

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ ในการกำจัดเบนซีน
ร่วมกับไนตริกออกไซด์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FEASIBILITY STUDY OF USING V_2O_5 -
 WO_3/TiO_2 CATALYST TO SIMULTANEOUSLY ELIMINATE BENZENE AND NITRIC OXIDE

Miss Wasita Chanbusarakum



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

วาสิตา จันทร์บุษราคัม : การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 - WO_3/TiO_2 ในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ (FEASIBILITY STUDY OF USING V_2O_5 - WO_3/TiO_2 CATALYST TO SIMULTANEOUSLY ELIMINATE BENZENE AND NITRIC OXIDE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ธราธร มงคลศรี, 74 หน้า.

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำวานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) และตัวรองรับเป็นไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเบนซีน โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) โดยคงสัดส่วนของวานาเดียมออกไซด์ไว้ที่ 3 %wt และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของทังสเตนออกไซด์ให้อยู่ในช่วง 5-7 %wt ทำการวัดปริมาณโลหะ พื้นที่ผิว และวิเคราะห์ความเป็นโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิค ICP single point BET และ XRD ตามลำดับ และวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรด ด้วยวิธีดูดซับไพรีดีนและ NH_3 -TPD และศึกษาการทำปฏิกิริยาเบนซีนออกซิเดชัน และการรีดิวซ์แบบเลือกเกิดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (SCR) แบบแยก และศึกษาการรวมกันของทั้งสองปฏิกิริยา ในช่วงอุณหภูมิ 120°C ถึง 450°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวสามารถกำจัดเบนซีนได้ดีขึ้น ในส่วนของ SCR พบว่า 3V5W และ 3V6W มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนตริกออกไซด์สูงขึ้น แต่เมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่งประสิทธิภาพจะลดลง ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W พบว่ามีความว่องไวในปฏิกิริยา SCR ต่ำ ในการศึกษาปฏิกิริยารวมพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดย 3V5W จะอยู่ในช่วง 300°C ถึง 350°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W จะอยู่ในช่วง 300°C ถึง 400°C

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5770301421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: V₂O₅ / WO₃ / TiO₂ / SCR / COMBINE SYSTEM / BENZENE OXIDATION / METAL OXIDE / CATALYST / NITRIC OXIDE REDUCTION

WASITA CHANBUSARAKUM: FEASIBILITY STUDY OF USING V₂O₅-WO₃/TiO₂ CATALYST TO SIMULTANEOUSLY ELIMINATE BENZENE AND NITRIC OXIDE. ADVISOR: ASSOC. PROF. THARATHON MONGKHONSI, Ph.D., 74 pp.

This research used V₂O₅, WO₃, and TiO₂ (as catalyst support) as benzene oxidation catalysts. The catalysts were prepared by wet impregnation method. The amount of V₂O₅ was fixed at a concentration around 3 %wt and the amount of WO₃ was varied between 5-7 %wt. Metal loading, BET surface area, and crystal structure were determined using ICP, Single point BET, and XRD, respectively. The total amount of acidic site was measured using pyridine adsorption technique while acid site strength was determined using NH₃-TPD technique. Catalytic performance for benzene oxidation and Selective Catalytic Reduction (SCR) was evaluated separately and simultaneously in the reaction temperature range 120-450°C. The experimental results show that percentage of benzene removal increases with reaction temperature. The SCR activities of 3V5W and 3V6W increase with reaction temperature until reaching a maximum before dropping. On the contrary, 3V7W is quite inactive for both benzene oxidation and SCR reaction. In addition, each catalyst has optimum working temperature i.e., 300-350°C for 3V5W and 300-400°C for 3V6W.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราธร มงคลศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ในการแก้ไขปัญหาขณะทำการทดลอง ตลอดจนช่วยแก้ไขและเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่ต้นจนสำเร็จสมบูรณ์ออกมาเป็นรูปเล่ม

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สีสุ้ง ปรีชานนท์ ประธานกรรมการ อ.ดร. ชลิดา คล้ายโสม และ อ.ดร. วัชรพงษ์ ขาวดี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในการทำเอกสารในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆ ในศูนย์เชี่ยวชาญทางเฉพาะทางด้านคาตาไลซิส ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย และทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดขอขอบคุณสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. วังน้อย ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3.1 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนด์บายบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂) ด้วยวิธีเคลือบฝูแบบเปียก (Wet impregnation).....	2
1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนด์บายบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝูแบบเปียก (Wet impregnation).....	2
1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนด์บายบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (P25) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝูแบบเปียก (Wet impregnation) ในการกำจัดเบนซีนและไนตริกออกไซด์ภายใต้สภาวะต่างๆ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR).....	6
2.2 กระบวนการกำจัดเบนซีน.....	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	13

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	13
3.1.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ (V ₂ O ₅) บนไทเทเนียมออกไซด์ (TiO ₂) ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก.....	13
3.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับ ไทเทเนียมออกไซด์ (V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂) ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก.....	14
3.2 วิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำปฏิกิริยา	14
3.2.1. ตรวจสอบปริมาณโลหะที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค ICP	14
ตรวจสอบปริมาณโลหะ	14
3.2.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	15
วิเคราะห์โครงสร้างผลึก	15
3.2.3 ตรวจสอบวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค single point BET	15
ตรวจสอบวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา	15
3.3 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
3.3.1 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเบนซีน	15
3.3.2 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ไทเทเนียมออกไซด์ TiO ₂ (P25) เป็นตัวรองรับ ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR).....	18
3.3.2.1 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน	18
3.3.2.2 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์แบบเลือกเกิดของไนตริกออกไซด์ด้วย แอมโมเนีย	19
3.3.3 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	23
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
4.1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	24

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD).....	24
4.1.3 การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน (N ₂ physisorption)	25
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอานาเดียมออกไซด์ทังสเตนออกไซด์ (V ₂ O ₅ -WO ₃) บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (P25) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก (wet impregnation).....	27
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบรวม	27
4.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน (Benzene oxidation).....	27
4.2.2 การทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH ₃ oxidation	29
4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนควบคู่กับการกำจัดไนตริกออกไซด์ในระหว่างปฏิกิริยา SCR	34
4.2.3.1 การทดสอบการกำจัดเบนซีนและประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเดี่ยวและระบบรวม.....	34
4.2.3.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบรวม	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	46
5.1.1 สรุปผลการทดลองในปฏิกิริยาเดี่ยว	46
5.1.2 สรุปผลการทดลองในปฏิกิริยารวม.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	47
รายการอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51

ภาคผนวก ข	การคำนวณสำหรับการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	54
ภาคผนวก ค	กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) และ %Conversion	66
ภาคผนวก ง	ตัวอย่างโครมาโทแกรม	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		74



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	องค์ประกอบแก๊สที่ใช้ในปฏิกิริยาเบนซีนออกซิเดชัน (Benzene oxidation).....	3
ตารางที่ 1.2	องค์ประกอบแก๊สในปฏิกิริยารีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ในกระบวนการรีดักชันแบบ เจาะจง (SCR).....	3
ตารางที่ 1.3	องค์ประกอบแก๊สปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (NH ₃ oxidation).....	4
ตารางที่ 1.4	องค์ประกอบแก๊สในปฏิกิริยารวมของเบนซีนออกซิเดชัน (Benzene oxidation) และ กระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR).....	4
ตารางที่ 2.1	สิทธิบัตรที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ ในปฏิกิริยา Hydrocarbon Oxidation	11
ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂	13
ตารางที่ 3.2	สัดส่วนความเข้มข้นของแก๊สขาเข้าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	18
ตารางที่ 3.3	สถานะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	21
ตารางที่ 4.1	เปอร์เซ็นต์ของโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา	24
ตารางที่ 4.2	พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ TiO ₂ (P25)	26
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดง %Benzene conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซีนของตัวเร่ง ปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์	28
ตารางที่ 4.4	ตารางแสดง %NO conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตน ออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์.....	30
ตารางที่ 4.5	ตารางแสดง %Benzene conversion และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีน เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W.....	36
ตารางที่ 4.6	ตารางแสดง %Benzene conversion และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีน เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W.....	37
ตารางที่ 4.7	ตารางแสดง %Benzene conversion และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีน เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W.....	38

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดง %Conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซีนรวมกับไนตริกออกไซด์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W.....	40
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดง %Conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซีนรวมกับไนตริกออกไซด์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W.....	42
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดง %Conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซีนรวมกับไนตริกออกไซด์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W.....	44
ตารางที่ 5.1 สรุปประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W 3V6W และ 3V7W ในแต่ละ ปฏิกิริยา.....	47
ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ TiO ₂	54
ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ 3V5W.....	55
ตารางที่ ข.3 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ 3V6W.....	56
ตารางที่ ข.4 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ 3V7W.....	57
ตารางที่ ข.5 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไฟรีดินของตัวรองรับ TiO ₂	58
ตารางที่ ข.6 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไฟรีดินของตัวรองรับ 3V5W.....	58
ตารางที่ ข.7 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไฟรีดินของตัวรองรับ 3V6W.....	59
ตารางที่ ข.8 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไฟรีดินของตัวรองรับ 3V7W.....	59
ตารางที่ ข.9 พื้นที่ได้กราฟ NH ₃ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	59
ตารางที่ ข.10 ปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ TiO ₂ (P25).....	61
ตารางที่ ค.1 แสดงผลการคำนวณของเบนซีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ppm).....	66

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	กราฟแสดงลักษณะของประสิทธิภาพในการกำจัด NO ในปฏิกิริยา SCR	7
รูปที่ 3.1	แผนผังการไหลของแก๊สสำหรับปฏิกิริยาการออกซิเดชันเบนซีน	17
รูปที่ 3.2	แผนผังการไหลของแก๊สสำหรับปฏิกิริยาการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย	20
รูปที่ 3.3	แผนผังการไหลของแก๊สสำหรับปฏิกิริยาการออกซิไซด์เบนซีนและการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย	22
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงโครงสร้างผลึกจากเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD).....	25
รูปที่ 4.2	ค่า %Benzene conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาอานาเดียวออกไซด์ทั้งสแตนด์ออลไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก	28
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ	31
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH ₃ oxidation ของตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (P25)	32
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH ₃ oxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W.....	32
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH ₃ oxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W.....	33
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH ₃ oxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W.....	33
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสามารถในการกำจัดเบนซีนและความสามารถในการเปลี่ยนเบนซีนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W	36
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสามารถในการกำจัดเบนซีนและความสามารถในการเปลี่ยนเบนซีนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W	37
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงความสามารถในการกำจัดเบนซีนและความสามารถในการเปลี่ยนเบนซีนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W.....	38

รูปที่ 4.11 กราฟ %Conversion การกำจัดเบนซีนรวมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W	40
รูปที่ 4.12 กราฟ %Conversion การกำจัดเบนซีนรวมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W	42
รูปที่ 4.13 กราฟ %Conversion การกำจัดเบนซีนรวมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W	44
รูปที่ ข.1 Calibration curve ของ NH ₃ ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0.1-0.7 μmol).....	60
รูปที่ ข.2 Calibration curve ของ NH ₃ ช่วงความเข้มข้นสูง (3-10 μmol)	60
รูปที่ ข.3 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวรองรับ (P25).....	62
รูปที่ ข.4 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W.....	63
รูปที่ ข.5 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W.....	64
รูปที่ ข.6 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W.....	65
รูปที่ ค.1 Calibration curve ของเบนซีนในช่วงความเข้มข้นสูง (100-800 ppm).....	67
รูปที่ ค.2 Calibration curve ของเบนซีนในช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-120 ppm)	68
รูปที่ ค.3 Calibration curve ของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ (180-620 ppm).....	69
รูปที่ ง.1 โครมาโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ในกระบวนการ SCR ที่อุณหภูมิต่างๆ....	71
รูปที่ ง.2 โครมาโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ในช่วงอุณหภูมิ 120-250°C (ทดสอบ repeatability ของการวัด)	72
รูปที่ ง.3 โครมาโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ในช่วงอุณหภูมิ 300-450°C (ทดสอบ repeatability ของการวัด)	72

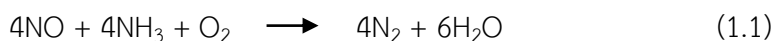
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันมีการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดมลพิษมากมาย ทั้งน้ำเสีย มลพิษทางเสียง รวมไปถึงมลพิษทางอากาศ หลายโรงงานมีการปล่อยแก๊สเสียออกสู่บรรยากาศ โดยในอากาศเสียเหล่านี้มีส่วนผสมของแก๊สไนตริกออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าบางโรงงานยังมีการปล่อยเบนซีน (C_6H_6) โดยพบว่าเบนซีนนั้นปนเปื้อนมากับแก๊สปล่อยทิ้งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงแยกแก๊สธรรมชาติแห่งหนึ่ง ซึ่งเบนซีนเป็นสารเคมีที่สามารถก่อมะเร็งได้ จึงจำเป็นต้องทำการกำจัดเบนซีนก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยกฎหมายของประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานของเบนซีนในบรรยากาศในเวลา 1 ปี จะต้องน้อยกว่า 1.7 mg/m^3 [1] แนวทางหนึ่งในการกำจัดเบนซีนคือการนำแก๊สปล่อยทิ้งที่มีเบนซีนปนเปื้อน ผสมรวมเข้ากับแก๊สปล่อยทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ที่ส่งไปยังกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) เนื่องจากแก๊สที่ออกมาจากหน่วยกำจัดแก๊สที่มีสภาพเป็นกรด มีอุณหภูมิและความดันต่ำ การนำแก๊สดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง จะทำให้แก๊สมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เบนซีนดีขึ้น และไม่ทำให้เกิดความดันต้านขึ้นในหน่วยกำจัดแก๊สที่มีสภาพเป็นกรด ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมของกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) มาทดสอบความสามารถในการกำจัดเบนซีน

ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดแก๊สไนตริกออกไซด์ (NO_x) ที่ปนเปื้อนมาในอากาศ โดยจะใช้หลักการการรีดักชันของไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนียให้ได้เป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) และ น้ำ (H_2O)



ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) นั้นจะมีการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 150C ถึง 450C โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมของวานาเดียมออกไซด์ทั้งสเตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิมกลางถึงสูง และเป็นที่ยอมรับกันดีในเรื่องคุณสมบัติของการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในเรื่องของการออกซิเดชัน (Oxidation catalyst) จึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยานี้มาใช้ในการออกซิไดซ์เบนซีนไปพร้อม ๆ กัน

โดยเป้าหมายหลักของการออกซิไดซ์เบนซีนนั้นต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพื่อทำการปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ หรือได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่มีความเป็นพิษน้อยลง สามารถดักจับได้ง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$) โดยกระบวนการกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$) ด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) โดยมีปริมาณวานาเดียมออกไซด์ประมาณ 3%wt และ ทั้งสแตนออกไซด์ประมาณ 5%wt , 6%wt และ 7%wt

1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) ด้วย

1.3.2.1 Inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES) เพื่อตรวจวัดปริมาณโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.2.2 X-ray diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.2.3 Brunauer Emmett and Teller (BET) เพื่อวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.2.4 NH_3 Temperature Programmed Desorption ($\text{NH}_3\text{-TPD}$) เพื่อวัดปริมาณตำแหน่งกรดบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$) บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (P25) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) ในการกำจัดเบนซีนและไนตริกออกไซด์ภายใต้สภาวะต่างๆดังนี้

1.3.3.1 ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบแก๊สที่ใช้ในปฏิกิริยาเบนซีนออกซิเดชัน (Benzene oxidation)

ชนิดแก๊ส	ความเข้มข้น
เบนซีน (C ₆ H ₆)	100 ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	30 ppm
ออกซิเจน (O ₂)	15%v
ไนโตรเจน (N ₂)	Balance 200 ml/min

1.3.3.2 ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไนตริกออกไซด์ในกระบวนการรีดักชัน

แบบเจาะจง (SCR)

ตารางที่ 1.2 องค์ประกอบแก๊สในปฏิกิริยารีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR)

ชนิดแก๊ส	ความเข้มข้น
ไนตริกออกไซด์ (NO)	120 ppm
แอมโมเนีย (NH ₃)	120 ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	30 ppm
ออกซิเจน (O ₂)	15%v
ไอน้ำ (H ₂ O)	15%v
ไนโตรเจน (N ₂)	Balance 200 ml/min (ไม่รวมไอน้ำ)

1.3.3.3 ทดสอบปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (NH₃ oxidation) ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR)

ตารางที่ 1.3 องค์ประกอบแก๊สปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (NH₃ oxidation)

ชนิดแก๊ส	ความเข้มข้น
แอมโมเนีย (NH ₃)	120 ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	30 ppm
ออกซิเจน (O ₂)	15%v
ไอน้ำ (H ₂ O)	15%v
ไนโตรเจน (N ₂)	Balance 200 ml/min (ไม่รวมไอน้ำ)

1.3.3.4 ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ในปฏิกิริยารวม

ตารางที่ 1.4 องค์ประกอบแก๊สในปฏิกิริยารวมของเบนซีนออกซิเดชัน (Benzene oxidation) และกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR)

ชนิดแก๊ส	ความเข้มข้น
เบนซีน (C ₆ H ₆)	100 ppm
ไนตริกออกไซด์ (NO)	120 ppm
แอมโมเนีย (NH ₃)	120 ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	30 ppm
ออกซิเจน (O ₂)	15%v
ไอน้ำ (H ₂ O)	15%v
ไนโตรเจน (N ₂)	Balance 200 ml/min (ไม่รวมไอน้ำ)

วิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็นบทซึ่งแต่ละบทมีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา รวมถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย ซึ่งประกอบด้วย การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา และการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

และภาคผนวกท้ายเล่มเป็นการรวบรวมวิธีการคำนวณต่างๆ รวมไปถึงข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) โดยใช้แอมโมเนียในการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนีย (NH_3 oxidation) และปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน (Benzene oxidation)

2.1 กระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR)

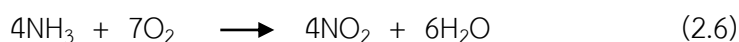
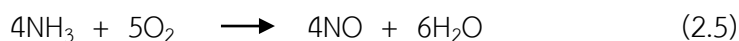
แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO , NO_2 และ N_2O) เป็นแก๊สที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็นตัวกลางนำไปสู่การเกิดฝนกรด, หมอกควัน, การทำลายชั้นโอโซนและผลกระทบต่อบ้านเรือนซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงดังปฏิกิริยา



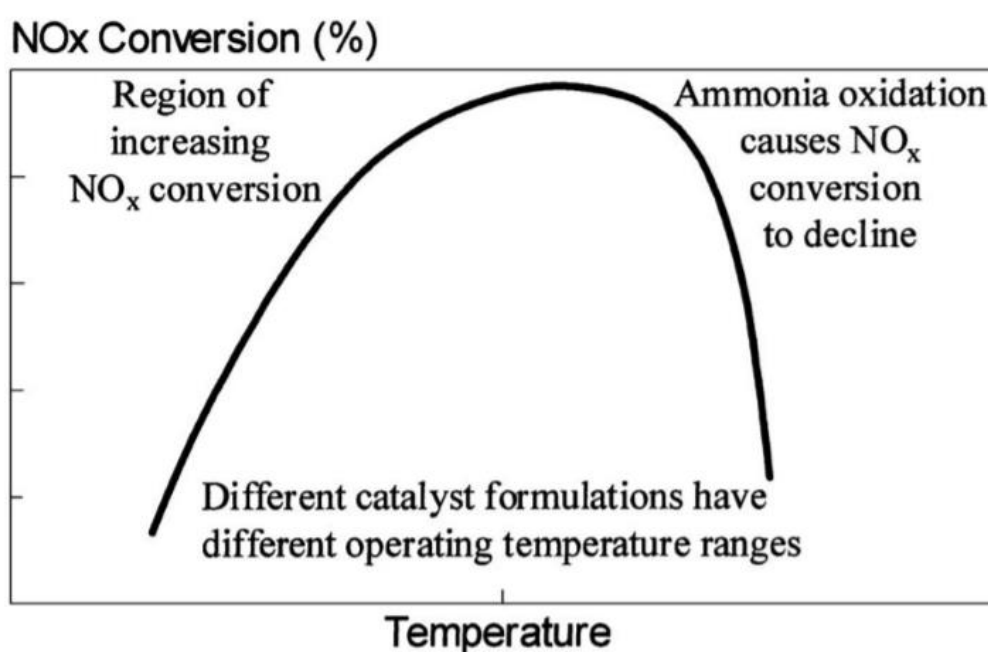
ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีกระบวนการกำจัดแก๊สไนตริกออกไซด์ก่อนที่จะปล่อยแก๊สปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศ โดยกระบวนการกำจัดแก๊สไนตริกออกไซด์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดแก๊สไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย (NH_3) ดังสมการต่อไปนี้



อย่างไรก็ตาม กระบวนการกำจัดแก๊สไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนียเป็นการทำปฏิกิริยาที่ช่วงอุณหภูมิ 120°C ถึง 450°C ซึ่งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น คือปฏิกิริยาการออกซิเดชันของแอมโมเนีย โดยแอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นไนตริกออกไซด์แทนที่จะทำปฏิกิริยากับไนตริกออกไซด์โดยตรง ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของแอมโมเนียที่ใช้ในการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนตริกออกไซด์ลดลงด้วย อีกทั้งยังก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ดังสมการต่อไปนี้



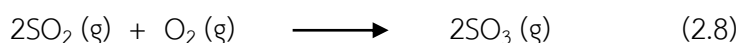
กล่าวคือประสิทธิภาพในการกำจัดไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่จะค่อย ๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเกินจุดสมดุล (Optimum) โดยจะแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงลักษณะของประสิทธิภาพในการกำจัด NO ในปฏิกิริยา SCR [2]

ในกระบวนการกำจัดไนตริกออกไซด์มีการใช้วานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ที่ใช้นั้นจะอยู่ในเฟสอะนาเทส (Anatase TiO_2) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทนซัลเฟอร์ได้ โดยมีส่วนประกอบของวานาเดียมออกไซด์อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3%wt [3] จากงานวิจัยพบว่า การเพิ่มปริมาณวานาเดียมออกไซด์จาก 1%wt เป็น 2%wt นั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนตริกออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย [4]

แต่อย่างไรก็ตามวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (V_2O_5/TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โดยจะเข้าไปออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ [5] และเข้าสู่กระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริกต่อไป ดังสมการด้านล่าง



นอกจากนี้ยังพบอีกว่าไทเทเนียมออกไซด์เป็นตัวรองรับที่มีความเสถียรสูง อีกทั้งยังเป็นตัวต้านทานซัลเฟตสูงในกรณีที่มีระบบมีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผสมอยู่ [5]

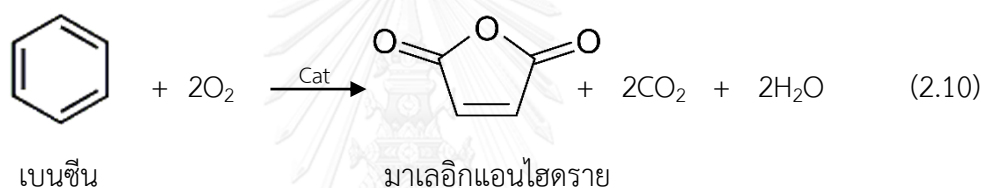
ทั้งนี้พบว่าการเติมโลหะบางชนิดลงไปเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (V_2O_5/TiO_2) เช่น โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) หรือ ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) จากงานวิจัยพบว่าทั้งทังสเตนออกไซด์และโมลิบดีนัมออกไซด์เป็นตัวยับยั้ง (inhibitor) ไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ [6] และยังมีส่วนช่วยในการลดลงของการเปลี่ยนเฟสไปเป็นรูไทล์ของไทเทเนียมออกไซด์ ทั้งนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยวานาเดียมออกไซด์โมลิบดีนัมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียม ($V_2O_5-MoO_3/TiO_2$) จะมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิต่ำถึงกลางและตัวเร่งปฏิกิริยวานาเดียมออกไซด์ทังสเตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($V_2O_5-WO_3/TiO_2$) จะมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาได้ดีที่ช่วงอุณหภูมิกลางถึงสูง [7, 8] อีกทั้งการเติม WO_3 ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5/TiO_2 นั้น ช่วยให้ความว่องไวและการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากไปช่วยเพิ่มความแรงของกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาให้สูงขึ้น [9]

ในเรื่องของกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) ได้มีการรวบรวมบางส่วนไว้ในงานวิจัยของคุณชลิตา แก้วบุตรดี ในเรื่อง การเลือกரிติวชไนโตรเจนออกไซด์ด้วยแอมโมเนียบนตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ ในปี พ.ศ. 2552 [10] ทั้งนี้ในงานวิจัยเล่มนี้จะไม่ขอกล่าวซ้ำในเรื่องดังกล่าว

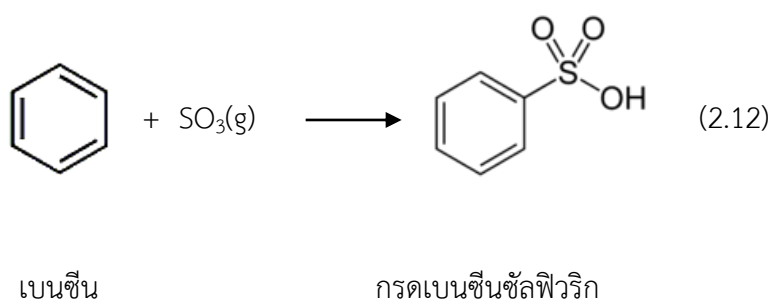
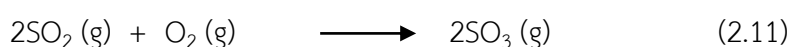
2.2 กระบวนการกำจัดเบนซีน

เบนซีนเป็นสารเคมีตัวหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามเบนซีนยังคงเป็นสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อร่างกายเมื่อได้รับทั้งทางการสัมผัสหรือการสูดดม เนื่องจากเบนซีนเป็นสารเคมีที่สามารถระเหยได้ง่าย (VOCs) และเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนก่อนที่จะปล่อยแก๊สเสียออกสู่บรรยากาศ [11] โดยวิธีหนึ่งในการกำจัดเบนซีนคือการออกซิไดซ์เบนซีนให้ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือสารตัวอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าหรือสามารถดักจับได้ง่ายกว่าเบนซีน

โดยที่ผ่านมามีการออกซิไดซ์เบนซีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (V_2O_5/TiO_2) ในการออกซิไดซ์เบนซีน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือมาเลอิกแอนไฮไดรย ($C_4H_2O_3$) เป็นของแข็งสีขาวและมีจุดเดือดต่ำ ซึ่งมีปฏิกิริยาดังสมการด้านล่าง [12]



นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบผลกระทบจากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่มีต่อการออกซิไดซ์เบนซีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (V_2O_5/TiO_2) พบว่าแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ให้เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ จากนั้นจึงเข้าทำปฏิกิริยากับเบนซีน ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดเบนซีนซัลฟูริก [13] ดังสมการด้านล่าง



ในปี ค.ศ. 1999 [14] มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) โดยมีตัวเสริมคือทังสเตนออกไซด์ (WO_3) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) มาใช้ในการกำจัดสารระเหย (VOCs) เนื่องจากสารระเหยเหล่านี้เป็นพิษต่อกระบวนการ SCR โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง $227^{\circ}C$ ถึง $427^{\circ}C$ โดยมีการใส่ปริมาณแก๊สออกซิเจนมากเกินไป พบว่าปฏิกิริยา oxidation ขึ้นกับปริมาณของวานาเดียมออกไซด์ โดยได้ผลิตภัณฑ์บางส่วนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ในปี ค.ศ. 2006 [7] มีการศึกษาปฏิกิริยา Benzene oxidation โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SCR $DeNO_x$ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง $300-350^{\circ}C$ โดยในแก๊สผสมมีเบนซีนผสมอยู่ 5-10 ppm มี HCl หรือ HBr 260 ppm และ SO_2 350 ppm ได้มีการตรวจพบว่า SO_2 มีการหายไปประมาณ 5-10% ซึ่งคาดว่าจะเกิดเป็น SO_3 นอกจากนี้ยังพบว่า SO_2 ช่วยเพิ่มค่า %Benzene conversion และได้ผลิตภัณฑ์เป็น CO และ CO_2

ในปี ค.ศ. 2010 [15] มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) โดยมีตัวเสริมคือโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) หรือทังสเตนออกไซด์ (WO_3) มาใช้ในการกำจัดเบนซีน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ $300^{\circ}C$ ภายใต้สภาวะที่ปราศจากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของเบนซีนที่สูงที่สุดอยู่ที่ 93% คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วย V_2O_5 10%wt และมี MoO_3 หรือ WO_3 10%wt ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นหลัก และมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ผสมอยู่เพียงเล็กน้อย

ในปี ค.ศ. 2013 [16] มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ในการทำปฏิกิริยา Benzene oxidation ให้ได้เป็นมาเลอิกแอนไฮดรายและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง $200-320^{\circ}C$ โดยมีการเติม Thiophene (C_4H_4S) ในระบบ พบว่าการเติม C_4H_4S ไปยังยั้งทั้งการเกิดเป็นมาเลอิกแอนไฮดรายและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากการใช้นานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วนั้น ยังมีการนำโลหะมีตระกูลเช่น ซีเรียม (Ce) ทองคำ (Au) แพลเลเดียม (Pd) มาใช้ในการออกซิไดซ์เบนซีน ซึ่งจะใช้นามาเคลือบฝังบนตัวรองรับเหล็ก (Fe) อีกด้วย [17]

ตารางที่ 2.1 สิทธิบัตรที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ ในปฏิกิริยา Hydrocarbon Oxidation

ปี ค.ศ.	ชื่อสิทธิบัตร	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์
1969	Oxidation catalyst containing vanadium and titanium [18]	V_2O_5/TiO_2 1-15%wt	Mo, W, Cr, Fe	Aromatic hydrocarbons/ unsaturated aliphatic hydrocarbon	Carboxylic acids
1971	Oxidation catalyst containing vanadium pentoxide and titanium dioxide [19]	V_2O_5/TiO_2 1-15%wt	Mo, W, Cr, Fe	Aromatic hydrocarbons unsaturated aliphatic hydrocarbon	Carboxylic acids

ปี ค.ศ.	ชื่อสิทธิบัตร	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์
2000	Preparation of organic acids such as acrylic acid by catalytic oxidation using a group V mixed metal oxide catalyst containing Cu, Mo, W, V, Nb และ Ta [20]	โลหะออกไซด์ Cu, Mo, W, V, Nb และ Ta	Ce, Fe, Ni, Co, Li, Na, K, Mg, Ca	-	acrylic acid
2002	Process for the catalytic removal of polycyclic aromatic nitro, nitroso and/or amino compounds [21]	V_2O_5/TiO_2 0.05-5%wt	WO_3 และ/ หรือ MoO_3 อีก 2-10 %wt	polycyclic aromatic nitro, nitroso และ/หรือ amino compounds	-

ในงานวิจัยเล่มนี้จะเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง มาใช้ในการออกซิเดชันเบนซีน ซึ่งคือวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (V_2O_5/TiO_2) ให้ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือสารอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือสามารถดักจับได้ง่าย โดยจะเป็นการรวมปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจงกับการออกซิเดชัน เบนซีน เข้าด้วยกัน คือแก๊สที่ผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จะประกอบไปด้วยเบนซีน ไนตริกออกไซด์ ไอน้ำ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกซิเจน แอมโมเนีย และไนโตรเจนเข้าร่วมในกระบวนการออกซิไดซ์เบนซีน เพื่อเป็นการทดสอบการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ในการออกซิไดซ์เบนซีนและออกซิไดซ์ไนตริกออกไซด์พร้อมๆกัน (Bifunctional catalyst)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ 3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 3.2 วิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำปฏิกิริยา และ 3.3 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝ้งแบบเปียก (Wet impregnation) โดยจะใช้แอมโมเนียมเมตตะวานาเดต (NH_4VO_3) และแอมโมเนียมพาราทังสเตน ($(\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2(\text{W}_2\text{O}_7)_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารตั้งต้น และใช้ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวรองรับ ซึ่งมีวิธีดังนี้

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$

สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
แอมโมเนียมเมตตะวานาเดต (NH_4VO_3) 99.99%	Aldrich
แอมโมเนียมพาราทังสเตน ($(\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2(\text{W}_2\text{O}_7)_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) 99%	Aldrich
กรดออกซาลิก	Fluka
ไทเทเนียมออกไซด์ (P25)	Aeroxide

3.1.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแวนาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) บนไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ด้วยวิธีการเคลือบฝ้งแบบเปียก

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ ด้วยวิธีการเคลือบฝ้งแบบเปียก ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ทำการละลายแอมโมเนียมเมตตะวานาเดตด้วยน้ำกลั่นและกรดออกซาลิก ปั่นจนจนกระทั่งได้สารละลายที่ใส
2. ใส่ตัวรองรับซึ่งคือ ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ลงในสารละลาย
3. ทำการปั่นจนและให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำบางส่วนออก จนกระทั่งสารละลายที่ได้มีลักษณะข้นขึ้น
4. ทำการไล่น้ำ โดยการนำสารละลายที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

5. ทำการเผา (Calcine) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนในอากาศ ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
6. จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์บนไทเทเนียมออกไซด์

3.1.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($V_2O_5-WO_3/TiO_2$) ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก จะใช้ปริมาณ WO_3 อยู่ที่ 5, 6 และ 7%wt ซึ่งจะใช้แทนชื่อตัวเร่งปฏิกิริยาว่า 3V5W 3V6W และ 3V7W ตามลำดับ ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ทำการละลายแอมโมเนียมพาราทังสแตนด้วยน้ำกลั่นและกรดออกซาลิก ปั่นกวนจนกระทั่งได้สารละลายที่ใส
2. ใส่ตัวรองรับที่มีวานาเดียมออกไซด์อยู่บนพื้นผิวไทเทเนียมออกไซด์ ลงในสารละลาย
3. ทำการปั่นกวนและให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำบางส่วนออก จนกระทั่งสารละลายที่ได้มีลักษณะข้นขึ้น
4. ทำการไล่น้ำ โดยการนำสารละลายที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. ทำการเผา (Calcine) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนในอากาศ ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
6. จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนไทเทเนียมออกไซด์

3.2 วิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำปฏิกิริยา

3.2.1. ตรวจสอบปริมาณโลหะที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค ICP

ตรวจสอบปริมาณโลหะที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค ICP ด้วยเครื่อง Perkin Elmer model PLASMA-1000 โดยทำการละลายตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.01 g ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 99.9%wt ปริมาตร 20 ml และแอมโมเนียมซัลเฟต 15 g หลังจากนั้นทำการปรับปริมาตรให้ได้ 100 ml ด้วยน้ำกลั่น ซึ่งในการเตรียมตัวอย่างเพื่อตรวจสอบปริมาณโลหะด้วยเทคนิค ICP นั้นจะต้องทำการเตรียมตัวอย่างให้ความเข้มข้นโลหะอยู่ในช่วง 1 ถึง 15 ppm

3.2.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ด้วยเครื่อง SIEMENS D-5000 ที่ทำการเชื่อมต่อกับโปรแกรม Diffract ZT รุ่น 3.3 โดยในการวิเคราะห์จะใช้ Cu K α radiation ซึ่งความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.54 Å ซึ่งตรวจวัดค่า 2θ ตั้งแต่ 20 ถึง 80° โดยเพิ่มลำดับ 0.04°C/min

3.2.3 ตรวจวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค single point BET

ตรวจวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค single point BET ด้วยเครื่อง Micrometrics Chemisorb 2750 ซึ่งคือการตรวจวัดพื้นที่ผิวจากปริมาณการดูดซับ (Adsorption) แก๊สไนโตรเจน (N₂) ในขั้นตอนนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g โดยจะทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำและแก๊สอื่นภายในตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำการดูดซับ แก๊สไนโตรเจน ทำการปล่อยแก๊สผสมไนโตรเจน (N₂) 30% ในฮีเลียม (He) ซึ่งเป็นแก๊สที่ใช้ดูดซับ โดยจะหล่อความเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว จนกระทั่งเส้นฐาน (Baseline) คงที่ หลังจากนั้นจะนำ สารให้ ความเย็นออก เพื่อให้เกิดการคายสารดูดซับ (Desorption) และทำการบันทึกพื้นที่ใต้กราฟ ที่ได้ และนำพื้นที่ใต้กราฟไปคำนวณหาปริมาณพื้นที่ผิวตามสมการที่ 3.1

$$\text{พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g} = \frac{\text{พื้นที่ผิวที่วัดได้}}{\text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้}} \quad (3.1)$$

3.3 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.1 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเบนซีน

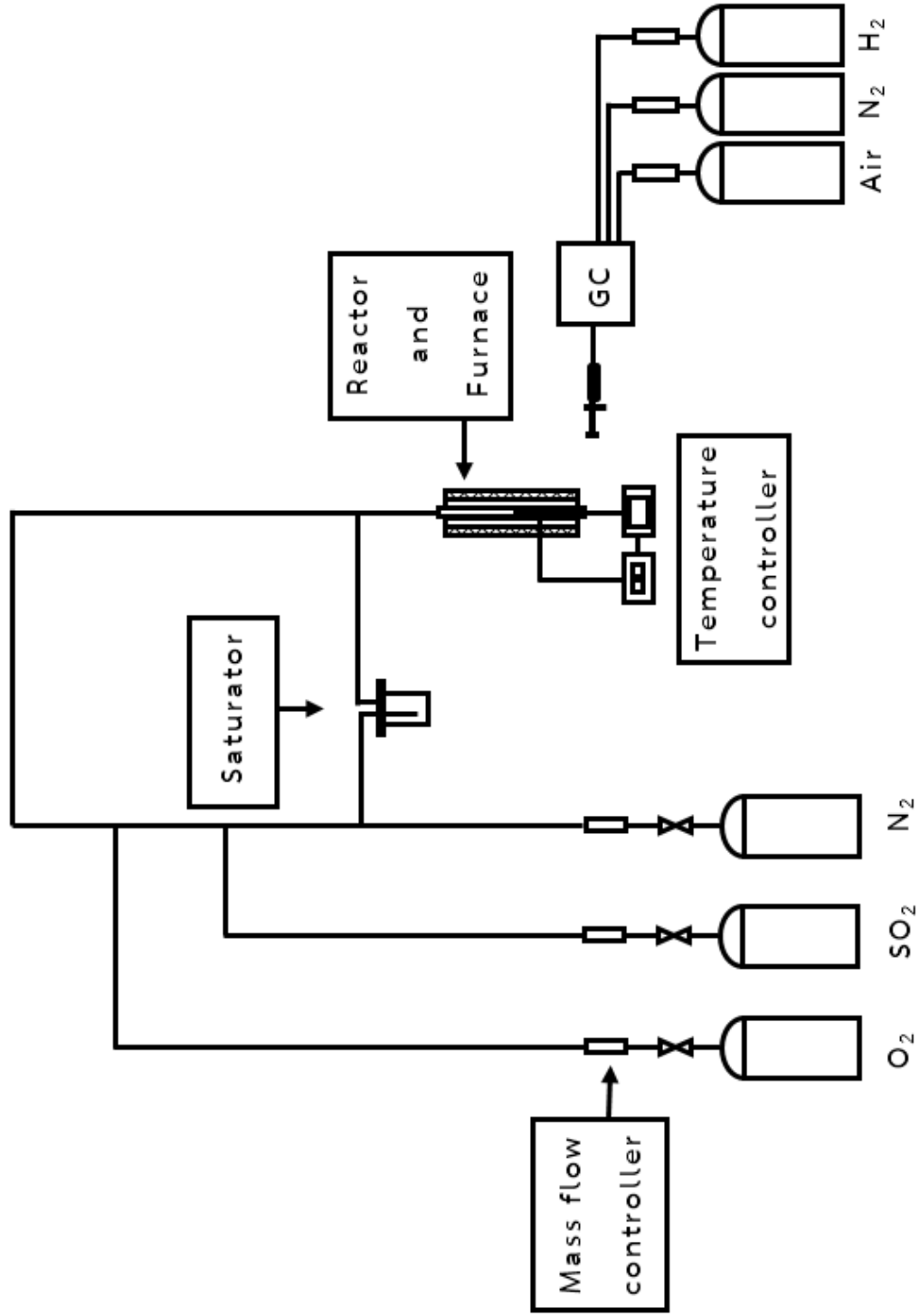
ทำการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g ลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/8 นิ้ว และใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นพาหะพาเบนซีน (C₆H₆) ความเข้มข้นประมาณ 100 ppm ออกซิเจน (O₂) ความเข้มข้น 15%v ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ความเข้มข้น 15 ppm และทำการเติมแก๊สไนโตรเจนโดยให้มีอัตราการไหลของแก๊สรวม 200 mL/min เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ทำการเก็บตัวอย่างทางด้านขาเข้าและขาออก และนำไปตรวจวัด ด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟ Shimadzu GC-8A ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด FID (Flame ionisation detector) และตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Shimadzu GC-8A ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด TCD (Thermal conductivity detector) ตามรูปที่ 3.1 และใช้พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแทนความเข้มข้นเบนซีน

และนำมาคำนวณ %Benzene conversion ตามสมการที่ 3.2 และคำนวณ %Benzene conversion to CO₂ ตามสมการที่ 3.3 โดยการทดสอบความสามารถในการออกซิไดซ์เบนซีนกระทำในช่วงอุณหภูมิ 120°C ถึง 45 °C

$$\% \text{ Benzene conversion} = \frac{[\text{Benzene}]_{\text{in}} - [\text{Benzene}]_{\text{out}}}{[\text{Benzene}]_{\text{in}}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\% \text{ Benzene conversion to CO}_2 = \frac{[\text{CO}_2] \text{ in benzene combustion}}{[\text{Benzene}]_{\text{in}} \times 6} \times 100 \quad (3.3)$$





รูปที่ 3.1 แผนผังการไหลของแก๊สสำหรับปฏิกิริยาการออกซิเดชันเบนซีน

3.3.2 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ไทเทเนียมออกไซด์ TiO₂ (P25) เป็นตัวรองรับ ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR)

ในกระบวนการรีดักชันแบบเจาะจง (SCR) จะแบ่งเป็น 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดิวซ์แบบเลือกเกิดของไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย โดยในการทดสอบจะใช้ความเข้มข้นของแก๊สขาเข้าดังตารางที่ 3.2 และแผนภาพดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนความเข้มข้นของแก๊สขาเข้าที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ชนิดแก๊ส	ความเข้มข้น
NH ₃	120 ppm
NO	120 ppm
SO ₂	30 ppm
O ₂	15%v
H ₂ O	15%v
N ₂	อัตราการไหลรวม 200 ml/min (ไม่รวมน้ำ)

3.3.2.1 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน

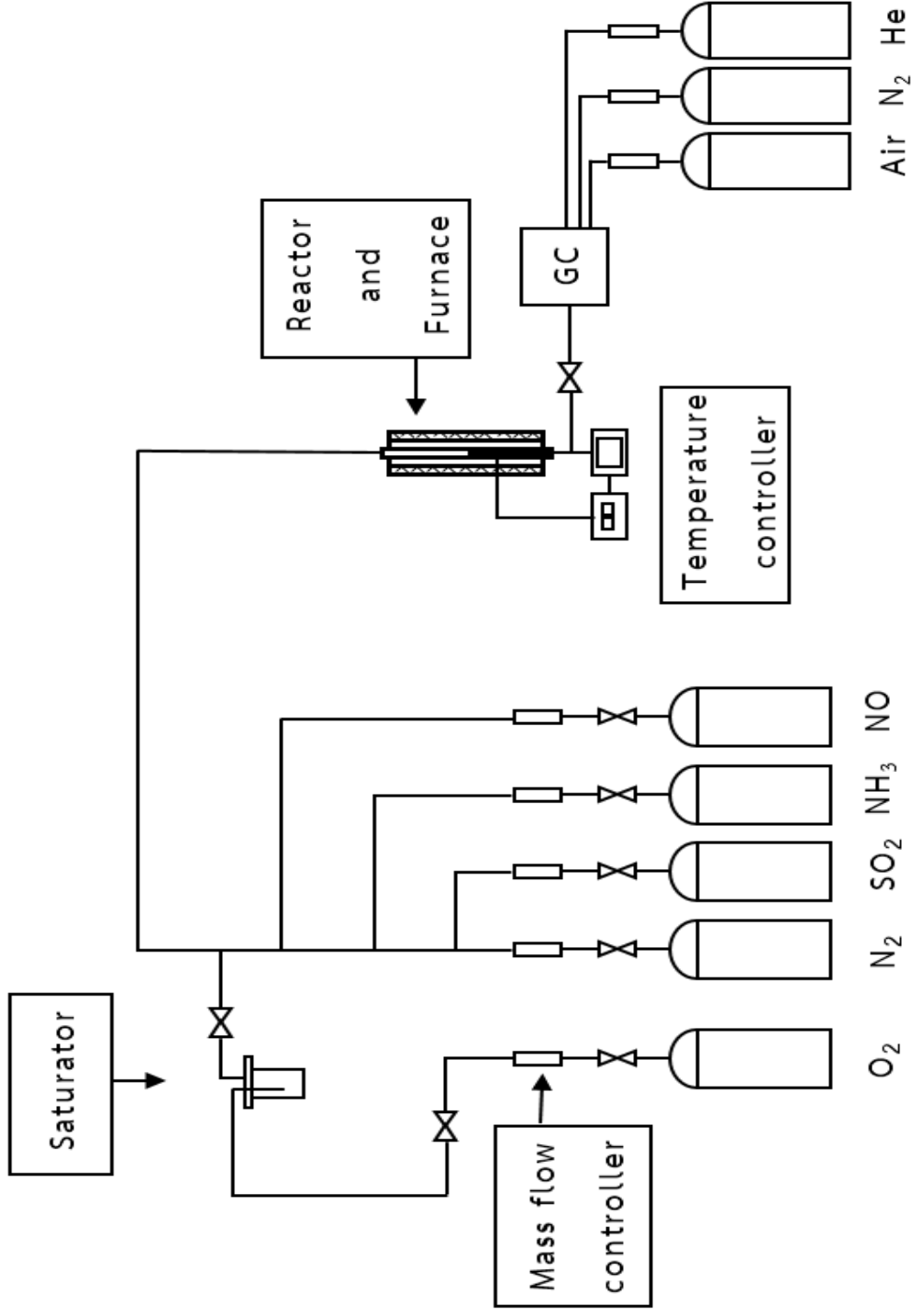
การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันเป็นการศึกษาการเกิดของแก๊สไนตริกออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา V₂O₅-WO₃/TiO₂ ที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 3.1 โดยทำการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/8 นิ้ว จากนั้นจะให้แก๊สที่ประกอบด้วยแก๊สแอมโมเนีย (NH₃) แก๊สออกซิเจน (O₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไอน้ำ (H₂O) และแก๊สไนโตรเจน (N₂) ไหลผ่าน เครื่องปฏิกรณ์ ทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 120°C ถึง 450°C โดยให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยระบบไฟฟ้า ทำการวัดความเข้มข้นของแก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Shimadzu GC-2014 โดยใช้ตัวตรวจวัดเป็นชนิด ECD (Electron Capture Detector) ดังรูปที่ 3.2 และคำนวณปริมาณไนตริกออกไซด์ที่ตรวจพบตามสมการที่ 3.4

$$\% \text{ NO conversion} = \frac{[\text{NO}]_{\text{in}} - [\text{NO}]_{\text{out}}}{[\text{NO}]_{\text{in}}} \times 100 \quad (3.4)$$

3.3.2.2 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์แบบเลือกเกิดของไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย

เป็นการทดสอบหาความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่หายไปจากการทำปฏิกิริยาด้วยแอมโมเนีย โดยทำการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.1 g ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed bed) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/8 นิ้ว จากนั้นจะให้แก๊สที่ประกอบด้วยแก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) แก๊สแอมโมเนีย (NH₃) แก๊สออกซิเจน (O₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไอน้ำ (H₂O) และแก๊สไนโตรเจน (N₂) ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ ทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 120°C ถึง 450°C โดยให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยระบบไฟฟ้า ทำการวัด ความเข้มข้นของแก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Shimadzu GC-2014 โดยใช้ตัวตรวจวัดเป็นชนิด ECD (Electron Capture Detector) ดังรูปที่ 3.2





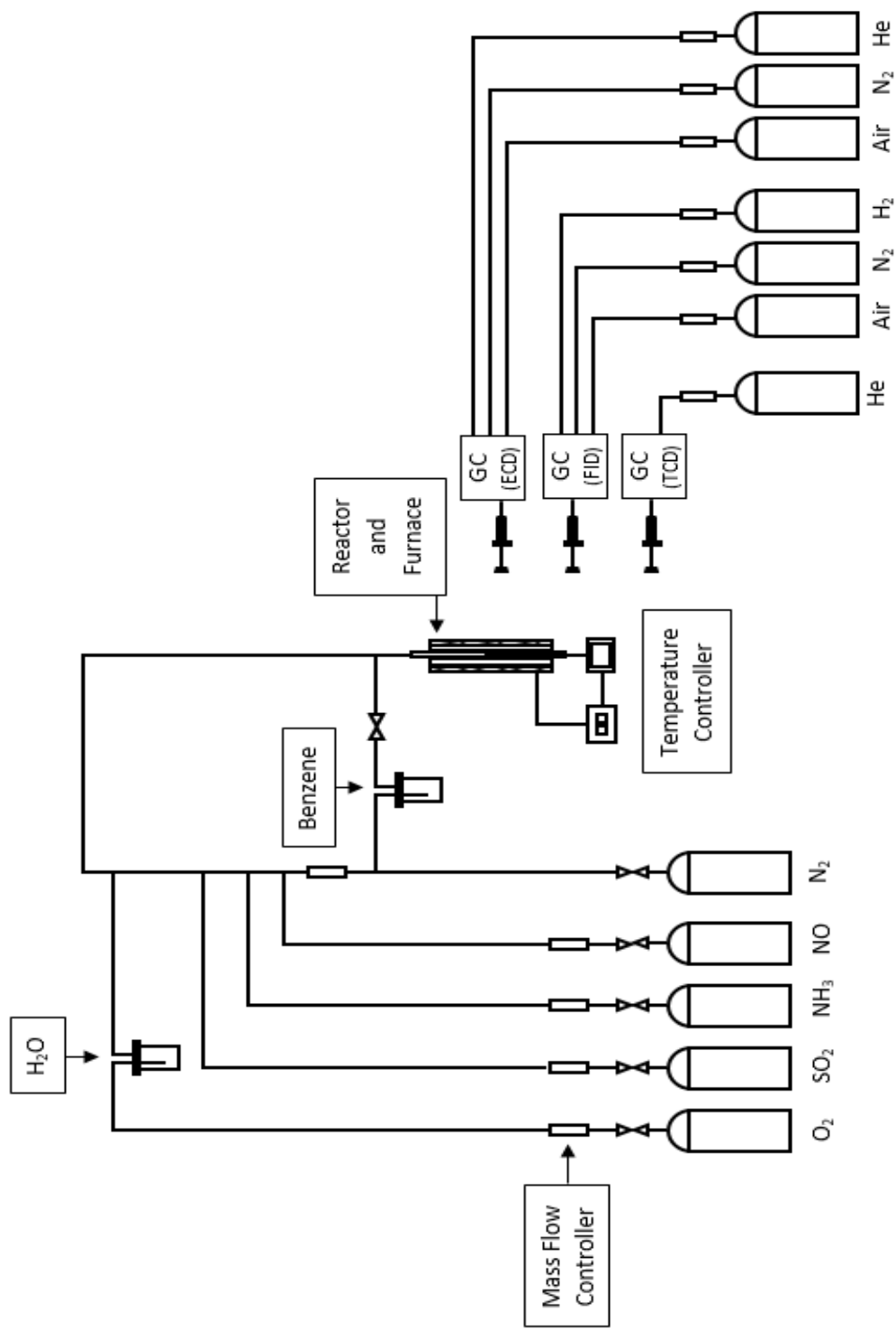
รูปที่ 3.2 แผนผังการไหลของแก๊สสำหรับปฏิกิริยาการรีดิวซ์ไนโตรริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย

3.3.3 การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์

เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ภายใต้สภาวะที่มีทั้งน้ำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ โดยทำการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ ที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.1 ปริมาณ 0.1 g ลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว จากนั้นจะให้แก๊สที่ประกอบด้วยเบนซีน 100 ppm แก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) แก๊สออกซิเจน (O_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไอน้ำ (H_2O) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ ทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $120^\circ C$ ถึง $450^\circ C$ โดยให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยระบบไฟฟ้า ทำการวัดความเข้มข้นของเบนซีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยเก็บตัวอย่างทางด้านขาเข้าและขาออก แล้วนำไปตรวจวัดปริมาณเบนซีนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Shimadzu GC-8A ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด FID และตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Shimadzu GC-8A ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด TCD (Thermal Conductivity Detector) รวมไปถึงการตรวจวัดปริมาณไนตริกออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Shimadzu GC-2014 โดยใช้ตัวตรวจวัดเป็นชนิด ECD (Electron Capture Detector) ตามรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

	แก๊สที่ตรวจวัด		
	C_6H_6	CO_2	NO
แก๊สโครมาโทกราฟี	Shimadzu	Shimadzu	Shimadzu
	GC-8A	GC-8A	GC-2014
ชนิดตัวตรวจวัด	FID	TCD	ECD
อุณหภูมิตัวตรวจวัด	$130^\circ C$	$130^\circ C$	$200^\circ C$
ชนิดคอลัมน์	แก้ว	สแตนเลส	สแตนเลส
อุณหภูมิคอลัมน์	$130^\circ C$	$250^\circ C$	$40^\circ C$
แก๊สตัวพา	ไนโตรเจน	ฮีเลียม	ไนโตรเจน
อัตราการไหล/ความดันของแก๊สตัวพา	75 kPa	40 mL/min	240 kPa



รูปที่ 3.3 แผนผังการไหลของแก๊สสำหรับปฏิกิริยาการออกไซด์เบนซีนและการรีดิวซ์เนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา และการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประกอบไปด้วย

4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

4.1.3 การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊ส

ไนโตรเจน

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน

4.2.2 การทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH_3 oxidation

4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนควบคู่กับการกำจัดไนตริกออกไซด์ในระหว่างปฏิกิริยา SCR

4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยตรวจหาปริมาณโลหะที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD) หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2 physisorption) และหาความเป็นกรด (Acid sites) บนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย NH_3 -Temperature Programmed Desorption (NH_3 -TPD) ซึ่งผลการทดลอง เป็นดังนี้

4.1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)

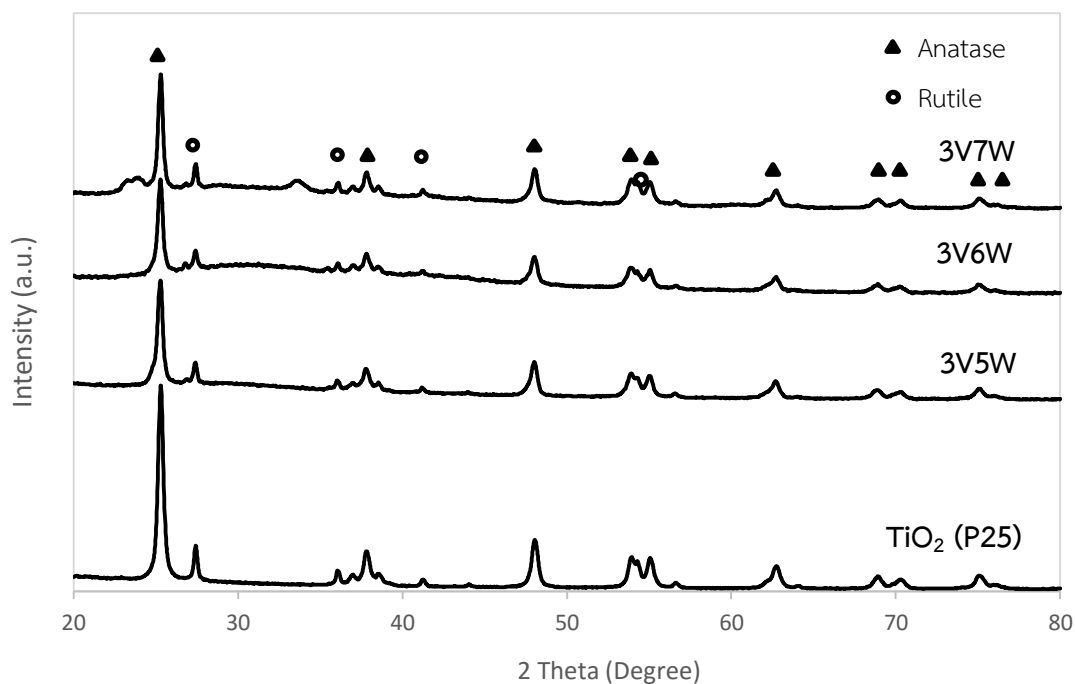
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) เป็นการตรวจวัดปริมาณโลหะด้วยรังสีพลาสมา ซึ่งผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของโลหะออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	3V5W	3V6W	3V7W
V ₂ O ₅	3.05	2.95	3.24
WO ₃	4.57	5.74	7.15

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD)

