจากอนาเทสเป็นรูไทล์ได้ ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวรองรับลดลง

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2

ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 เตรียมโดยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำสารตั้งต้น (Precursor) ได้แก่ แอมโมเนียมเมทตาวานาเตท (Ammonium metavanadate, NH_4VO_3) จำนวน 0.08 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร หากสารตั้งต้นยังไม่ละลายให้เติมกรดออกซาลิก ($H_2C_2O_4$) ลงไปเล็กน้อยเพื่อช่วยให้สารตั้งต้นละลายดียิ่งขึ้น จนได้สารละลายใส
2. เติมตัวรองรับ TiO_2 (P25) ที่ได้จากขั้นตอนแรกจำนวน 2 กรัม ลงไปปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ เพื่อให้ น้ำระเหยออกอย่างช้า ๆ จนสารละลายชั้นหนืดไม่สามารถปั่นกวนได้อีก
3. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $110^\circ C$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
4. หลังการอบแห้งตัวเร่งปฏิกิริยาจะจับตัวเป็นก้อน จึงต้องทำการบดสารด้วยโกร่งบดสาร จากนั้นนำไปเผาในอากาศที่ box furnace โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ $500^\circ C$ ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate) $10^\circ C/min$ จากนั้นคงไว้ที่ $500^\circ C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5-MgO/TiO_2

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5-MgO/TiO_2 ด้วยการเคลือบฝัง MgO ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ที่ได้จากขั้นตอนที่สอง โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

1. นำสารตั้งต้น ได้แก่ แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 0.064 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร
2. เติมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ที่ได้จากขั้นตอนที่สอง จำนวน 2 กรัม ลงไปปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ เพื่อให้ น้ำระเหยออกอย่างช้า ๆ จนสารละลายชั้นหนืด
3. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $110^\circ C$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
4. หลังการอบแห้งตัวเร่งปฏิกิริยาจะจับตัวเป็นก้อน จึงต้องทำการบดสารด้วยโกร่งบดสาร จากนั้นนำไปเผาในอากาศที่ box furnace โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ $500^\circ C$ ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate) $10^\circ C/min$ จากนั้นคงไว้ที่ $500^\circ C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 -MgO/TiO₂ ใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 เทคนิค ได้แก่

3.2.1 การหาปริมาณของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)

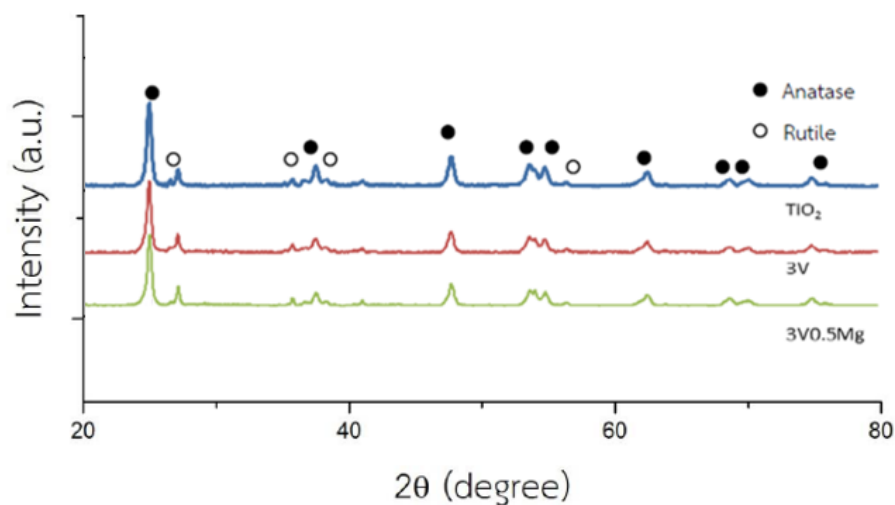
ในการวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยการตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES Perkin Elmer Optima 7000DV สารตัวอย่างจะถูกเตรียมได้จากการนำตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 -MgO/TiO₂ ที่ต้องการวิเคราะห์มาละลายกับกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เข้มข้น 99% จำนวน 20 มิลลิลิตรและแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) จำนวน 15 กรัม จากนั้นนำไปปั่นจนและให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 150°C จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสารละลายใส จากนั้นนำไปปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น โดยใช้ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 10 ppm

ผลจากการตรวจวัดเพื่อหาปริมาณโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค ICP พบว่ามี V_2O_5 3.03 wt% และ MgO 0.64 wt%

3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ด้วยเครื่อง BRUKER D8 ADVANCE X-ray diffractometer ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Diffract ZT version 3.3 ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น Cu K α radiation (ความยาวคลื่น $\lambda = 0.154056$ nm) วิเคราะห์ที่มุม 2θ ระหว่าง 20-80° โดยเพิ่มครั้งละ 0.02°/min

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวรองรับไททาเนียประกอบไปด้วย 2 เฟส คือ เฟสอนาเทส (anatase) เป็นหลักและเฟสรูไทล์ (rutile) ในปริมาณเล็กน้อยและไม่พบตำแหน่งพีคของวานาเดียมออกไซด์ เนื่องจากมีการกระจายตัวได้ดีทำให้ไม่พบผลึกของวานาเดียมออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD

3.2.3 การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Nitrogen physisorption

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง Micromeritics ChemiSorb 2020 โดยอาศัยการดูดซับและการคายซับของ N_2 ที่อุณหภูมิ $-196^\circ C$ การวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการบรรจุตัวอย่างจำนวน 0.1 กรัม ในหลอดแก้วบรรจุตัวอย่าง กำจัดแก๊สออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้ความร้อนพร้อมทำสุญญากาศที่อุณหภูมิ $150^\circ C$ จนกระทั่งทำสุญญากาศได้ระดับ จึงเริ่มให้ดูดซับแก๊ส N_2 ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่ $-196^\circ C$

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวรองรับไททาเนีย แสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าพื้นที่ผิวของ TiO_2 เท่ากับ $53.66 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่เมื่อมีการเติมโลหะออกไซด์ของ V_2O_5 และ MgO ลงไปบนตัวรองรับ TiO_2 ทำให้พื้นที่ผิวมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมโลหะออกไซด์เข้าไปบดบังหรืออุดตันรูพรุนของตัวรองรับ TiO_2 ทำให้สูญเสียพื้นที่ผิวบางส่วนไป

ตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Nitrogen Physisorption

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ($\text{m}^2/\text{g cat}$)
TiO_2	53.66
$V_2O_5\text{-}MgO/TiO_2$	40.14

3.2.4 วิเคราะห์ปริมาณความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

จะใช้การวิเคราะห์ 2 เทคนิคด้วยกัน คือ

1. เทคนิคการดูดซับไพริดีน (Pyridine adsorption)

การวัดปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Total amount of acidic sites) ทำได้โดยการใช้เทคนิคการดูดซับไพริดีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม บรรจุในท่อรูปตัวยูที่ติดตั้งอยู่ในเครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionization Detector (FID) ใช้ N_2 เป็น carrier gas ด้วยอัตราการไหล 25 mL/min และใช้แก๊สไฮโดรเจนและอากาศเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับ FID โดยตั้งอุณหภูมิคอลัมน์ไว้ที่ 150°C จากนั้นฉีดไพริดีน 0.2 μ L เข้าเครื่อง Gas Chromatograph ไปเรื่อย ๆ จนกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับไพริดีนจนอิ่มตัว (ปริมาณไพริดีนขาออกคงที่) ซึ่งปริมาณความเป็นกรดทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากผลรวมของผลต่างของไพริดีนที่ดูดซับจนอิ่มตัวกับปริมาณไพริดีนที่เหลือจากการดูดซับแต่ละครั้งผลจากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.3

2. การวัดปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค NH_3 Temperature Programmed Desorption (NH_3 -TPD)

การวัดปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Micromeritics chemisorb 2750 ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Thermal conductivity detector (TCD) ในการวิเคราะห์ ซึ่งอาศัยหลักการ การดูดซับและคายซับแอมโมเนียของตัวเร่งปฏิกิริยา การวิเคราะห์เริ่มจาก นำตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 0.1 กรัม บรรจุในหลอดแก้วรูปตัวยู จากนั้นจะทำการไล่แก๊สที่ไม่ใช่ฮีเลียมออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแก๊สฮีเลียมที่อัตราการไหล 50 mL/min ที่อุณหภูมิ 220°C นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ 120°C เพื่อทำการดูดซับแก๊สแอมโมเนียด้วยการผ่านแก๊สแอมโมเนียเข้มข้น 15% ที่อัตราการไหล 25 mL/min เป็นเวลา 30 นาที จนตัวเร่งปฏิกิริยาอิ่มตัวไปด้วยแอมโมเนีย เมื่อครบกำหนดเวลาก็ทำการไล่แก๊สแอมโมเนียที่ไม่ดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยแก๊สฮีเลียมบริสุทธิ์ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 70 นาที เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการคายซับแอมโมเนีย หลังจากนั้นทำการปรับลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง โดยสัญญาณที่แสดงการคายซับของแอมโมเนียสามารถนำมาหาปริมาณความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยสามารถคำนวณปริมาณแอมโมเนียที่พื้นผิวนำมาหาปริมาณความเป็นกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยสามารถคำนวณปริมาณแอมโมเนียที่พื้นผิวคายซับออกมาจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NH_3 -TPD ก็มีข้อจำกัดคือ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการวิเคราะห์จะถูกจำกัดที่ 500°C เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของตัวรองรับ TiO_2 จากเฟสอนาเทสไปเป็นเฟสรูไทล์ เพราะฉะนั้นการวัดความแรงของ

ตำแหน่งกรดจึงบอกได้เพียงปริมาณแอมโมเนียที่พื้นผิวคายซับออกมาจนถึงอุณหภูมิ 500°C เท่านั้น ส่วนปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดที่แรงกว่าอุณหภูมิ 500°C สามารถคำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณของตำแหน่งที่เป็นกรดทั้งหมดที่ได้จากการดูดซับไพริดีนกับการคายซับของแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	จำนวนตำแหน่งที่เป็นกรด ($\mu\text{mol/g}$)		
	Pyridine adsorption	NH ₃ desorption	
		อุณหภูมิ $\leq 500^\circ\text{C}$	อุณหภูมิ $> 500^\circ\text{C}$
TiO ₂	87.96	4.97	82.99
V ₂ O ₅ -MgO/TiO ₂	64.04	26.32	37.72

จากตารางที่ 3.3 พบว่าปริมาณตำแหน่งกรดทั้งหมดที่ทดสอบได้จากเทคนิค Pyridine adsorption เมื่อมีการเคลือบฝังโลหะออกไซด์ลงบนตัวรองรับ TiO₂ จะส่งผลให้ปริมาณตำแหน่งกรดลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของไซต์ที่มีขนาดไอออนที่ใหญ่กว่า ทำให้ไปบดบังตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวรองรับ TiO₂ เราจึงเห็นปริมาณตำแหน่งที่เป็นกรดลดลง และยังเมื่อเติม MgO ลงไป จะส่งผลทำให้ปริมาณตำแหน่งความเป็นกรดลดลง เนื่องจาก MgO มีฤทธิ์เป็นเบสเข้าไปสะเทินตำแหน่งว่องไวที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา V₂O₅/TiO₂

3.3 การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์

การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion) ในปฏิกิริยาโทลูอินออกซิเดชันสามารถคำนวณได้จากการนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่วัดได้จากเครื่อง GC ชนิดตัวตรวจวัด FID มาแปลงค่าเป็นความเข้มข้นโทลูอิน โดยใช้สมการจากการทำ Calibration curve ของโทลูอิน จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของโทลูอินมาคำนวณ %Toluene conversion ตามสมการที่ 3.1

$$\%Toluene\ conversion = \frac{[Toluene\ in] - [Toluene\ out]}{[Toluene\ in]} \times 100 \quad (3.1)$$

การคำนวณหา %CO₂ selectivity คำนวณได้จากการนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่วัดได้จากเครื่อง GC ชนิดตัวตรวจวัด TCD มาแปลงค่าเป็นความเข้มข้น CO₂ โดยใช้สมการจากการทำ Calibration curve ของ CO₂ โดยเทียบจากโทลูอิน 1 mol ที่เผาไหม้สมบูรณ์จะได้คาร์บอนมอนอกไซด์ 7 mol ดังนั้นเพื่อที่จะเปรียบเทียบจำนวนโมลของโทลูอินที่จะเปลี่ยนเป็นจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์จึงต้องการ 7 หลังจากนั้นก็ให้นำค่าความเข้มข้นของ Toluene ทางด้านขาเข้าและขาออกมาคำนวณ %CO₂ selectivity ตามสมการที่ 3.2

$$\%CO_2\ selectivity = \frac{CO_2/7}{[Toluene\ in] - [Toluene\ out]} \times 100 \quad (3.2)$$

การคำนวณหา %NO conversion คำนวณได้จากการนำกราฟที่วัดได้จากเครื่อง GC ชนิดตัวตรวจวัด ECD และใช้โปรแกรม Fityk ช่วยในการหาพื้นที่ใต้กราฟ โดยกำหนดให้พื้นที่ใต้กราฟของ NO ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นค่าเริ่มต้นและที่อุณหภูมิอื่น ๆ จะถูกนำมาเทียบสัดส่วนกับพื้นที่ใต้กราฟที่เป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งจะได้เป็น NO conversion ที่อุณหภูมิการทดลองนั้น ๆ ตามสมการที่ 3.3

$$\%NO\ conversion = \frac{[NO\ in] - [NO\ out]}{[NO\ out]} \times 100 \quad (3.3)$$

บทที่ 4

การทดสอบสมรรถภาพและผลการทดสอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

บทนี้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยารวมถึงระเบียบวิธีการทดลองและอธิบายผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอีน การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวมและการเปรียบเทียบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการรวมระบบและหลังการรวมระบบ

4.1 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดสอบสมรรถภาพในการกำจัดโทลูอีนร่วมกับ NO ด้วยปฏิกิริยารีดักชันแบบเจาะจง แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สารเคมีและแก๊สที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการทำปฏิกิริยา

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

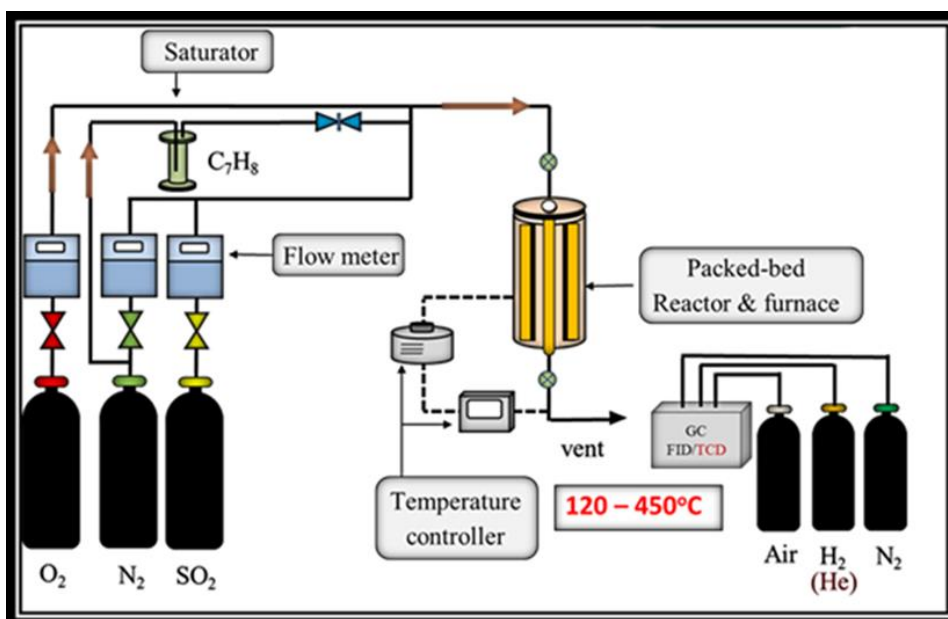
4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ก่อนที่จะนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทดสอบสมรรถภาพในระบบต่าง ๆ จะต้องมีการทดสอบเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน โดยเริ่มจากการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม ลงใน packed bed reactor ที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (SS 304) ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว ทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาอีกครั้งโดยใช้ O_2 เข้มข้น 15 vol.% ใน N_2 ที่อัตราการไหล 200 mL/min ที่อุณหภูมิ 450°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลองเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบสมรรถภาพในการทำปฏิกิริยา เสมือนเป็นการเผาในอากาศอีกครั้ง เนื่องจากการเผาใน box furnace นั้นอาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ด้านล่างของถ้วยเซรามิกไม่ได้สัมผัสกับอากาศที่ไหลผ่านทั้งหมด เกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งการเผาอีกครั้งในท่อปฏิกรณ์จะทำให้มั่นใจได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเผาในอากาศได้สมบูรณ์มากกว่าในภาชนะเซรามิก เพราะทุกอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสัมผัสกับ O_2 ที่ไหลผ่าน โดยผลจากการทดสอบพบว่า การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาในอากาศอีกครั้งก่อนที่จะเริ่มทดสอบจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีเสถียรภาพ

