

สภามหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปฏิภณาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอลูมินา



นางสาวสิวลี

แสงธำรง

นางสาวสุจิรัตน์

แสนคำ

นางสาวสุภัชญา

ยศอาลัย

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

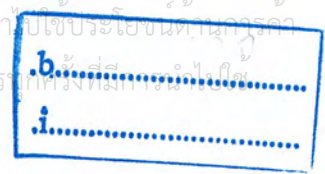
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....55685

วัน,เดือน,ปี.....24 พ.ค. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากฝ่าฝืนให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่แจ้งชื่อไว้



THE STUDY OF NO-CO REACTION OVER $\text{Rh}/\text{Al}_2\text{O}_3$



MISS SEEWALEE

SANGTUMRONG

MISS SUJIRAT

SANKUM

MISS SUPATCHAYA

YOTARLAI

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2003

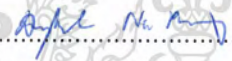
ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอนุภาคนาโน

จัดทำโดย นางสาวสีวลี แสงธำรง เลขประจำตัว 43010807
นางสาวสุจิตร์ณ์ แสนคำ เลขประจำตัว 43010810
นางสาวสุภัชญา ยศอาลัย เลขประจำตัว 43010816

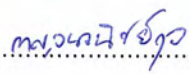
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ดวงกมล ณ ระนอง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ดร. ดวงกมล ณ ระนอง)


.....กรรมการ
(ดร. สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์)


.....กรรมการ
(ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอลูมินา			
จัดทำโดย	นางสาวสีวลี	แสงธำรง	เลขประจำตัว	43010807
	นางสาวสุจิรัตน์	แสนคำ	เลขประจำตัว	43010810
	นางสาวสุภัชญา	ยศอาลัย	เลขประจำตัว	43010816
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ดวงกมล ณะระนอง			
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง			

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอลูมินา โดยทำการทดลองเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 1 atm ณ สภาวะคงตัว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์อนุพันธ์แบบเบดนิ่ง (Differential packed-bed reactor) ในช่วงความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ตั้งแต่ 2.56×10^{-2} ถึง $2.45 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์เท่ากับ 2.56×10^{-2} และ $4.09 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ พบว่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์เทียบกับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์และอันดับการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.09 และ 0.13 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title The study of NO-CO reaction over Rh/Al₂O₃

By Miss Seewalee Sangtumrong ID.NO. 43010807
 Miss Sujirat Sankum ID.NO. 43010810
 Miss Supatchaya Yotarlai ID.NO. 43010816

Advisor Dr. Duangkamol Na-Ranong

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering
 Department of Chemical Engineering
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

The kinetics of NO-CO reaction over Rh/Al₂O₃ has been investigated. The experiment was conducted using a differential packed-bed reactor at 150°C and 1 atm. The rate of the reaction was measured at steady-state for two different NO concentrations ($C_{NO} = 2.56 \times 10^{-2}$ and $4.09 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$) in the CO concentration range of 2.56×10^{-2} to $2.45 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$. The results showed that the rate of NO reduction was 0.09 order with respect to the concentration of CO and that the rate of CO oxidation was 0.13 order with respect to the concentration of CO.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่านและผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ดวงกมล ณ ระนอง อาจารย์ผู้ควบคุมงานวิจัยที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนบางส่วนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ กราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนที่ทำให้กำลังใจและสนับสนุนโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
รายการสัญลักษณ์.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.1.1 การเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	5
2.1.2 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2.1 การดูดซับของแก๊สต่าง ๆ บนโรเดียม.....	17
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาระหว่าง ไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ของโรเดียม.....	18
2.2.3 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิด	18
บทที่ 3 การทดลอง.....	19
3.1 การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟ.....	19
3.2 การปรับสภาพและฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.1 ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
4.2 ผลของความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา...29	
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	34
ภาคผนวก ก รีเทนชันไทม์และกราฟมาตรฐานของแก๊สต่าง ๆ.....	35
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณหาค่าเปลี่ยนรูปเคมีและอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	41
ภาคผนวก ค อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาและอุปกรณ์ ที่ใช้ในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....5
รูปที่ 2.2	การทำปฏิกิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์เดียว.....7
รูปที่ 2.3	การทำปฏิกิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์คู่ชนิดเดียวกัน.....7
รูปที่ 2.4	การทำปฏิกิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์คู่ต่างชนิดกัน.....8
รูปที่ 2.5	กลไกแบบ Eley-Rideal.....8
รูปที่ 2.6	เบตของอนุพันธ์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....9
รูปที่ 2.7	ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์.....16
รูปที่ 3.1	แผนภาพเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟี.....23
รูปที่ 3.2	แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....24
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์กับ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....25
รูปที่ 4.2	ผลของความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่มีต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัว ของปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่.....26
รูปที่ 4.3	ผลของความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อการเข้าสู่ สภาวะคงตัวของปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์คงที่.....26
รูปที่ 4.4	ผลของการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ ภาวะมาตรฐาน.....28
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับอัตราการ เกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์.....29
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับอัตราการ เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์.....29
รูปที่ 4.7	กราฟลอการิทึมระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สไนตริกออกไซด์ กับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์.....30
รูปที่ 4.8	กราฟลอการิทึมระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์ กับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์.....30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 อันดับของปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์.....32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

C_i	=	ความเข้มข้นของสาร i [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$]
$C_{i,\text{in}}$	=	ความเข้มข้นขาเข้าของสาร i [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$]
$C_{i,\text{out}}$	=	ความเข้มข้นขาออกของสาร i [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$]
C_{i-S}	=	ความเข้มข้นของสาร i บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$]
C_t	=	ปริมาณจุดกัมมันต์ทั้งหมดต่อมวลตัวเร่งปฏิกิริยา [$\text{gmol}\cdot\text{g}^{-1}(\text{catalyst})$]
C_V	=	ปริมาณจุดกัมมันต์ที่ว่างเปล่าต่อมวลตัวเร่งปฏิกิริยา [$\text{gmol}\cdot\text{g}^{-1}(\text{catalyst})$]
$F_{i,\text{in}}$	=	อัตราการไหลเข้าเชิงโมลของสาร i [$\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$]
$F_{i,\text{out}}$	=	อัตราการไหลออกเชิงโมลของสาร i [$\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$]
$i\cdot S$	=	สาร i ถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์
K_{AD}, k_i	=	ค่าคงที่การดูดซับ [$\text{mol}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
K_D, k_{-i}	=	ค่าคงที่การคายซับ [s^{-1}]
K_S	=	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา [s^{-1}]
K_i	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของสาร i [$\text{mol}^{-1}\cdot\text{m}^3$]
r_{AD}	=	อัตราเร็วการดูดซับสุทธิ [$\text{gmol}\cdot\text{g}^{-1}(\text{catalyst})\cdot\text{s}^{-1}$]
r_D	=	อัตราเร็วการคายซับสุทธิ [$\text{gmol}\cdot\text{g}^{-1}(\text{catalyst})\cdot\text{s}^{-1}$]
$-r_i$	=	อัตราเร็วปฏิกิริยาของสาร i [$\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]
W	=	น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา [g]
X_i	=	ค่าการเปลี่ยนรูปเคมีของสาร i [-]

อักษรกรีก

V	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
α	=	อันดับการเกิดปฏิกิริยาของสาร A [-]
β	=	อันดับการเกิดปฏิกิริยาของสาร B [-]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวห้อยล่าง

in	=	ขาเข้า , ปากทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์
out	=	ขาออก , ปากทางออกเครื่องปฏิกรณ์
AD	=	การดูดซับ
D	=	การคายซับ
t	=	ทั้งหมด
v	=	ว่างเปล่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

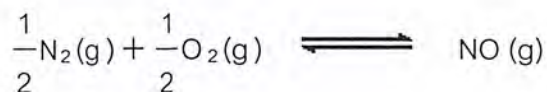
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

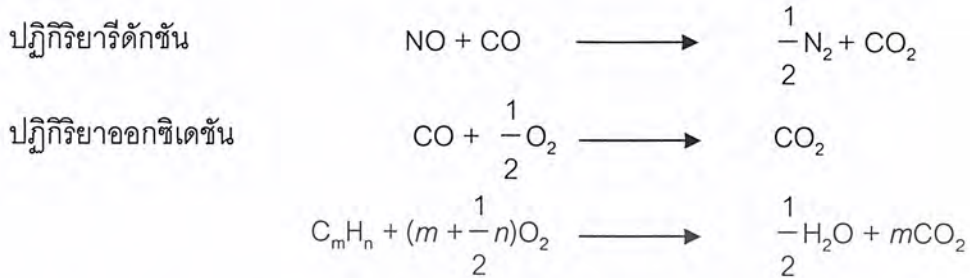
การเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบันทำให้ปริมาณการใช้รถยนต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศตามเมืองใหญ่ไม่เฉพาะแต่ในกรุงเทพมหานครเท่านั้น เพื่อเป็นการบรรเทาปัญหาดังกล่าวรัฐบาลได้ออกกฎหมายกำหนดให้รถยนต์รุ่นใหม่ต้องติดเครื่องกรองไอเสียเพื่อใช้ในการบำบัดแก๊สพิษก่อนปล่อยออกสู่อากาศ ถึงแม้ว่าเครื่องกรองไอเสียที่ใช้อยู่ปัจจุบันจะมีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีราคาแพงเนื่องจากได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้งานในประเทศที่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับปริมาณที่ยอมรับได้ของแก๊สพิษที่ถูกปลดปล่อยออกสู่อากาศที่เข้มงวดมาก จึงทำให้จำเป็นต้องใช้องค์ประกอบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สพิษสูงแม้จะมีราคาแพงก็ตาม สำหรับสถานการณ์ในประเทศไทยนั้นต่างจากประเทศที่พัฒนาแล้ว กล่าวคือข้อกำหนดต่าง ๆ ในกฎหมายที่ยังไม่เข้มงวดมากนัก ทำให้มีการใช้งานเครื่องกรองไอเสียทั้งที่เสื่อมประสิทธิภาพแล้ว นอกจากนี้ยังมีรถยนต์เก่าอีกมากมายที่ไม่ได้รับการติดตั้งเครื่องกรองไอเสียจึงอาจกล่าวได้ว่ารถยนต์เหล่านี้เป็นต้นเหตุสำคัญของมลพิษทางอากาศ หากเราสามารถพัฒนาเครื่องกรองไอเสียที่เหมาะสมกับการใช้งานภายในประเทศ คือ มีประสิทธิภาพที่ดีพอควร และมีราคาถูก ก็จะทำให้มีการติดตั้งเครื่องกรองไอเสียเพิ่มมากขึ้นและช่วยบรรเทาปัญหาได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้เครื่องกรองไอเสียที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีภายในประเทศจะช่วยลดการสูญเสียเงินตราที่ใช้ในการซื้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

แก๊สไอเสียที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องยนต์เบนซินของรถยนต์จะมีสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยที่คาร์บอนมอนอกไซด์และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิงและสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนนั้นเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง



เพื่อให้การลดปริมาณขององค์ประกอบสารพิษทั้งสามเกิดขึ้นพร้อมกันอย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องกรองไอเสียที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามทาง (Three - Way Catalyst) ซึ่งประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาหลักสามชนิดคือ โรเดียม (Rh) พลาตินัม (Pt) และแพลเลเดียม (Pd) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่โรเดียม จะทำหน้าที่หลักในการเร่งปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของไนตริกออกไซด์ ส่วนแพลตินัมและแพลลาเดียมจะทำหน้าที่หลักในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และ คาร์บอนมอนอกไซด์



โรเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติพิเศษในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของไนตริกออกไซด์ คือ จะสามารถทำงานได้ดีแม้ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (by-product) จำพวกแอมโมเนีย (NH_3) ต่างจากแพลตินัมและแพลลาเดียม ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสามทางจึงต้องมีโรเดียมเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยเสมอแม้จะมีราคาแพง

จากการศึกษานิววิจัยในสาขาวิศวกรรมปฏิกิริยาเชิงเร็ว (chemical reaction engineering) พบว่าตำแหน่งของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับและตำแหน่งการจัดวางตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับบางปฏิกิริยา และจากการศึกษาของ ดวงกมล [2] เกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิด คือ โรเดียมบนอะลูมินาและแพลตินัมบนอะลูมินา พบว่าลำดับการจัดวางตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองภายในเครื่องปฏิกรณ์จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ภายใต้สภาวะไม่คงตัว (unsteady state) ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องกรองไอเสียซึ่งมีสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะการขับที่รถยนต์ตลอดเวลาจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของตำแหน่งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

การออกแบบโดยใช้แบบจำลองจะสามารถทำได้ง่ายและใช้เวลาน้อยกว่าการออกแบบโดยอ้างอิงจากการทดลองเพียงอย่างเดียวและหากทำการศึกษากลศาสตร์ของปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ก็จะสามารถสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายการทำงานของเครื่องกรองไอเสียภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของโรเดียมยังมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณาหาตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ทดแทนโรเดียมในอนาคตด้วย งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการทำงานของโรเดียมในการเร่งปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องกรองไอเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อที่จะทำการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอลูมินาอย่างละเอียดต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลัก คือ

1. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมกับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาสำหรับการปรับสภาพและฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะคงตัวและอันดับของปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์อนุพันธ์แบบเบดนิ่ง (Differential packed-bed reactor) ในช่วงความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ตั้งแต่ $2.56 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ถึง $2.45 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์เท่ากับ $2.56 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ และ $4.09 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดัน 1 atm

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา
2. ออกแบบการทดลอง
3. สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
4. ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น
5. หาภาวะ (condition) การทำงานของเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ
6. สร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ กับพื้นที่ใต้กราฟ
7. หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพ (pretreatment) และฟื้นฟูสภาพ (re-activation) ตัวเร่งปฏิกิริยา
8. ทำการทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะคงตัว
9. วิเคราะห์ผลการทดลอง
10. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบข้อมูลพื้นฐานที่มีความจำเป็นในการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอย่างละเอียดต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

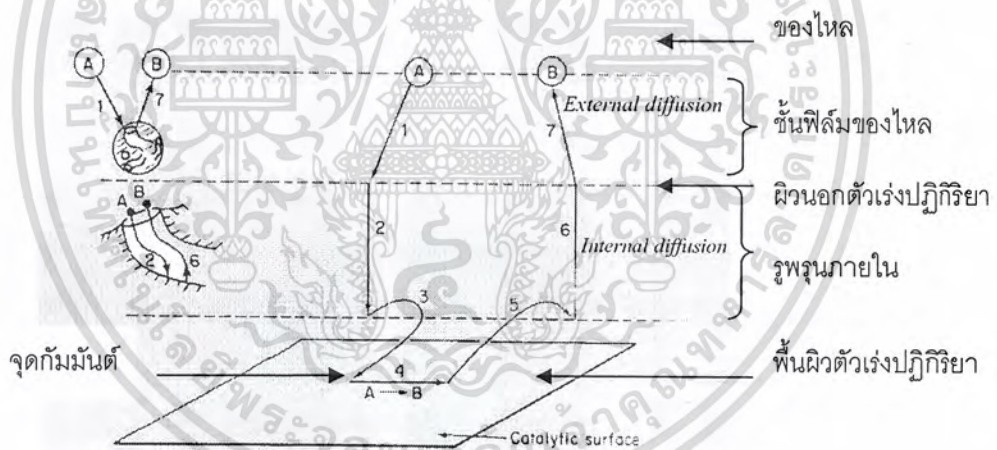
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 การเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวិวิหพันธ์

การเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิหพันธ์ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน คือ

1. สารตั้งต้นแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของไหลไปยังบริเวณผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. สารตั้งต้นแพร่ผ่านรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยา
3. สารตั้งต้นถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์ (Active site)
4. สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาบนจุดกัมมันต์
5. สารผลิตภัณฑ์ถูกคายซับออกจากจุดกัมมันต์
6. สารผลิตภัณฑ์แพร่ผ่านรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. สารผลิตภัณฑ์แพร่ผ่านชั้นฟิล์มของไหลไปยังของไหลภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิหพันธ์

กระบวนการข้างต้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ขั้นตอนการแพร่ (1, 2, 6 และ 7) ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงกายภาพ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา (3, 4 และ 5) ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงเคมี

ในกรณีที่ขั้นตอนของการแพร่ช้ากว่าขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาโดยรวมจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion limited) ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นสารตั้งต้นในของไหล จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้งานอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์

2.1.2.1 ภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาทางจลนพลศาสตร์

ในการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จะต้องทำการทดลองในภาวะที่ไม่มีผลของกระบวนการเชิงกายภาพต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวม จึงต้องกำหนดอัตราการไหลของสารป้อนและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมโดยอาศัยหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้ คือ

อัตราการไหลของสายป้อน

อัตราการไหลของสายป้อน (Feed) จะต้องไม่ช้าหรือเร็วเกินไป ทั้งนี้เพราะหากอัตราการไหลของสายป้อนช้าเกินไปจะทำให้ความต้านทานการแพร่ของสารตั้งต้นผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปยังพื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากและความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่พื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น ทำให้ไม่สามารถหาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แท้จริงได้ แต่ถ้าอัตราการไหลของสายป้อนเร็วเกินไปสารตั้งต้นจะมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อยเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อย อาจทำให้ความผิดพลาดจากการทดลองมีค่ามากขึ้น

ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องไม่ใหญ่เกินไป ทั้งนี้เพราะหากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาใหญ่เกินไปจะทำให้สารตั้งต้นต้องใช้เวลาในการแพร่ผ่านรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังจุดกัมมันต์นาน ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ณ จุดกัมมันต์ภายในตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นที่พื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในกรณีเช่นนี้ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่เฉพาะบริเวณผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถหาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แท้จริงได้

การลดความต้านทานการแพร่ภายในรูพรุนสามารถทำได้โดยการลดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ หรืออาจใช้การออกแบบรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าช่วย เช่น ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นวงแหวนหรือกลีบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

2.1.2.2 ปฏิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิริยา

ปฏิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิริยาสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบซึ่งสามารถแบ่งตามกลไกการเกิดปฏิริยาได้ 2 ประเภท คือ

1. Langmuir-Hinshelwood mechanism

กลไกการเกิดปฏิริยาแบบนี้สารตั้งต้นทุกตัวต้องถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์แล้วจึงเกิดปฏิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งประเภทตามจำนวนจุดกัมมันต์ที่มีส่วนร่วมในการทำปฏิริยาได้ดังนี้

1.1 การเกิดปฏิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์เดียว (Single site reaction)

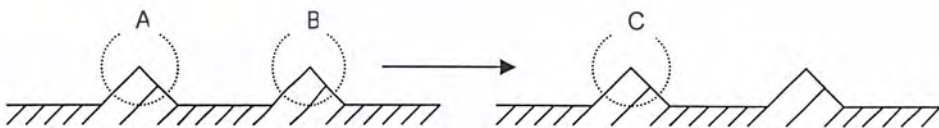
การเกิดปฏิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์เดียวนั้น สารตั้งต้นถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์แล้วจึงเกิดปฏิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 การทำปฏิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์เดียว (Single site reaction)

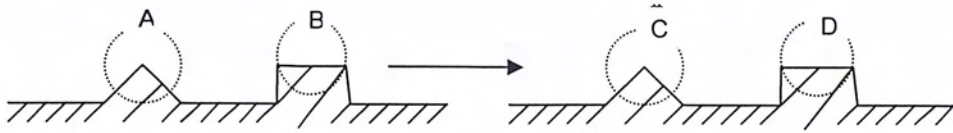
1.2 การเกิดปฏิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์คู่ (Dual site reaction)

การเกิดปฏิริยาแบบใช้จุดกัมมันต์คู่สามารถเกิดได้หลายแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิริยาและชนิดของจุดกัมมันต์ เช่น สารตั้งต้นสองชนิดทำปฏิริยากันโดยที่สารตั้งต้นแต่ละชนิดถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์ชนิดเดียวกันแล้วจึงเกิดปฏิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2.3), สารตั้งต้นแต่ละชนิดถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์ต่างชนิดกันแล้วจึงเกิดปฏิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.3 การทำปฏิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์คู่ชนิดเดียวกัน

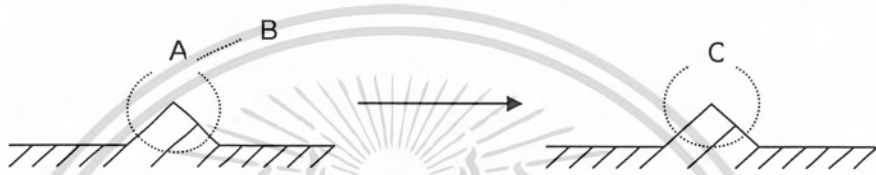
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การทำปฏิกิริยาโดยใช้จุดกัมมันต์คู่ต่างชนิดกัน

2. Eley-Rideal mechanism

กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้สารตั้งต้นชนิดหนึ่ง (A) จะถูกดูดซับบนจุดกัมมันต์ แล้วจึงทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอีกชนิดหนึ่งที่อยู่ในกระแสแก๊ส (B) กลายเป็นผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2.5)

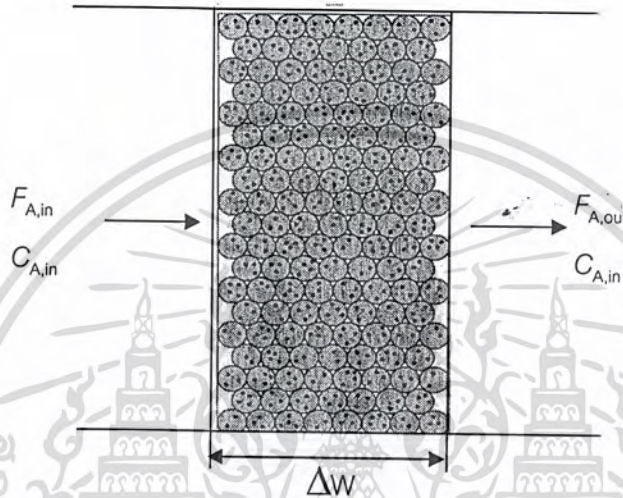


รูปที่ 2.5 กลไกแบบ Eley-Rideal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลอง [3]

การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลองสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่ต้องการศึกษา ในงานวิจัยนี้จะเลือกทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์อนุพันธ์แบบเบดนิ่ง (Differential packed-bed reactor) ซึ่งสามารถออกแบบได้ง่ายและสะดวกในการทดลอง ทั้งนี้การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์อนุพันธ์แบบเบดนิ่งนี้ควรออกแบบและทำการทดลองภายใต้ภาวะซึ่งสารตั้งต้นมีค่าการเปลี่ยนรูปเคมี (Conversion) น้อยกว่า 5%



รูปที่ 2.6 เบดของอนุพันธ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Differential catalyst bed)

ในการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาทำได้โดยเริ่มต้นจากการสร้างสมการดุลโมลของสาร A รอบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก Δw บรรจุอยู่ภายใน

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลเข้าเชิงโมล} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลออกเชิงโมล} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการผลิต} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right)$$

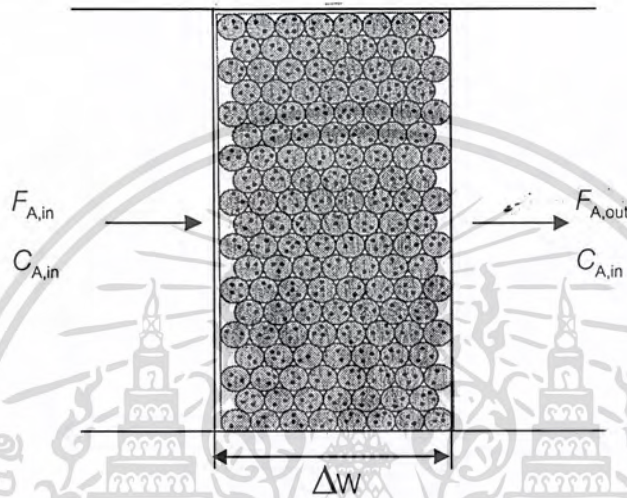
ที่สภาวะคงตัวอัตราการสะสมของสาร A ภายในปริมาตรที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น

$$\left(F_{A,in} \right) - \left(F_{A,out} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อ} \\ \text{มวลของตัวเร่งปฏิกิริยา} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{มวลของตัวเร่งปฏิกิริยา} \\ = \\ \emptyset \end{array} \right) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลอง [3]

การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลองสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่ต้องการศึกษา ในงานวิจัยนี้จะเลือกทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์อนุพันธ์แบบเบดนิ่ง (Differential packed-bed reactor) ซึ่งสามารถออกแบบได้ง่ายและสะดวกในการทดลอง ทั้งนี้การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์อนุพันธ์แบบเบดนิ่งนี้ควรออกแบบและทำการทดลองภายใต้ภาวะซึ่งสารตั้งต้นมีค่าการเปลี่ยนรูปเคมี (Conversion) น้อยกว่า 5%



รูปที่ 2.6 เบดของอนุพันธ์ตัวเร่งปฏิกิริยา (Differential catalyst bed)

ในการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาทำได้โดยเริ่มต้นจากการสร้างสมการดุลโมลของสาร A รอบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก Δw บรรจุอยู่ภายใน

$$\left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลเข้าเชิงโมล} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการไหลออกเชิงโมล} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการผลิต} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของสาร A} \end{array} \right)$$

ที่สภาวะคงตัวอัตราการสะสมของสาร A ภายในปริมาตรที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น

$$\left(F_{A,in} \right) - \left(F_{A,out} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อ} \\ \text{มวลของตัวเร่งปฏิกิริยา} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{มวลของตัวเร่งปฏิกิริยา} \\ = \theta \end{array} \right) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{A,in} - F_{A,out} + (r_A) \cdot (\Delta W) = 0$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$-r_A = \frac{F_{A,in} - F_{A,out}}{\Delta W}$$