โครงสร้างผลึกสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD) โดยจากรูปที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W และ 3V6W แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของ TiO₂ (P25) โดยแสดงเฟส อนาเทสและพบรูไทล์กับบรูคิตเล็กน้อย และการที่ไม่พบพีคที่แสดงถึงโลหะออกไซด์เนื่องจากโลหะออกไซด์ที่เติมเข้าไปบนตัวรองรับนั้นมีปริมาณน้อยเกินไปที่ XRD จะสามารถตรวจพบได้ อีกทั้งโลหะออกไซด์ที่เติมไปนั้นกระจายตัวได้ดี ไม่เกาะกันเป็นโครงสร้างผลึกจน XRD สามารถตรวจวัดได้ [11] แต่เมื่อสังเกตรูปตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W จะพบว่าไม่มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 23.5° เกิดขึ้น [13] ซึ่งพีคนี้เป็นพีคที่แสดงถึงตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์ (WO₃) จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W มีการเกาะกันของทั้งสเดนออกไซด์เป็นโครงสร้างผลึกจน XRD สามารถตรวจวัดได้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงโครงร่างผลึกจากเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD)

4.1.3 การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂ physisorption)

พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์แสดงในตารางที่ 4.2 จากตารางพบว่า TiO₂ มีพื้นที่ผิว 28.11 m²/g และเมื่อเติมโลหะออกไซด์ลงบนตัวรองรับทำให้พื้นที่ผิวลดลงอยู่ระหว่าง 18 ถึง 24 m²/g โดยเมื่อคิดเทียบปริมาณพื้นที่ผิวต่อ 1%wt ของวานาเดียมออกไซด์ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W มีปริมาณพื้นที่ผิวต่อ 1%wt ของวานาเดียมออกไซด์มากที่สุด ซึ่งแสดงถึงการแผ่กระจายตัวของวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ได้ดีที่สุด

$$\text{พื้นที่ผิวต่อ 1\%wt V}_2\text{O}_5 = \frac{\text{พื้นที่ผิว}}{\text{ปริมาณวานาเดียมออกไซด์}} \quad 4.1$$

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ TiO₂ (P25)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (m ² /g)	พื้นที่ผิวต่อ 1%wt V ₂ O ₅
TiO ₂	28.11	-
3V5W	24.98	8.33
3V6W	18.95	6.53
3V7W	20.27	6.33



4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์ ($V_2O_5-WO_3$) บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (P25) ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก (wet impregnation)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ ที่เตรียมได้มาทำการทดสอบประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังนี้

4.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน (Benzene oxidation)

4.2.2 การทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH_3 oxidation

4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนควบคู่กับการกำจัดไนตริกออกไซด์ในระหว่างปฏิกิริยา SCR โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

1. การทดสอบการกำจัดเบนซีนและประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเดี่ยวและระบบรวม

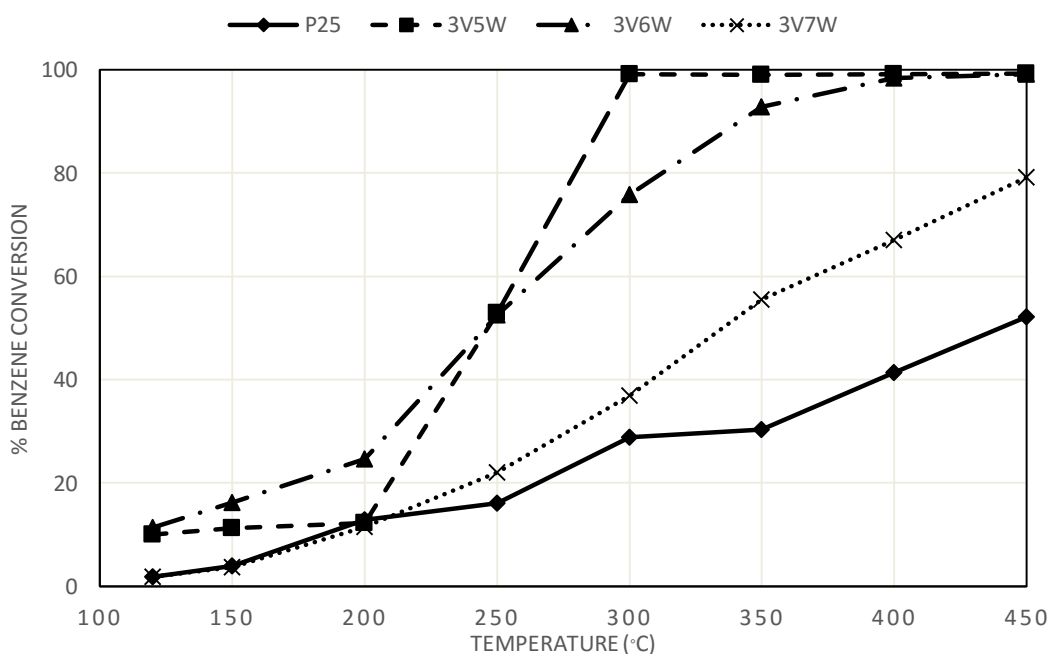
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบรวม

4.2.1 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน (Benzene oxidation)

การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเบนซีน โดยทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 g แก๊สตั้งต้นประกอบด้วย เบนซีน (C_6H_6) 100 ppm ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 30 ppm ออกซิเจน (O_2) 15%v และปรับปริมาตรด้วยไนโตรเจน (N_2) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ $120^\circ C$ ถึง $450^\circ C$ และวัดความเข้มข้นของเบนซีนทางด้านขาเข้าและขาออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph) Shimadzu GC-8A ที่ติดตัวตรวจวัดชนิด FID ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนสูงขึ้น ในทุกๆตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสัดส่วนของวานาเดียมออกไซด์ 3%wt ทั้งสแตนออกไซด์ 5%wt มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนได้ดีที่สุด โดยมี %Benzene conversion สูงสุด อยู่ที่ 99.27% โดยดูได้จากตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดง %Benzene conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซีนของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์

อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา	P25	3V5W	3V6W	3V7W
120°C	1.88	9.96	11.41	1.80
150°C	3.96	11.28	16.26	3.75
200°C	12.81	12.27	24.58	11.49
250°C	16.11	52.89	52.52	22.05
300°C	28.90	99.19	75.81	36.96
350°C	30.30	99.06	92.79	55.51
400°C	41.32	99.17	98.38	66.99
450°C	52.17	99.27	99.16	79.15



รูปที่ 4.2 ค่า %Benzene conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก

จากการทดลองนี้พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมทั้งสแตนนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนได้ โดยเปรียบเทียบ %Benzene conversion ระหว่างตัวรองรับ (P25) ที่ไม่ได้เติมโลหะออกไซด์ และตัวรองรับที่มีการเติมโลหะออกไซด์ลงไป ซึ่งเมื่อเติมโลหะออกไซด์ลงไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนสูงขึ้น จากรูปที่ 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณทั้งสแตน 5%wt มีความสามารถในการกำจัดเบนซีนได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการแผ่กระจายออกของวานาเดียมออกไซด์ที่ดีที่สุดตามตารางที่ 4.2 นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณทั้งสแตนขึ้นเป็น 7%wt พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนกลับลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณทั้งสแตนที่ใส่มากเกินไปจนไปเคลือบทับวานาเดียมออกไซด์ รวมถึงการเกาะกันเป็นผลึกจน XRD สามารถตรวจพบผลึกของทั้งสแตนออกไซด์ได้ อีกทั้งยังเกิดเป็นสารประกอบของทั้งสแตนวานาเดียมออกไซด์ (W-V-O) [22] ซึ่งสังเกตได้ จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) จะพบพีคที่ 33.6° ซึ่งยังไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นพีคของโครงสร้างใด ดังรูปที่ 4.1

การศึกษาปฏิกิริยาเบนซีนออกซิเดชัน (Benzene oxidation) ในระบบเดี่ยว สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งมีค่า %Benzene conversion สูงถึง 99.19% ตั้งแต่อุณหภูมิ 300°C และที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350°C พบว่าจะมีค่า %Benzene conversion ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W จะมีค่า %Benzene conversion ต่ำที่สุด

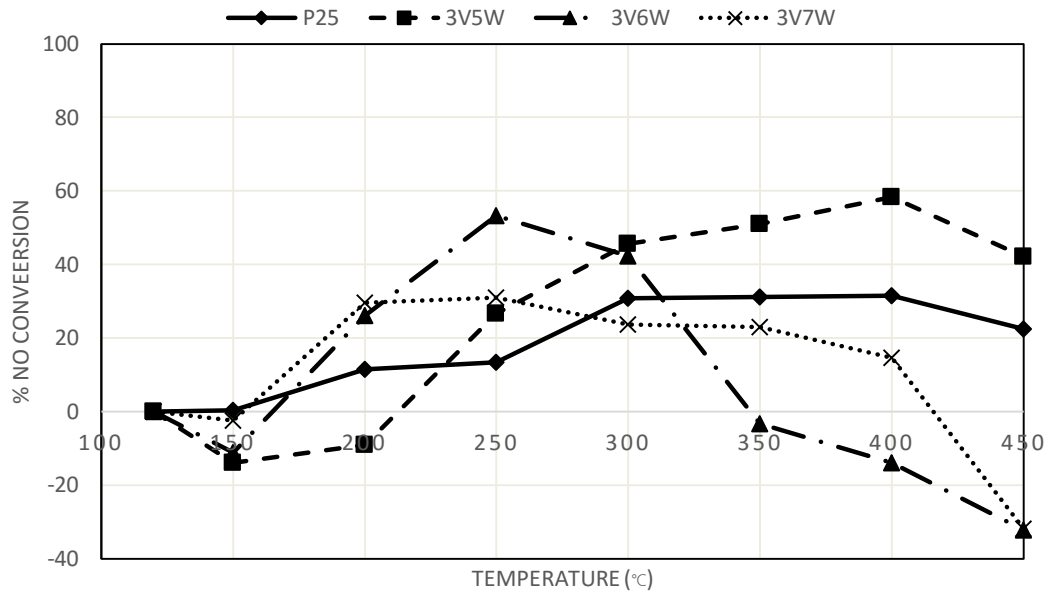
4.2.2 การทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH_3 oxidation

ในการทดลองนี้ประกอบด้วย การทดสอบ 2 ปฏิกิริยา การทดสอบแรกเป็น การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างปฏิกิริยา SCR ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$) 0.1 g แก๊สตั้งต้นประกอบด้วยแก๊สไนตริกออกไซด์ (NO) 120 ppm แอมโมเนีย (NH_3) 120 ppm ออกซิเจน (O_2) 15%v ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 30 ppm ไอน้ำ (H_2O) 15%v และไนโตรเจน (N_2) โดย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 120°C ถึง 450°C และวัดความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ (NO) ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph) Shimadzu GC-2014 การทดสอบที่สองเป็นการทดสอบปฏิกิริยา NH_3 oxidation ซึ่งใช้สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบแรก เพียงแต่ไม่มีการป้อนไนตริกออกไซด์ เข้าในระบบ

รูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบปฏิกิริยา SCR พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาในทุกสัดส่วน มีความสามารถในการช่วยให้เกิดการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ด้วยแอมโมเนีย โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ดีขึ้นด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป ส่งผลให้ความสามารถในการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์กลายเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) จึงส่งผลให้ปริมาณไนตริกออกไซด์ที่ตรวจพบมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W และ 3V6W มีความสามารถในการกำจัดไนตริกออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน คือได้ %conversion ที่สูงสุดอยู่ที่ 58.23% ที่ 400°C และ 53.35% ที่ 250°C ตามลำดับ ทั้งนี้การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวมี %conversion ตีดลบที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งคือการทำปฏิกิริยาของแอมโมเนียและออกซิเจน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไนตริกออกไซด์ โดยปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้ทุกอุณหภูมิและเกิดควบคู่ไปกับการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ แต่เนื่องจากการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิพอเหมาะ จึงทำให้เห็นว่า %conversion ที่อุณหภูมิต่ำนั้นตีดลบ

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดง %NO conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาวานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนด์ออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์

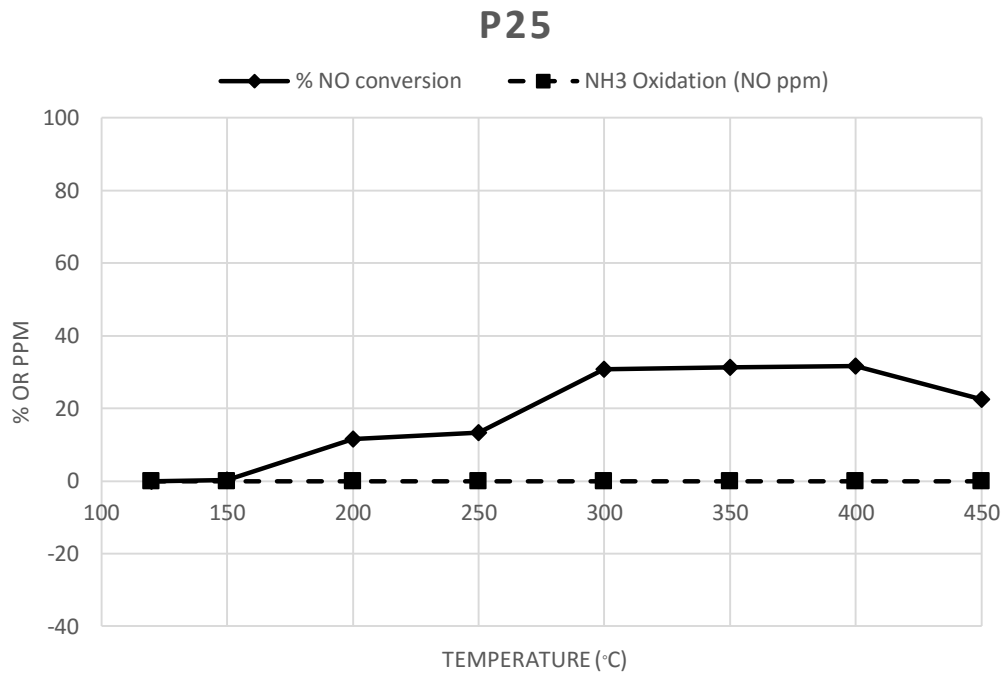
อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา	P25	3V5W	3V6W	3V7W
120°C	0	0	0	0
150°C	0.36	-13.93	-11.22	-2.49
200°C	11.51	-9.00	26.07	29.59
250°C	13.33	26.61	53.35	31.017
300°C	30.78	45.60	42.28	23.59
350°C	31.24	51.05	-3.37	23.04
400°C	31.58	58.23	-13.88	14.58
450°C	22.44	42.05	-32.22	-31.92



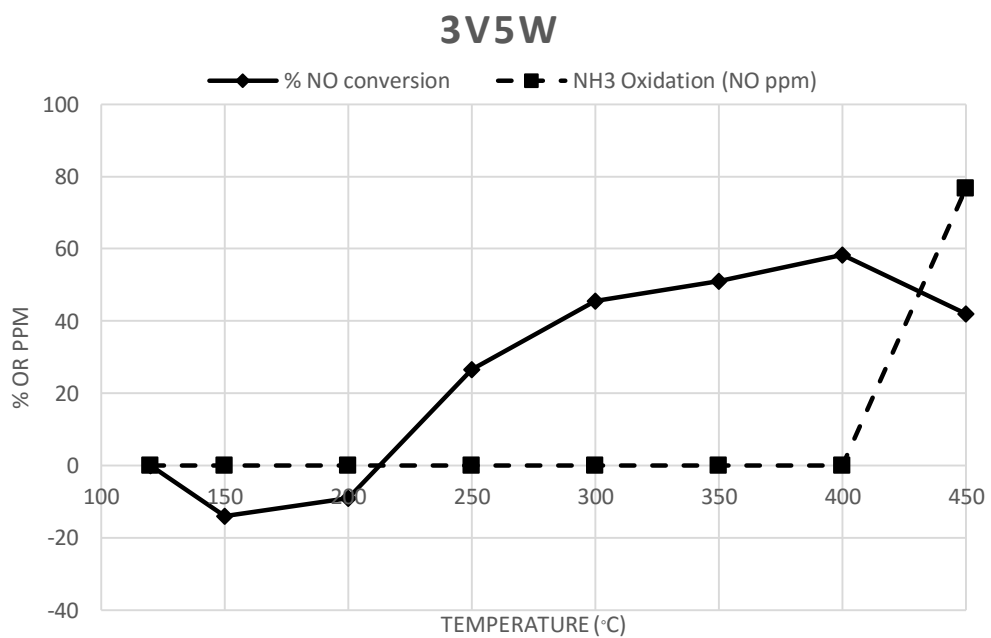
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

รูปที่ 4.4 ถึง 4.7 แสดงความสามารถในการทำปฏิกิริยา SCR และการเกิดปฏิกิริยา NH_3 Oxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัว พบว่าที่อุณหภูมิ 450°C ทุกตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของแอมโมเนียเป็นไนตริกออกไซด์ตามสมการที่ 4.1 ซึ่งส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียในการกำจัดไนตริกออกไซด์ลดลง ทั้งนี้ยังเกิดไนตริกออกไซด์เพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงมากที่สุดคือ 3V7W ซึ่งเท่ากับ 97.56 ppm

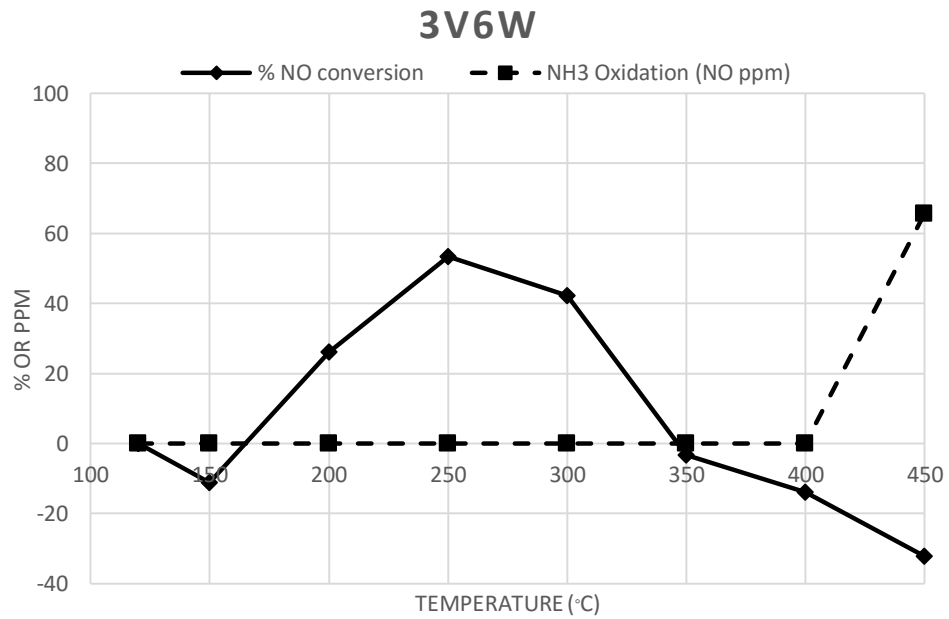




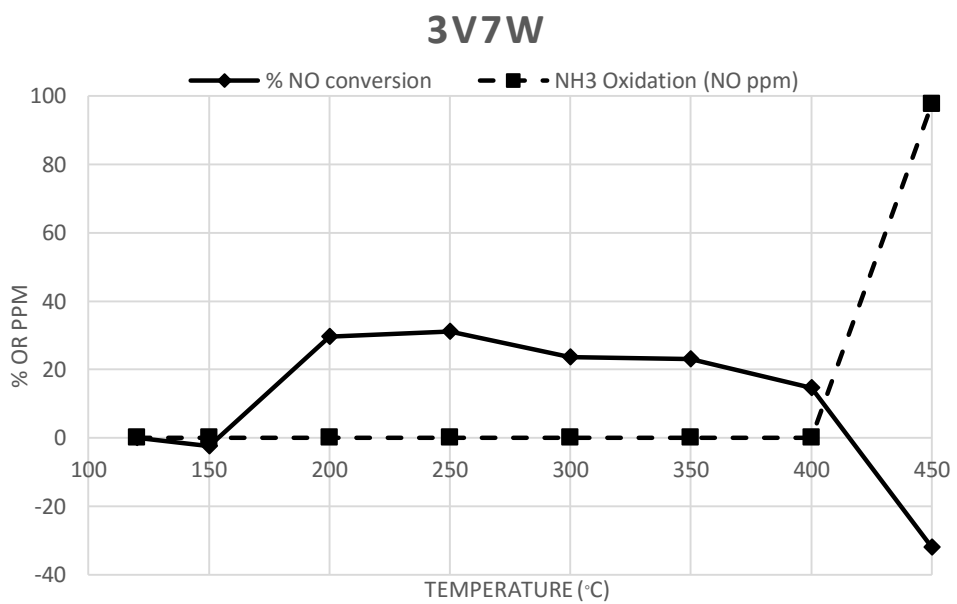
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH_3 oxidation ของตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (P25)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH_3 oxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH₃ oxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบในระหว่างปฏิกิริยา SCR และปฏิกิริยา NH₃ oxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