4.3 การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน

4.3.1 ระเบียบวิธีการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน

การทดสอบใช้อุณหภูมิการทดสอบในช่วง 120-450°C โดยแก๊สที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย โทลูอิน 200 ppm (ในส่วนของโทลูอินที่เป็นของเหลว จะถูกบรรจุอยู่ใน saturator ซึ่งควบคุมอัตราการระเหยการกลายเป็นไอของโทลูอินที่ออกจาก saturator ด้วย needle valve) O_2 เข้มข้น 15 และ 5 vol.% SO_2 เข้มข้น 30 90 และ 150 ppm โดยส่วนที่เหลือคือ N_2 ที่อัตราการไหลรวม 200 mL/min (ไม่รวมไอน้ำ) ทำการเก็บแก๊สผสมทั้งขาเข้าและออกเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 1 mL มาตรวจวัดความเข้มข้นของโทลูอินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ที่มีตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionization Detector (FID) โดยใช้อุณหภูมิคอลัมน์ 130°C และทำการวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการเก็บแก๊สขาออกเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 2 mL โดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ที่มีตัวตรวจวัดชนิด Thermal Conductive Detector (TCD) โดยใช้อุณหภูมิคอลัมน์ 230°C แผนผังกระบวนการกำจัดโทลูอินแสดงดังรูปที่ 4.1



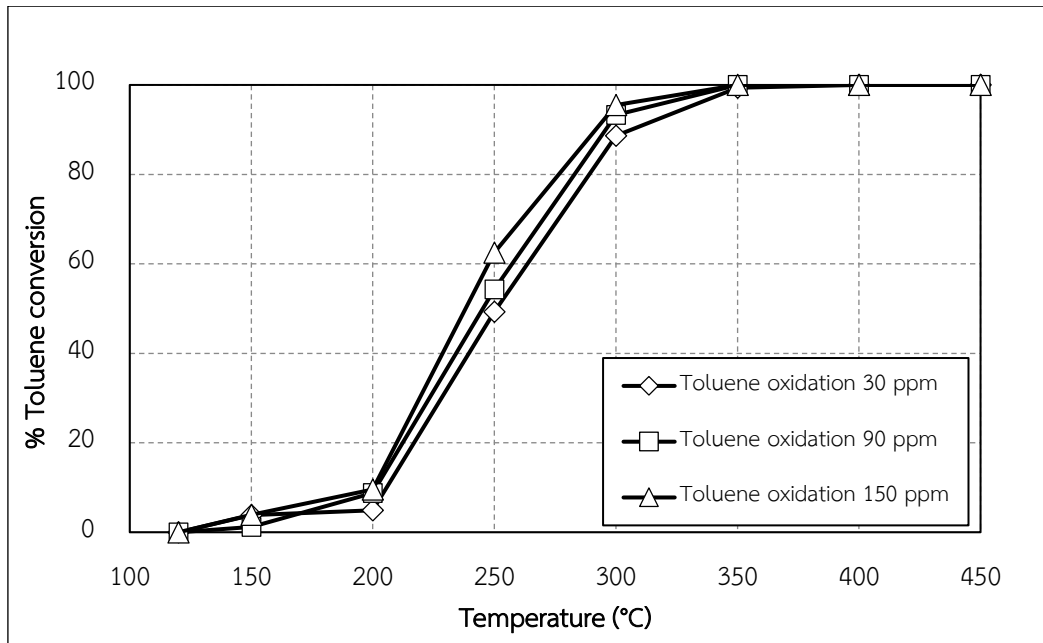
รูปที่ 4.1 แผนผังระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน

4.3.2 ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีน

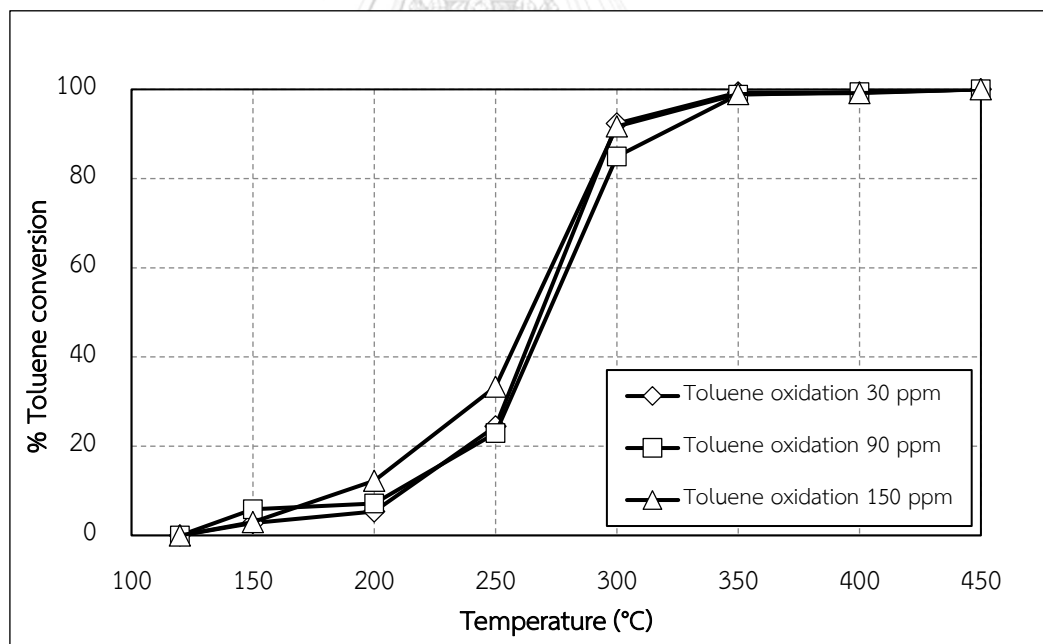
ในการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอีนถูกแบ่ง จะทำการศึกษา 2 ส่วน ได้แก่ สมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดโทลูอีน (%Toluene conversion) และสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนโทลูอีนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของ SO_2 และ O_2 ต่างกันถูก แสดงในรูปที่ 4.2-4.5 พบว่าที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่ำจะเห็น %Toluene conversion มีค่าน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ต้องอาศัยพลังงานจำนวนหนึ่งในการเริ่มการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจะเห็นค่า %Toluene conversion เพิ่มสูงขึ้น

ผลของ O_2 ต่อการออกซิไดซ์โทลูอีน ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ชัดเจนที่ อุณหภูมิประมาณ 250°C โดยพบว่าเมื่อลดความเข้มข้นของ O_2 จาก 15 ลงเหลือ 5 vol.% ทำให้ %Toluene conversion ลดต่ำลง ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200°C ปฏิกิริยาเกิดเพียงเล็กน้อยหรือไม่ เกิด จึงไม่เห็นความแตกต่าง ส่วนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปมี %Toluene conversion สูงเกือบ 100% ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างเช่นกัน และผลของการที่มีความเข้มข้นของ O_2 ลดลง 3 เท่า (จาก 15 เป็น 5 vol.%) ทำให้เห็นว่า light off temperature ของปฏิกิริยา toluene oxidation ขยับมา ทางขวาเล็กน้อย (นิยามของ “light off temperature” ในที่นี้คือ อุณหภูมิที่ทำให้ได้ค่า conversion 50%)



รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ผ่านปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินด้วย O₂ 15 vol.%

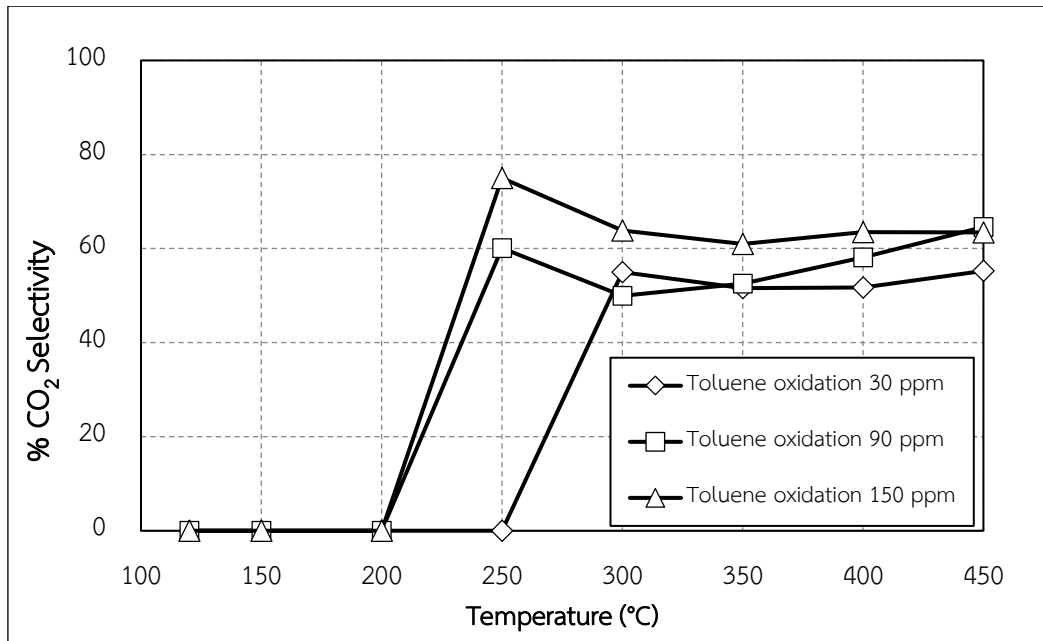


รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ผ่านปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินด้วย O₂ 5 vol.%

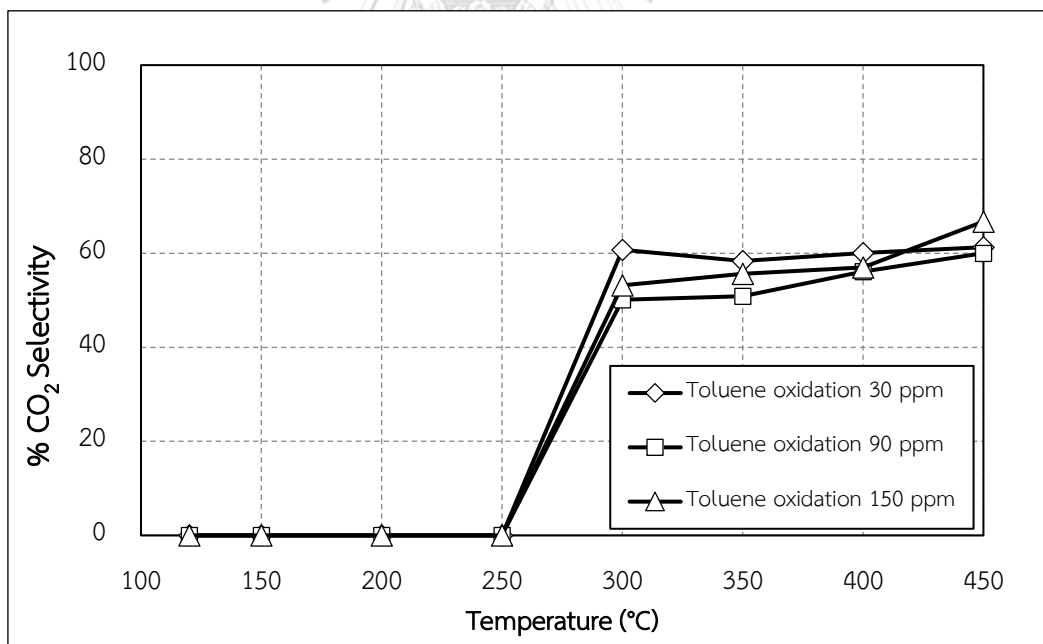
ค่าการเลือกเกิด CO_2 แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 จากผลการวิเคราะห์พบว่าในช่วงอุณหภูมิที่ค่า %Toluene conversion ยังไม่ถึง 100% นั้น ปริมาณ CO_2 ที่ตรวจพบนั้นเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา แต่เมื่อ %Toluene conversion ถึงระดับ 100% พบว่าปริมาณ CO_2 ที่ตรวจพบไม่ได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

พฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นจาก ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินมีโอกาสเกิดได้ 2 เส้นทางด้วยกัน เส้นทางแรกคือการออกซิไดซ์โทลูอินไปเป็น CO_2 โดยตรง เส้นทางที่ 2 คือ การออกซิไดซ์โทลูอินไปเป็นกรดเบนโซอิก (หลังจากนั้นกรดเบนโซอิกจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น CO_2) ปฏิกิริยาของเส้นทางแรกนั้นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นทางที่สอง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงมากพอจึงทำให้เส้นทางที่สองเกิดขึ้น แต่กรดเบนโซอิกที่เกิดขึ้นจากเส้นทางที่สองสลายตัวไปเป็น CO_2 ได้น้อย (เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 มีตำแหน่งว่างไว้เป็นกรด จึงทำให้กรดเบนโซอิกซึ่งมีความเป็นกรดเหมือนกันดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อย) ด้วยเหตุนี้เราจึงเห็นค่าการเลือกเกิด CO_2 ไม่เพิ่มขึ้นจนถึง 100% แม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 450°C

ในส่วนผลของความเข้มข้น SO_2 และ O_2 (รวมถึงไอน้ำ) ไม่มีผลต่อการออกซิไดซ์กรดเบนโซอิกไปเป็น CO_2 ดังเห็นได้จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ผลของ SO_2 ที่ต่างกัน ให้ค่า % CO_2 Selectivity อยู่ที่ประมาณ 60% แม้ว่า %Toluene conversion จะสูงขึ้นถึง 100% แต่ค่าการเลือกเกิด CO_2 ค่อนข้างนิ่งและไม่ได้เพิ่มขึ้นแม้ว่าอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาจะสูงขึ้น จากตรงนี้แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดผลิตภัณฑ์ออกซิเจนที่ทนต่อการออกซิไดซ์ซึ่งก็คือ กรดเบนโซอิก



รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity ผ่านปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินด้วย O₂ 15 vol.%



รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity ผ่านปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินด้วย O₂ 5 vol.%

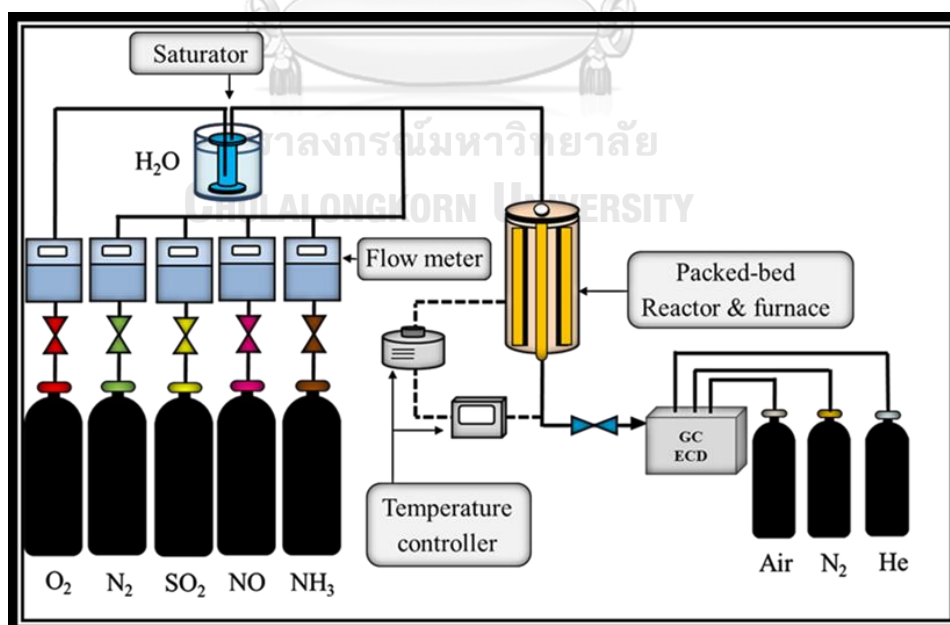
4.4 การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

4.4.1 ระเบียบวิธีการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

การทดสอบจะใช้อุณหภูมิการทดสอบในช่วง 120-450°C โดยแก๊สที่ใช้ในการทดสอบ มีอัตราการไหลรวม 200 mL/min (ไม่รวมไอน้ำ) ประกอบไปด้วย NO เข้มข้น 120 ppm NH₃ เข้มข้น 120 ppm O₂ เข้มข้น 15 และ 5 vol.% SO₂ เข้มข้น 30, 90 และ 150 ppm ไอน้ำ 15 และ 5 vol.% (ในกรณี O₂ เข้มข้น 5 vol.%) โดยส่วนที่เหลือคือ N₂