สามารถเขียนในเทอมของความเข้มข้นได้ดังนี้

$$-r_A = \frac{V_O C_{A,in} - V C_{A,out}}{\Delta W}$$

ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ จะได้ว่า

$$-r_A = \frac{V_O C_{A,in} X_A}{\Delta W} \quad (2.1)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.4 การหากฎอัตราของปฏิกิริยา [3]

1. การหากฎอัตราอย่างง่าย

กฎอัตราอย่างง่ายเป็นสมการที่มีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและอันดับของปฏิกิริยา โดยที่อันดับของปฏิกิริยาจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในกรณีที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยมีสารตั้งต้นสองชนิดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$-r_A = k C_A^\alpha C_B^\beta \quad (2.2)$$

การหาค่าคงที่ต่าง ๆ (k, α, β) ของกฎอัตราทำได้โดยใส่ ln สมการ (2.2) ให้กลายเป็นสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\ln(-r_A) = \ln k + \alpha \ln C_A + \beta \ln C_B \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้ $y = \ln(-r_A)$, $x_1 = \ln C_A$, $x_2 = \ln C_B$, $a_0 = \ln k$, $a_1 = \alpha$ และ $a_2 = \beta$ จะเขียนสมการที่ (2.3) ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (2.4)$$

เมื่อทำการทดลอง N ครั้ง สำหรับการทดลองลำดับที่ j ($j = 1, 2, 3, \dots, N$) จะได้

$$y_j = a_0 + a_1 x_{1j} + a_2 x_{2j} \quad (2.5)$$

ค่า a_0, a_1, a_2 สามารถหาได้จากการแก้สมการ (2.6) ถึง (2.8)

$$\sum_{j=1}^N y_j = N a_0 + a_1 \sum_{j=1}^N x_{1j} + a_2 \sum_{j=1}^N x_{2j} \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{1j} y_j = a_0 \sum_{j=1}^N x_{1j} + a_1 \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 + a_2 \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{2j} \quad (2.7)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{2j} y_j = a_0 \sum_{j=1}^N x_{2j} + a_1 \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{2j} + a_2 \sum_{j=1}^N x_{2j}^2 \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหากฎอัตราจากกลไกการเกิดปฏิกิริยา

ในการหากฎอัตราจากกลไกการเกิดปฏิกิริยามักจะทำโดยใช้สมมติฐานของ Langmuir ที่ว่า

1. จำนวนจุดกัมมันต์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณคงที่
2. จุดกัมมันต์ทุกจุดมีลักษณะเหมือนกัน
3. สมรรถนะของจุดกัมมันต์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับสภาพหรือปริมาณของสารที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

การหากฎอัตราจากกลไกการเกิดปฏิกิริยามี 2 วิธี ดังนี้

2.1 วิธีกำหนดขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยารวม (Rate limiting step)

วิธีนี้จะทำโดยเลือกให้ขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งในกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่สมมติขึ้นเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเกิดปฏิกิริยารวม เช่น พิจารณาการทำปฏิกิริยาของสาร A กลายเป็นสาร B ดังสมการ



1. สมมติให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็น ดังนี้



2. สมมติขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา

โดยทั่วไปการดูดซับและการคายซับของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วและขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นขั้นตอนที่เกิดอย่างช้า ๆ ดังนั้นจึงสามารถสมมติให้ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยารวม ในสภาวะเช่นนี้สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยาดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจนอยู่ในสภาวะสมดุลและอัตราเร็วปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณของสาร i ($C_{A \cdot S}$) ที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

$$-r'_A = r_s = k_s \left(C_v C_{A \cdot S} - \frac{C_{A \cdot S} C_v}{K_s} \right) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หาความเข้มข้นของสาร i ที่ถูกดูดซับ โดยใช้ขั้นตอนอื่นที่ไม่ได้เลือกให้เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยามาหาค่า $C_{i,S}$ ($C_{A,S}$ และ $C_{B,S}$)

เนื่องจากเลือกให้ปฏิกิริยาที่พื้นผิวให้เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา จึงได้ว่า k_{AD} และ k_D มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น

$$\frac{r_{AD}}{k_{AD}} \approx 0 \quad C_{A,S} = C_A K_A C_V \quad (2.13)$$

$$\frac{r_D}{k_D} \approx 0 \quad C_{B,S} = \frac{C_B C_V}{K_D} = K_B C_B C_V \quad (2.14)$$

4. ทำดุลของจำนวนจุดกัมมันต์ได้

$$C_t = C_v + C_{A,S} + C_{B,S} \quad (2.15)$$

5. หากกฎอัตราโดยเริ่มจากแทนค่า $C_{A,S}$ จากสมการที่ (2.13) และ $C_{B,S}$ จากสมการที่ (2.14) ลงในสมการที่ (2.15) เพื่อหาค่า C_V จากนั้นนำค่า C_V กลับไปแทนสมการที่ (2.13) และ (2.14) จะได้ $C_{A,S}, C_{B,S}$ เมื่อนำค่า $C_V, C_{A,S}, C_{B,S}$ แทนลงในสมการที่ (2.12) จะได้

$$-r'_A = r_s = \frac{k_s C_t^2 K_A \left(C_A - \frac{C_B}{K_C} \right)}{(1 + K_A C_A + K_B C_B)^2} \quad (2.16)$$

6. เปรียบเทียบกฎอัตราที่ได้จากข้อ 5 กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ถ้ากฎอัตราที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง แสดงว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาและขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาที่สมมุติขึ้นถูกต้อง แต่ถ้ากฎอัตราที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองแสดงว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยา และ/หรือ ขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาที่สมมุติขึ้นไม่ถูกต้อง จะต้องหากฎอัตราใหม่ตามขั้นตอนดังนี้

6.1 กรณีที่ใช้กลไกการเกิดปฏิกิริยาเดิม ให้สมมุติขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาใหม่แล้วทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 6

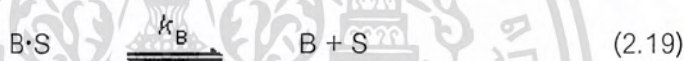
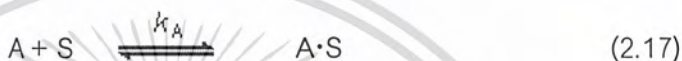
6.2 สมมุติกลไกการเกิดปฏิกิริยาใหม่จากนั้นทำเช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 2 ถึง 6

2.2 วิธี Pseudo steady state hypothesis

ในกรณีที่ปฏิกิริยามีขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งขั้นตอนหรือปฏิกิริยาไม่มีขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา จะไม่สามารถใช้วิธีกำหนดขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาารวมได้ จำเป็นต้องใช้วิธี Pseudo steady state hypothesis แทน วิธีนี้มีสมมติฐานเพิ่มเติม คือ อัตราการดูดซับสุทธิของสาร intermediate ชนิดต่าง ๆ บนพื้นผิวมีค่าเป็นศูนย์

$$r^*_{i-s} = 0$$

เช่น ในกรณีที่กลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ (2.17) ถึง (2.19)



จะได้กฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิว

$$-r'_A = r'_S = k_S C_{A \cdot S} \tag{2.20}$$

จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาารวมของตัวถูกดูดซับแต่ละชนิด (A·S และ B·S) มีค่าดังนี้

$$r^*_{A \cdot S} = k_A C_A C_V - k_{-A} C_{A \cdot S} - k_S C_{A \cdot S} = 0 \tag{2.21}$$

$$r^*_{B \cdot S} = k_S C_{A \cdot S} - k_B C_{B \cdot S} + k_{-B} C_B C_V = 0 \tag{2.22}$$

แก้สมการ(2.21) และ (2.22) จะได้ $C_{A \cdot S}$ และ $C_{B \cdot S}$ ดังนี้

$$C_{A \cdot S} = \frac{k_A C_A C_V}{k_{-A} + k_S} \tag{2.23}$$

$$C_{B \cdot S} = \frac{k_S C_{A \cdot S} + k_{-B} C_B C_V}{k_B} = \left(\frac{k_S k_A C_A}{k_B (k_{-A} + k_S)} + \frac{k_{-B}}{k_A} C_B \right) C_V \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $C_{A \cdot S}$ ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$r'_A = \frac{k_A k_S}{k_{-A} + k_S} C_A C_V \quad (2.25)$$

ทำดูของจำนวนจุดกัมมันต์

$$C_t = C_V + C_{A \cdot S} + C_{B \cdot S} \quad (2.26)$$

และแทนค่า $C_{A \cdot S}$, $C_{B \cdot S}$ จากสมการ(2.23) และ (2.24) ลงในสมการที่ (2.26) จะได้ค่า C_V จากนั้นแทนค่า C_V ลงในสมการที่ (2.25) จะได้

$$-r'_A = \left(\frac{k_A k_S C_t}{k_{-A} + k_S} \right) \frac{C_A}{1 + \frac{k_A}{k_{-A} + k_S} \left(1 + \frac{k_S}{k_B} \right) C_A + \frac{k_{-B}}{k_B} C_B} \quad (2.27)$$

เมื่อกำหนดให้ $K_B = \frac{k_{-B}}{k_B}$, $K_A = \frac{k_{-A}}{k_A}$ สมการ (2.27) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$-r'_A = \left(\frac{K_A k_S C_t}{1 + \frac{k_S}{k_{-A}}} \right) \frac{C_A}{1 + \frac{k_A}{k_S} K_A C_A + K_B C_B} \quad (2.28)$$

เมื่อปฏิกิริยาที่พื้นผิวเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิว (k_S) จะมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่การคายซับมาก ๆ นั่นคือ $1 \gg \frac{k_S}{k_{-A}}$ ทำให้กฎอัตราจากสมการที่ (2.28)

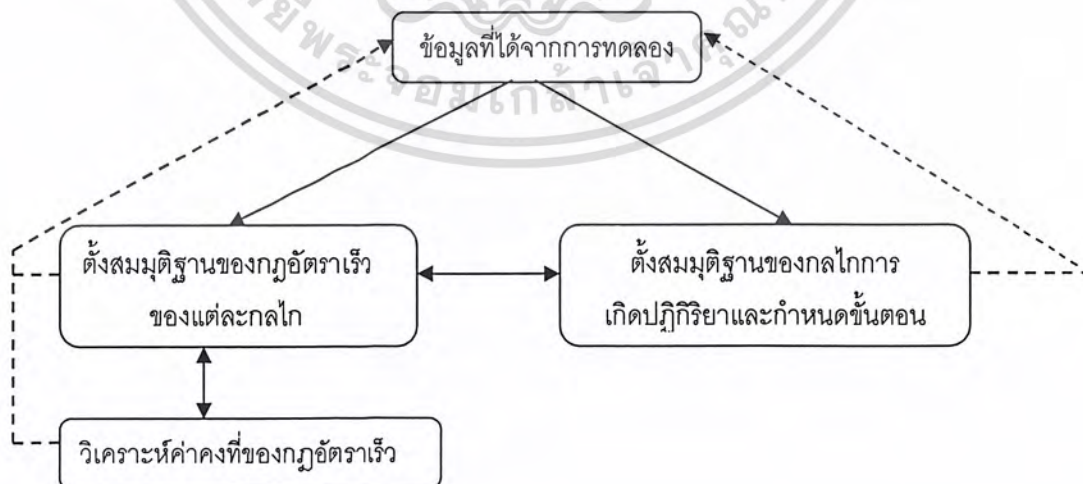
กลายเป็น
$$r'_A = \frac{k C_A}{1 + K_A C_A + K_B C_B} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบอื่น ๆ มีกฎอัตราดังนี้

จุดกัมมันต์เดี่ยว (Single site reaction) $A \cdot S \rightarrow B \cdot S$	$-r'_A = \frac{k C_A}{1 + K_A C_A + K_B C_B}$
จุดกัมมันต์คู่ (Dual site reaction) $A \cdot S + S \rightarrow B \cdot S + S$ $A \cdot S + B \cdot S \rightarrow C \cdot S + S$	$-r'_A = \frac{k C_A}{(1 + K_A C_A + K_B C_B)^2}$ $-r'_A = \frac{k C_A C_B}{(1 + K_A C_A + K_B C_B + K_C C_C)^2}$
Eley-Rideal $A \cdot S + B \rightarrow C \cdot S$	$-r'_A = \frac{k C_A C_B}{1 + K_A C_A + K_C C_C}$

การศึกษาทางจลนพลศาสตร์สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังรูปที่ 2.7 คือเริ่มจากการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลอง สมมุติกลไกการเกิดปฏิกิริยาและหากฎอัตราของกลไกที่สมมุติขึ้น หากผลการทดลองสอดคล้องกับสมการอัตราที่ได้ แสดงว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่สมมุตินั้นน่าจะถูกต้อง ทั้งนี้อาจจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอื่น เช่น ข้อมูลทาง Infrared spectroscopy (IR) ที่เกี่ยวกับลักษณะการดูดซับของสารต่าง ๆ บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อยืนยันความถูกต้องของกลไกและกฎอัตราให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นปฏิกิริยาหนึ่งที่เกิดขึ้นในระบบกรองไอเสียของยานยนต์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์, ไนโตรเจนและไนตรัสออกไซด์ โดยความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาและการเลือกเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา, อุณหภูมิของปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้น เป็นต้น

ลำดับของความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ของโลหะมีค่า คือ รูทีเนียม (Ru) > โรเดียม (Rh) > แพลลาเดียม (Pd) > พลาตินัม (Pt) ซึ่งในสถานะที่อุณหภูมิตำรวมถึงที่มีออกซิเจนหรือไฮโดรเจน โรเดียมจะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าแพลลาเดียมและพลาตินัม นอกจากนี้ในสถานะที่อุณหภูมิสูงโรเดียมยังทำให้เกิดไนตรัสออกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ส่วนรูทีเนียมถึงแม้ว่าจะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาสูง แต่จะทำให้เกิดออกไซด์ที่เป็นพิษ ดังนั้นโรเดียมจึงถูกเลือกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในระบบกรองไอเสียของยานยนต์ [4]

2.2.1 การดูดซับของแก๊สต่างๆ บนโรเดียม

จากการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอนุภาคนาของ William และคณะ [5] พบว่าการดูดซับของไนตริกออกไซด์สามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ แบบเชิงเส้น (linear) และแบบ gem-dinitrosyl โดยที่การดูดซับแบบเชิงเส้นอาจมีสถานะทางไฟฟ้าได้ 3 อย่าง คือ $Rh-NO^{\delta-}$, $Rh-NO$ และ $Rh-NO^{\delta+}$ ส่วนการดูดซับแบบ gem-dinitrosyl ($Rh(NO)_2$) จะเป็นการดูดซับที่มีไนตริกออกไซด์ 2 โมเลกุลอยู่บนจุดกัมมันต์เพียงจุดเดียวซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของโรเดียมที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของไนตริกออกไซด์ของโรเดียมที่สูงกว่าโลหะชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกดูดซับบนพื้นผิวของโรเดียมได้ 3 แบบ คือ แบบเชิงเส้น ($Rh-CO$) แบบบริจด์ (Rh_2CO) และแบบ gem-dicarbonyl ($Rh(CO)_2$) การตรวจพบ $Rh(CO)_2$ และ $Rh(NO)_2$ นั้นสอดคล้องกับรายงานที่ Kathleen [4] และ Shelef [6] ได้รวบรวมไว้ เมื่อศึกษาการดูดซับของแก๊สต่าง ๆ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่ามีสารถูกดูดซับอยู่หลายชนิดเกิดขึ้นพร้อมกันบนพื้นผิวของโรเดียม คือ $Rh(NO)(CO)$, $Rh-NCO$, $Rh-CN$ และคาร์บอนเนต โดยที่ $Rh-NCO$ เป็นสารที่ถูกดูดซับที่ไม่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ของโรเดียม

2.2.2.1 การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาของ William และคณะ [5] พบว่าภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยามีผลกระทบต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก โดยที่การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อนแล้วตามด้วยการทำปฏิกิริยารีดักชันจะมีทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวสูงกว่าการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการทำปฏิกิริยารีดักชันก่อน

2.2.2.2 อุณหภูมิของปฏิกิริยา

การศึกษาของ William และคณะ [5] ยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยามีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของโรเดียมเป็นอย่างมาก กล่าวคือ ค่าการเปลี่ยนรูปเคมีของไนตริกออกไซด์ และค่าการเลือกเกิดไนตรัสออกไซด์และไนโตรเจน ดังนี้คือ เมื่อทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิต่ำจะได้ค่าการเปลี่ยนรูปเคมีของไนตริกออกไซด์ต่ำ ค่าการเลือกเกิดไนตรัสออกไซด์มาก และค่าการเลือกเกิดไนโตรเจนน้อย แต่เมื่อทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิสูงจะได้ค่าการเปลี่ยนรูปเคมีของไนตริกออกไซด์สูงขึ้นและจะมีค่าประมาณ 100% เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 228 °C ส่วนค่าการเลือกเกิดไนตรัสออกไซด์นั้นจะต่ำลง แต่ค่าการเลือกเกิดไนโตรเจนจะมีค่ามากขึ้น

2.2.3 การศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิด

จากการศึกษาของ ดวงกมล [2] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอลูมินา ($\text{Rh}/\text{Al}_2\text{O}_3$) สามารถเร่งปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ภายใต้ภาวะคงตัว (steady condition) ได้ดีกว่าแพลตินัมบนอลูมินา ($\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$) และประสิทธิภาพของแพลตินัมบนอลูมินาจะดีขึ้นเมื่อปฏิบัติงานภายใต้ภาวะไม่คงตัว (unsteady condition) ซึ่งอาจทำงานได้ดีกว่าโรเดียมบนอลูมินาสำหรับบางภาวะ

การศึกษามูลของการจัดเรียงตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน คือ เครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดบรรจุอยู่เป็นชั้นภายใน (เครื่องปฏิกรณ์ A มีแพลตินัมบนอลูมินา 0.25 กรัม บรรจุที่ด้านทางเข้าและโรเดียมบนอลูมินา 0.25 กรัม บรรจุที่ด้านทางออก และเครื่องปฏิกรณ์ B มีโรเดียมบนอลูมินา 0.25 กรัม บรรจุที่ด้านทางเข้าและแพลตินัมบนอลูมินา 0.25 กรัม บรรจุที่ด้านทางออก) พบว่าเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันเมื่อปฏิบัติงานภายใต้ภาวะคงตัว แต่เครื่องปฏิกรณ์ A จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ B เกือบสองเท่าเมื่อปฏิบัติงานภายใต้ภาวะไม่คงตัว การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าลำดับการจัดวางตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์โดยเฉพาะเมื่อเครื่องปฏิกรณ์ถูกใช้งานภายใต้ภาวะไม่คงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (GC), การปรับสภาพและฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี และการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

3.1 การวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

3.1.1 สารเคมี

1. Porapak Q (80-100 เมช) ของบริษัท Waters Corporation
2. Molecular Sieve 5A (60-80 เมช) ของบริษัท G-L Science
3. ฮีเลียมบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center

3.1.2 อุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟีที่ใช้ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ (รูปที่ 3.1) คือ

1. ตัวตรวจวัดแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD)
2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Analog ที่วัดได้จาก TCD
3. ตู้อบที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิและสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วง 30 °C ถึง 80 °C
4. คอลัมน์ที่ใช้แยกสาร 2 คอลัมน์ ได้แก่
 - 4.1. คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.055 นิ้ว ยาว 2 m ภายในบรรจุ Porapak Q เพื่อใช้แยกคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O)
 - 4.2. คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.055 นิ้ว ยาว 5 m ภายในบรรจุ Molecular Sieve 5A เพื่อใช้แยกไนโตรเจน (N₂), ไนตริกออกไซด์ (NO) และคาร์บอนมอนอกไซด์(CO)

3.1.3 การทดลอง

3.1.3.1 การหา retention time ของแก๊สต่าง ๆ

1. เก็บตัวอย่าง (sampling) แก๊สแต่ละชนิด (ไนตริกออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์, ไนโตรเจนและไนตรัสออกไซด์)
2. วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี
3. หาเวลาการเกิดพีกของแก๊สแต่ละชนิด

3.1.3.2 การทำกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ กับพื้นที่ใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ภาวะที่ใช้สำหรับเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ

อุณหภูมิ

คอลัมน์แยกสาร	50 °C
คอลัมน์เปล่า (Blank column)	25 °C
เครื่องตรวจวัด (TCD)	100 °C
การลดทอนกระแส (Attenuation)	1
อัตราการไหลของ He	$3.82 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
ปริมาตรของสารตัวอย่าง	$2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

3.2 การปรับสภาพและฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.1 สารเคมี

1. ออกซิเจนบริสุทธิ์ (High purity grade) 99.99% ของบริษัท TIG
2. ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center
3. ฮีเลียมบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn Lab Center

3.2.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับสภาพและฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา (เห็นประกอบที่ 3.2) มี

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส (Flow controller)
การควบคุมอัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ จะใช้ มีเตอร์ริงวาล์ว (Metering valve)
2. เครื่องปฏิกรณ์เคมี (Reactor)
เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.12 นิ้ว ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับแก๊สต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูง

3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) และเครื่องทำความร้อน (Heater)

เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้เป็นแบบ PID ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ได้ในช่วง 30°C ถึง 600°C โดยมีเครื่องทำความร้อนเป็นแหล่งให้ความร้อนที่สามารถให้ความร้อนได้ถึง 3000 Watt และมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K) เป็นตัววัดอุณหภูมิ

3.2.3 การทดลอง

3.2.3.1 การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

การปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำในครั้งแรกเพียงครั้งเดียวก่อนการทำปฏิกิริยาโดย มีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดฮีเลียมให้ไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์
2. เพิ่มอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นให้เท่ากับ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. เปลี่ยนให้ออกซิเจนไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. เปลี่ยนให้ฮีเลียมไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 10 นาที
5. เปลี่ยนให้ไฮโดรเจน ไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.2.3.2 การฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนในการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมือนกับการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาแต่จะเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้จาก $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $450\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.2.4 ภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพและฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิ

การปรับสภาพ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

การฟื้นฟูสภาพ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$

อัตราการไหล

ออกซิเจน $1.33 \times 10^{-6}\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

ไฮโดรเจน $3.33 \times 10^{-7}\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

ฮีเลียม $1.33 \times 10^{-6}\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

3.3 การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

3.3.1 สารเคมี

1. 1% wt $\text{Rh}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ขนาด 60-80 เมช ซึ่งเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation) โดยรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการเตรียมจะเหมือนกับวิธีที่ใช้ในการเตรียม $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [1] แต่จะใช้สารละลายของเกลือ RhCl_3 เป็นสารละลายตั้งต้น (precursor) แทน

2. ไนตริกออกไซด์ในฮีเลียม (NO/He) ความเข้มข้นจากถัง $2.46 \times 10^{-1}\text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ของ บริษัท BOC GASES

3. คาร์บอนมอนอกไซด์ในฮีเลียม (CO/He) ความเข้มข้นจากถัง $4.46 \times 10^{-1}\text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ของบริษัท TIG

4. ฮีเลียมบริสุทธิ์ (Ultra high purity grade) 99.999% ของบริษัท Chattakorn lab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 อุปกรณ์

ใช้อุปกรณ์เดียวกันกับการปรับสภาพและฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีเส้นทางการไหลของสารต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.3.3 การทดลอง

1. ปรับอัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นตามต้องการ
2. ฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ลดอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาลงให้เท่ากับ 150°C ในไฮโดรเจน
4. เปลี่ยนให้ฮีเลียมไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 10 นาที
5. ให้สารตั้งต้น ผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยา
6. หลังจากสารตั้งต้นผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 10 นาที จึงเก็บตัวอย่างแก๊สที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเข้าสู่ตัววิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ และทำเช่นนี้ในทุกๆ 60 นาที จนกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะคงที่จึงนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าการเปลี่ยนรูปเคมี และอัตราเร็วของปฏิกิริยาดังแสดงในภาคผนวก ข.