ในระหว่างปฏิกิริยา SCR พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W มีค่า %NO conversion สูงที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 400°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W มีค่า %NO conversion สูงที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 250°C ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W พบว่าไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยานี้ และพบว่าทุกตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งคือปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (NH_3 oxidation) ที่อุณหภูมิ 450°C

4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนควบคู่กับการกำจัดไนตริกออกไซด์ในระหว่างปฏิกิริยา SCR

การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเบนซีนและไนตริกออกไซด์ โดยทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 g แก๊สตั้งต้นประกอบด้วย เบนซีน (C_6H_6) 100 ppm ไนตริกออกไซด์ (NO) 120 ppm แอมโมเนีย (NH_3) 120 ppm ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 30 ppm ออกซิเจน (O_2) 15%v ไอน้ำ 15%v และปรับปริมาตรด้วยไนโตรเจน (N_2) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 120°C ถึง 450°C และวัดความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ (NO) ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph) Shimadzu GC-2014 วัดปริมาณเบนซีนทางด้านขาเข้าและขาออก ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph) Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด FID และวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทางด้านขาออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph) Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด TCD

4.2.3.1 การทดสอบการกำจัดเบนซีนและประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเดี่ยวและระบบรวม

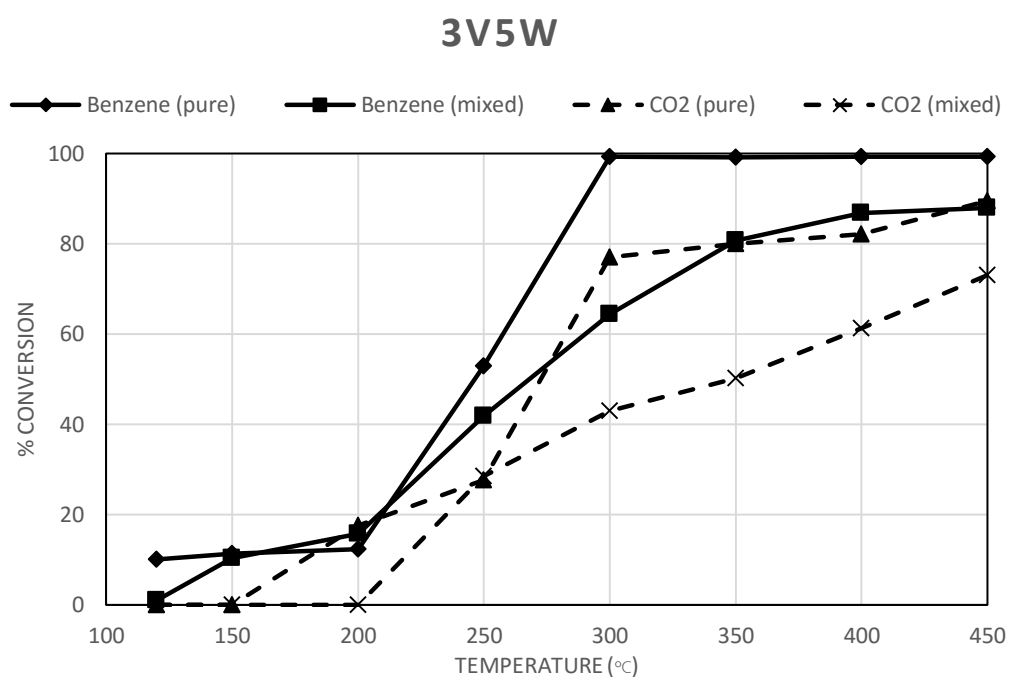
รูปที่ 4.8 ถึง 4.10 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างปฏิกิริยา Benzene oxidation ในสถานะที่ไม่มีปฏิกิริยา SCR (ระบบเดี่ยว) และมีปฏิกิริยา SCR รวม (ระบบรวม) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนระหว่างในระบบเดี่ยวและระบบรวม พบว่าในระบบเดี่ยว ตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W และ 3V6W จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนได้ดีกว่าในระบบรวม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการแย่งตำแหน่งว่องไว (Active site) ในการทำปฏิกิริยาระหว่างปฏิกิริยาการออกซิเดชันเบนซีนและปฏิกิริยาการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W นั้นเกิดสารประกอบของทั้งสเตนวานาเดียมออกไซด์ (W-V-O) ซึ่งสารประกอบตัวนี้จะไม่ว่องไวในปฏิกิริยาการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ แต่จะทำปฏิกิริยาการออกซิเดชันเบนซีนได้เล็กน้อย จึงจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W ในระบบเดี่ยวและระบบรวมไม่มีความแตกต่างกัน

เบนซีนที่ถูกป้อนเข้ามาเมื่อผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วนั้น จะทำปฏิกิริยาได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะทำการเก็บแก๊สตัวอย่างทางด้านขวาออกจากเครื่องปฏิกรณ์แล้วนำไปตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph) Shimadzu GC-8A ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด TCD ตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%Benzene conversion to CO₂) ได้สูงที่สุด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวจะมีสัดส่วนการเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงตาม %Benzene conversion แต่ในตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W จะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากสารมัธยันตร์ (Intermediate) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการออกซิไดซ์เบนซีน เข้าทำปฏิกิริยากับไนตริกออกไซด์เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า %Benzene conversion to CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W นั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปแบบตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น



ตารางที่ 4.5 ตารางแสดง %Benzene conversion และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W

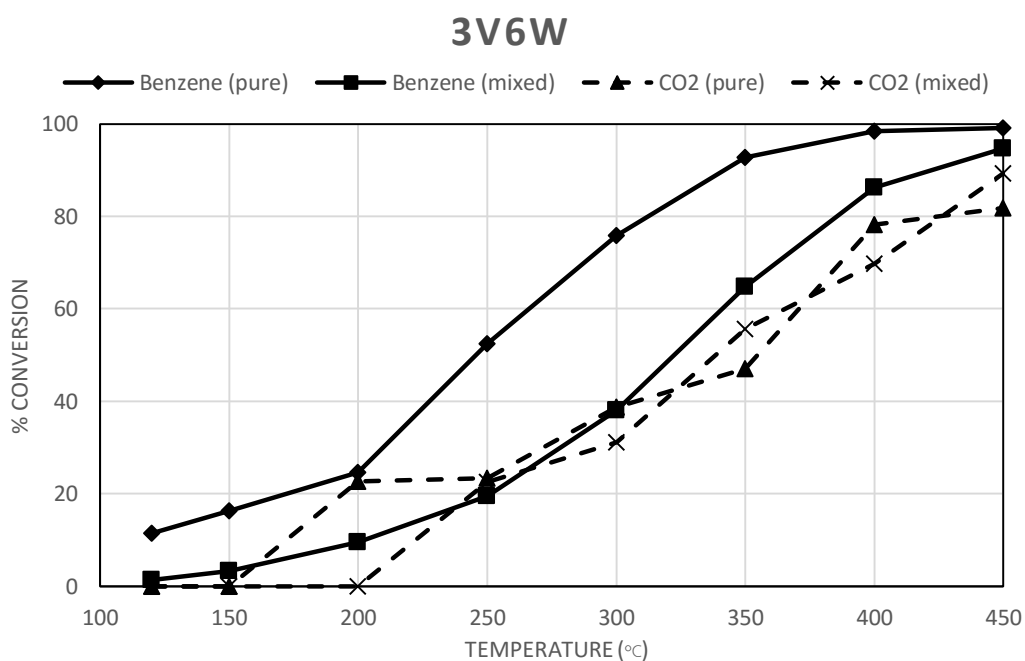
อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา	%Benzene conversion		%Benzene conversion to CO ₂	
	Pure	Mixed	Pure	Mixed
120°C	9.96	0.88	0	0
150°C	11.28	10.30	0	0
200°C	12.27	15.71	17.51	0
250°C	52.89	41.75	27.54	28.45
300°C	99.19	64.36	77.00	42.97
350°C	99.06	80.70	79.90	50.21
400°C	99.17	86.69	82.01	61.26
450°C	99.27	87.87	89.39	72.97



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสามารถในการกำจัดเบนซีนและความสามารถในการเปลี่ยนเบนซีนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดง %Benzene conversion และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W

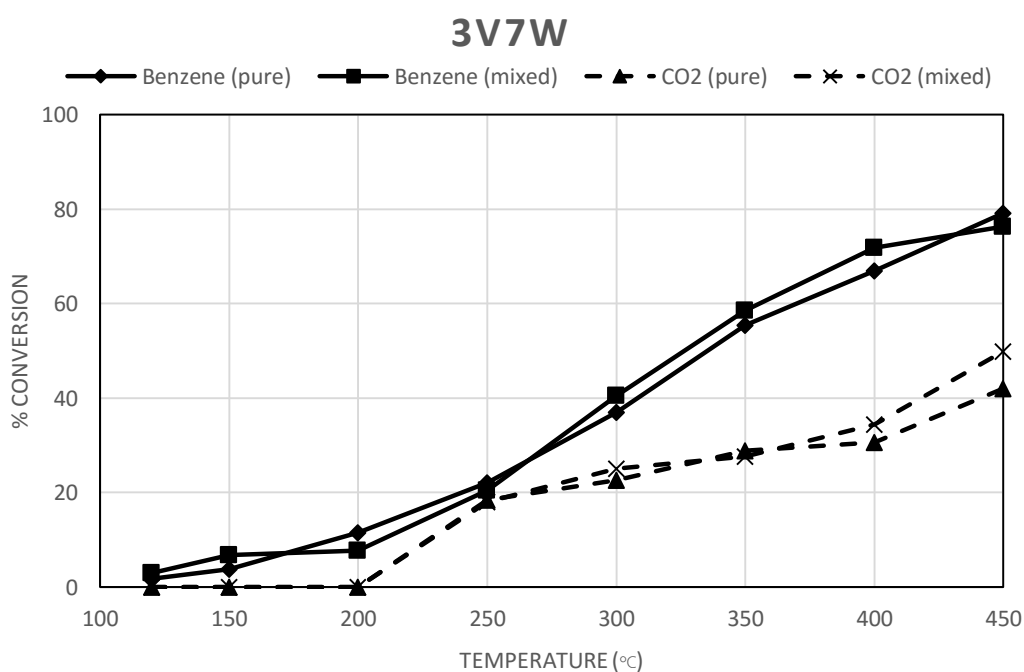
อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา	%Benzene conversion		%Benzene conversion to CO ₂	
	Pure	Mixed	Pure	Mixed
120°C	11.41	1.39	0	0
150°C	16.26	3.29	0	0
200°C	24.58	9.51	22.66	0
250°C	52.52	19.48	23.36	22.52
300°C	75.81	38.06	38.70	31.12
350°C	92.79	64.74	47.10	55.68
400°C	98.38	86.23	78.22	69.79
450°C	99.16	94.70	81.78	89.36



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสามารถในการกำจัดเบนซีนและความสามารถในการเปลี่ยนเบนซีนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดง %Benzene conversion และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา	%Benzene conversion		%Benzene conversion to CO ₂	
	Pure	Mixed	Pure	Mixed
120°C	1.80	2.96	0	0
150°C	3.74	6.69	0	0
200°C	11.49	7.65	0	0
250°C	22.05	20.50	18.42	18.00
300°C	36.96	40.51	22.66	25.03
350°C	55.51	58.60	28.86	27.63
400°C	66.99	71.86	30.64	34.48
450°C	79.15	76.34	41.97	49.90



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสามารถในการกำจัดเบนซีนและความสามารถในการเบนซีนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

ตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W และ 3V6W มีค่า %Benzene conversion ในระบบรวมต่ำกว่าระบบเดี่ยว ซึ่งต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W ที่มีค่า %Benzene conversion ใกล้เคียงกันในทั้ง 2 ระบบ ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W

4.2.3.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบรวม

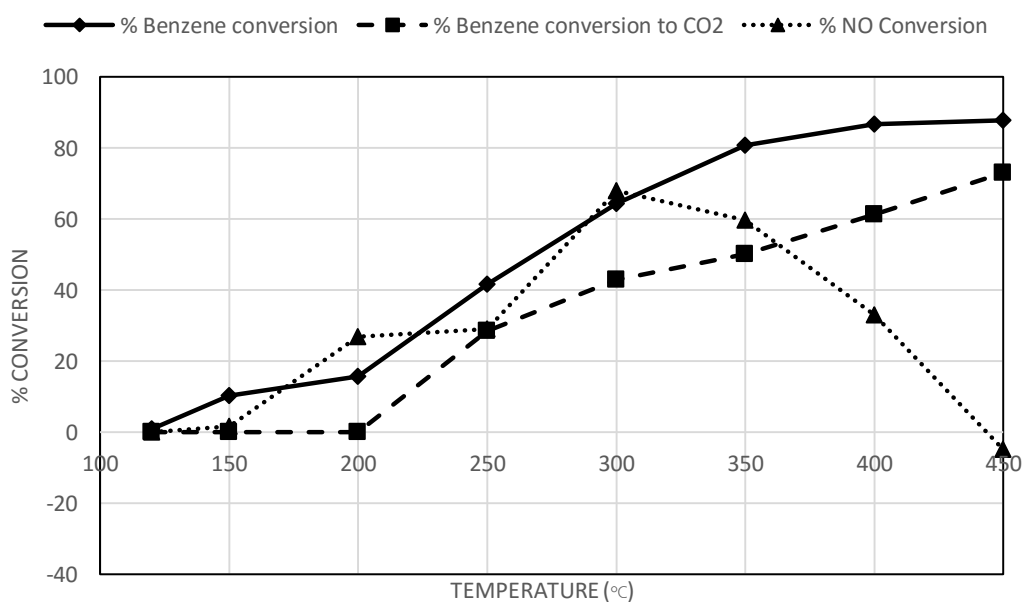
เนื่องจากการใช้งานนั้นต้องการกำจัดทั้งไนตริกออกไซด์และเบนซีน โดยต้องการให้เบนซีนเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้มากที่สุด ดังนั้นหลักที่ใช้ในการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะเลือกจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนตริกออกไซด์สูง และเบนซีนสูง รวมไปถึงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี โดยจากผลการทดลองพบว่าแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับแต่ละปฏิกิริยาแตกต่างกันไป

รูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดง %Benzene conversion และ %NO conversion ในระบบรวม รวมไปถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%Benzene conversion to CO₂) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เหมาะแก่การใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 300°C ถึง 350°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงที่สุดในปฏิกิริยาการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ โดยหากเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 400°C จะเห็นได้ว่า %Conversion ในการกำจัดไนตริกออกไซด์ลดลงเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดง %Conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	NO	Benzene	CO ₂
120°C	0	0.88	0
150°C	1.63	10.29	0
200°C	26.83	15.71	0
250°C	29.11	41.75	28.45
300°C	67.89	64.36	42.97
350°C	59.73	80.70	50.21
400°C	32.96	86.69	61.26
450°C	-4.81	87.87	72.97

3V5W



รูปที่ 4.11 กราฟ %Conversion การกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W

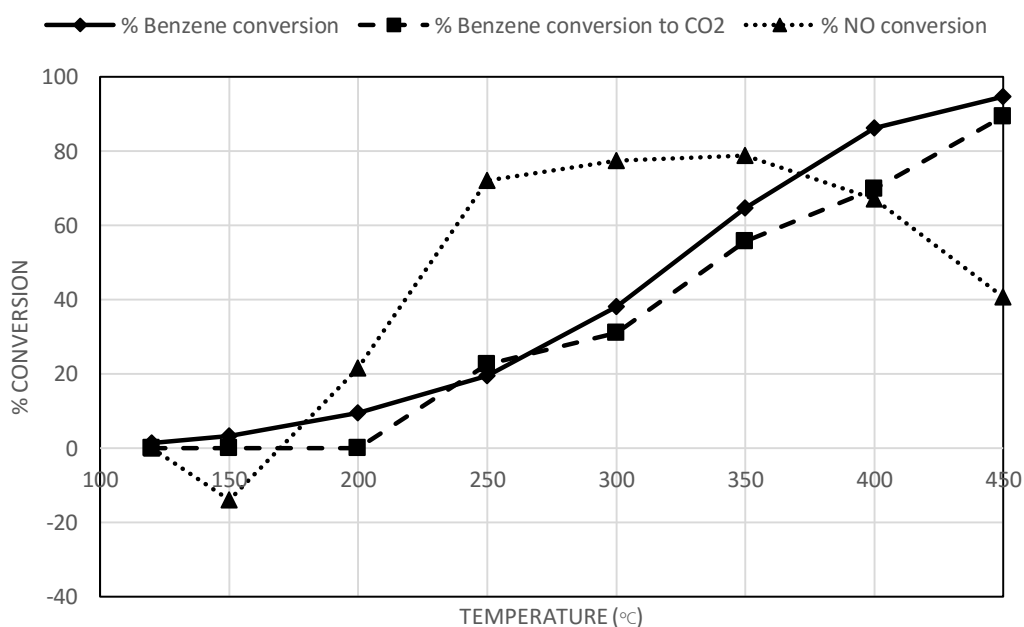
รูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดง %Benzene conversion และ %NO conversion ในระบบรวมรวมไปถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%Benzene conversion to CO₂) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เหมาะที่จะทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 250°C ถึง 400°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงที่สุดในปฏิกิริยาการรีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้พบว่าในระบบรวมจะมีค่า %Benzene conversion ต่ำกว่าในระบบเดี่ยว เนื่องจากเกิดการแย่งกันทำปฏิกิริยาที่จุดว่างไว (Active site) ของทั้ง 2 ปฏิกิริยา และมีค่า %NO conversion สูงขึ้น เนื่องจากเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารมัธยันตร์ (Intermediate) ที่เกิดจากการออกซิไดซ์เบนซีนเข้าทำปฏิกิริยากับไนตริกออกไซด์ ซึ่งจะส่งผลให้ %NO conversion สูงขึ้น