ไอน้ำมาจากน้ำที่ถูกบรรจุอยู่ใน saturator โดยให้ความร้อนกับ saturator ผ่านน้ำที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อให้น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ โดยรักษาอุณหภูมิของน้ำไว้ที่ 80°C และมี O₂ เป็น carrier gas ในการพาไอน้ำออกจาก saturator

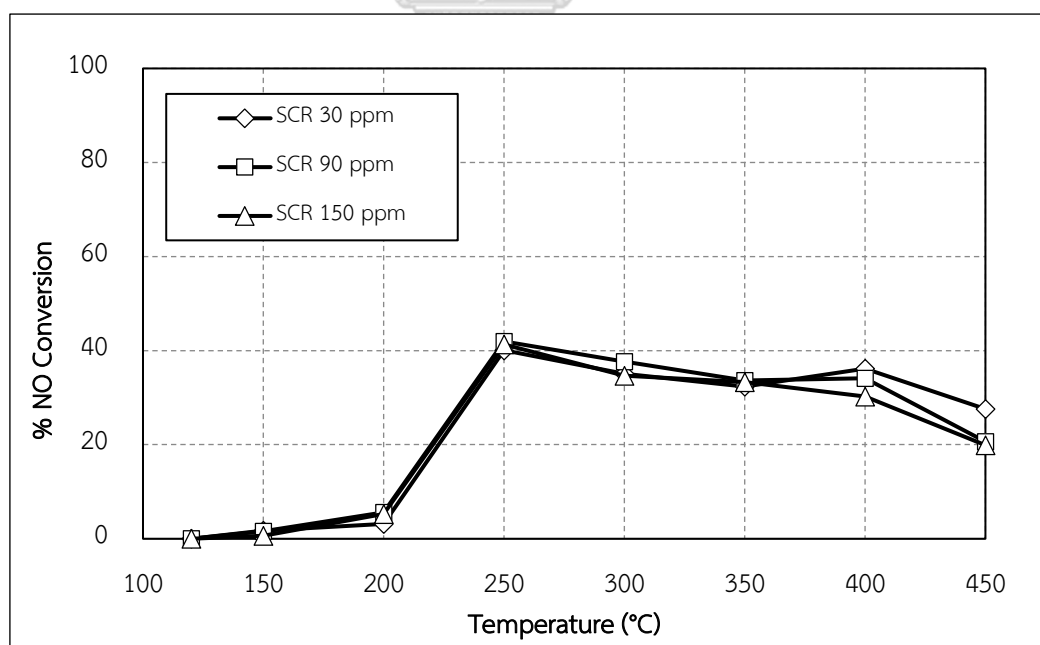
ในการทดลองวัดความเข้มข้นของ NO ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์หลังทำปฏิกิริยาแก๊สด้วยเครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-2014 ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Electron Capture Detector (ECD) โดยใช้อุณหภูมิกอลัมน์ 40°C อุณหภูมิตัวตรวจวัด (Detector) 200°C และใช้ N₂ เป็น carrier gas ความดันของ N₂ ด้านขาเข้า Detector 240 kPa แผนผังกระบวนการกำจัด NO ด้วยปฏิกิริยา SCR แสดงดังรูปที่ 4.6



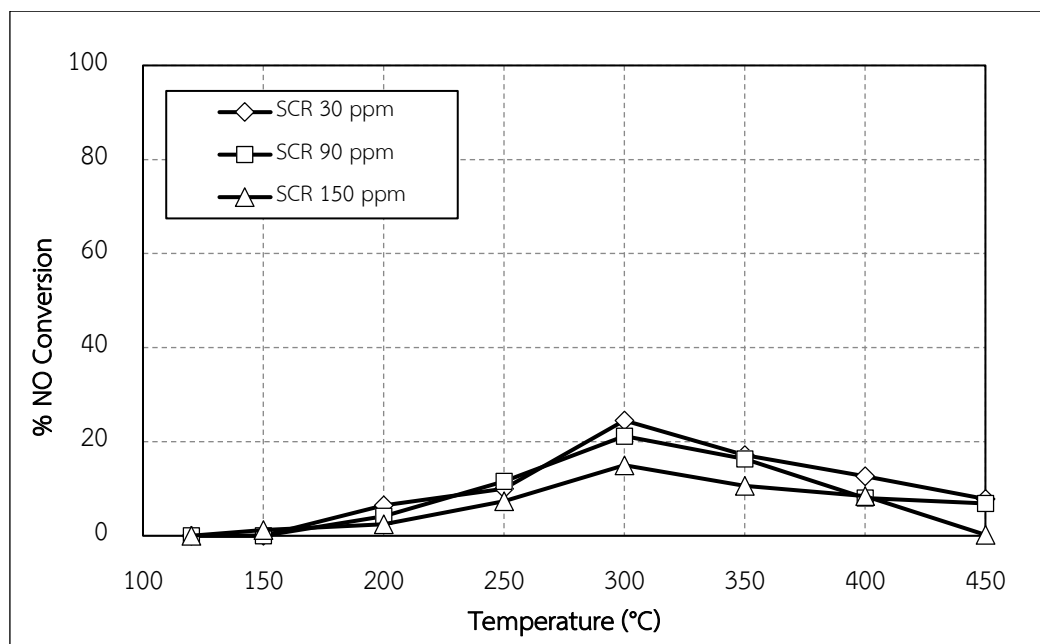
รูปที่ 4.6 แผนผังปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

4.4.2 ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

การหาความเข้มข้นของ NO สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ที่กำหนดให้พื้นที่ใต้กราฟ ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นค่ามาตรฐาน ปฏิกิริยาจะเริ่มจาก NH_3 เข้าไปเกาะตรงตำแหน่งที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้น NO และ O_2 จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ NH_3 บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็น N_2 และไอน้ำ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น %NO conversion จะมีค่าสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น โดยระบบที่มี O_2 15 vol.% จะสามารถกำจัด NO ที่สูงสุด 40% ที่อุณหภูมิ 250°C และระบบที่มี O_2 5 vol.% จะสามารถกำจัด NO ที่สูงสุดประมาณ 20% ที่อุณหภูมิ 300°C จากนั้น %NO conversion จะลดลงอันเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Ammonia oxidation ที่เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงระดับหนึ่ง (300-450°C) โดยในปฏิกิริยา Ammonia oxidation นี้แก๊ส NH_3 บางส่วนทำปฏิกิริยากับ O_2 กลายเป็น NO แทน ส่งผลให้มี NO เกิดเพิ่มขึ้นในระบบ จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด NO ลดลง เนื่องจากการสูญเสีย NH_3 ส่วนหนึ่งไป และเมื่อเปรียบเทียบผลจากการลดลงของ O_2 พบว่าเมื่อลดความเข้มข้นของ O_2 ลงสามเท่า จะส่งผลให้ %NO conversion มีค่าลดลงจากเดิมประมาณ 50% เนื่องจาก O_2 ที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง และพบว่าความเข้มข้นทั้งสามค่าของ SO_2 ให้ค่า % NO conversion ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O_2 15 vol.%

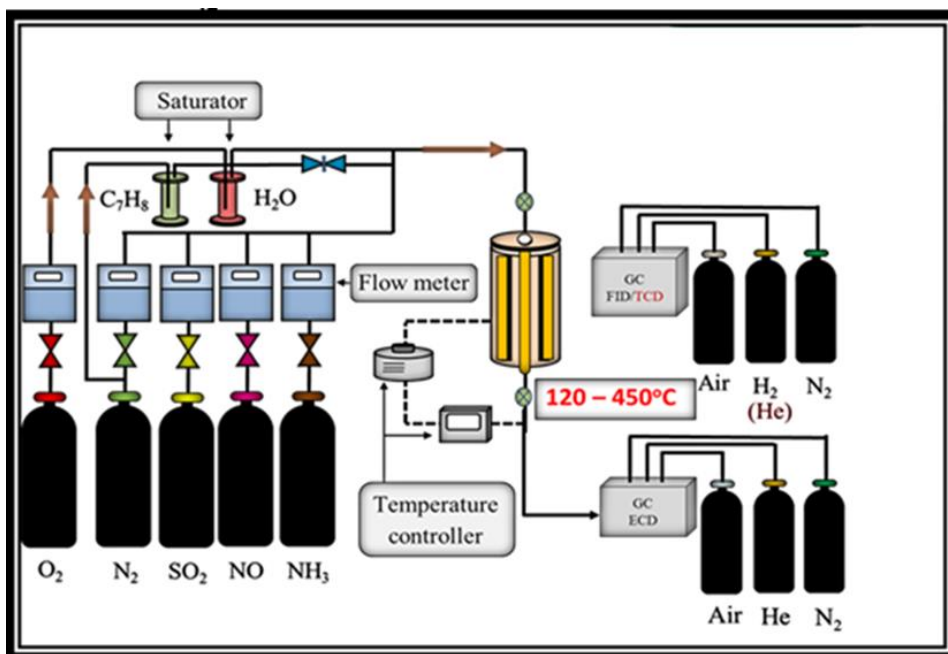


รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O_2 5 vol.%

4.5 การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวม

4.5.1 ระเบียบวิธีการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวม

ระบบปฏิกิริยารวมคือ การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัด NO ร่วมกับโทลูอิน การทดสอบใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ 120-450°C โดยใช้แก๊สในการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด และโทลูอินที่ 200 ppm ทำการเก็บแก๊สผสมทั้งขาเข้าและออกเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 1 mL มาตรวจวัดความเข้มข้นของโทลูอินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ที่มีตัวตรวจวัดชนิด Flame Ionization Detector (FID) โดยใช้อุณหภูมิคอลัมน์ 130°C และทำการวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการเก็บแก๊สขาออกเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 2 mL โดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph Shimadzu GC-8A ที่มีตัวตรวจวัดชนิด Thermal Conductive Detector (TCD) โดยใช้อุณหภูมิคอลัมน์ 230°C แผนผังกระบวนการกำจัด NO ร่วมกับโทลูอินแสดงดังรูปที่ 4.9

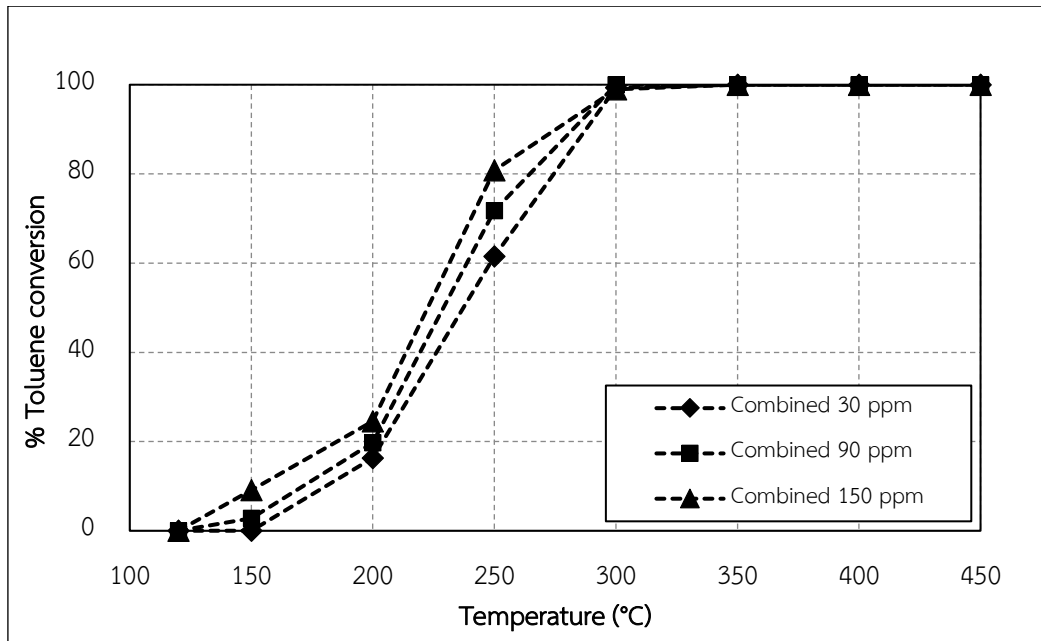


รูปที่ 4.9 แผนผังกระบวนการกำจัดไนโตรเจนมอนอกไซด์ร่วมกับโทลูอีน

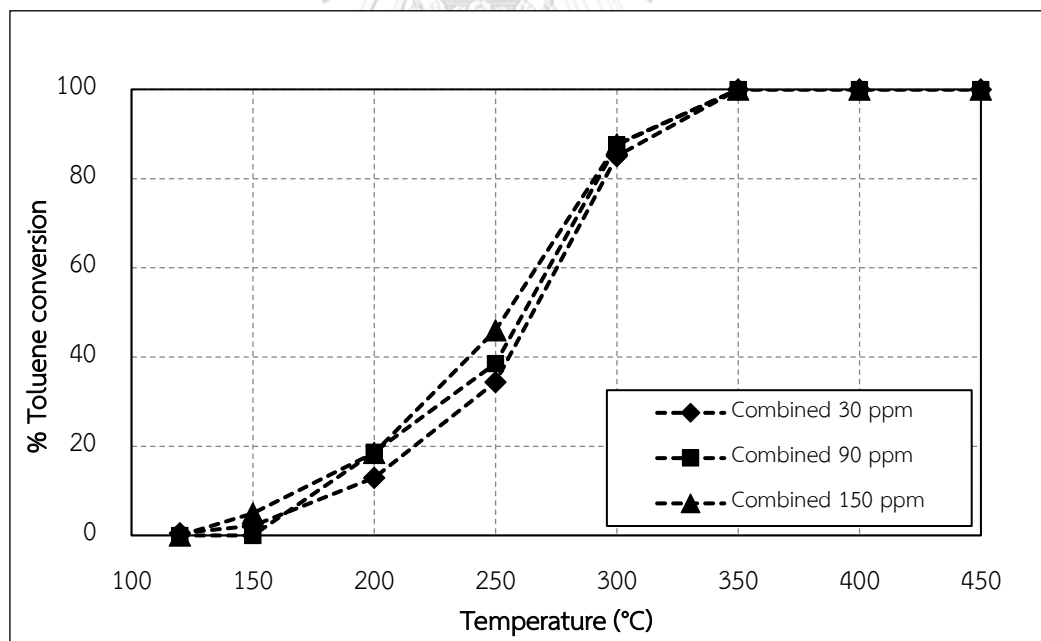
4.5.2 ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวม

การทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารวม จะทำการศึกษาสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ส่วนรวมกัน คือ สมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดโทลูอีน สมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนโทลูอีนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และสมรรถภาพในการกำจัด NO

ผลการทดสอบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดโทลูอีน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าความสามารถในการกำจัดโทลูอีนที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาดำจะเห็น %Toluene conversion มีค่าน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นจำนวนหนึ่งในการเริ่มการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจะเห็นค่า % Toluene conversion เพิ่มสูงขึ้น ผลของ O_2 ต่อการออกซิไดซ์โทลูอีนในรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นได้ชัดเจนในช่วงอุณหภูมิที่ $250^{\circ}C$ พบว่าเมื่อลดความเข้มข้นของ O_2 ลง %Toluene conversion ก็ลดลงไปด้วย ผลของการที่มีความเข้มข้นของ O_2 ลดลง 3 เท่า (จาก 15 เป็น 5 vol.%) ทำให้เห็นว่า light off temperature ของปฏิกิริยา toluene oxidation ขยับมาทางขวาเล็กน้อย และผลของความเข้มข้นของ SO_2 ในระบบที่มี O_2 15 vol.% พบว่า ผลของการที่มี SO_2 เพิ่มขึ้น 5 เท่า (จาก 30 ppm เป็น 150 ppm) ส่งผลให้ light off temperature ของปฏิกิริยา toluene oxidation ลดลงเพียง $20^{\circ}C$