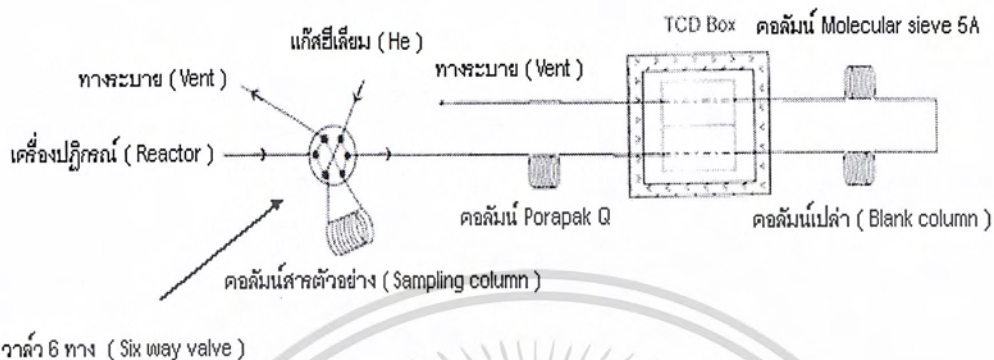
7. หยุดป้อนสารตั้งต้นแล้วทำการลดอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาลงให้เท่ากับอุณหภูมิห้องในฮีเลียม

8. ในการทดลองครั้งต่อไปให้ทำซ้ำข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 7

3.3.4 ภาวะที่ใช้ในการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

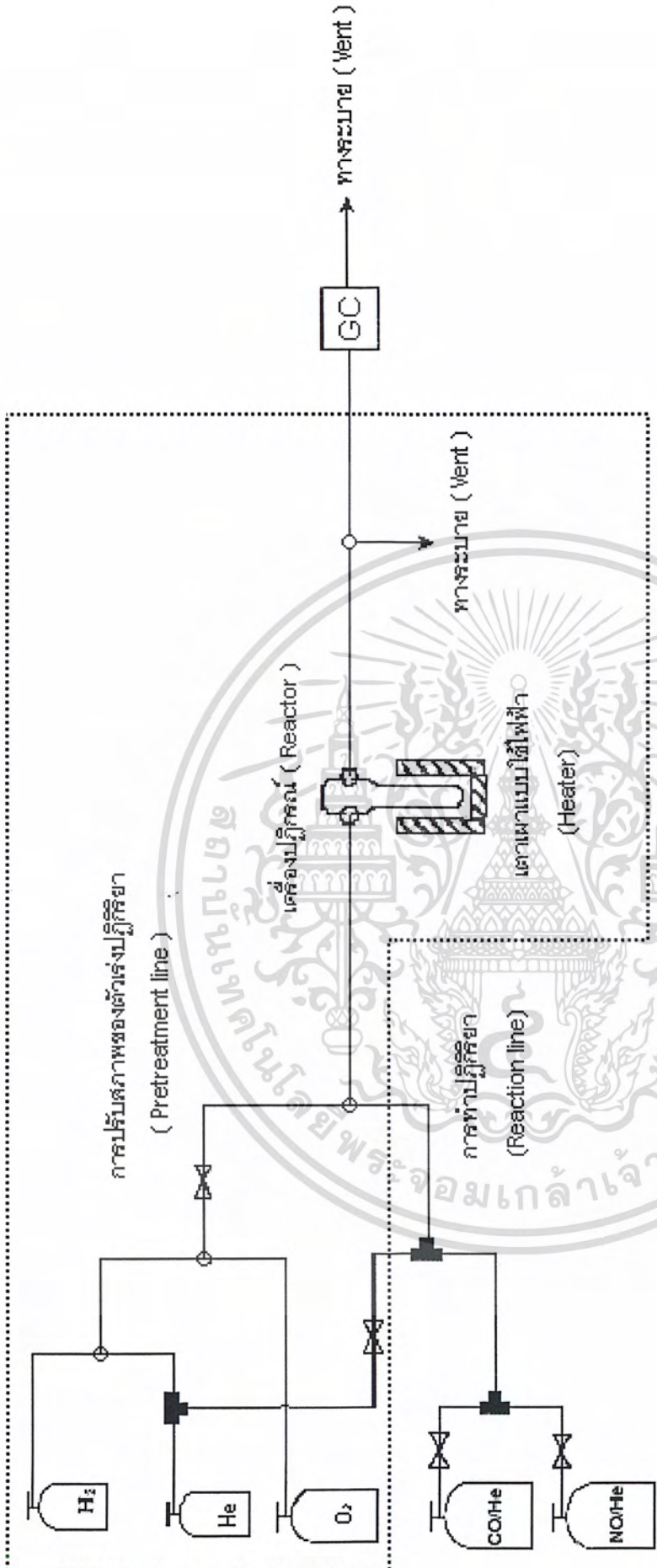
น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา	0.3208	g
อุณหภูมิ	150	$^{\circ}\text{C}$
ความดัน	1	atm
อัตราการไหลรวม	8.33×10^{-7}	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
ความเข้มข้นของสารตั้งต้น	C_{NO} เท่ากับ 2.56×10^{-2} และ 4.09×10^{-2}	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
	C_{CO} ตั้งแต่ 2.56×10^{-2} ถึง 2.45×10^{-1}	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
หมายเหตุ;	ภาวะมาตรฐาน $C_{\text{NO}} = C_{\text{CO}}$ เท่ากับ 4.09×10^{-2}	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

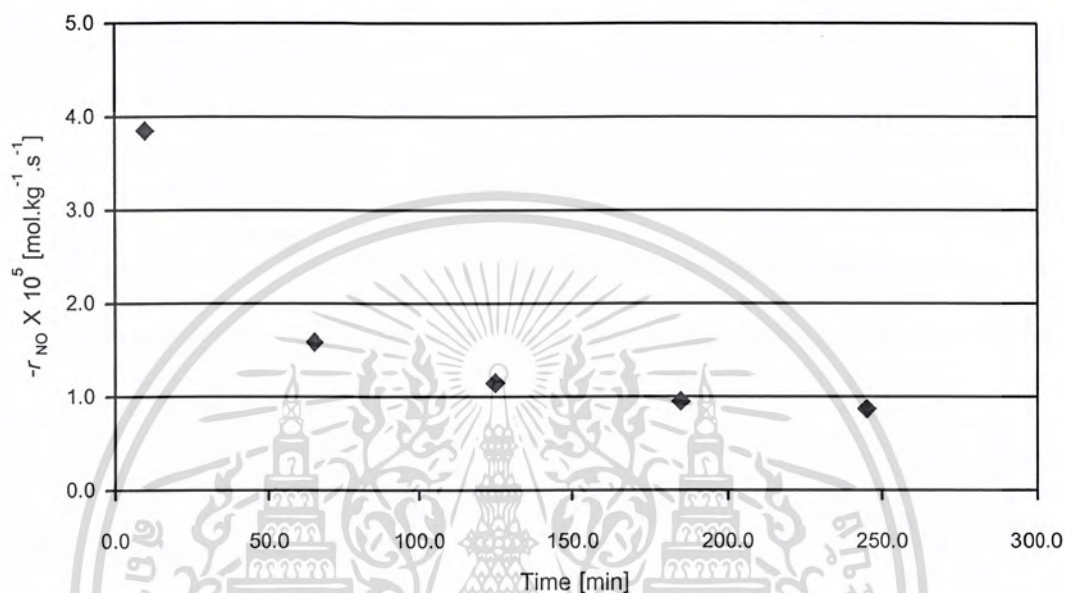
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา

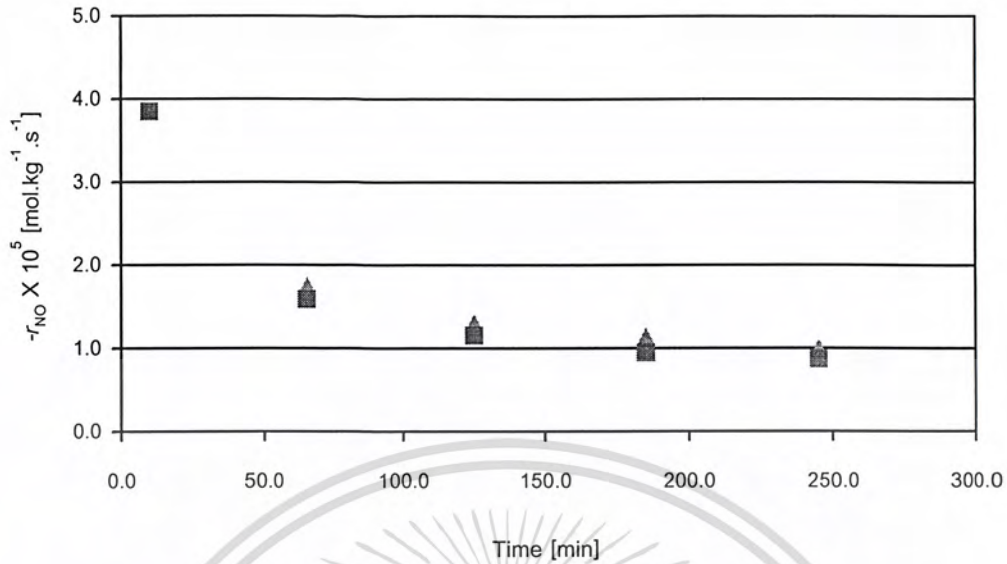
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเทียบกับเวลา



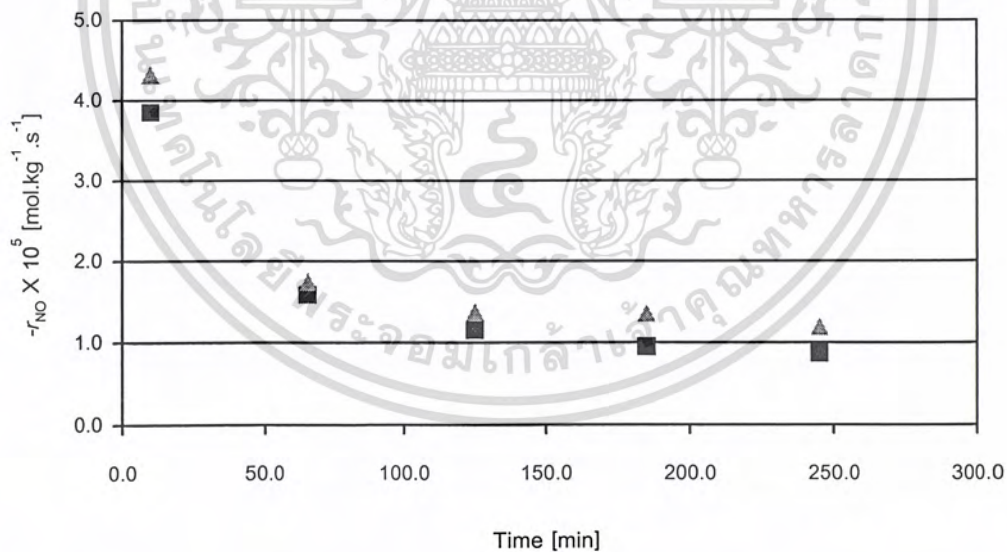
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($C_{NO} = 4.09 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$, $C_{CO} = 4.09 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$)

รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสำหรับการทดลองที่ภาวะมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาที แรกของการทำปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที จึงกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที

4.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่มีต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวของปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่ ($C_{CO} = 4.09 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$) และ $C_{NO} [\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}] = (\blacktriangle) 2.56 \times 10^{-2}, (\blacksquare) 4.09 \times 10^{-2}$



รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวของปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์คงที่ ($C_{NO} = 4.09 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$) $C_{CO} [\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}] = (\blacksquare) 4.09 \times 10^{-2}, (\blacktriangle) 2.45 \times 10^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

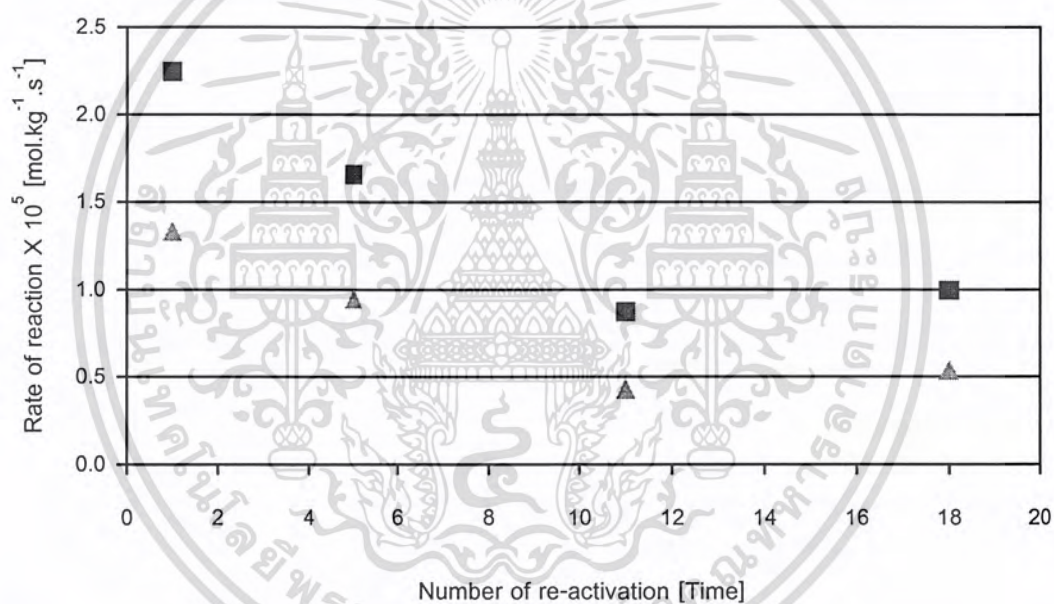
รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แสดงผลของความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์และความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของปฏิกิริยาดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงถือว่าค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์ที่วัดได้ ณ เวลา 240 นาทีเป็นค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะคงตัวและจะนำค่านี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลของการฟื้นฟูสภาพที่มีต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา

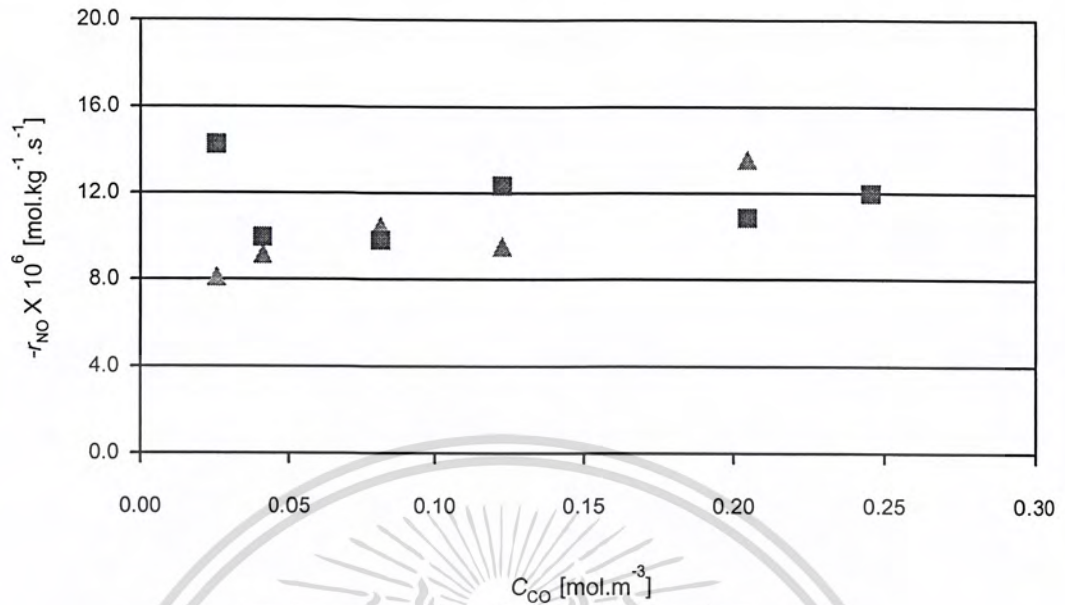
ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมตลอดไม่มีการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เนื่องจากความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงตามระยะเวลาที่ใช้งานจึงจำเป็นต้องทำการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาทุกครั้งก่อนเปลี่ยนภาวะที่ทำการทดลอง อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการทดลองทุกครั้ง ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาก็อาจลดลงเนื่องมาจากการใช้งานเป็นเวลานาน ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ตลอดทุกภาวะที่ทำการทดลอง และการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่วัดได้ที่สภาวะคงตัวนั้นเป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่านั้น จึงได้ทำการทดลองวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ภาวะมาตรฐานเพื่อหาผลของการฟื้นฟูสภาพที่มีต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา



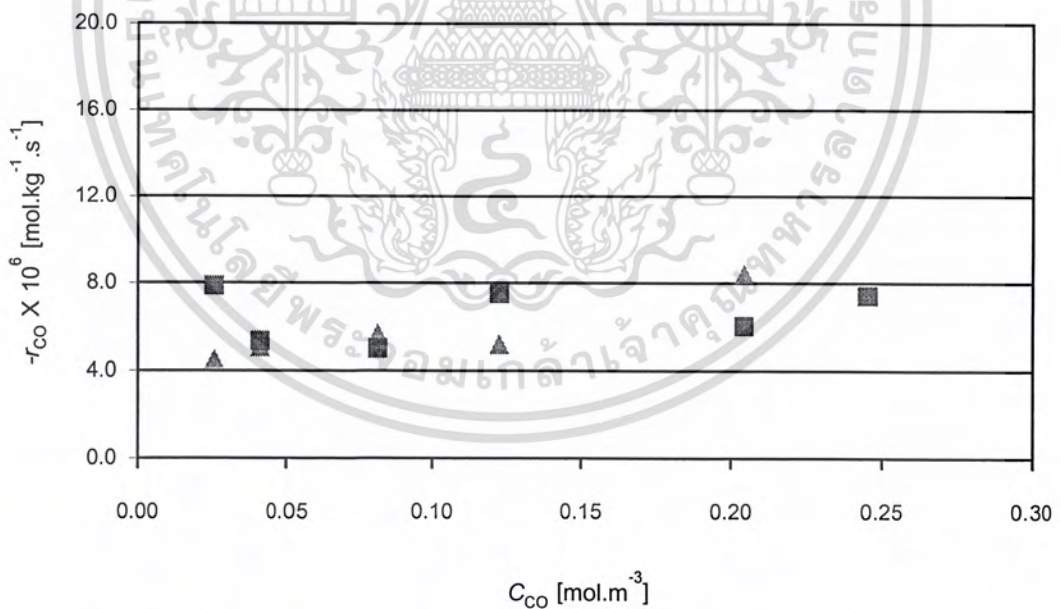
รูปที่ 4.4 ผลของการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ณ ภาวะมาตรฐาน
(■) r_{NO} , (▲) r_{CO}

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงตามจำนวนครั้งที่ทำการฟื้นฟูสภาพ โดยเฉพาะในช่วง 5 ครั้งแรก หลังจากนั้นการฟื้นฟูสภาพจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะคงตัวน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะนำผลการทดลองเฉพาะในช่วงที่การฟื้นฟูสภาพมีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยมาก คือ ตั้งแต่ครั้งที่ 7 เป็นต้นไปมาใช้ในการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์

4.2 ผลของความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

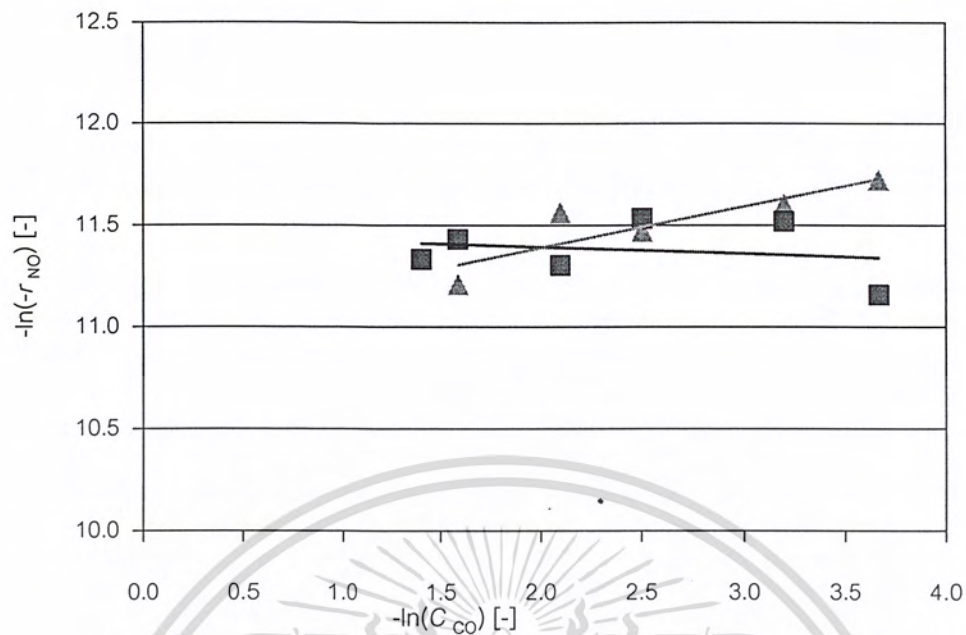


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์: C_{NO} [mol.m⁻³] = (▲) 2.56×10^{-2} , (■) 4.09×10^{-2}

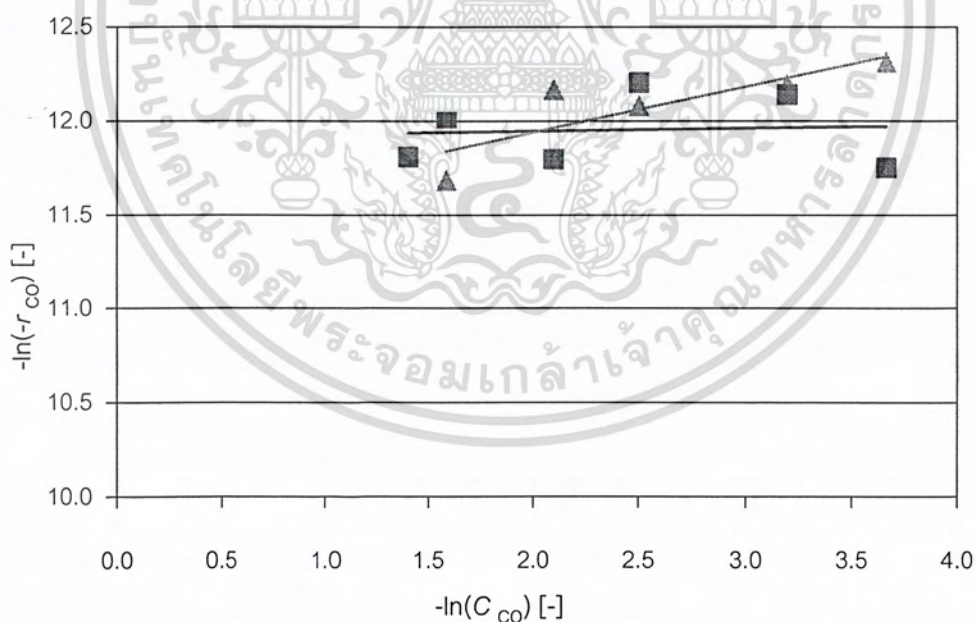


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์: C_{NO} [mol.m⁻³] = (▲) 2.56×10^{-2} , (■) 4.09×10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟลอการิทึมระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์กับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์: $C_{NO} [\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}] = (\blacktriangle) 2.56 \times 10^{-2}$, $(\blacksquare) 4.09 \times 10^{-2}$



รูปที่ 4.8 กราฟลอการิทึมระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์กับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์: $C_{NO} [\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}] = (\blacktriangle) 2.56 \times 10^{-2}$, $(\blacksquare) 4.09 \times 10^{-2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์ตามลำดับ เมื่อสมมติให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์แสดงดังกฎอัตราในสมการที่ (4.6)

$$-r_{\text{NO}} = k_1 \cdot C_{\text{NO}}^{\alpha_1} \cdot C_{\text{CO}}^{\beta_1} \quad (4.6)$$

และนำผลการทดลองในรูปที่ 4.5 มาเขียนกราฟระหว่าง $\ln(r_{\text{NO}})$ กับ $\ln(C_{\text{CO}})$ จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อทำ Linear regression จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชัน (β_1) เท่ากับ 0.2 ที่ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์คงที่เท่ากับ $2.56 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ และเส้นตรงซึ่งมีความชัน (β_1) เท่ากับ -0.03 ที่ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์คงที่เท่ากับ $4.09 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ จึงสรุปได้ว่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์เทียบกับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.09 ในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา

เมื่อสมมติให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์แสดงดังกฎอัตราในสมการที่ (4.7)

$$r_{\text{CO}} = k_2 \cdot C_{\text{NO}}^{\alpha_2} \cdot C_{\text{CO}}^{\beta_2} \quad (4.7)$$

และนำผลการทดลองในรูปที่ 4.6 มาเขียนกราฟระหว่าง $\ln(r_{\text{CO}})$ กับ $\ln(C_{\text{CO}})$ จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อทำ Linear regression จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชัน (β_2) เท่ากับ 0.24 ที่ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์คงที่เท่ากับ $2.56 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ และจะได้เส้นตรงซึ่งมีความชัน (β_2) เท่ากับ 0.01 ที่ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์คงที่เท่ากับ $4.09 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ จึงสรุปได้ว่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.13 ในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปค่าอันดับของปฏิกิริยาได้ดังตารางที่ 4.1 อันดับของปฏิกิริยาที่หาได้จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นแต่ละชนิดมีค่าประมาณศูนย์ หมายความว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่มีผลต่อทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 4.1 อันดับของปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์

C_{NO} [mol·m ⁻³]	β_1 (for r_{NO})	β_2 (for r_{CO})
2.56×10^{-2}	0.20	0.24
4.09×10^{-2}	-0.03	0.01
ค่าเฉลี่ย	0.09	0.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาทางจลนพลศาสตร์เบื้องต้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพที่ 600°C และพื้นฟูสภาพที่ 450°C ตามขั้นตอนดังนี้ คือ เริ่มจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (อัตราการไหล $1.33 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) แล้วต่อด้วยการทำปฏิกิริยารีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (อัตราการไหล $3.33 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งผ่านการฟื้นฟูสภาพมาแล้ว 7 ครั้ง มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์ได้

จากการทดลองหาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไนตริกออกไซด์กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโรเดียมบนอนุภาคนิกเกิลที่สภาวะคงตัวพบว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของไนตริกออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงที่ทำการทดลอง



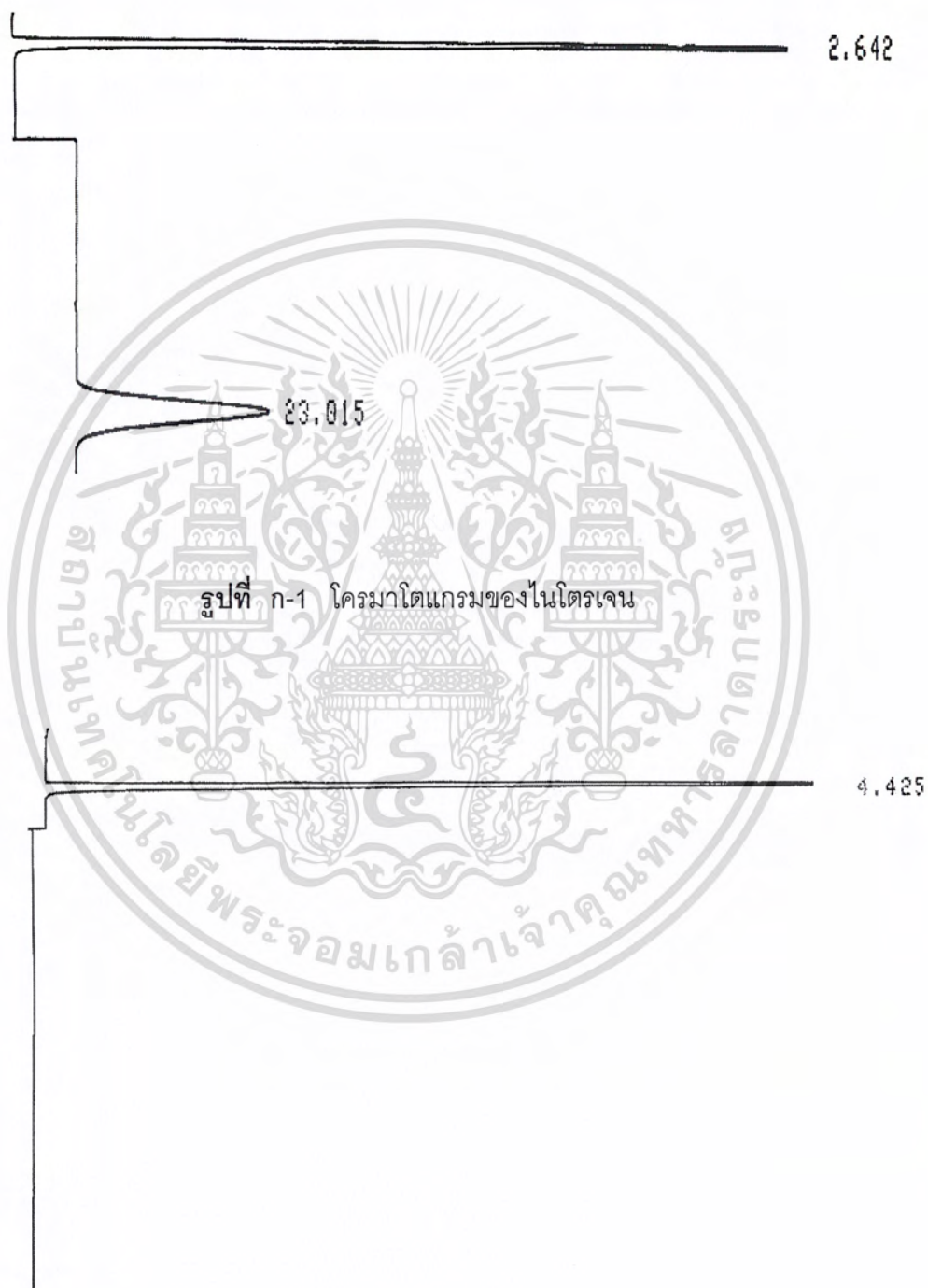
เอกสารอ้างอิง

- [1] Na -Ranong Duangkamol. "Kinetics and Spectroscopic Studies on NO Reduction by CO over Pt/Al₂O₃ Catalyst under Transient Condition." Master Thesis of Tokyo Institute of Technology. 1998.
- [2] Na-Ranong Duangkamol. "NO-CO Reaction over Noble Metal Catalysts under Periodic Operation." Ph.D. Thesis of Tokyo Institute of Technology. 2002.
- [3] Fogler, S. C. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. 3 rd ed. New Jersey: Prentice Hall International Series. 1999.
- [4] Kathleen C. "Nitric Oxide Catalysis in Automotive Exhaust Systems." CATAL. REV.-SCI. ENG., vol. 35, no. 4, 1993. pp. 457-481.
- [5] William C. Hecker and Alexis T. Bell. "Reduction of NO by CO over Silica-Supported Rhodium : Infrared and Kinetic Studies." Journal of Catalysis, vol. 84, 1983. pp. 200-215.
- [6] Shelef M. and Graham G. W. "Why Rhodium in Automotive Three-Way Catalysts?." CATAL. REV. -SCI. ENG., vol. 36, no 3, 1994. pp. 433-457.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ริเทนชันไทม์และกราฟมาตรฐานของแก๊สต่าง ๆ



รูปที่ ก-2 โคโรมาโตแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.667

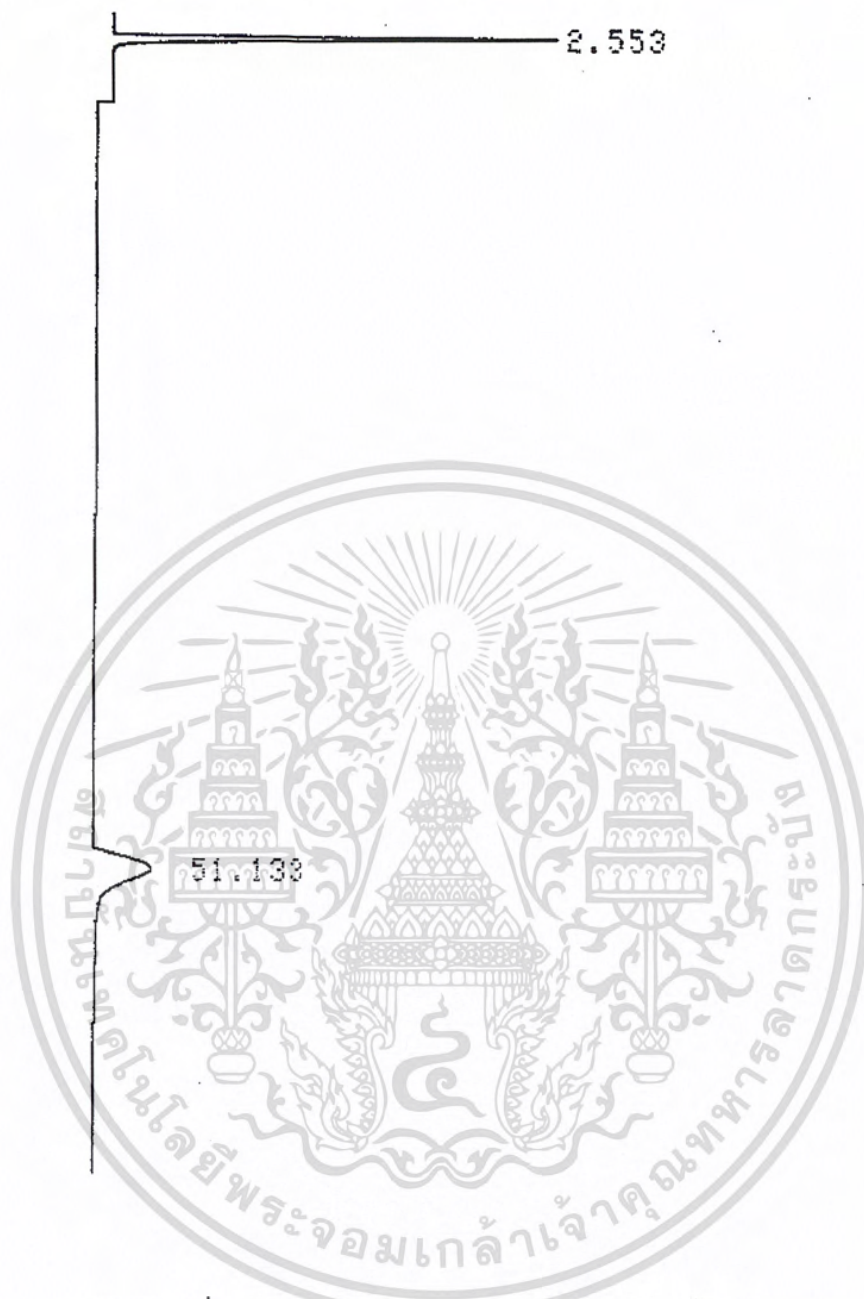


รูปที่ ก-3 โครมาโตแกรมของไนตริกออกไซด์

5.7

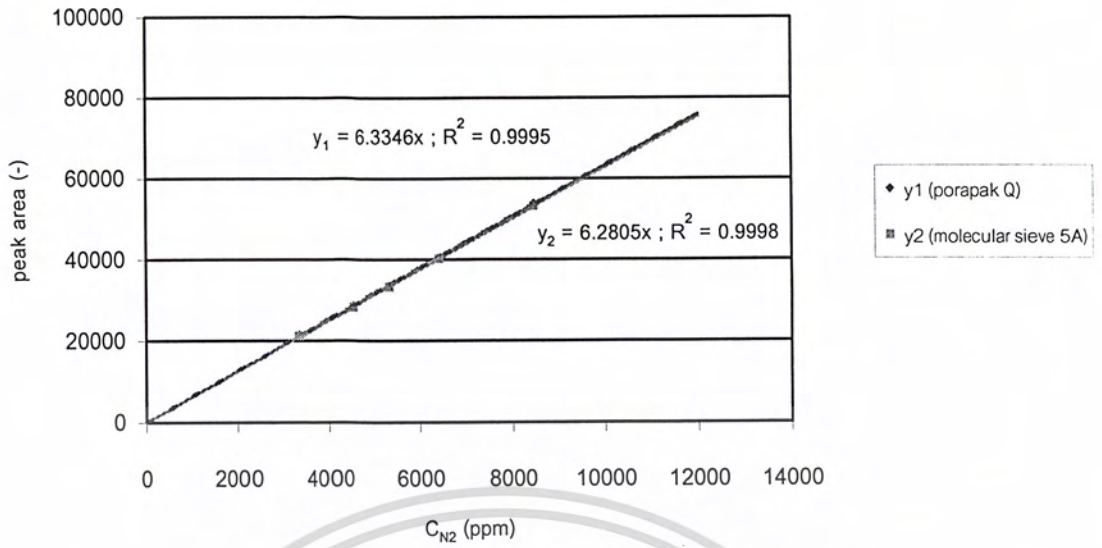
รูปที่ ก-4 โครมาโตแกรมของไนตรัสออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

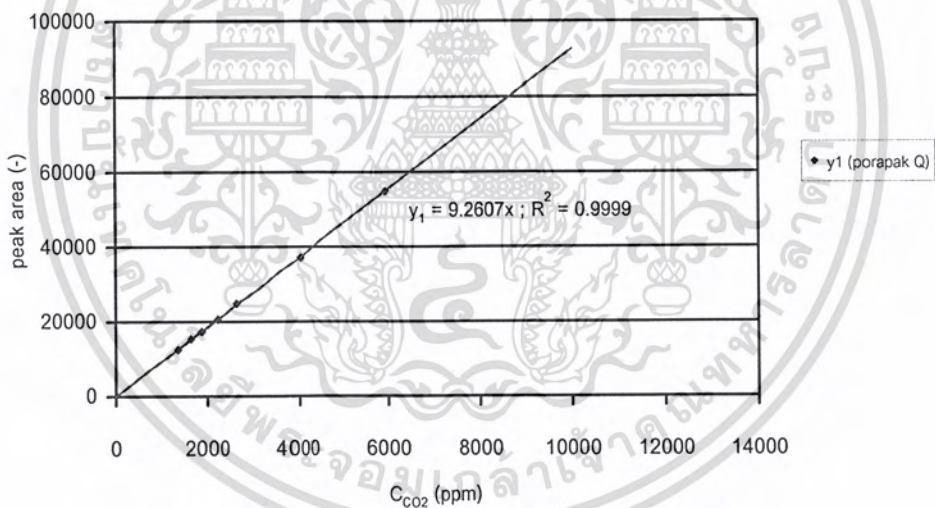


รูปที่ ก-5 โครมาโตแกรมของคาร์บอนมอนอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