ตารางที่ 4.9 ตารางแสดง %Conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซินร่วมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	NO	Benzene	CO ₂
120°C	0	1.39	0
150°C	-14.00	3.29	0
200°C	21.63	9.51	0
250°C	72.02	19.48	22.52
300°C	77.43	38.06	31.12
350°C	78.90	64.74	55.68
400°C	67.15	86.23	69.79
450°C	40.68	94.69	89.36

3V6W



รูปที่ 4.12 กราฟ %Conversion การกำจัดเบนซินร่วมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W

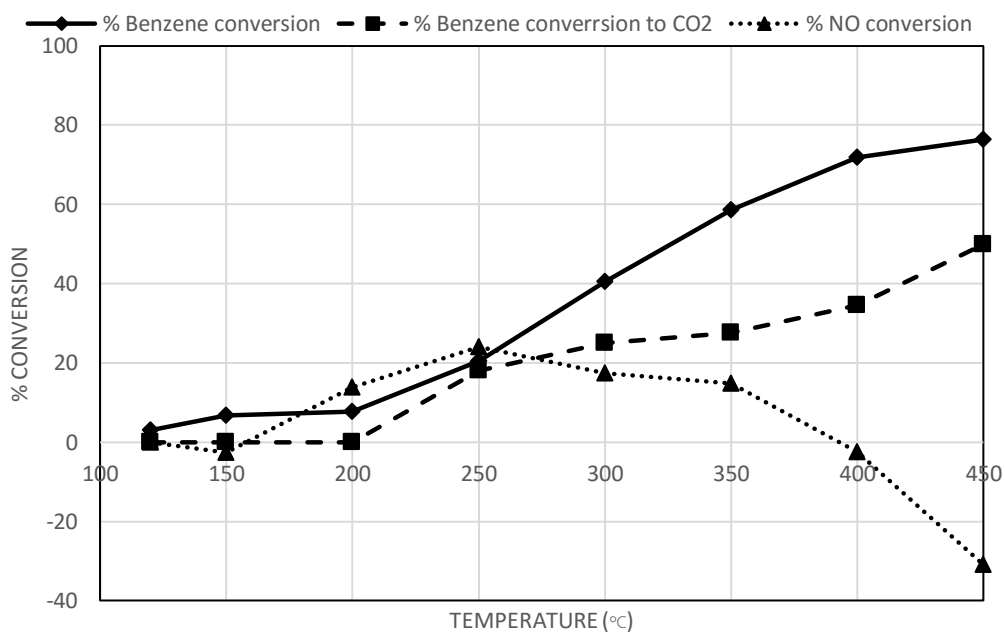
รูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดง %Benzene conversion และ %NO conversion ในระบบรวมรวมไปถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%Benzene conversion to CO₂) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เหมาะสมในการกำจัดเบนซีนร่วมกับไนตริกออกไซด์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไม่ว่องไว (active) ต่อปฏิกิริยารีดิวซ์ไนตริกออกไซด์ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เบนซีนต่ำที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบ V-W-O บนตัวรองรับ



ตารางที่ 4.10 ตารางแสดง %Conversion ในปฏิกิริยาการกำจัดเบนซินร่วมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	NO	Benzene	CO ₂
120°C	0	2.96	0
150°C	-2.56	6.69	0
200°C	13.92	7.65	0
250°C	23.96	20.50	18.00
300°C	17.39	40.51	25.03
350°C	14.82	58.60	27.63
400°C	-2.40	71.86	34.48
450°C	-30.89	76.34	49.90

3V7W



รูปที่ 4.13 กราฟ %Conversion การกำจัดเบนซินร่วมกับไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

ในระบบรวมพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัว มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงาน (ช่วงที่มี %Benzene conversion และ %NO conversion สูง) ที่แตกต่างกันไป โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W จะอยู่ในช่วง 300°C ถึง 350°C ตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W จะอยู่ในช่วง 300°C ถึง 400°C และตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เหมาะสมในกระบวนการนี้

จากการทดลองข้างต้น สามารถบอกได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในระบบรวมคือตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีทั้ง %Benzene conversion และ %NO conversion สูง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่ดีในการเปลี่ยนจากเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานที่กว้าง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทสรุปผลการทดลองนี้ประกอบไปด้วย การสรุปผลการทดลองในปฏิกิริยา Benzene oxidation และ NO reduction ทั้งในปฏิกิริยาเดี่ยวและปฏิกิริยารวม ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W 3V6W และ 3V7W อยู่ในหัวข้อ 5.1 หัวข้อ 5.2 เป็นส่วนของข้อเสนอแนะจากงานวิจัย ที่ควรจะมีการศึกษาต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.1 สรุปผลการทดลองในปฏิกิริยาเดี่ยว

การศึกษาปฏิกิริยา Benzene oxidation พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวมี %Benzene oxidation เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยสูงสุดที่อุณหภูมิ 450°C โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W และ 3V6W มี %Benzene oxidation ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

การศึกษาปฏิกิริยา NO reduction พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W และ 3V6W มี %NO conversion สูงขึ้นและลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W นั้น พบว่าไม่ว่องในปฏิกิริยา NO reduction และที่อุณหภูมิ 450°C พบว่าเกิดปฏิกิริยา NH_3 oxidation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงในทุกตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.2 สรุปผลการทดลองในปฏิกิริยารวม

เนื่องจากการทดลองนี้เน้นไปที่การกำจัดไนตริกออกไซด์ร่วมกับเบนซีน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะต้องสามารถกำจัดได้ทั้งไนตริกออกไซด์และเบนซีน รวมไปถึงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเบนซีนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W มี %Benzene conversion %NO conversion และ %Benzene to CO_2 สูงในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งต่างจาก 3V5W ที่ให้ผลดีในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน

โดยข้อสรุปที่ได้จากการทำการทดลอง จะรวบรวมอยู่ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W 3V6W และ 3V7W ในแต่ละปฏิกิริยา

	3V5W	3V6W	3V7W
Benzene oxidation	ดี	ดี	ต่ำ
NO reduction	ดี	ดี	ต่ำ
Mixed	ปานกลาง	ดี	ต่ำ
ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม	300-350°C	300-400°C	ไม่เหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By product) เกิดขึ้น แต่ในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่สามารถจัดเก็บเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ ในการทำการทดลองครั้งต่อไปควรศึกษาในระบบที่ใหญ่ขึ้น หรือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาแต่ละอุณหภูมิให้นานขึ้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่มากขึ้น และเก็บมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อไป

รายการอ้างอิง

1. กำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี, ก. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, Editor. 2550, ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 30. p. 8-9.
2. Heck, R.M., *Catalytic abatement of nitrogen oxides—stationary applications*. Catalysis Today, 1999. **53**(4): p. 519-523.
3. Vargas, M.A.L., et al., *An IR study of thermally stable V₂O₅-WO₃-TiO₂ SCR catalysts modified with silica and rare-earths (Ce, Tb, Er)*. Applied Catalysis B: Environmental, 2007. **75**(3-4): p. 303-311.
4. Madia, G., et al., *Thermal stability of vanadia-tungsta-titania catalysts in the SCR process*. Applied Catalysis B: Environmental, 2002. **39**(2): p. 181-190.
5. T., C., *Environmental Catalyst*. 2005, Boca Raton: CRC press. 14.
6. Perathoner, G.C.a.S., *Metal Oxides Chemistry and Application*. 2006, Boca Raton: CRC press. 19.
7. Choung, J.W., I.-S. Nam, and S.-W. Ham, *Effect of promoters including tungsten and barium on the thermal stability of V₂O₅/sulfated TiO₂ catalyst for NO reduction by NH₃*. Catalysis Today, 2006. **111**(3-4): p. 242-247.
8. Forzatti, P., *Environmental catalysis for stationary applications*. Catalysis Today, 2000. **62**(1): p. 51-65.
9. Busca, G., et al., *Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxide catalysts: A review*. Applied Catalysis B: Environmental, 1998. **18**(1-2): p. 1-36.
10. Kaewbuddee, C., *SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION OF NITROGEN OXIDE BY AMMONIA OVER V₂O₅-WO₃/TiO₂ CATALYSTS* 2009, Chulalongkorn University p. 6-19.
11. Armor, J.N., *New catalytic technology commercialized in the USA during the 1980's*. Applied Catalysis, 1991. **78**(2): p. 141-173.
12. Barker, R.S., *Method of oxidizing benzene to maleic anhydride using a vanadium, molybdenum, boron containing catalyst*. 1975, Google Patents.

13. Lazăr, L., et al., *INFLUENCE OF SULPHUR DIOXIDE AND HALOGENATED ACIDS UPON BENZENE CONVERSION ON SCR-DeNO_x COMMERCIAL CATALYST*. 2006.
14. Busca, G., et al., *Evaluation of V₂O₅-WO₃-TiO₂ and alternative SCR catalysts in the abatement of VOCs*. *Catalysis Today*, 1999. **53**(4): p. 525-533.
15. Debecker, D.P., et al., *Total oxidation of benzene and chlorobenzene with MoO₃- and WO₃-promoted V₂O₅/TiO₂ catalysts prepared by a nonhydrolytic sol-gel route*. *Catalysis Today*, 2010. **157**(1-4): p. 125-130.
16. Boikov, E., et al., *Oxidation of benzene on a vanadium-molybdenum catalyst in the presence of thiophene*. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2013. **7**(3): p. 251-254.
17. Tabakova, T., et al., *Complete benzene oxidation over mono and bimetallic Au-Pd catalysts supported on Fe-modified ceria*. *Chemical Engineering Journal*, 2015. **260**: p. 133-141.
18. Friedrichsen, W. and O. Goehre, *Oxidation catalyst containing vanadium and titanium*. 1969, Google Patents.
19. Friedrichsen, W., O. Goehre, and G. Poehler, *Oxidation catalysts containing vanadium pentoxide and titanium dioxide*. 1971, Google Patents.
20. Hibst, H., A. Tenten, and L. Marosi, *Preparation of organic acids such as acrylic acid by catalytic oxidation using a group V mixed metal oxide catalyst containing Cu, Mo, W, V, Nb and Ta*. 2000, Google Patents.
21. Fischer, W. and R. Neufert, *Process for the catalytic removal of polycyclic aromatic nitro, nitroso and/or amino compounds*. 2002, Google Patents.
22. Goto, Y., et al., *Hydrothermal synthesis of microporous W-V-O as an efficient catalyst for ammoxidation of 3-picoline*. *Applied Catalysis A: General*, 2016. **509**: p. 118-122.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การคำนวณปริมาณโลหะออกไซด์ทุกชนิดที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คัดจากจำนวนโมลโลหะ โดยจะให้เท่ากับจำนวนโมลโลหะวานาเดียม ที่คิดเป็นวานาเดียมออกไซด์ 3 %wt ในภาคผนวก ก จะแสดงตัวอย่างการคำนวณของ V_2O_5 / TiO_2 และ $V_2O_5 - WO_3 / TiO_2$

ข้อมูลที่จำเป็นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา มีดังต่อไปนี้

- | | |
|---|------------|
| 1. สารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาตะวานาเตต (NH_4VO_3) | MW 116.94 |
| 2. สารตั้งต้นแอมโมเนียมพาราทังสแตน ($H_{40}N_{10}O_{41}W_{12} \cdot 7H_2O$) | MW 3168.08 |
| 3. โลหะออกไซด์วานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) | MW 181.88 |
| 4. โลหะออกไซด์ทังสแตนออกไซด์ (WO_3) | MW 231.84 |

ก.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา V_2O_5 / TiO_2 จากแอมโมเนียมเมตาตะวานาเตต (NH_4VO_3)

น้ำหนักของ 3 %wt ของวานาเดียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ 10 g

$$\frac{x}{10+x} = 0.03; \quad x = 0.309$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้าต้องการ } V_2O_5 \text{ 181.88 g} \quad \text{ต้องใช้เกลือ } NH_4VO_3 &= 2 \times 116.94 = 233.88 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } V_2O_5 \text{ 0.309 g} \quad \text{ต้องใช้เกลือ } NH_4VO_3 &= (0.309 \times 233.88)/181.88 \\ &= 0.397 \text{ g} \end{aligned}$$

ก.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5 - WO_3 / TiO_2$ จากแอมโมเนียมพาราทังสแตน ($H_{40}N_{10}O_{41}W_{12} \cdot 7H_2O$)

$$\begin{aligned} TiO_2 \quad 10 \quad g \quad \text{เป็น } TiO_2 + V_2O_5 \quad 10+0.309 = 10.309 \quad g \\ TiO_2 \quad 2 \quad g \quad \text{เป็น } TiO_2 + V_2O_5 \quad (2 \times 10.309)/10 = 2.062 \quad g \end{aligned}$$

ก.2-1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W

น้ำหนักของ 5 %wt ของทั้งสแตนออกไซด์ บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ที่มีวานาเดียมออกไซด์อยู่บนพื้นผิว

$$\frac{x}{2.062+x} = 0.05 \quad ; \quad x = 0.109$$

ถ้าต้องการ WO_3 231.84 g

$$\text{ต้องใช้เกลือ } H_{40}N_{10}O_{41}W_{12} \cdot 7H_2O = 3168.08/12 = 264.01 \text{ g}$$

ถ้าต้องการ WO_3 0.109 g

$$\text{ต้องใช้เกลือ } H_{40}N_{10}O_{41}W_{12} \cdot 7H_2O = (0.109 \times 264.01)/231.84 = 0.124 \text{ g}$$

ก.2-2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W

น้ำหนักของ 6 %wt ของทั้งสแตนออกไซด์ บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ที่มีวานาเดียมออกไซด์อยู่บนพื้นผิว

$$\frac{x}{2.062+x} = 0.06 \quad ; \quad x = 0.132$$

ถ้าต้องการ WO_3 231.84 g

$$\text{ต้องใช้เกลือ } H_{40}N_{10}O_{41}W_{12} \cdot 7H_2O = 3168.08/12 = 264.01 \text{ g}$$

ถ้าต้องการ WO_3 0.132 g

$$\text{ต้องใช้เกลือ } H_{40}N_{10}O_{41}W_{12} \cdot 7H_2O = (0.132 \times 264.01)/231.84 = 0.150 \text{ g}$$

ก.2-3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

น้ำหนักของ 7 %wt ของทั้งสแตนออกไซด์ บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ที่มีวานาเดียมออกไซด์อยู่บนพื้นผิว

$$\frac{x}{2.062+x} = 0.07 \quad ; \quad x = 0.155$$

ถ้าต้องการ WO_3 231.84 g

$$\text{ต้องใช้เกลือ } \text{H}_{40}\text{N}_{10}\text{O}_{41}\text{W}_{12} \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 3168.08/12 = 264.01 \text{ g}$$

ถ้าต้องการ WO_3 0.155 g

$$\text{ต้องใช้เกลือ } \text{H}_{40}\text{N}_{10}\text{O}_{41}\text{W}_{12} \cdot 7\text{H}_2\text{O} = (0.155 \times 264.01)/231.84 = 0.177 \text{ g}$$



ภาคผนวก ข

การคำนวณสำหรับการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Single point BET

ข.1-1 การหา surface area ของ TiO₂ (P25)

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ 0.1001 g

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ TiO₂

	Adsorb [m ²]	Desorb [m ²]	Calibrate N ₂
Exp. 1	3.33	2.39	2.38
Exp. 2	3.83	2.34	2.36
Exp. 3	3.34	2.31	2.38
Average	3.50	2.35	2.37

$$\text{Correction factor} = \frac{\text{value from theory}}{\text{experimental value}} = \frac{2.84}{2.37} = 1.198$$

$$\text{Surface area} = \text{desorb value} \times \text{correction factor} \times \frac{1}{\text{g.catalyst}}$$

$$= 2.35 \times 1.198 \times \frac{1}{0.10}$$

$$= 28.15$$

ดังนั้น พื้นที่ผิว single point BET ของ TiO₂ (P25) มีค่าเท่ากับ 28.15 m²/g

ข.1-2 การหา surface area ของ 3V5W

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ 0.10 g

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ 3V5W

	Adsorb [m ²]	Desorb [m ²]	Calibrate N ₂
Test round 1	2.25	1.81	2.07
Test round 2	2.33	1.83	2.07
Test round 3	2.31	1.83	2.08
Average	2.30	1.82	2.07

$$\text{Correction factor} = \frac{\text{value from theory}}{\text{experimental value}} = \frac{2.84}{2.07} = 1.37$$

$$\text{Surface area} = \text{desorb value} \times \text{correction factor} \times \frac{1}{\text{g.catalyst}}$$

$$= 1.82 \times 1.37 \times \frac{1}{0.10}$$

$$= 24.98 \text{ m}^2/\text{g}$$

ดังนั้น พื้นที่ผิว single point BET ของ 3V5W มีค่าเท่ากับ 24.98 m²/g

ข.1-3 การหา surface area ของ 3V6W

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ 0.10 g

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ 3V6W

	Adsorb [m ²]	Desorb [m ²]	Calibrate N ₂
Test round 1	2.37	1.69	2.54
Test round 2	2.37	1.70	2.55
Test round 3	2.36	1.70	2.54
Average	2.37	1.70	2.54

$$\text{Correction factor} = \frac{\text{value from theory}}{\text{experimental value}} = \frac{2.84}{2.54} = 1.12$$

$$\text{Surface area} = \text{desorb value} \times \text{correction factor} \times \frac{1}{\text{g.catalyst}}$$

$$= 1.70 \times 1.12 \times \frac{1}{0.10}$$

$$= 18.95 \text{ m}^2/\text{g}$$

ดังนั้น พื้นที่ผิว single point BET ของ 3V6W มีค่าเท่ากับ 18.95 m²/g

ข.1-4 การหา surface area ของ 3V7W

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ 0.05 g

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวรองรับ 3V7W

	Adsorb [m ²]	Desorb [m ²]	Calibrate N ₂
Test round 1	0.67	0.83	2.41
Test round 2	0.64	0.88	2.40
Test round 3	0.65	0.86	2.39
Average	0.65	0.86	2.40

$$\text{Correction factor} = \frac{\text{value from theory}}{\text{experimental value}} = \frac{2.84}{2.40} = 1.18$$

$$\text{Surface area} = \text{desorb value} \times \text{correction factor} \times \frac{1}{\text{g.catalyst}}$$

$$= 0.86 \times 1.18 \times \frac{1}{0.05}$$

$$= 20.27 \text{ m}^2/\text{g}$$

ดังนั้น พื้นที่ผิว single point BET ของ 3V7W มีค่าเท่ากับ 20.27 m²/g

ข.2 การวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรด ด้วยเทคนิค Pyridine adsorption และ NH₃ Temperature Programmed Desorption (NH₃-TPD)

การหาปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีการวิเคราะห์ทั้งปริมาณการดูดซับไพริดีน (Pyridine adsorption) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ Shimadzu GC-8A ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด FID (Flame ionisation detector) เพื่อบอกถึงปริมาณสูงสุดที่ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆสามารถดูดซับได้ และการคายซับของแอมโมเนีย NH₃ Temperature Programmed Desorption (NH₃-TPD) ด้วยเครื่อง Micromeritics chemisorb 2750 ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด Thermal conductivity detector (TCD) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้อุณหภูมิสูงสุดในการวิเคราะห์อยู่ที่ 500°C เนื่องจากไม่ต้องการให้ตัวรองรับเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นพื้นที่ใต้กราฟที่ได้เป็นการบอกถึงปริมาณความเป็นกรดที่ตรวจวัดได้เกิดจากการคายซับที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C