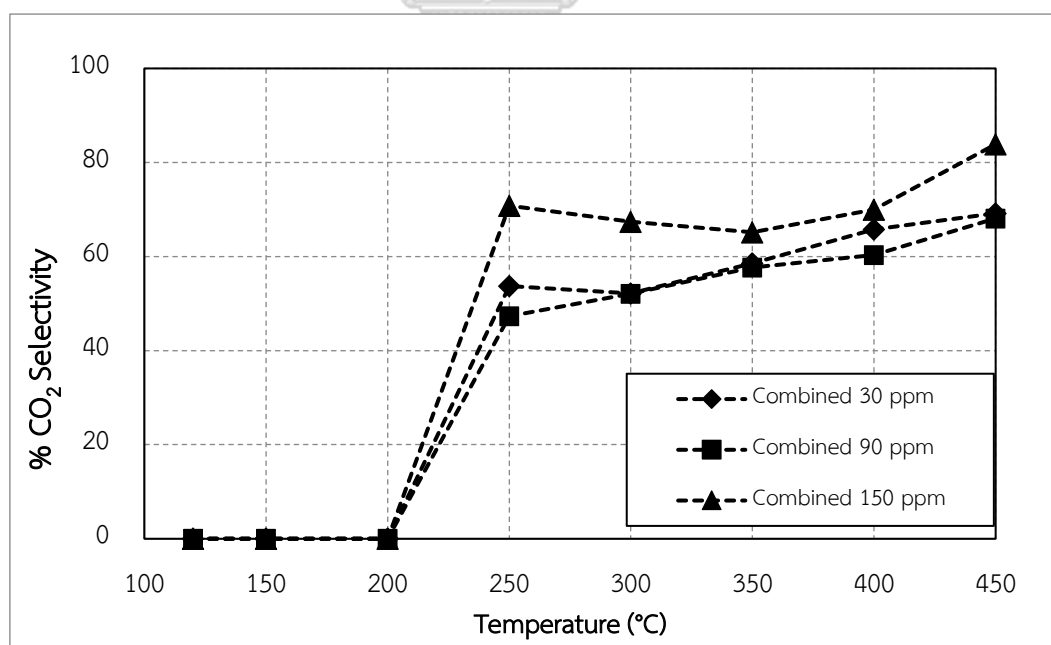
รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion
ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O₂ 15 vol.%



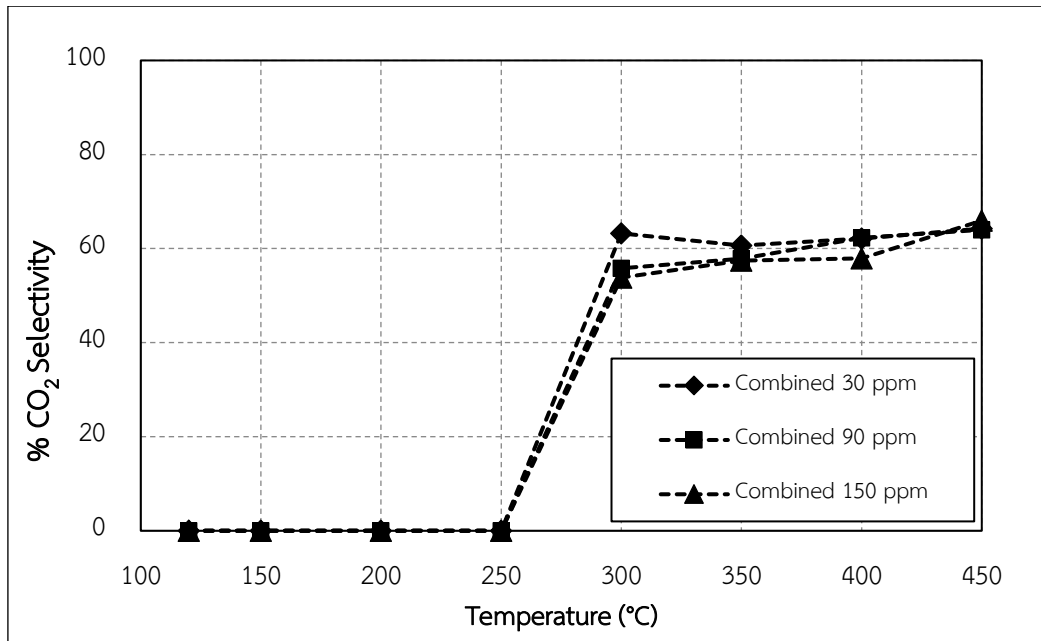
รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion
ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O₂ 5 vol.%

สำหรับค่าการเลือกเกิดของ CO_2 แสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าในช่วงที่อุณหภูมิต่ำจะไม่เห็นการเกิด CO_2 เนื่องจาก %Toluene conversion ยังต่ำอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการกำจัดโทลูอีนก็จะเพิ่มขึ้นและจะเริ่มเห็นการเกิด CO_2 และในระบบที่มี O_2 15 vol.% (รูปที่ 4.12) นอกจากเส้นทางการออกซิไดซ์โทลูอีนไปเป็น CO_2 โดยตรงและการออกซิไดซ์โทลูอีนผ่านทางกรเกิดกรดเบนโซอิก ยังพบว่ามีกรเกิดผ่านเส้นทางที่กรดเบนโซอิกถูกออกซิไดซ์ไปเป็น CO_2 ดังจะเห็นได้จาก แม้ว่า %Toluene conversion จะสูงถึง 100% แต่ค่าการเลือกเกิดของ CO_2 มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ส่วนในระบบที่มี O_2 5% (รูปที่ 4.13) จะเกิดการออกซิไดซ์แต่เพียงสองเส้นทาง คือ จากโทลูอีนไปเป็น CO_2 และจากโทลูอีนไปเป็นกรดเบนโซอิก

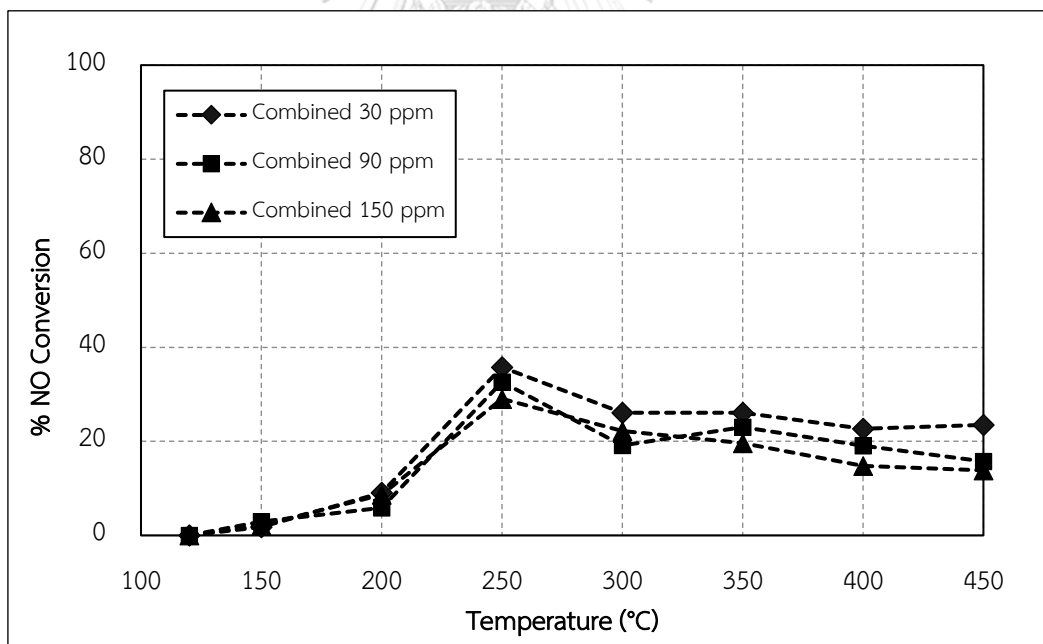
ส่วนผลของค่าการกำจัด NO ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.14-4.15 พบว่าระบบที่มี O_2 15 vol.% จะสามารถกำจัด NO ได้มากกว่าระบบที่มี O_2 5 vol.% เนื่องจากในปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดจำเป็นต้องใช้ O_2 (สมการที่ 2.4) นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของ SO_2 ที่แตกต่างกันถึง 5 เท่า ให้ค่า %NO conversion ที่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้ทำงานได้ในช่วงความเข้มข้น SO_2 ที่กว้าง



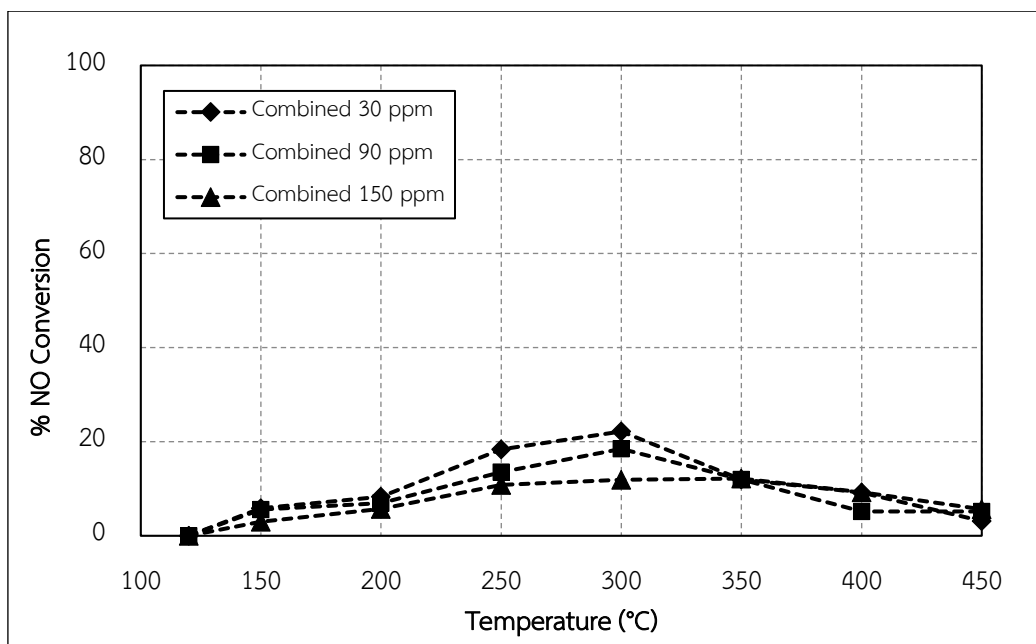
รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O_2 15 vol.%



รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบ %Carbon dioxide Selectivity
ผ่านระบบปฏิกิริยารวมด้วย O₂ 5 vol.%



รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion
ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O₂ 15 vol.%



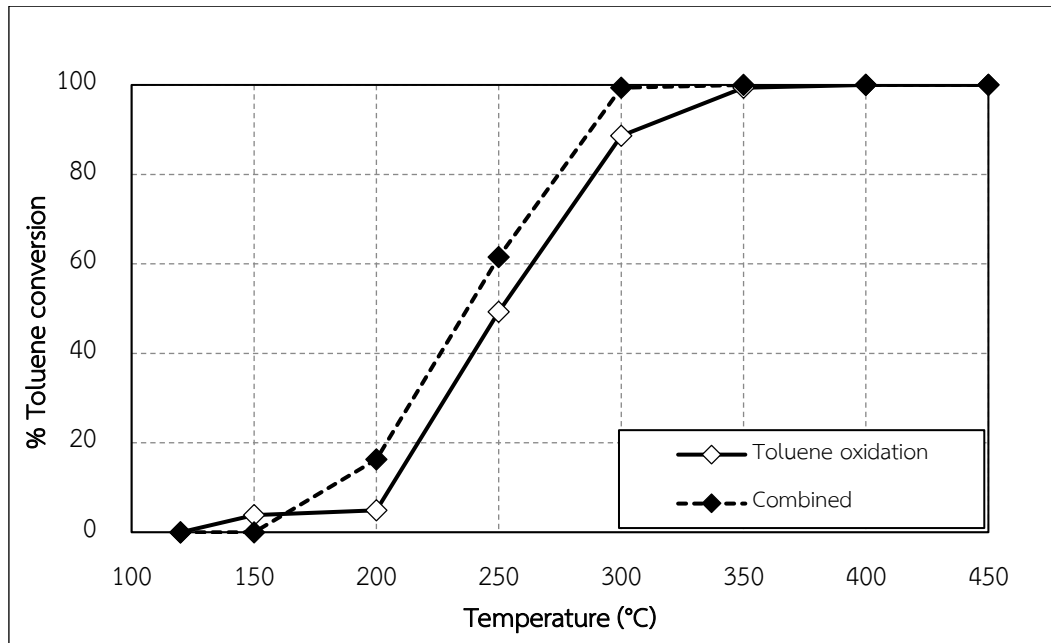
รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบ %NO Conversion ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดด้วย O₂ 5 vol.%

4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการรวมระบบ

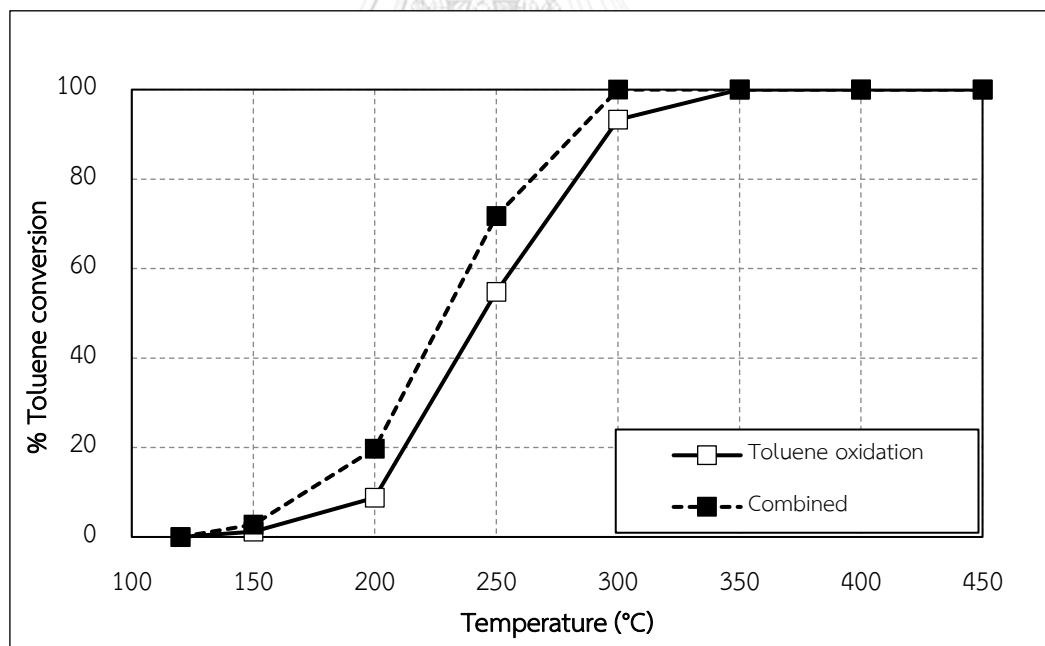
ในส่วนของ การเปรียบเทียบสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนรวมระบบ (ระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินและระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด) และหลังรวมระบบ จะพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ ผลของ NO และ NH₃ ต่อสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน และผลของโทลูอินต่อสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

4.6.1 ผลของ NO และ NH₃ ต่อสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอิน

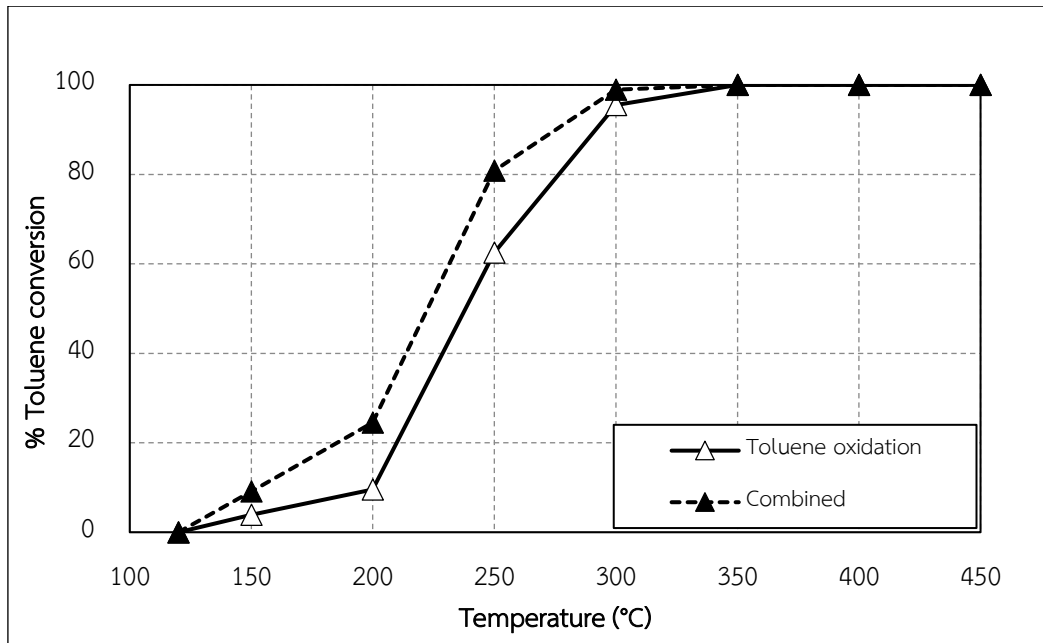
ผลของการเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินและการเกิดปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินในระบบที่มีการรวมปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 4.16-4.27 ในส่วนของ %Toluene conversion หลังจากมีการรวมระบบ พบว่าความสามารถในการกำจัดโทลูอินทำได้ใกล้เคียงกันแต่ระบบหลังรวมจะสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการมี NO เป็นตัวออกซิไดซ์โทลูอินเพิ่มขึ้นในระบบ ทำให้โทลูอินถูกออกซิไดซ์เพิ่มขึ้น จึงเห็น %Toluene conversion สูงขึ้นและเมื่อพิจารณาค่าการเลือกเกิด CO₂ ในรูปที่ 4.22-4.27 พบว่าของระบบรวมมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเช่นกัน