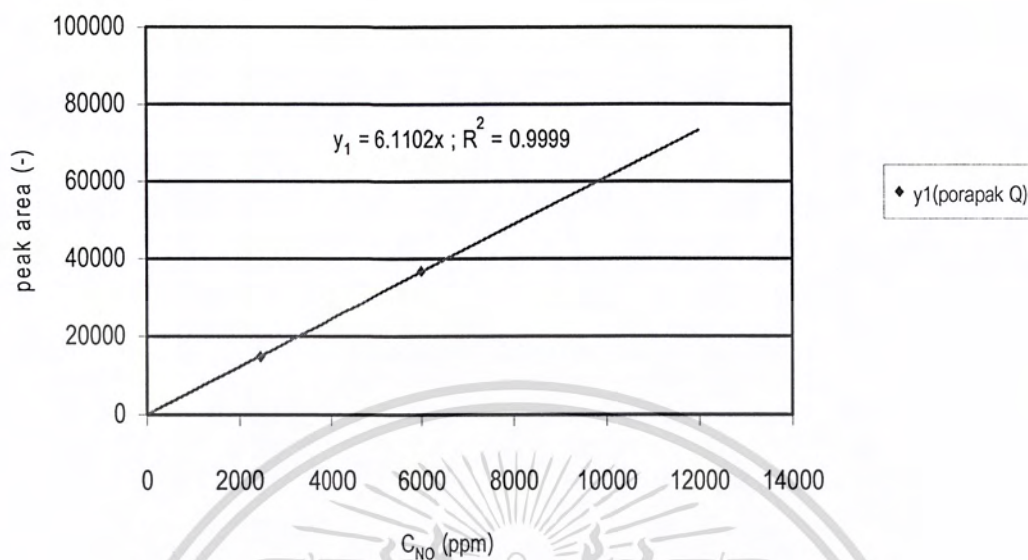


รูปที่ ก-6 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไนโตรเจน

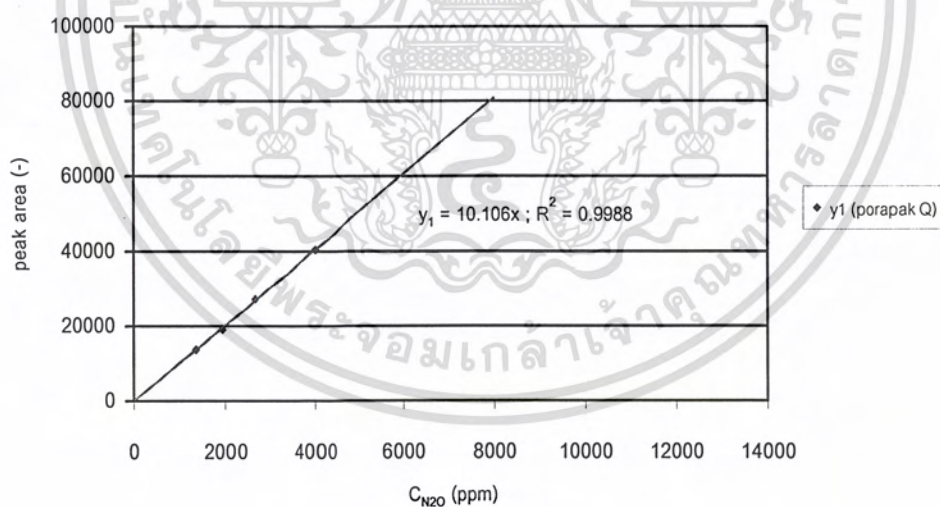


รูปที่ ก-7 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

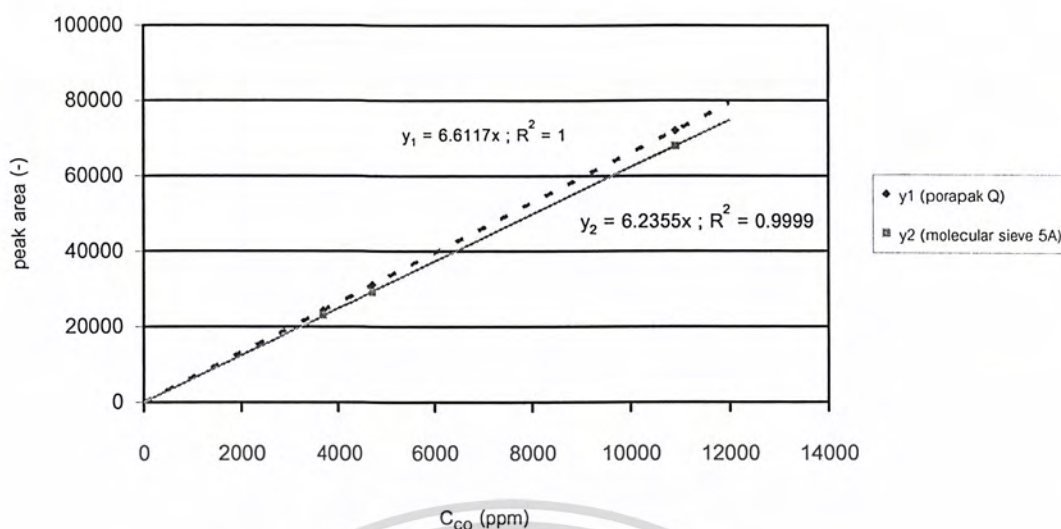


รูปที่ ก-8 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์



รูปที่ ก-9 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-10 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์

รึเทนชั้นไหม้ของแก๊สต่างๆ

ชนิดของแก๊ส	คอลัมน์ Porapak Q	คอลัมน์ Molecular sieave 5A
ไนโตรเจน	2.64	23.02
คาร์บอนไดออกไซด์	4.43	x
ไนตริกออกไซด์	2.67	*
ไนตรัสออกไซด์	5.70	x
คาร์บอนมอนอกไซด์	2.55	51.13

หมายเหตุ (*) เนื่องจากพีคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ
ของไนตริกออกไซด์กว้างเกินกว่าเครื่องวิเคราะห์จะอ่านค่าได้ ดังนั้นจึงไม่ใช่ค่าที่ได้จากแยกด้วย
คอลัมน์ Molecular sieve 5A

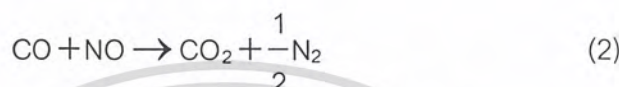
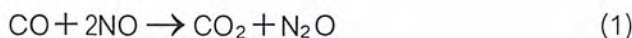
(x) ไม่สามารถแยกได้ด้วย Molecular Sieve 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณค่าเปลี่ยนรูปเคมีและอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการทดลอง คือ



การคำนวณค่าเปลี่ยนรูปเคมีของไนตริกออกไซด์

$$\% X_{\text{NO}} = \left(\frac{C_{\text{NO},\text{in}} - C_{\text{NO},\text{out}}}{C_{\text{NO},\text{in}}} \right) \times 100 \quad (3)$$

การเปลี่ยนรูปเคมีของไนตริกออกไซด์สามารถหาได้สมการที่ (3) แต่เนื่องจากไม่สามารถหาค่าความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่ปากทางเข้าและปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยตรง จึงต้องคำนวณหาปริมาณไนตริกออกไซด์ที่หายไปในการทำปฏิกิริยามาแทนในส่วนตัวตั้งของสมการที่ (3)

เนื่องจากไนตริกออกไซด์ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาที่ (1) และ (2) ดังนั้นปริมาณไนตริกออกไซด์ที่หายไปในการทำปฏิกิริยาจะเท่ากับผลรวมของไนตริกออกไซด์ที่หายไปในการทำปฏิกิริยา (1) กับไนตริกออกไซด์ที่หายไปในการทำปฏิกิริยา (2) โดยปริมาณของไนตริกออกไซด์ที่ใช้ไปในปฏิกิริยาที่ (1) และ (2) หาได้ดังนี้

1. ปริมาณของไนตริกออกไซด์ที่ใช้ไปในปฏิกิริยาที่ (1) เท่ากับสองเท่าของความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่วัดได้
2. ปริมาณของไนตริกออกไซด์ที่ใช้ไปในปฏิกิริยาที่ (2) เท่ากับ $\frac{C_{\text{CO}_2} - C_{\text{N}_2\text{O}}}{2}$

ดังนั้นปริมาณรวมของไนตริกออกไซด์ที่ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยา คือ

$$2C_{\text{N}_2\text{O}} + (C_{\text{CO}_2} - C_{\text{N}_2\text{O}})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงสามารถเขียนสมการที่ (3) ได้ใหม่เป็น

$$\% X_{NO} = \left(\frac{2C_{N_2O} + (C_{CO_2} - C_{N_2O})}{C_{NO}} \right) \times 100 \quad (4)$$

การคำนวณค่าเปลี่ยนรูปเคมีของคาร์บอนมอนอกไซด์

$$\% X_{CO} = \left(\frac{C_{CO,in} - C_{CO,out}}{C_{CO,out}} \right) \times 100 \quad (5)$$

การเปลี่ยนรูปเคมีของคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถหาได้สมการที่ (5) แต่เนื่องจากไม่สามารถหาค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปากทางเข้าและปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยตรง จึงต้องคำนวณหาปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่หายไปในการทำปฏิกิริยามาแทนในส่วนตัวตั้งของสมการที่ (5)

เนื่องจากปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาจะมีค่าเท่ากับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดดังนั้น

$$\% X_{CO} = \left(\frac{C_{CO_2}}{C_{CO,in}} \right) \times 100 \quad (6)$$

การคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์อนุพันธ์แบบเบดนิ่งในการทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะได้ว่า

$$-r_A = \frac{V_0 C_{A0} X_A}{\Delta W} \quad (7)$$

เนื่องจากค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่วัดได้ในการทดลองมีหน่วยเป็น ppm จึงต้องเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นให้กลายเป็น $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ก่อนตามวิธีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 25 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ความเข้มข้นของสาร A } a \text{ ppm} &= a \times 10^{-6} && \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \\ \text{ที่ STP ความเข้มข้นของสาร A} &= \frac{a \times 10^{-6} \times 273}{298} && \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ STP สาร 1 โมล มีปริมาตร $2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3$

$$\therefore C_{A0} = \frac{a \times 10^{-6} \times 273}{298 \times 2.24 \times 10^{-2}} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

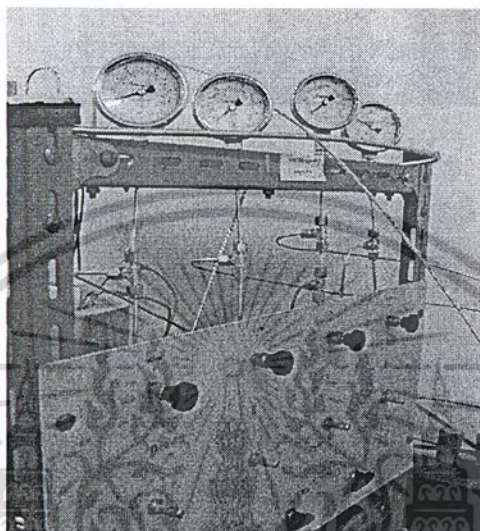
จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ (7) เพื่อหา $-r_A$ ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ ค-1 ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส (Flow controller)

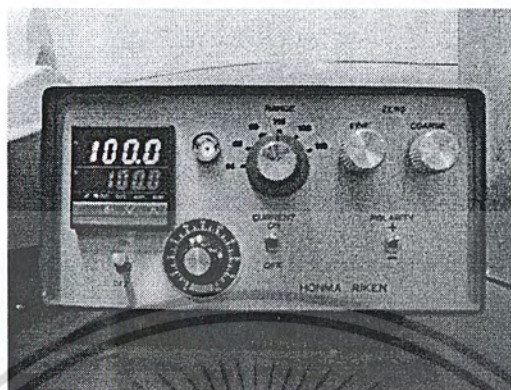


7 4 2004

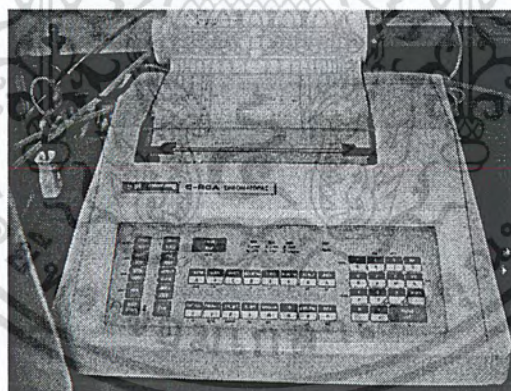
รูปที่ ค-2 เครื่องปฏิกรณ์เคมี (Reactor) และเครื่องทำความร้อน (Heater)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (GC)

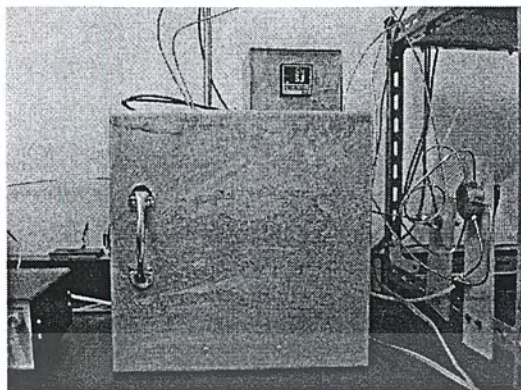


รูปที่ ค-3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและกระแสของ TCD

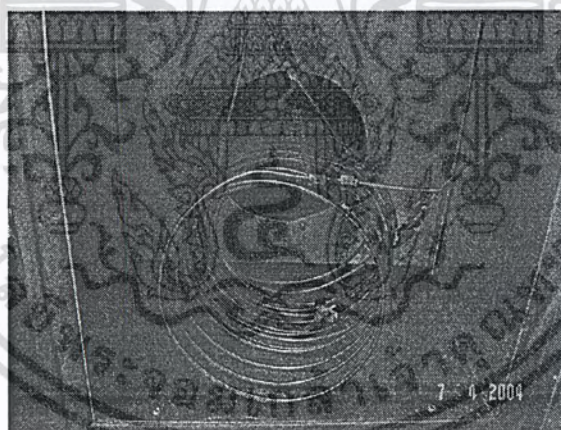


รูปที่ ค-4 Integrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-5 ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้คงที่ได้ในช่วง 30°C ถึง 80°C



รูปที่ ค-6 คอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้