ข.2-1 เทคนิค Pyridine adsorption

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Pyridine

$$\text{Amount of pyridine} = \frac{\text{Density of pyridine} \times \text{Inject volume}}{\text{M.W. of pyridine}}$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณของไพริดีนที่ฉีดแต่ละเข็ม} = \frac{0.973 \times 0.2 \times 10^4}{79.099} = 24.60 \mu\text{mol/g}$$

ตารางที่ ข.5 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไพริดีนของตัวรองรับ TiO₂

	Peak Area	μmol/g
ตำแหน่งที่อิมตัว	1278212	24.60
ปริมาณที่ดูดซับทั้งหมด	2816771	43.30

ตารางที่ ข.6 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไพริดีนของตัวรองรับ 3V5W

	Peak Area	μmol/g
ตำแหน่งที่อิมตัว	1465060	24.61
ปริมาณที่ดูดซับทั้งหมด	5804569	97.47

ตารางที่ ข.7 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไพรดีนของตัวรองรับ 3V6W

	Peak Area	$\mu\text{mol/g}$
ตำแหน่งที่อิ่มตัว	1327432	24.60
ปริมาณที่ดูดซับทั้งหมด	1858360	34.44

ตารางที่ ข.8 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับของไพรดีนของตัวรองรับ 3V7W

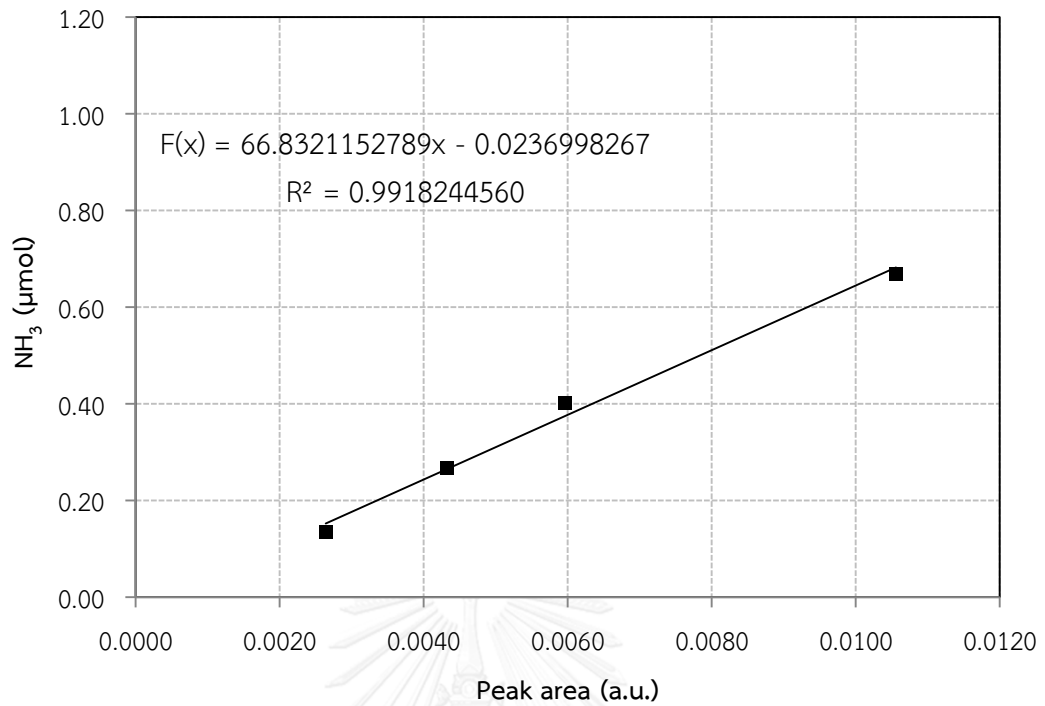
	Peak Area	$\mu\text{mol/g}$
ตำแหน่งที่อิ่มตัว	1365199	24.60
ปริมาณที่ดูดซับทั้งหมด	3501237	63.10

ข.2-2 เทคนิค NH_3 Temperature Programmed Desorption (NH_3 -TPD)

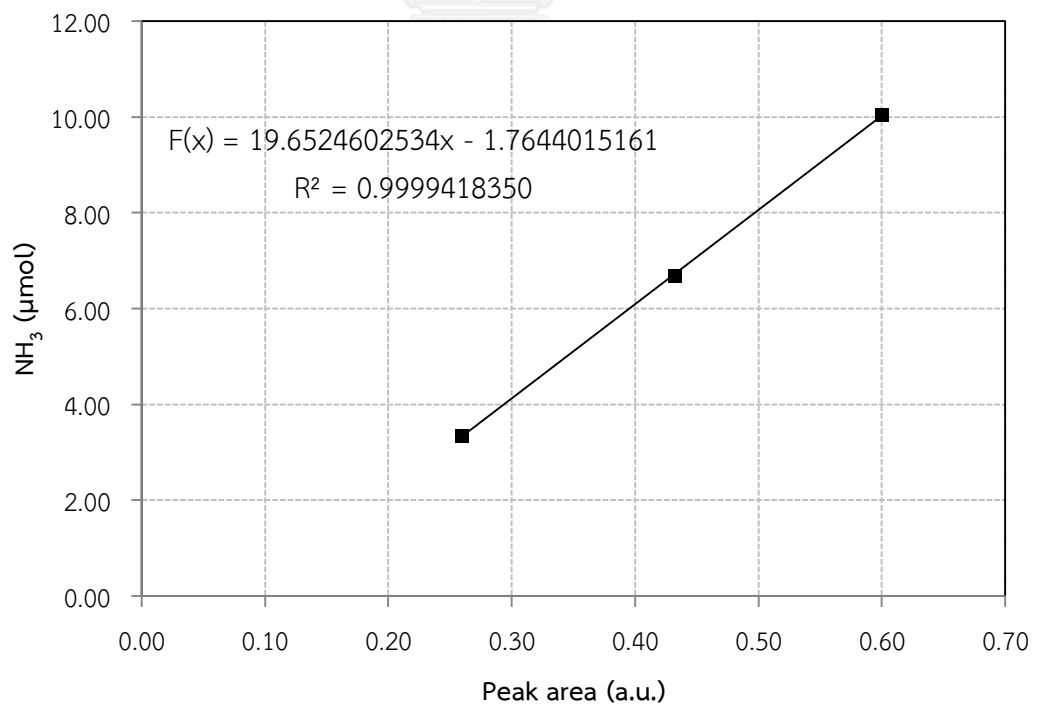
การคำนวณปริมาณตำแหน่งกรด สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากเทคนิค NH_3 -TPD ให้เป็นปริมาณตำแหน่งกรด โดยใช้กราฟมาตรฐาน (calibration curve) ซึ่งผลการแสดงค่าพื้นที่ใต้กราฟ และ ความเข้มข้นของ NH_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ ข.9

ตารางที่ ข.9 พื้นที่ใต้กราฟ NH_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Peak area	NH_3 low concentration (μmol)				NH_3 high concentration (μmol)		
	0.1339	0.2678	0.4017	0.6695	3.3475	6.6950	10.0425
1	0.0029	0.0052	0.0064	0.0110	0.2594	0.4265	0.5763
2	0.0025	0.0036	0.0055	0.0103	0.2453	0.4320	0.5534
3	0.0027	0.0047	0.0064	0.0110	0.2645	0.4492	0.6361
4	0.0025	0.0037	0.0055	0.0100	0.2683	0.4201	0.6343
average	0.0026	0.0043	0.0059	0.0106	0.2594	0.4320	0.6000



รูปที่ ข.1 Calibration curve ของ NH_3 ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0.1-0.7 μmol)



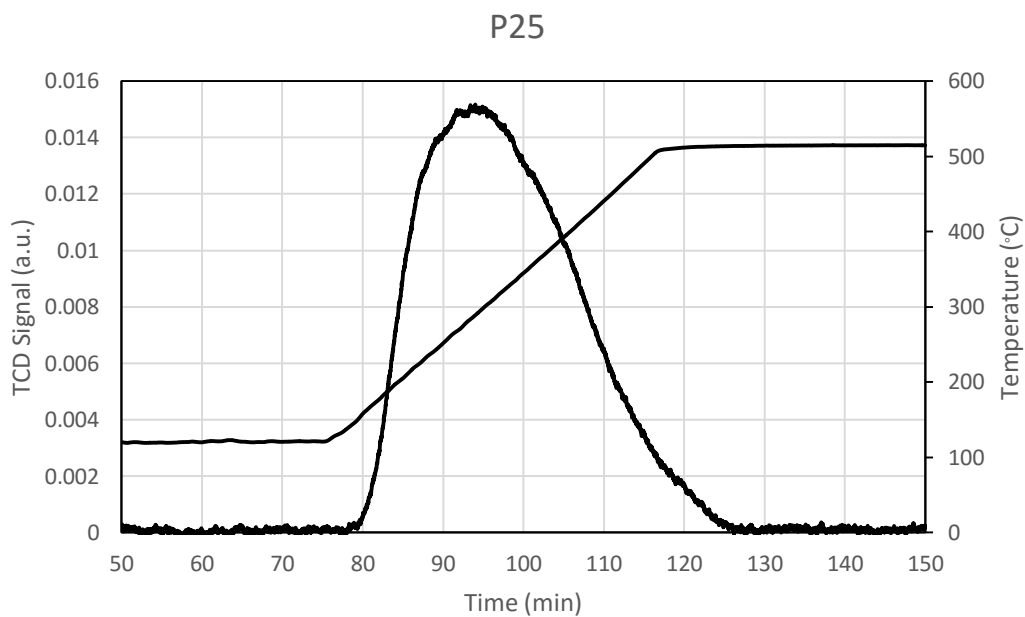
รูปที่ ข.2 Calibration curve ของ NH_3 ช่วงความเข้มข้นสูง (3-10 μmol)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดที่ได้จากเทคนิค NH_3 Temperature Programmed Desorption (NH_3 -TPD) ของตัวรองรับ (P25) และตัวเร่งปฏิกิริยาอานาเดียมออกไซด์ทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ ($\text{V}_2\text{O}_5 - \text{WO}_3 / \text{TiO}_2$) ในทุกสัดส่วน

ตารางที่ ข.10 แสดงค่าปริมาณตำแหน่งกรดทั้งหมดที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Pyridine adsorption และปริมาณตำแหน่งกรดที่มีการคายซับที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ที่วัดได้

ตารางที่ ข.10 ปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ TiO_2 (P25)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณไพรีดินที่ถูกดูดซับ ($\mu\text{mol/g.cat}$)	ปริมาณความเป็นกรด < 500°C ($\mu\text{mol/g.cat}$)
TiO_2	49.81	43.30
3V5W	97.47	48.71
3V6W	34.44	33.33
3V7W	63.10	43.88



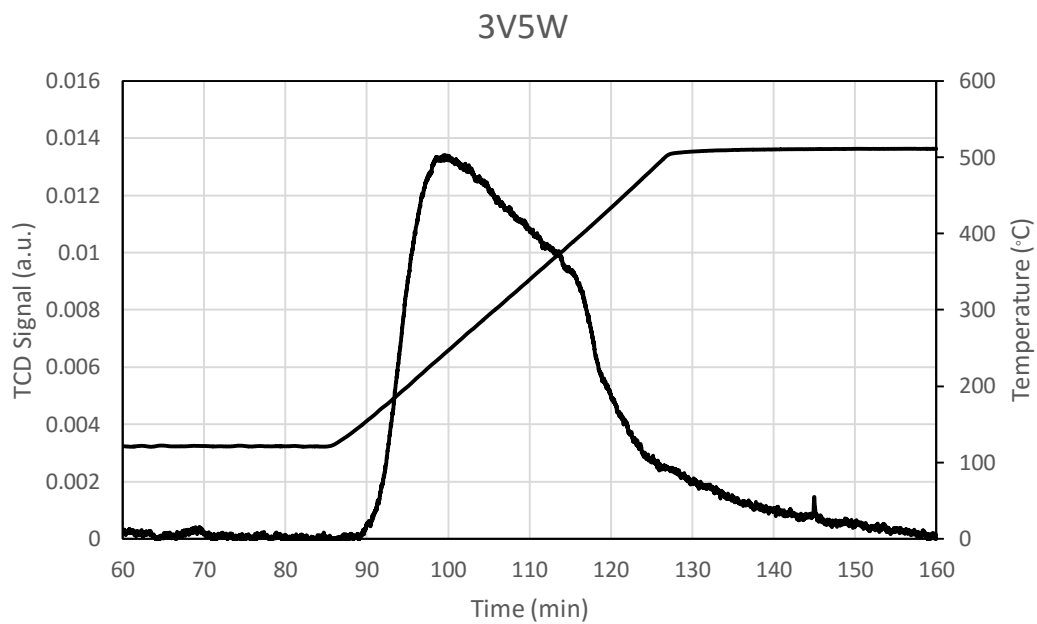
รูปที่ ข.3 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวรองรับ (P25)

ปริมาณแอมโมเนียที่คายซับ (Adsorb) จะคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ

ตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ (P25)

ปริมาณ 0.1 g มีพื้นที่ใต้กราฟ 0.31 คิดเป็น 4.33 μmol

ปริมาณ 1 g คิดเป็น 43.30 μmol



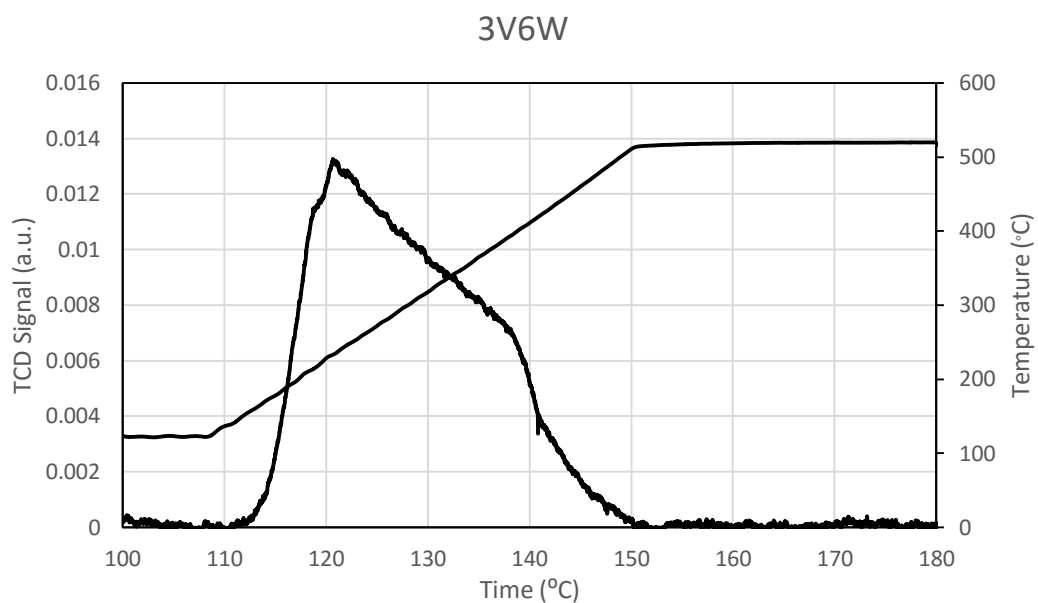
รูปที่ ข.4 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V5W

ปริมาณแอมโมเนียที่คายซับ (Adsorb) จะคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ

3V5W

ปริมาณ 0.1 g มีพื้นที่ใต้กราฟ 0.34 คิดเป็น 4.871 μmol

ปริมาณ 1 g คิดเป็น 48.71 μmol



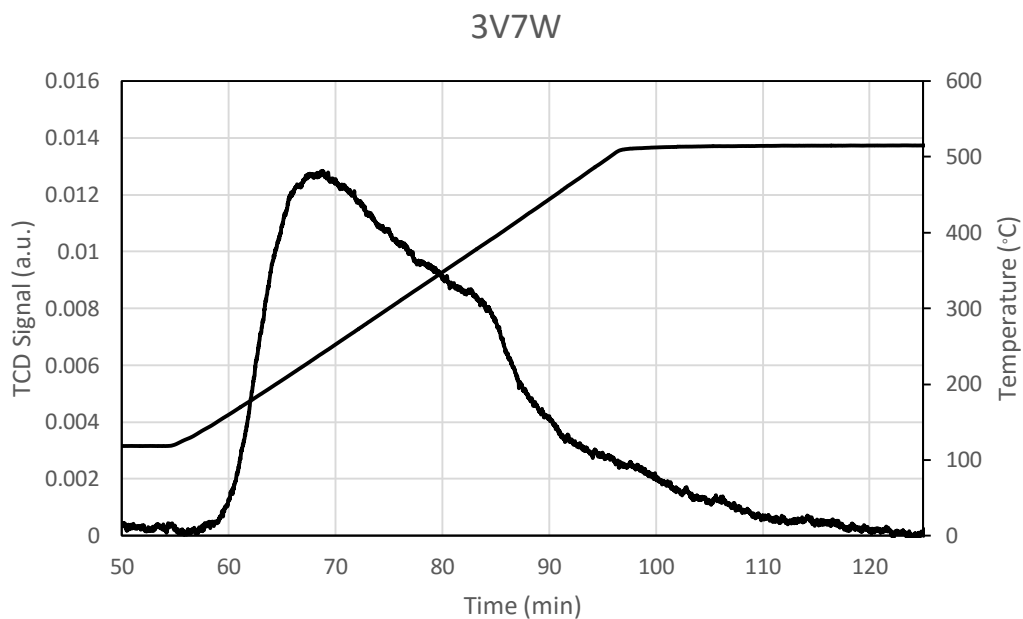
รูปที่ ข.5 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W

ปริมาณแอมโมเนียที่คายซับ (Adsorb) จะคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ

3V6W

ปริมาณ 0.1 g มีพื้นที่ใต้กราฟ .026 คิดเป็น 3.333 μmol

ปริมาณ 1 g คิดเป็น 33.33 μmol



รูปที่ ข.6 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V7W

ปริมาณแอมโมเนียที่คายซับ (Adsorb) จะคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ

3V7W

ปริมาณ 0.1 g มีพื้นที่ใต้กราฟ .031 คิดเป็น 4.388 μmol

ปริมาณ 1 g คิดเป็น 43.88 μmol

ภาคผนวก ค

กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) และ %Conversion

ค.1 กราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

ค.1-1 กราฟมาตรฐานในการคำนวณปริมาณเบนซีน (ppm) จากพื้นที่ใต้กราฟ

ความเข้มข้นของเบนซีน (ppm) คัดจาก

$$\text{Benzene concentration} = \frac{\text{Mass of benzene} \times \text{Inject volume} \times 10^6}{\text{M.W.of benzene} \times \text{Solution volume} \times \text{Mole of solution}}$$