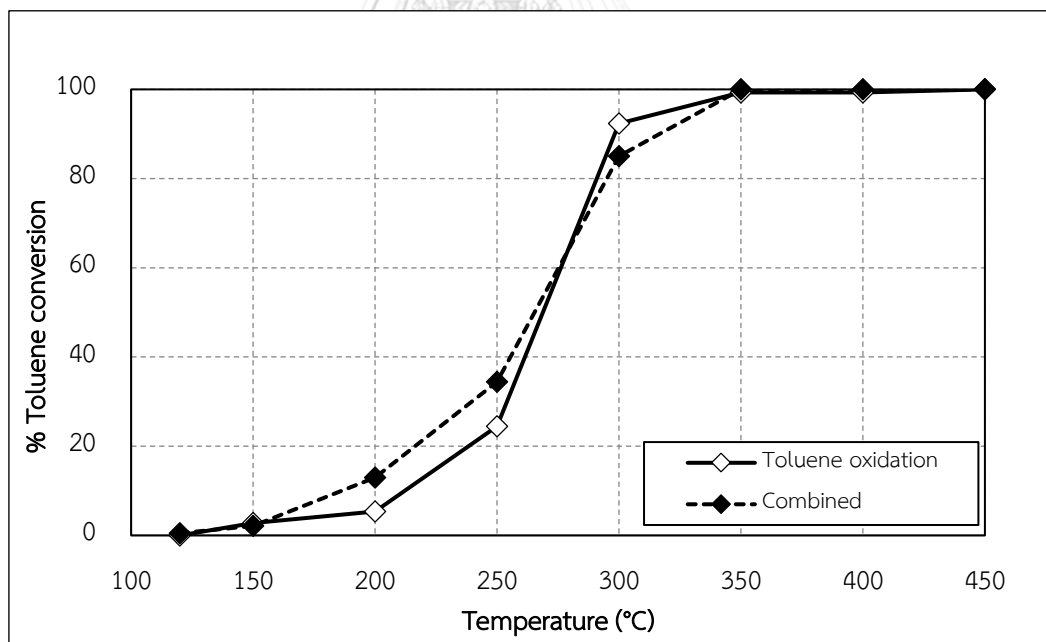
รูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 30 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



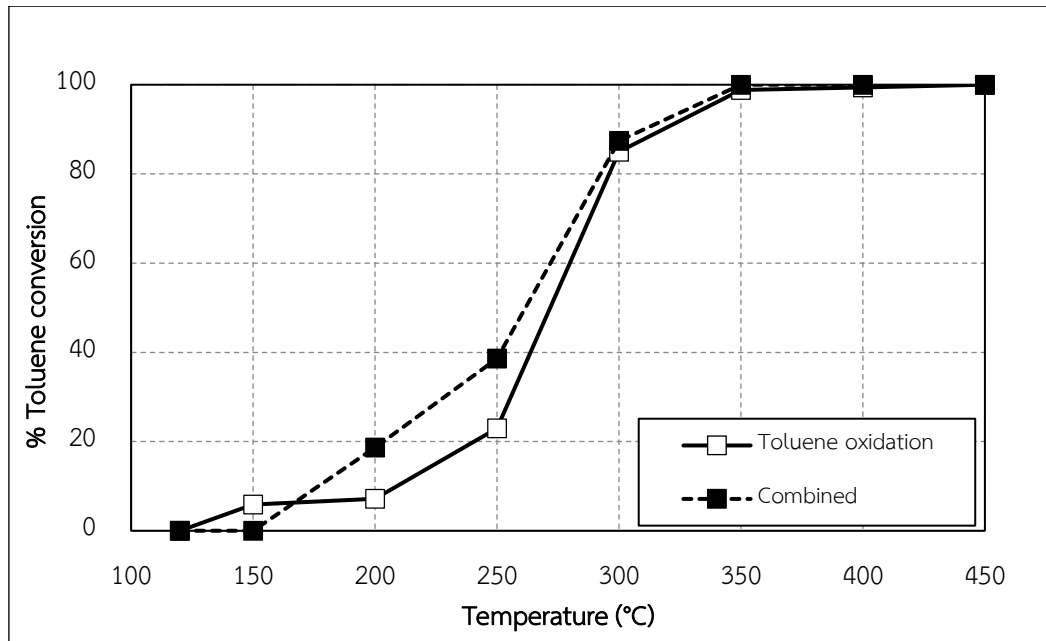
รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 90 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



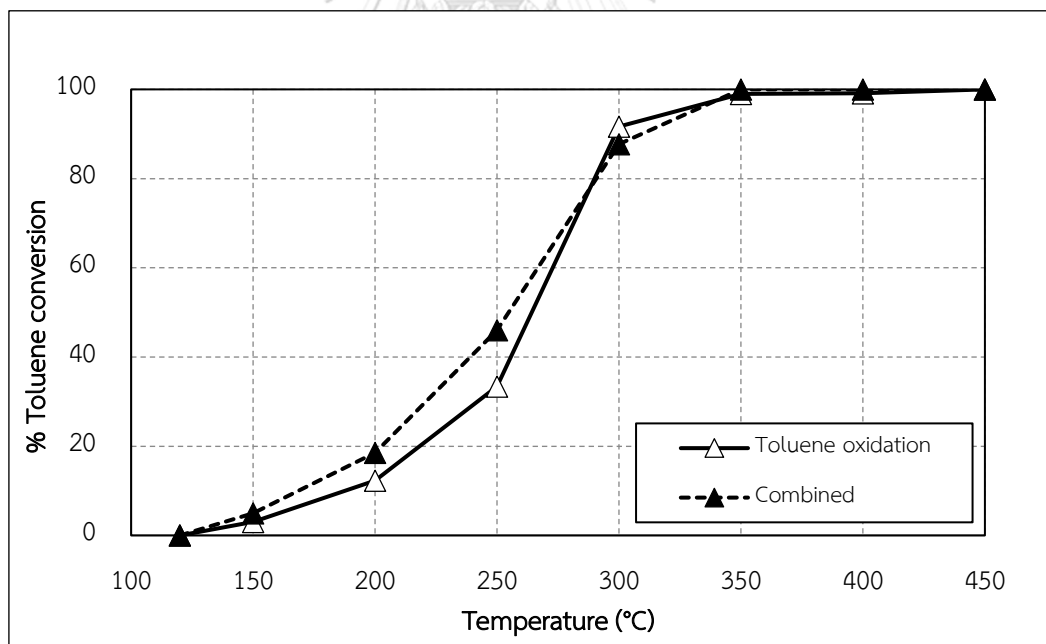
รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 150 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



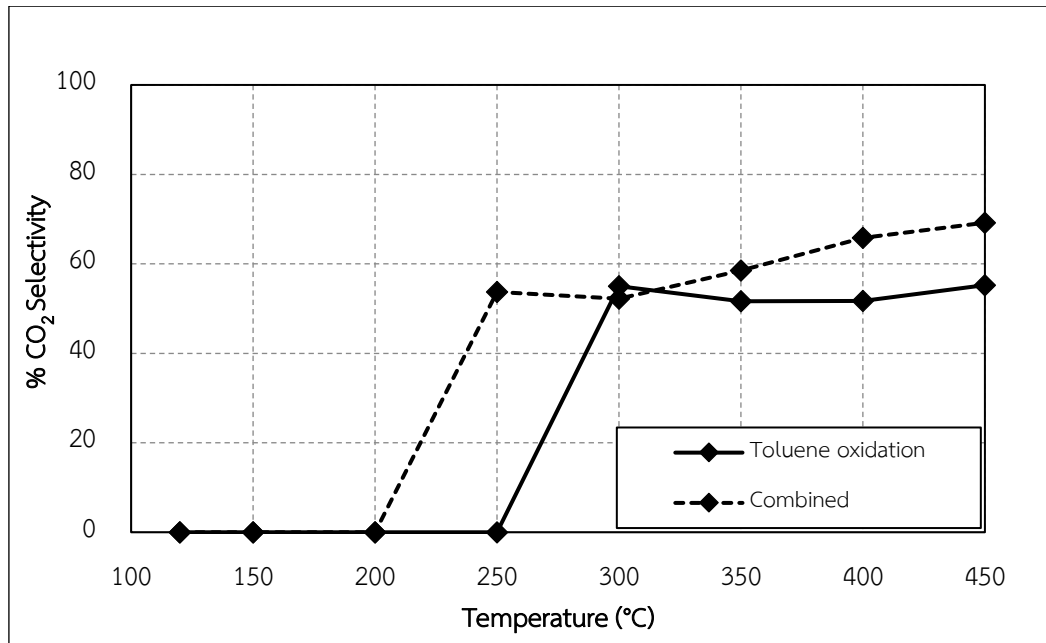
รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 30 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%



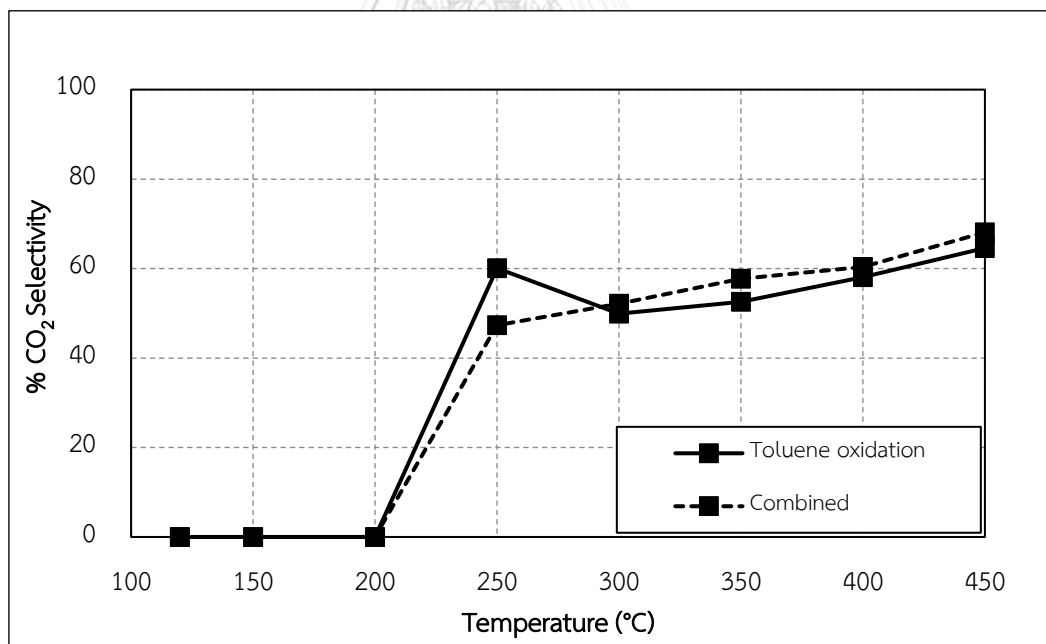
รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 90 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%



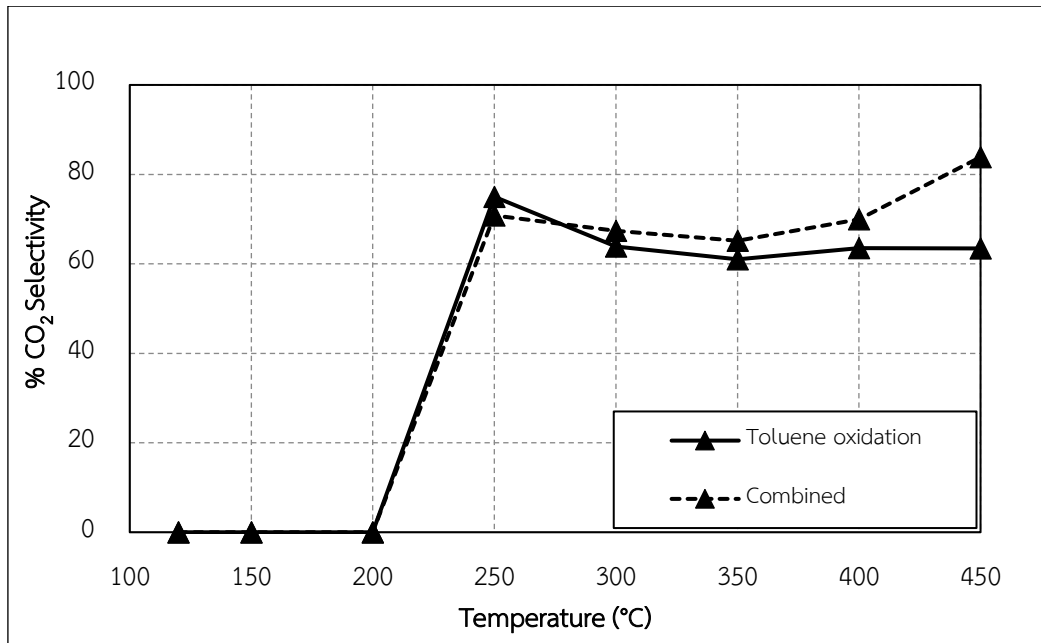
รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบ %Toluene conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 150 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%



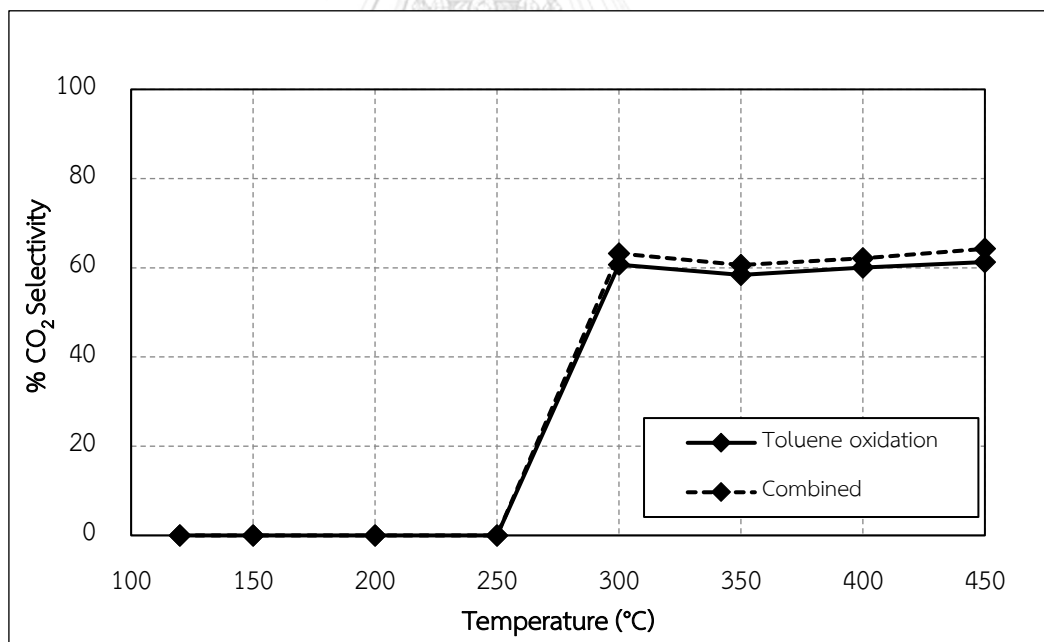
รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบ %CO₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 30 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



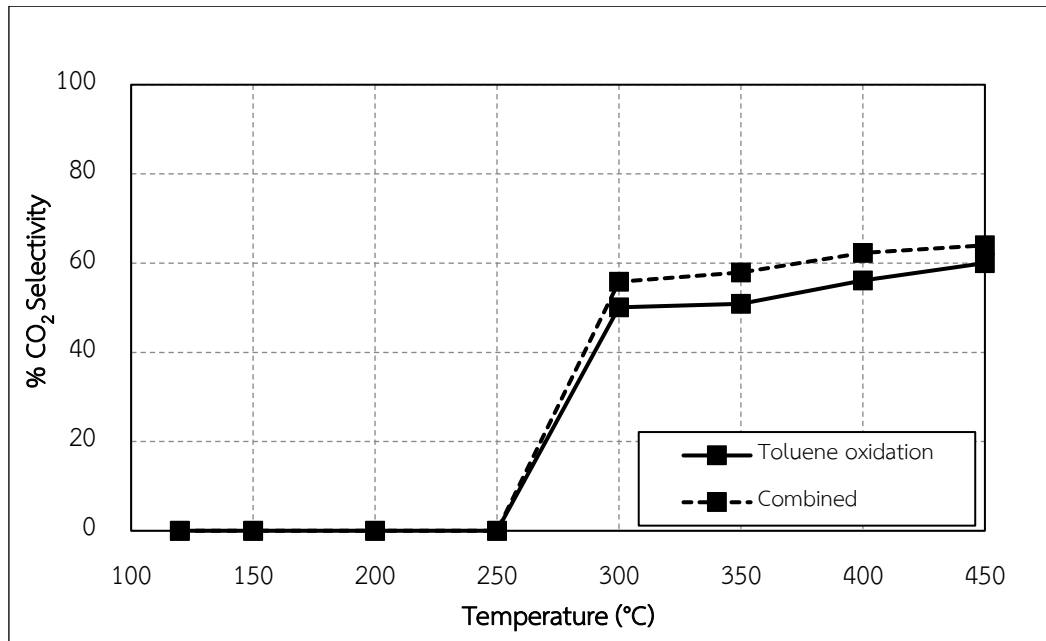
รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบ %CO₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 90 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