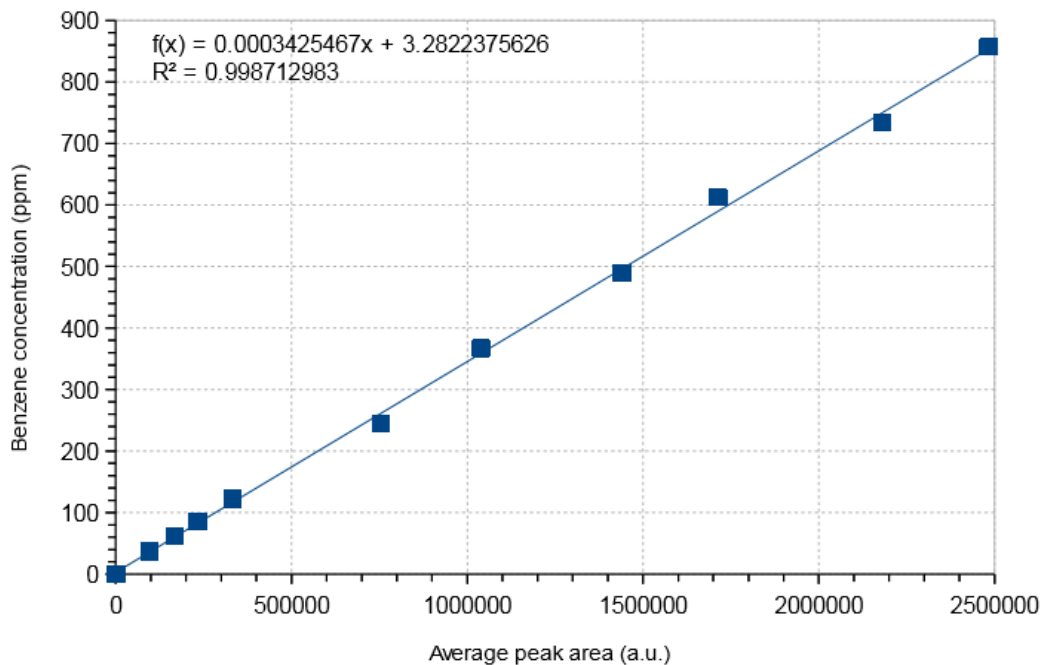
ตัวอย่างเช่น กรณีที่ฉีดสารละลายเบนซีน 0.3 μL

$$\text{ความเข้มข้นเบนซีน} = \frac{0.0427 \times 0.0003 \times 22,400 \times 10^6}{78.11 \times 100} = 36.74 \text{ ppm}$$

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการคำนวณของเบนซีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ppm)

Benzene (g.)	Solution (ml)	C _{BZ1} (mol/ml)	Sample (μL)	N _{BZ} (mol)	%N _G (mol.%)	Benzene (ppm)
0.0427	100	5.47E-06	0.3	1.64E-09	0.0037	36.74
0.0427	100	5.47E-06	0.5	2.73E-09	0.0061	61.23
0.0427	100	5.47E-06	0.7	3.83E-09	0.0086	85.72
0.0427	100	5.47E-06	1.0	5.47E-09	0.0122	122.45
0.0427	100	5.47E-06	2.0	1.09E-08	0.0245	244.91
0.0427	100	5.47E-06	3.0	1.64E-08	0.0367	367.36
0.0427	100	5.47E-06	4.0	2.19E-08	0.0490	489.81
0.0427	100	5.47E-06	5.0	2.73E-08	0.0612	612.26
0.0427	100	5.47E-06	6.0	3.28E-08	0.0735	734.72
0.0427	100	5.47E-06	7.0	3.83E-08	0.0857	857.17

พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของเบนซีนกับพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากเครื่อง GC ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด FID โดยแบ่งกราฟเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มข้นต่ำและช่วงความเข้มข้นสูง



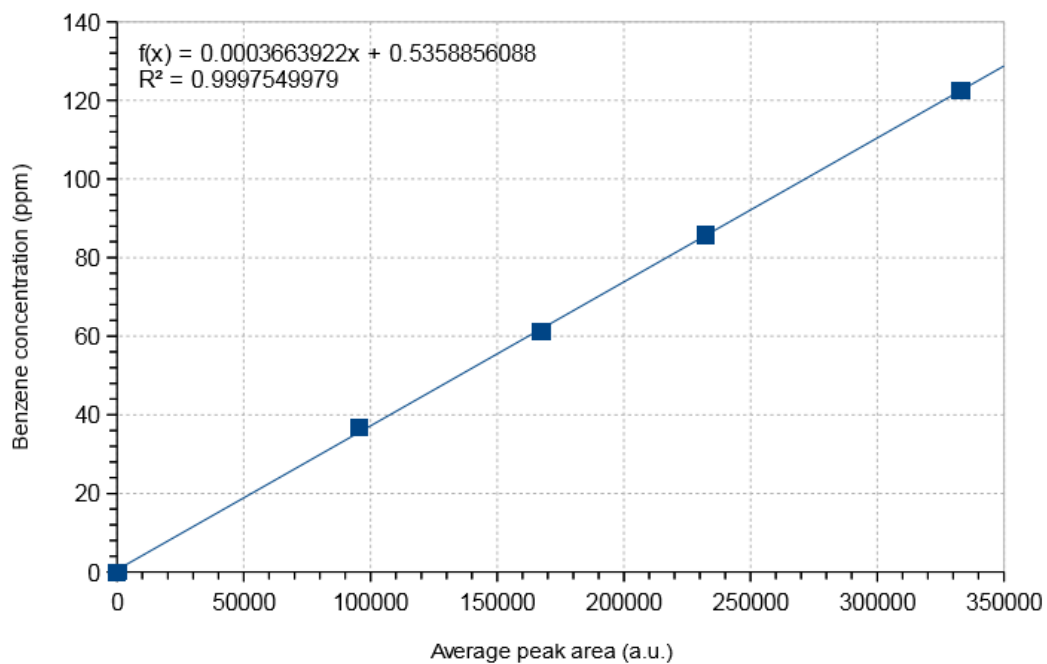
รูปที่ ค.1 Calibration curve ของเบนซีนในช่วงความเข้มข้นสูง (100-800 ppm)

$$0.0003425467x + 3.2822375626 = y$$

$$(0.0003425467 \times 520430.333) + 3.2822375626 = 181.554$$

โดยที่ y คือ ความเข้มข้นเบนซีน (ppm)

x คือ พื้นที่ใต้กราฟ



รูปที่ ค.2 Calibration curve ของเบนซีนในช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-120 ppm)

$$0.0003663922x + 0.5358856088 = y$$

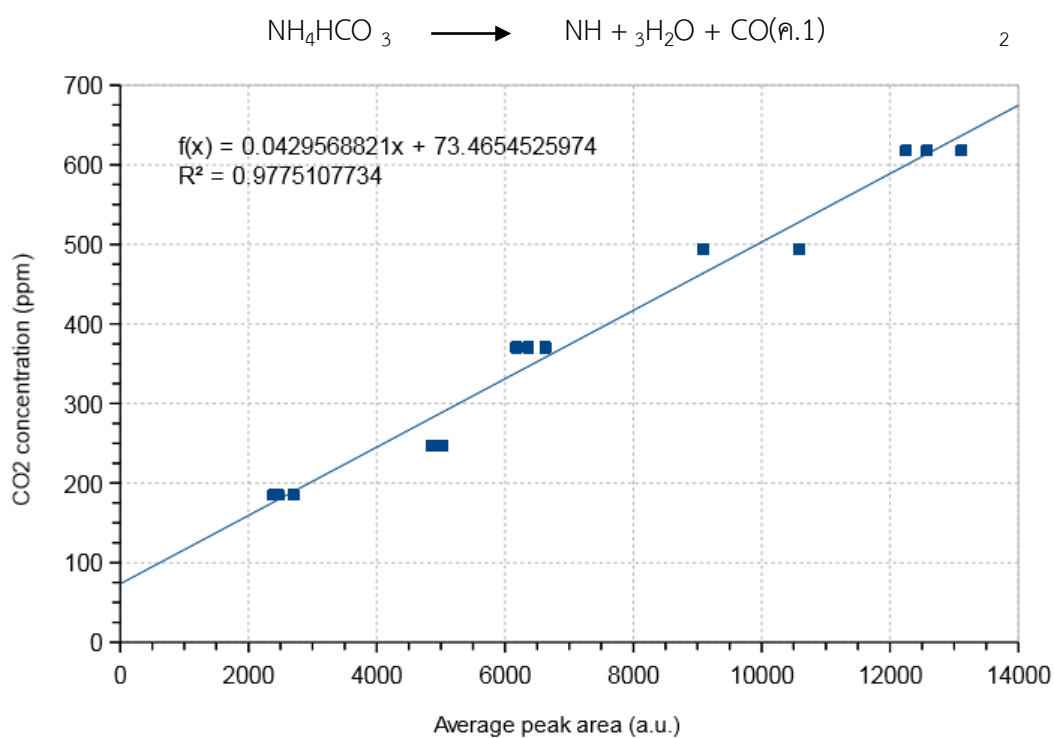
$$(0.0003663922 \times 283599.00) + 0.5358856088 = 104.444$$

โดยที่ y คือ ความเข้มข้นเบนซีน (ppm)

x คือ พื้นที่ใต้กราฟ

ค.1-2 กราฟมาตรฐานในการคำนวณปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ppm) จากพื้นที่ใต้กราฟ

กราฟมาตรฐานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำโดยการนำสารละลาย ammonium bicarbonate (NH_4HCO_3) ความเข้มข้น 0.1 mol/L ฉีดเข้าไปในคอลัมน์ GC ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด TCD ปริมาตร 1.0 – 0.3 μl เมื่อได้รับความร้อน สูงกว่า 50°C) สารตั้งต้นจะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ ค.1. และพล็อตกราฟระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับปริมาณแก๊ส CO_2



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

$$0.0429568821x + 73.4654525974 = y$$

$$0.0429568821 \times 2439.96073.4654525974 + (= 178.279$$

โดยที่ y คือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ppm)

x คือ พื้นที่ใต้กราฟ

ค.2 การคำนวณ % Conversion

ค.2-1 %Benzene conversion

$$\frac{[\text{Benzene}]_{\text{in}} - [\text{Benzene}]_{\text{out}}}{[\text{Benzene}]_{\text{in}}} \times 100 = \% \text{ Conversion}$$

$$\frac{268386.00 - 32548.667}{268386} \times 100 = 86.872 \%$$

ค.2-2 %Benzene conversion to CO₂ (based on total benzene in feed)

$$\frac{\frac{[\text{CO}_2]_{\text{out}}}{6}}{[\text{Benzene}]_{\text{in}} (\text{ppm})} \times 100$$

$$\frac{\frac{178.279}{6}}{104.444} \times 100$$

ค.2-3 %NO Conversion

$$\frac{[\text{NO}_x]_{\text{in}} - [\text{NO}_x]_{\text{out}}}{[\text{NO}_x]_{\text{in}}} \times 100$$

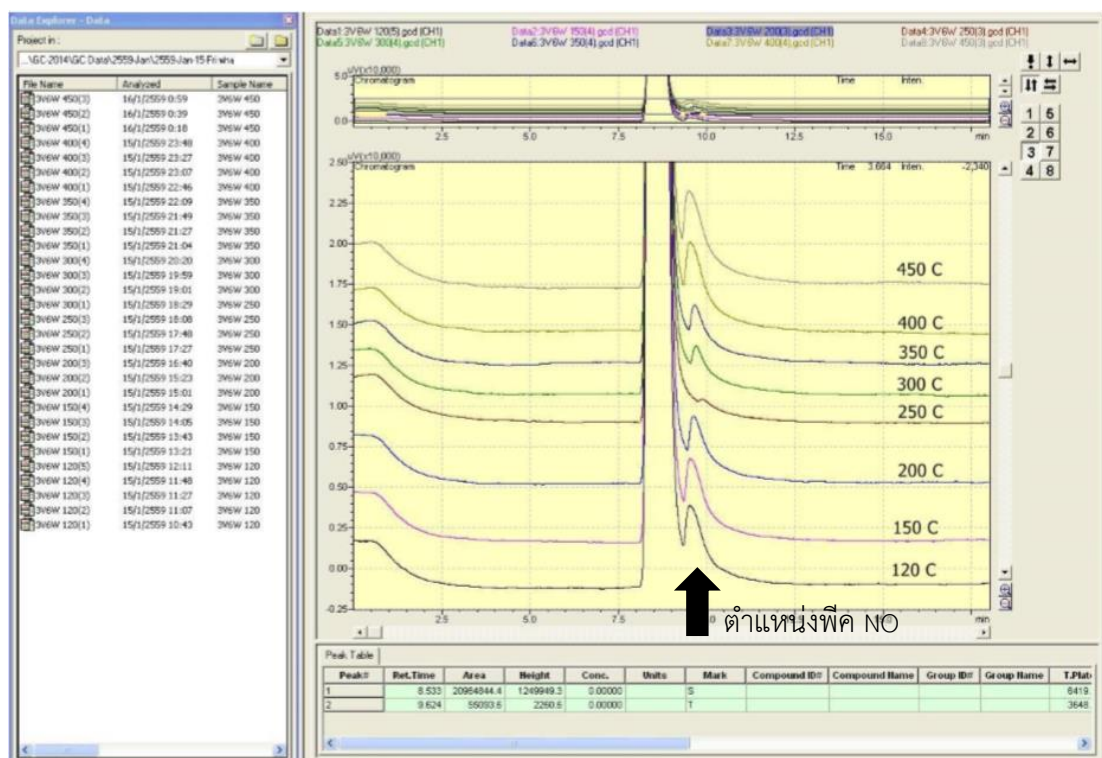
$$\frac{5336.792 - 1713.507}{5336.792} \times 100 = 67.893$$

ภาคผนวก ง

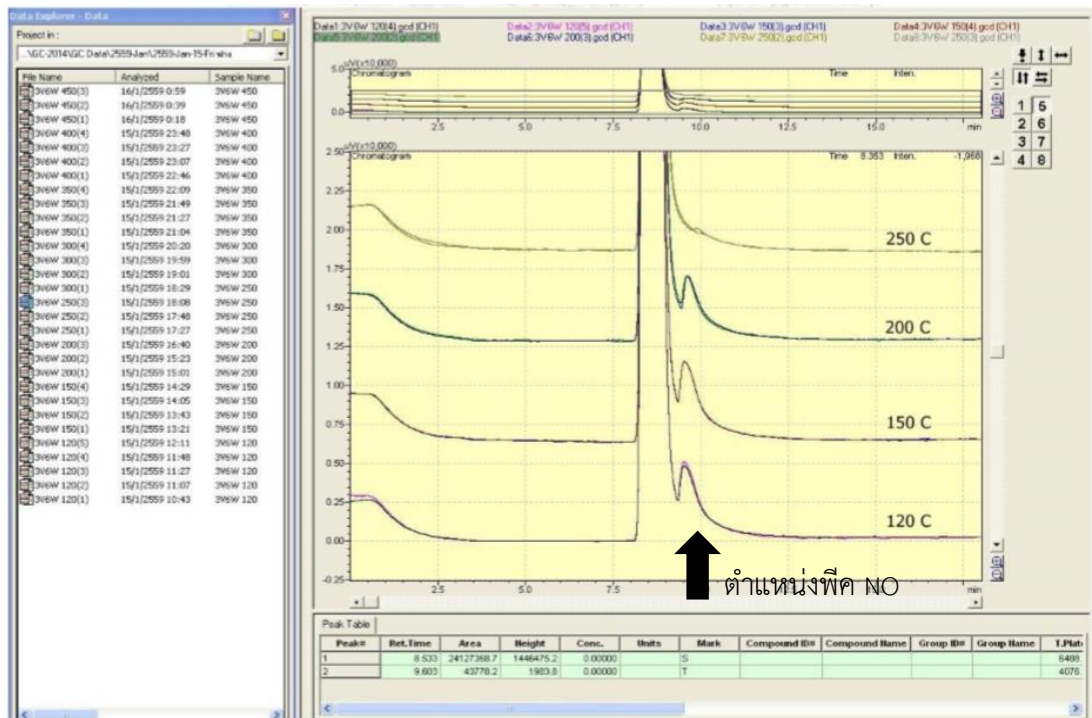
ตัวอย่างโครมาโทแกรม

ง.1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของไนตริกออกไซด์

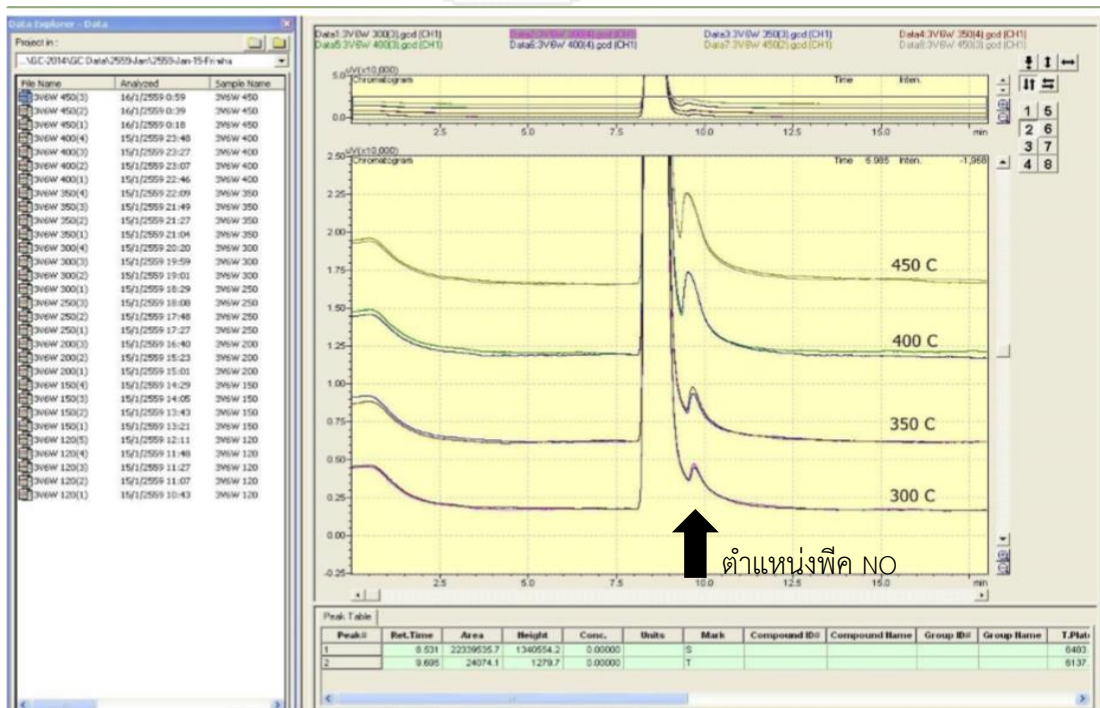
ตัวอย่างโครมาโทแกรมของการตรวจวัดปริมาณไนตริกออกไซด์ ที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC-2014) ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด ECD ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ในระบบเดี่ยว



รูปที่ ง.1 โครมาโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ในกระบวนการ SCR ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ ง.2 โครมาโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ในช่วงอุณหภูมิ 120-250°C (ทดสอบ repeatability ของการวัด)



รูปที่ ง.3 โครมาโทแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา 3V6W ในช่วงอุณหภูมิ 300-450°C (ทดสอบ repeatability ของการวัด)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววาสิตา จันทร์บุษราคัม เกิดเมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2535 ที่จังหวัดระยอง โดยสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนระยองวิทยาคม จังหวัดระยอง เมื่อปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และได้สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2556 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