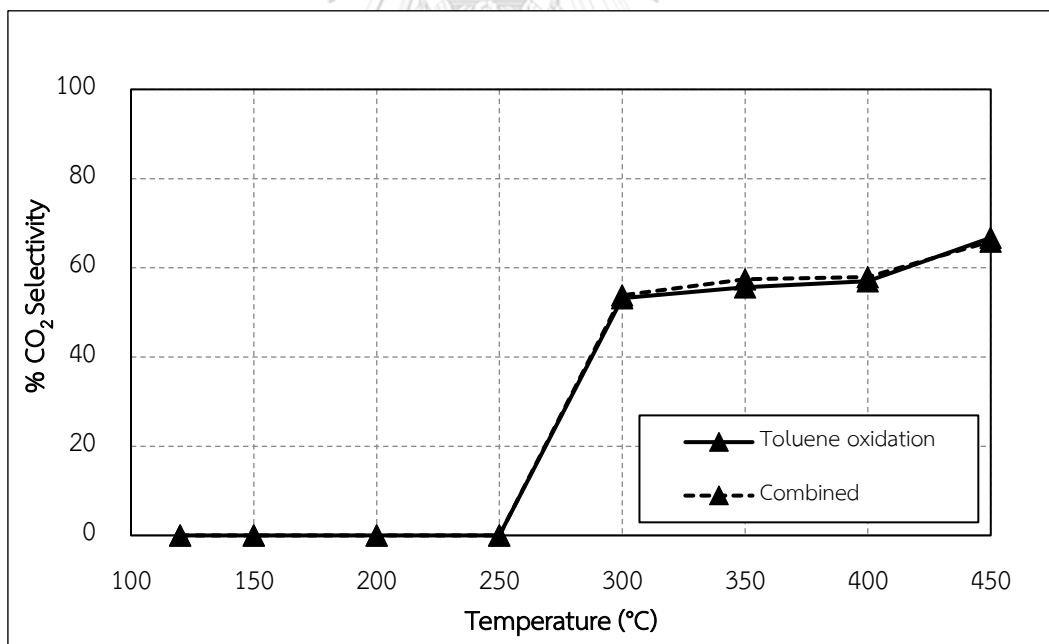
รูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบ %CO₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 150 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



รูปที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบ %CO₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 30 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%



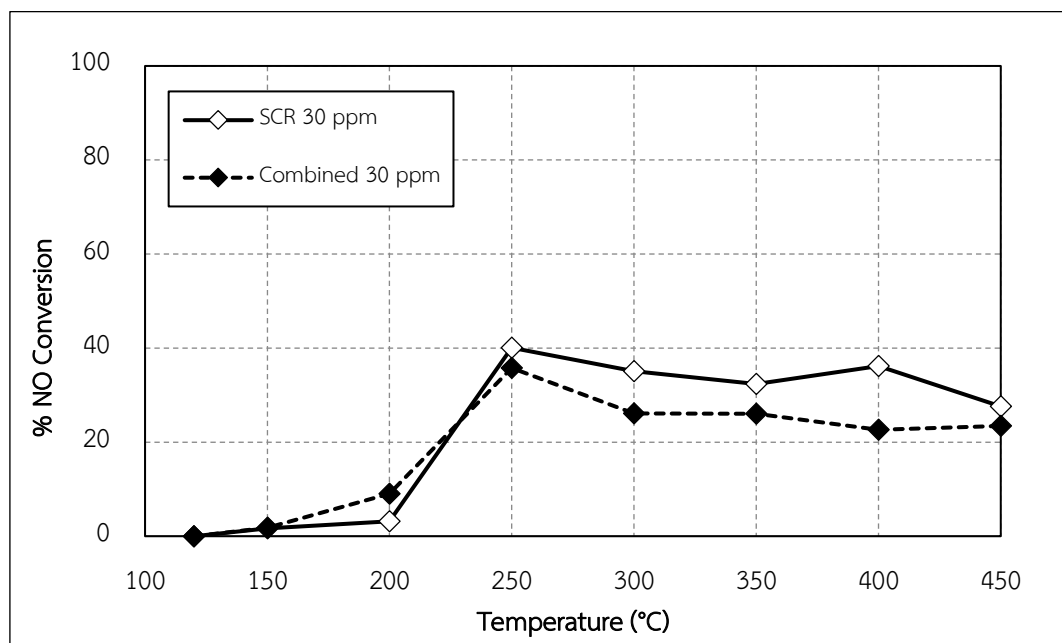
รูปที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบ %CO₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 90 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%



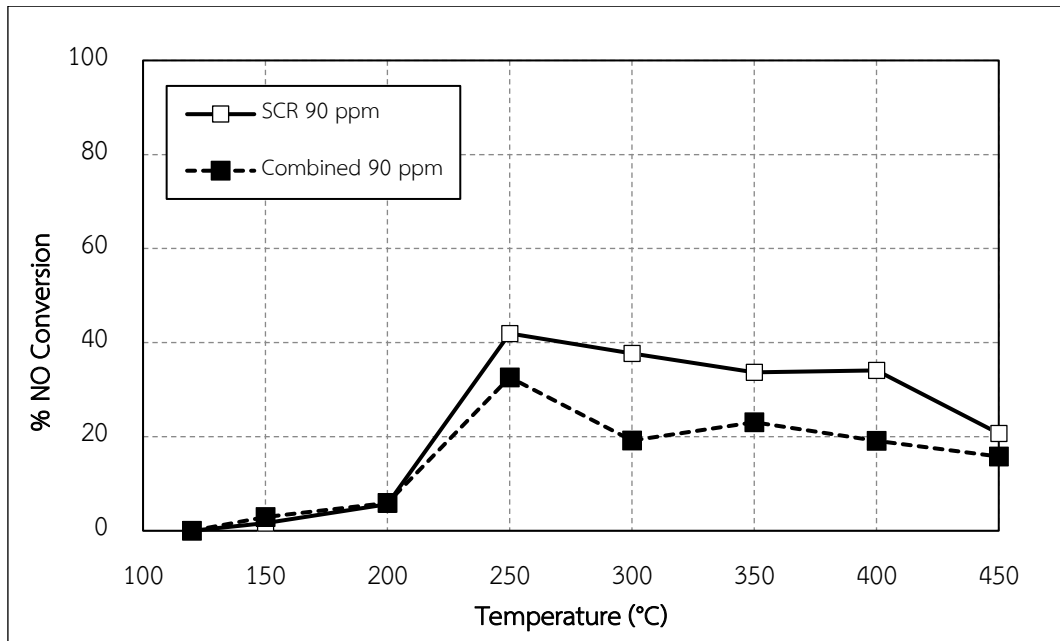
รูปที่ 4.27 ผลการเปรียบเทียบ %CO₂ Selectivity ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 150 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%

4.6.2 ผลของโทลูอินต่อสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

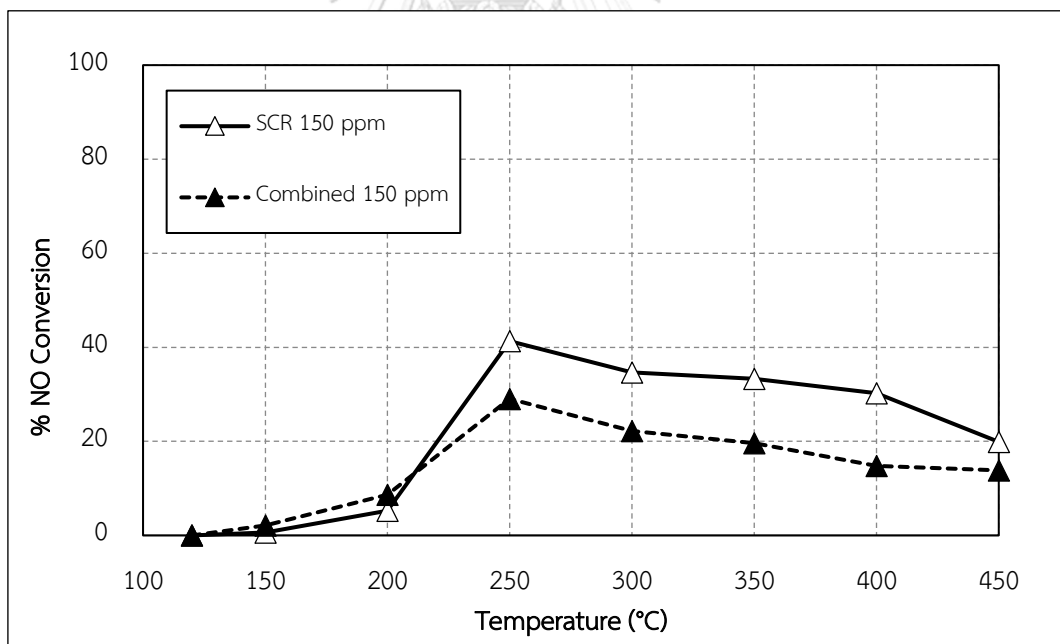
ในส่วนผลของโทลูอินต่อสมรรถภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด โดยค่า %NO conversion ก่อนและหลังรวมระบบ ถูกแสดงในรูปที่ 4.28-4.33 จะพบว่าเมื่อรวมระบบ %NO conversion จะมีค่าลดลง เนื่องจากการที่มีโทลูอินอยู่ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด จะมีโทลูอินและกรดเบนโซอิกที่แย่งการดูดซับบนพื้นผิวจึงทำให้โอกาสที่ NH_3 จะถูกดูดซับบนพื้นผิวลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดลดต่ำลง จึงทำให้ค่า %NO conversion มีค่าลดลง



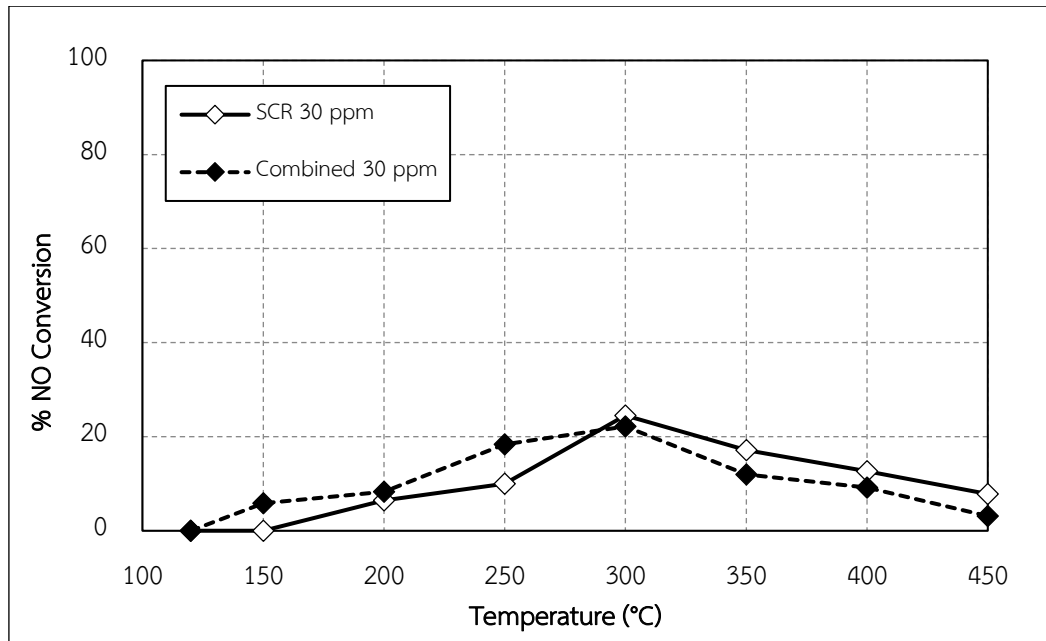
รูปที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO_2 30 ppm ด้วย O_2 15 vol.%



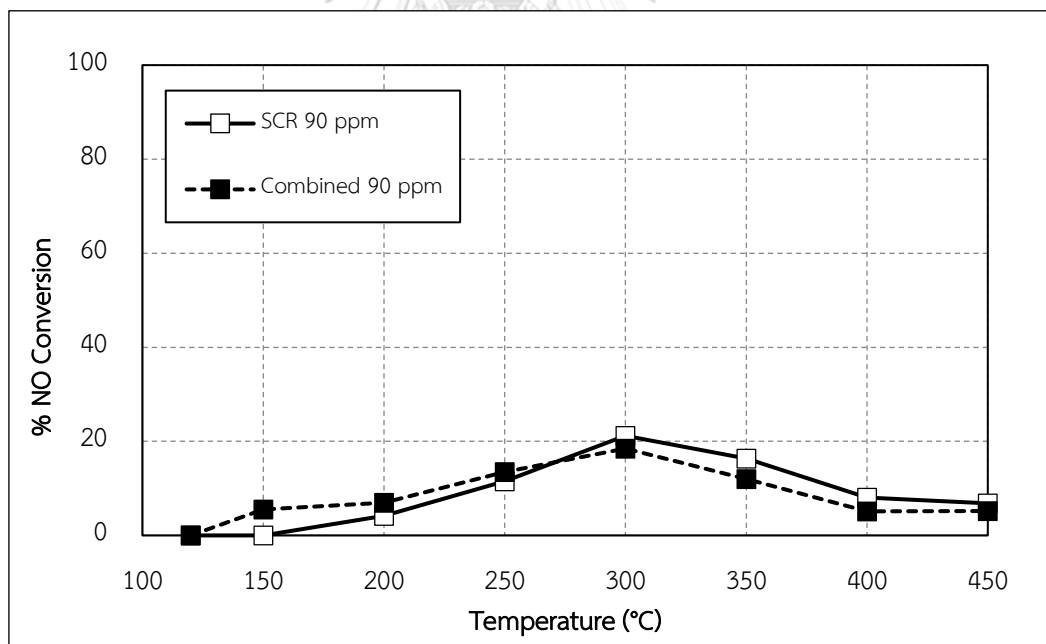
รูปที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 90 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



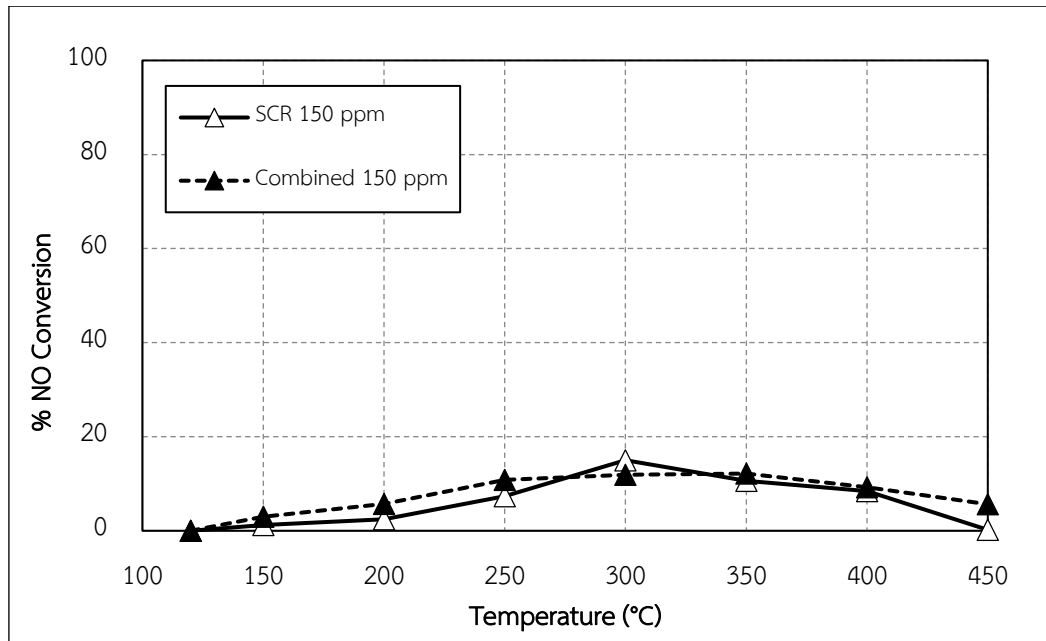
รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 150 ppm ด้วย O₂ 15 vol.%



รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 30 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%



รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO₂ 90 ppm ด้วย O₂ 5 vol.%



รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบ %NO conversion

ก่อนและหลังรวมระบบที่ความเข้มข้นของ SO_2 150 ppm ด้วย O_2 5 vol.%

4.7 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.3-4.6 ที่ออกแบบมาสำหรับการกำจัด NO ด้วยปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด สำหรับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ O_2 สูงและ SO_2 ต่ำ (แก๊สปล่อยทิ้งจากเครื่องยนต์กังหันแก๊ส) ในระบบร่วนนั้นความสามารถในการกำจัดโทลูอิน และเปลี่ยนโทลูอินไปเป็น CO_2 ยังคงเดิมโดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของ O_2 และ SO_2 แต่ความสามารถในการกำจัด NO ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ O_2 ลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้และข้อเสนอแนะ สำหรับงานที่จะมีการศึกษาต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ที่ได้รับการเสริมด้วย MgO พบว่ามีตำแหน่งกรดที่ลดลง แต่ทำให้สัดส่วนของตำแหน่งกรดที่จับ NH_3 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $500^\circ C$ มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5-MgO/TiO_2 ที่ออกแบบมาสำหรับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 30 ppm และ O_2 15 vol.% ในการกำจัดโทลูอินร่วมกับ NO โดยปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด สามารถนำมาใช้กับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ที่สูงขึ้นและความเข้มข้นของ O_2 ที่ต่ำลงได้เช่นกัน

โดยก่อนการรวมระบบพบว่า ในส่วนของ %Toluene conversion % CO_2 selectivity และ % NO conversion ที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลมากต่อสามค่าที่กล่าว แต่การที่ O_2 มีความเข้มข้นที่ลดลงจะส่งผลให้ทั้งสามค่าที่กล่าวมามีค่าที่ลดลง โดย %Toluene conversion จะลดลงแตกต่างกันเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ $250^\circ C$ แสดงให้เห็นว่าสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาตัวนี้ไปใช้กับแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 ในช่วง 30-150 ppm และ O_2 15 vol.% ได้ทั้งในระบบปฏิกิริยาการออกซิไดซ์โทลูอินและระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด

หลังจากการรวมระบบพบว่า ทั้งระบบที่มี O_2 15 และ 5 vol.% ในส่วนของ %Toluene conversion และ % CO_2 selectivity พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย แต่ในส่วนของ % NO conversion ที่ O_2 5 vol.% ไม่ได้แตกต่างจากระบบก่อนรวม แต่ในระบบที่ O_2 15 vol.% ค่า % NO conversion ลดลงจากก่อนรวมระบบอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการที่มีโทลูอินอยู่ในระบบปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิด จะมีโทลูอินและกรดเบนโซอิกที่แย่งการดูดซับบนพื้นผิวจึงทำให้โอกาสที่ NH_3 จะถูกดูดซับบนพื้นผิวลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันแบบเลือกเกิดลดต่ำลง จึงมองเห็น % NO conversion มีค่าลดลง ภาพโดยรวมคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถทำงานได้ในระบบแก๊สปล่อยทิ้งที่มีความเข้มข้นของ SO_2 สูงขึ้นและความเข้มข้นของ O_2 ต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาการกำจัด NO ร่วมกับไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น เช่น เบนซีน เพื่อเป็นการขยายขอบเขตความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ที่ได้รับการเสริมด้วย MgO



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- [1] Z. Fu, M. Guo, C. Liu, N. Ji, C. Song, and Q. Liu, "Design and Synthesis Functional Selective Catalytic Reduction Catalyst for NO_x Removal," *Procedia Engineering*, vol. 121, pp. 952-956, 2015.
- [2] W. Tongtawee, "การกำจัดไนโตรเจนมอนอกไซด์พร้อมโทลูอินบนตัวเร่งปฏิกิริยา V₂O₅/TiO₂ ที่ได้รับการเสริมด้วยMgO," จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- [3] A. T. Thetkathuek, "สารโทลูอิน: การประเมินการรับสัมผัสและผลกระทบต่อสุขภาพ Toluene: Exposure Assessment and Health Effect," *Naresuan University Journal: Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 101-111, 2013.
- [4] S. Lormphongs, "การประเมินการรับสัมผัสสารโทลูอินและรูปแบบการใช้ชีวิตของพนักงาน เก็บกวาดขยะของสำนักงานเขตแห่งหนึ่งในเขตกรุงเทพมหานคร," วารสารสาธารณสุข มหาวิทยาลัยบูรพา, vol. 11, no. 2, pp. 12-21, 2016.
- [5] R. M. Heck, "Catalytic abatement of nitrogen oxides—stationary applications," *Catalysis Today*, vol. 53, no. 4, pp. 519-523, 1999.
- [6] H. Ge, G. Chen, Q. Yuan, and H. Li, "Gas phase catalytic partial oxidation of toluene in a microchannel reactor," *Catalysis today*, vol. 110, no. 1-2, pp. 171-178, 2005.
- [7] Z. Alipour, M. Rezaei, and F. Meshkani, "Effect of alkaline earth promoters (MgO, CaO, and BaO) on the activity and coke formation of Ni catalysts supported on nanocrystalline Al₂O₃ in dry reforming of methane," *Journal of Industrial Engineering Chemistry*, vol. 20, no. 5, pp. 2858-2863, 2014.
- [8] E. F. Aboelfetoh, M. Fechtelkord, and R. Pietschnig, "Structure and catalytic properties of MgO-supported vanadium oxide in the selective oxidation of cyclohexane," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 318, no. 1-2, pp. 51-59, 2010.
- [9] T. Mongkhonsi, P. Pimanmas, and P. Praserthdam, "Selective Oxidation of Ethanol and 1-Propanol over V–Mg–O/TiO₂ Catalyst," *Chemistry Letters*, vol. 29, no. 8, pp. 968-969, 2000.
- [10] I. Tomskii, M. Vishnetskaya, and A. Kokorin, "The partial catalytic oxidation of toluene on vanadium and molybdenum oxides," *Russian Journal of Physical Chemistry B, Focus on Physics*, vol. 2, no. 4, pp. 562-567, 2008.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ก.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ที่มีปริมาณโลหะออกไซด์ V_2O_5 3% โดยใช้ตัวรองรับไททานีย 2 กรัม จะได้

$$\frac{x}{x+2} = 0.03$$

จะได้ $x = 0.062$ กรัม เมื่อ x คือปริมาณ V_2O_5

ถ้าต้องการ V_2O_5 หนัก 181.88 กรัม ต้องใช้สารตั้งต้น $NH_3VO_3 = 2 \times 116.98 = 233.96$ กรัม

ถ้าต้องการ V_2O_5 หนัก 0.062 กรัม ต้องใช้สารตั้งต้น $NH_3VO_3 = 0.08$ กรัม

ดังนั้นต้องใช้ NH_3VO_3 ปริมาณ 0.08 กรัมและตัวรองรับไททานียปริมาณ 2 กรัม

ก.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5-MgO/TiO_2

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5-MgO/TiO_2 ที่มีปริมาณโลหะออกไซด์ MgO 0.5% บนตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 (ที่เตรียมได้จากข้อ ก.1) ปริมาณ 2 กรัม

$$\frac{x}{x+2} = 0.005$$

จะได้ $x = 0.01$ กรัม เมื่อ x คือปริมาณ MgO

ถ้าต้องการ MgO หนัก 40.3044 กรัม ต้องใช้สารตั้งต้น $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O = 256.41$ กรัม

ถ้าต้องการ MgO หนัก 0.01 กรัม ต้องใช้สารตั้งต้น $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O = 0.064$ กรัม

ดังนั้นต้องใช้ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ปริมาณ 0.064 กรัมและตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ปริมาณ 2 กรัม

ภาคผนวก ข

การคำนวณการเตรียมสารละลายวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP

การคำนวณการเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณ V_2O_5 ในตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 ด้วยเทคนิค ICP โดยใช้ standard V เข้มข้น 10 ppm (10 mg/L) มีขั้นตอนดังนี้

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี V_2O_5 3 wt.%

ตัวเร่งปฏิกิริยา	1	กรัม	มี V_2O_5 0.03	กรัม
V_2O_5	181.88	กรัม	มี V = $2 \times 50.94 = 101.88$	กรัม
V_2O_5	0.03	กรัม	มี V = 0.0168	กรัม
ดังนั้น V	0.0168	กรัม (16.8 mg)	ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	1
	V 10 mg		ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	0.595

ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (V_2O_5/TiO_2) 0.0595 กรัมละลายกับกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ปริมาณ 20 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ค

การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

ค.1 กราฟมาตรฐานโทลูอีน

การสร้างกราฟมาตรฐานโทลูอีน (calibration curve of toluene) เริ่มจากการชั่งโทลูอีน 0.1204 กรัมลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL จากนั้นเติมเมทิลแอลกอฮอล์ลงไปเล็กน้อยเพื่อช่วยให้โทลูอีนสามารถละลายในน้ำได้ จากนั้นใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 250 mL โดยความเข้มข้นของโทลูอีนในสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมการ ค.1 และผลการคำนวณของโทลูอีนที่ความเข้มข้น 30-700 ppm แสดงในตารางที่ ค.1

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

ตัวอย่าง การคำนวณการฉีดโทลูอีนปริมาณ 0.3 μL

$$\text{Toluene concentration} = \frac{0.1204 \times 0.0003 \times 22400 \times 10^6}{92.14 \times 250} = 35.12 \text{ ppm}$$

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณโทลูอีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ppm)

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

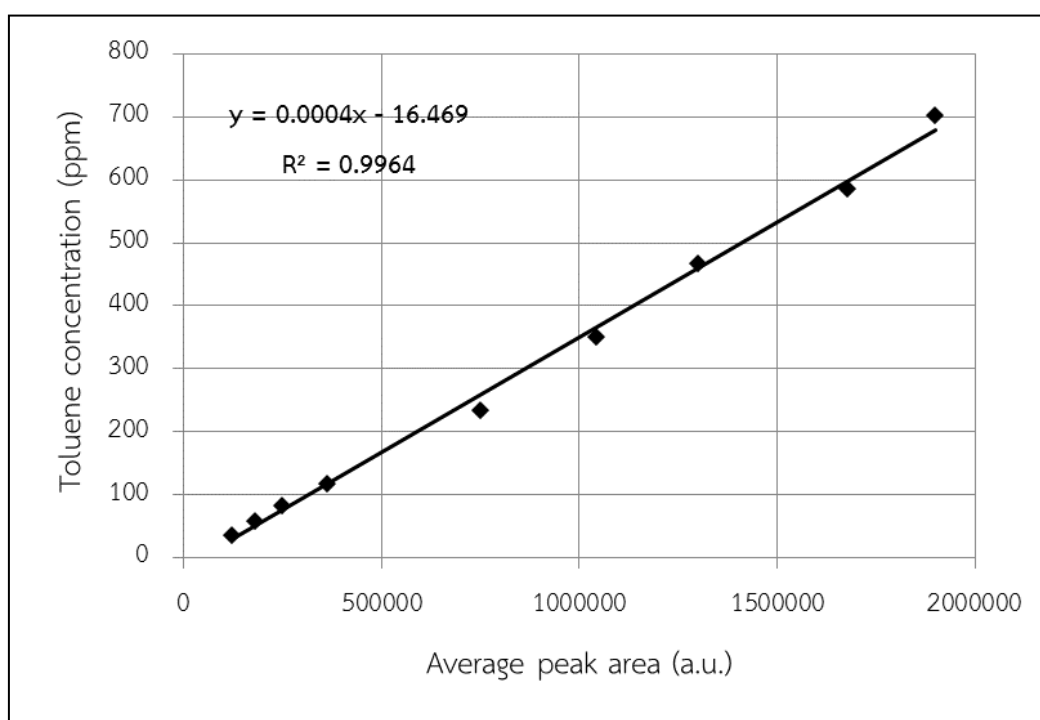
$$\text{ความเข้มข้นของโทลูอีน} ; C_t \text{ (mol/ml)} = \frac{\text{g of toluene}}{\text{M.W. of toluene} \times V}$$

ปริมาณโทลูอีนที่ฉีด ; $V_{t_{inj}}$

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

$$\text{เปอร์เซ็นต์โมลของโทลูอีนทั้งหมด} ; \%N_T = N_T \times 22400 \times 100$$

เมื่อนำค่าพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง Gas Chromatograph ที่มีตัวตรวจวัดเป็น FID มาพล็อตเป็นกราฟระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและปริมาณของโทลูอีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะได้กราฟมาตรฐานของโทลูอีน ดังแสดงในรูปที่ ค.1



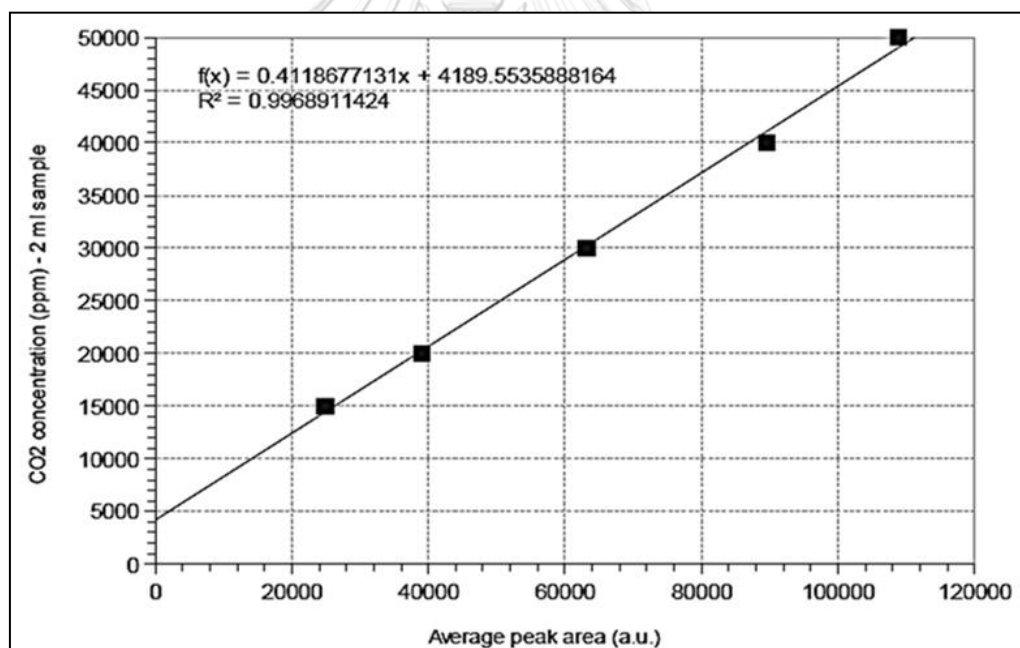
รูปที่ ค.1 กราฟ calibration curve ของโทลูอีนที่ความเข้มข้น 30-700 ppm

ค.2 กราฟมาตรฐานคาร์บอนไดออกไซด์

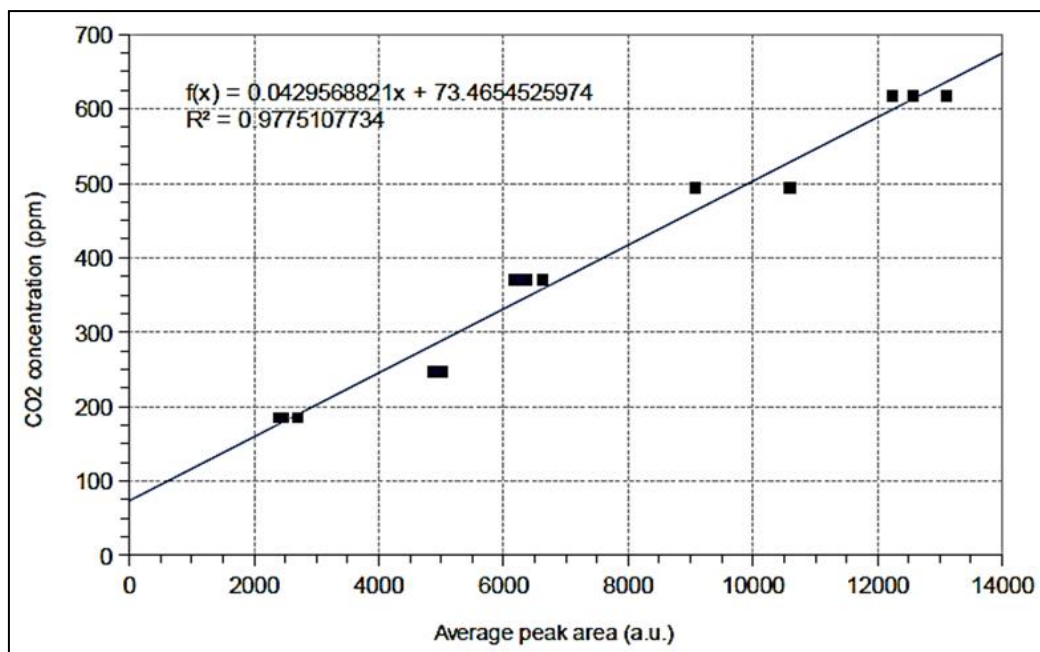
การสร้างกราฟมาตรฐานของคาร์บอนไดออกไซด์ ทำโดยการฉีดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ความเข้มข้น 100%) ที่ปริมาตรต่าง ๆ โดยใช้เข็มขนาด 100 μL ใช้เครื่อง Gas Chromatograph ที่มีตัวตรวจวัดชนิด TCD จากนั้นคำนวณว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ฉีดไปเมื่อเทียบกับกรณี ที่ฉีดด้วยเข็มขนาด 2 mL จะเทียบความเข้มข้นเป็นหน่วย ppm โดยค่าพื้นที่ใต้กราฟของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูง แสดงในตารางที่ ค.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูงและต่ำดังแสดงในรูป ที่ ค.2 และ ค.3 ตามลำดับ

ตารางที่ ค.2 พื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูง

CO ₂ concentration (ppm)	15000	20000	30000	40000	50000
Peak area (average)	26247	38387	62667	86947	111226



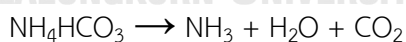
รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นสูง



รูปที่ ค.3 กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ (180-620 ppm)

จากรูปที่ ค.3 กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ ทำโดยการนำสารละลาย ammonium bicarbonate (NH_4HCO_3 มวลโมเลกุล 79.056 g/mol) ความเข้มข้น 0.1 mol/L ฉีดเข้าไปในคอลัมน์ Gas Chromatograph ที่มีตัวตรวจวัดชนิด TCD ปริมาตร 0.3-1.0 μL เมื่อได้รับความร้อน (สูงกว่า 50°C) สารตั้งต้นจะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ ค.2 และผลการแสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำดังแสดงในตารางที่ ค.3

CHULALONGKORN UNIVERSITY



(สมการ ค.2)

ตารางที่ ค.3 พื้นที่ใต้กราฟของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ

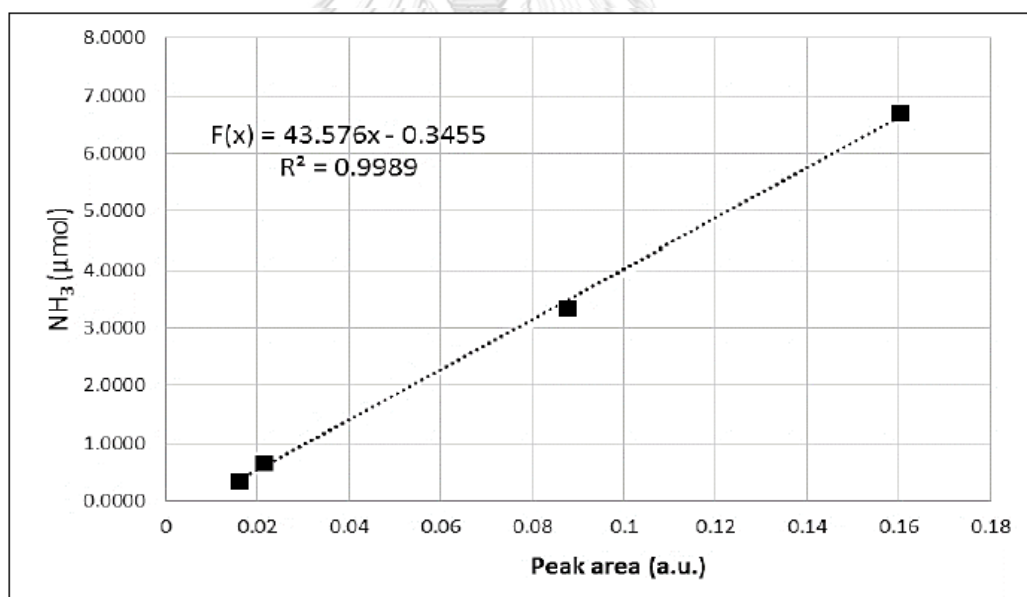
Peak area	CO ₂ concentration (ppm)				
	180	245	370	490	620
1	2302	4520	6243	9041	12234
2	2311	4496	6375	10563	12602
3	2524	4489	6532	10684	13129
average	2379	4502	6383	10096	12655

ค.3 กราฟมาตรฐานการคายซับของแอมโมเนีย (NH₃) จากเทคนิค NH₃-TPD

เทคนิค NH₃-TPD เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาปริมาณและความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตารางที่ ค.4 แสดงการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของ NH₃ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และการสร้างกราฟมาตรฐานจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของ NH₃ ดังแสดงในรูปที่ ค.4

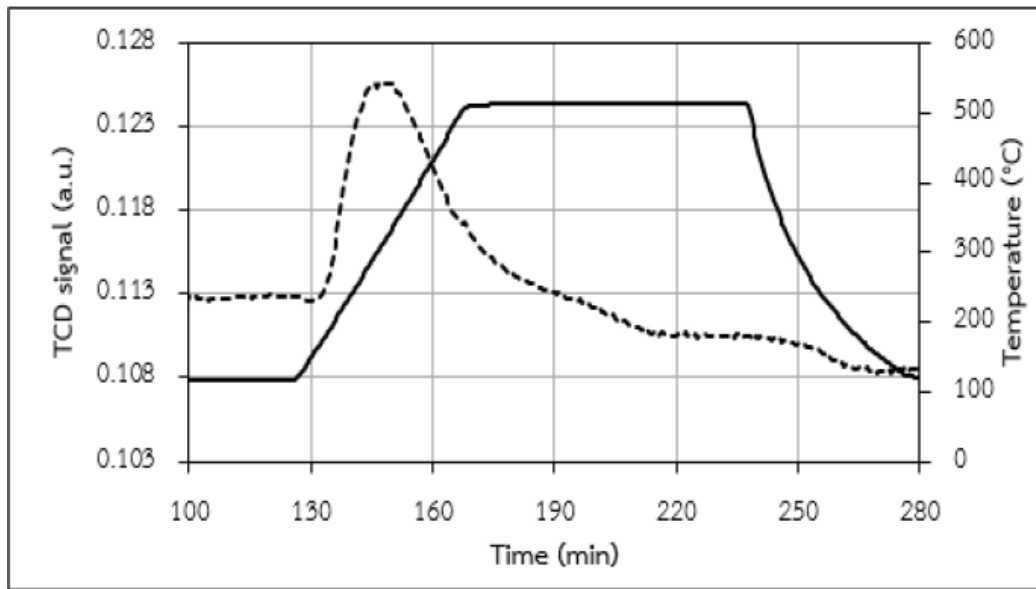
ตารางที่ ค.4 พื้นที่ใต้กราฟของ NH₃ และความเข้มข้นของ NH₃ ที่ปริมาตรต่าง ๆ

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

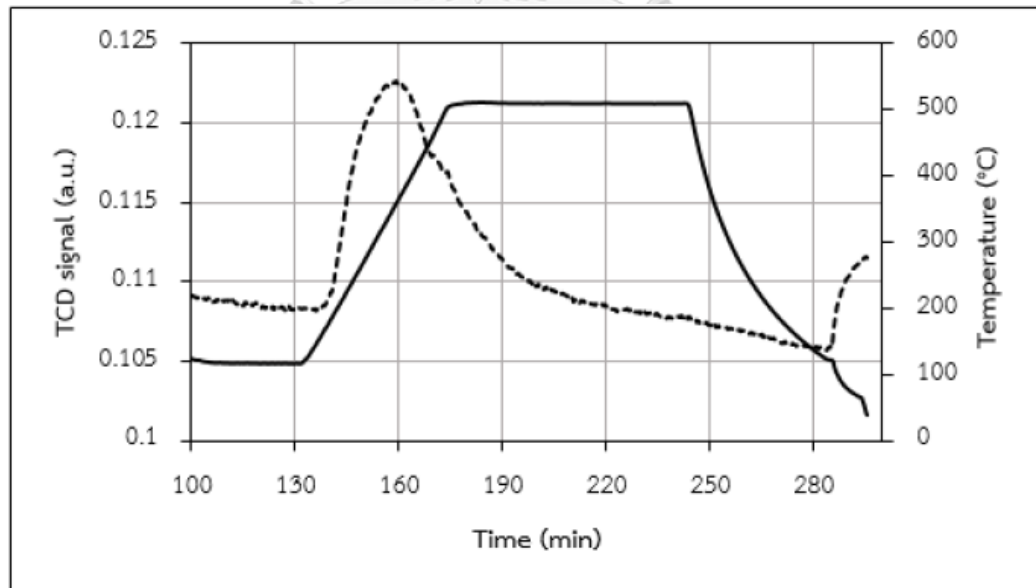


รูปที่ ค.4 กราฟมาตรฐานของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

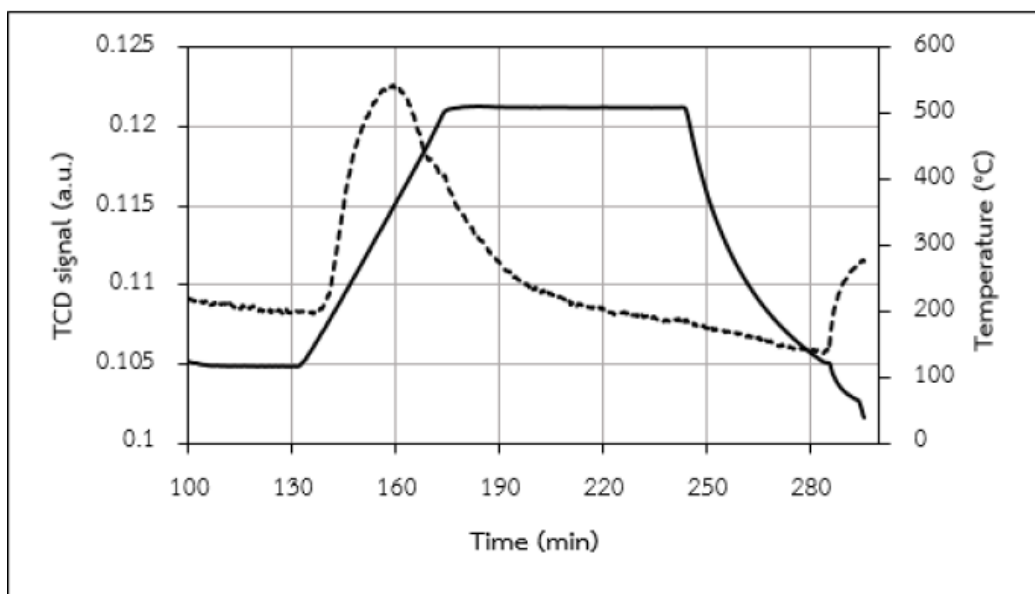
ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการคายซับของแอมโมเนีย
จากเทคนิค NH₃-TPD



รูปที่ ง.1 กราฟ NH₃-TPD pattern ของตัวรองรับ TiO₂



รูปที่ ง.2 กราฟ NH₃-TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา V₂O₅/TiO₂



รูปที่ ๓.๓ กราฟ NH_3 -TPD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MgO/TiO}_2$



ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ จ.1 %Toluene conversion ในระบบปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอีน

Temperature(°C)	%Toluene conversion					
	O ₂ 15 vol.%			O ₂ 5 vol.%		
SO ₂ (ppm)	30	90	150	30	90	150
120	0	0	0	0	0	0
150	3.81	1.17	3.91	2.75	5.86	3.00
200	4.94	8.75	9.54	5.37	7.19	12.26
250	49.24	54.77	62.49	24.46	22.95	33.36
300	88.66	93.25	95.53	92.33	84.94	91.68
350	99.38	100.00	100.00	99.30	98.83	98.97
400	100.00	100.00	100.00	99.34	99.42	99.13
450	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ตารางที่ จ.2 %CO₂ selectivity ในระบบปฏิกิริยาการออกซิเดชันโทลูอีน

Temperature(°C)	%CO ₂ selectivity					
	O ₂ 15 vol.%			O ₂ 5 vol.%		
SO ₂ (ppm)	30	90	150	30	90	150
120	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
250	0	60.08	75.00	0	0	0
300	54.99	49.95	63.85	60.73	50.10	53.18
350	51.61	52.54	61.00	58.38	50.87	55.61
400	51.75	58.11	63.53	60.03	56.13	57.02
450	55.24	64.58	63.45	61.29	60.01	66.73

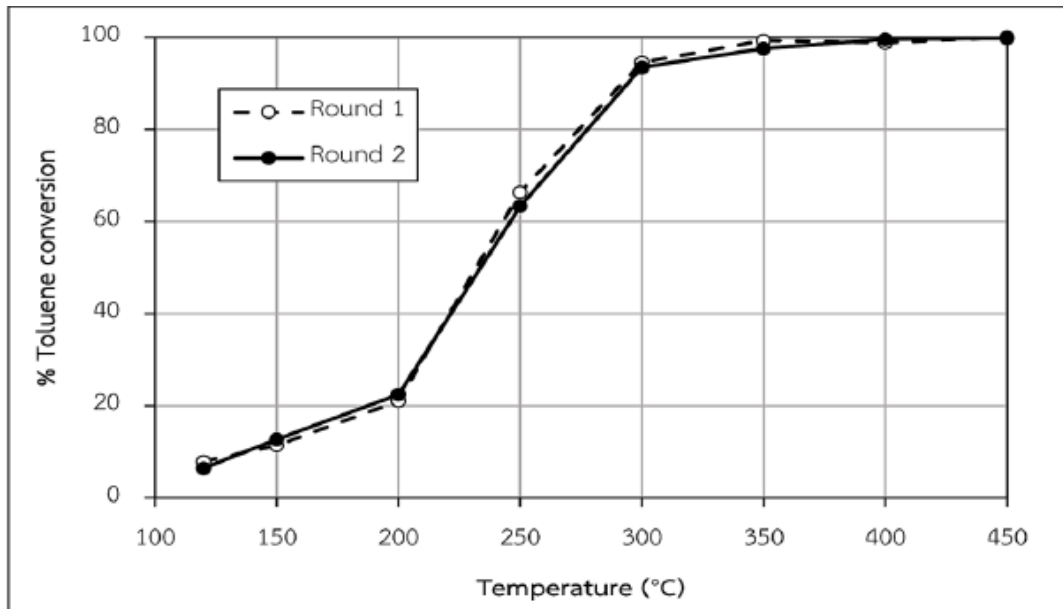
ตารางที่ จ.5 %CO₂ selectivity ในระบบปฏิกริยารวม

Temperature(°C)	%CO ₂ selectivity					
	O ₂ 15 vol.%			O ₂ 5 vol.%		
SO ₂ (ppm)	30	90	150	30	90	150
120	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0
250	54.00	47.31	70.84	0	0	0
300	52.19	52.10	67.39	63.22	55.80	53.85
350	58.54	57.70	65.17	60.62	57.87	57.43
400	65.80	60.33	69.97	62.17	62.31	57.91
450	69.19	68.11	83.87	64.25	63.99	65.93

ตารางที่ จ.6 %NO conversion ในระบบปฏิกริยารวม

Temperature(°C)	%NO conversion					
	O ₂ 15 vol.%			O ₂ 5 vol.%		
SO ₂ (ppm)	30	90	150	30	90	150
120	0	0	0	0	0	0
150	1.82	2.94	2.10	5.84	5.55	2.99
200	9.05	5.90	8.68	8.32	6.96	5.73
250	35.77	32.62	29.05	18.34	13.52	10.82
300	26.08	19.16	22.21	22.17	18.47	11.89
350	26.07	23.06	19.64	11.97	11.97	12.16
400	22.67	19.08	14.80	9.19	5.14	9.25
450	23.47	15.77	13.85	3.09	5.18	5.66

ภาคผนวก ฉ
ผลการทดสอบเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ ฉ.1 ความสามารถการทำให้เข้าในการกำจัดโทลูอีนของตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5(0.64)Mg$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐชยาภักตร์ สร้อยแสง
วัน เดือน ปี เกิด	18 เมษายน 2536
สถานที่เกิด	อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี
วุฒิการศึกษา	จบชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนนารีรุฒิ อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ในปี พ.ศ. 2554 ได้สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ในปีพ.ศ.2560 และปัจจุบันได้เข้าศึกษาในระดับชั้นปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	166/4 ม.12 ต.เขาขลุง อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี