

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากวัตถุประสงค์ของการทดลองที่กล่าวในบทที่ 1 การทดลองจึงมุ่งศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วเชิงสเปซ และสัดส่วนขององค์ประกอบของสารตั้งต้น และนำผลการทดลองมาหาสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา แล้วจึงพิจารณาเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการกำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ต่อไป ดังนั้นในรายละเอียดของบทนี้จะเสนอผลของการทดลอง ในลักษณะของข้อมูลดิบของการทดลองแต่ละขั้นตอน แล้วจึงนำผลของการทดลองนั้นมาวิเคราะห์ตามทฤษฎีที่แสดงไว้ในบทที่ 2 โดยมีเงื่อนไขของการทดลองแต่ละขั้นตอนได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 3 ในเรื่องของวิธีการทดลอง

ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีปริมาณของ CuO ค่าต่างๆ กัน

สภาวะที่กำหนดสำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้

1. สัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์กับไฮโดรเจนของสารตั้งต้นคงที่ มีค่าเป็น 1 : 1 โดยโมล
2. อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่อุณหภูมิห้อง มีค่า 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ นาที
3. น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช

และมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของการทดลอง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 8% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, 10% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ 12% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$
2. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยา คือ 200, 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ ใน
 กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีปริมาณของ CuO ค่าต่างๆ กัน

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์		
	8% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	10% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	12% $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$
200	0.7612	0.7786	0.7736
250	0.8307	0.8609	0.8687
300	0.8754	0.9079	0.8917
350	0.9147	0.9389	0.9309
400	0.9287	0.9613	0.9553



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของสารตั้งต้นในสถานะที่ขจัดผลของความต้านทานการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างบรรยากาศของของไหลกับผิวค้ำานนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา

สถานะที่กำหนดสำหรับการทดลองในขั้นนี้ มีดังนี้

1. อุณหภูมิของปฏิกิริยาครั้งที่ 300 องศาเซลเซียส
2. สัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์กับไฮโดรเจนของสารตั้งต้นครั้งที่ มีค่าเป็น 1 : 1 โดยโมล
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 10% CuO/Al₂O₃ ขนาด 60/80 เมช

และมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของการทดลอง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 0.1003 กรัม และ 0.2027 กรัม
2. เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารตั้งต้นระหว่าง 60 ถึง 360 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที สำหรับการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก 0.1003 กรัม และระหว่าง 180 ถึง 600 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที สำหรับการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก 0.2027 กรัม โดยมีการเพิ่มค่าครึ่งละประมาณ 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ซึ่งผลจากการทดลองในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีน้ำหนัก 0.1003 กรัม ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และสำหรับการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก 0.2027 กรัม ได้แสดงผลการทดลองในตารางที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และตัวประกอบเวลา สำหรับการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของสารตั้งต้นในสถานะที่จัดผลของความดันทานการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างบรรยากาศของของไหลกับผิวค้ำานนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหนัก 0.1003 กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช น้ำหนัก 0.1003 กรัม		
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส		
อัตราส่วนของสารป้อน $\text{NO} : \text{H}_2 = 1 : 1$ โดยโมล		
อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 34°C (cm^3/min)	สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ (Conversion of NO)	ตัวประกอบเวลา (W/F) ที่อุณหภูมิ 34°C (g cat.hr / mole feed)
61.05	0.9656	0.69
95.51	0.9355	0.44
128.11	0.9111	0.33
159.89	0.8536	0.26
192.50	0.7916	0.22
223.18	0.7316	0.19
255.52	0.6722	0.16
290.88	0.6212	0.14
325.16	0.5760	0.13
358.77	0.5176	0.12

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และตัวประกอบเวลา สำหรับการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของสารตั้งต้นในสถานะที่จัดผลของความต้านทานการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างบรรยากาศของของไหลกับผิวค้ำนอนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำหนัก 0.2027 กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.2027 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส		
อัตราส่วนของสารป้อน $\text{NO} : \text{H}_2 = 1 : 1$ โดยโมล		
อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 34°C (cm^3/min)	สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ (Conversion of NO)	ตัวประกอบเวลา (W/F) ที่อุณหภูมิ 34°C (g cat.hr / mole feed)
182.76	0.9497	0.47
211.19	0.9400	0.40
242.60	0.9202	0.35
274.30	0.8912	0.31
320.23	0.8615	0.27
365.71	0.8201	0.23
425.64	0.7609	0.20
465.03	0.7225	0.18
525.92	0.6711	0.16
585.16	0.6459	0.15



3. ผลการทดลองเพื่อหาขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสภาวะขจัดผลของความต้านทานการถ่ายเทมวลและความร้อนจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ผ่านรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยา

สภาวะที่กำหนดสำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้

1. อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ ที่ 300 องศาเซลเซียส
2. สัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์กับไฮโดรเจน ของสารตั้งต้นคงที่ มีค่าเป็น 1 : 1 โดยโมล
3. อัตราการไหลของสารตั้งต้น เท่ากับ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 10% CuO/Al₂O₃ น้ำหนัก 0.1 กรัม

และมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของการทดลอง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 80/100, 60/80, 40/60, 30/40 และ 20/30 เมช

ซึ่งผลการทดลองในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาด 80/100, 60/80, 40/60, 30/40 และ 20/30 เมช ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของสารตั้งต้นสำหรับการทดลองเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดต่างๆ

ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา		น้ำหนัก ของตัวเร่งปฏิกิริยา (gm)	อัตราการไหลของสาร ตั้งต้นที่อุณหภูมิ 34 °ซ (cm ³ /min)
ตัวเลขเมช (mesh)	เส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ย(μm)		
80/100	165	0.1032	151.2911
60/80	215	0.1017	150.7609
40/60	337.5	0.1021	149.8904
30/40	512.5	0.1002	150.1813
20/30	725	0.1075	151.0701

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการทดลองเพื่อหาขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสภาวะขจัดผลของความต้านทานการถ่ายเทมวลและความร้อนจากสารตั้งต้นและผลิตผลผ่านรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของสารป้อน NO : H ₂ = 1 : 1 โดยโมล		
ขนาดตัวเร่ง ปฏิกิริยา (mesh)	สัดส่วนการเปลี่ยนรูป ของไนโตรเจนออกไซด์ (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
80/100	0.9101	6.3277
60/80	0.8998	6.3394
40/60	0.9013	6.3238
30/40	0.6530	4.6851
20/30	0.4771	3.1887

4. ผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

สภาวะที่กำหนดสำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้

1. สัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์กับไฮโดรเจน ของสารตั้งต้นคงที่ มีค่าเป็น 1 : 1 โดยโมล
2. อัตราการไหลของสารตั้งต้น เท่ากับ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

และมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของการทดลอง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยา คือ 200, 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส

ซึ่งผลการทดลองสำหรับการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของ ไนโตรเจนออกไซด์ (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ STP (Mole NO Reacted / hr) ($\times 10^{-3}$)
200	0.0866	0.0621
250	0.1729	0.1241
300	0.2869	0.2059
350	0.3942	0.2828
400	0.4208	0.3019

5. ผลการทดลองเพื่อหาอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง

สภาวะที่กำหนดสำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้

1. อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ ที่ 300 องศาเซลเซียส
2. สัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์กับไฮโดรเจนของสารตั้งต้นคงที่ มีค่าเป็น 1 : 1 โดยโมล
3. อัตราการไหลของสารตั้งต้น เท่ากับ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 10% CuO/Al₂O₃, น้ำหนัก 0.1017 กรัม

และมีการเปลี่ยนสภาวะของการทดลอง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา คือ ตั้งแต่ 0 ถึง 7 ชั่วโมง โดยเก็บก๊าซตัวอย่างทุก 20 นาที

ผลการทดลองสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในระยะเวลาต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 4.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์เพื่อหา
ระยะเวลาการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลาที่เกิดปฏิกิริยา (hr:min)	สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ (Conversion of NO)
0:00	0.5318
0:05	0.9221
0:20	0.9036
0:40	0.9018
1:00	0.9027
1:20	0.8939
1:40	0.8946
2:00	0.8959
2:20	0.8917
2:40	0.8961
3:00	0.8970
3:20	0.8984
3:40	0.8860
4:00	0.8908
4:20	0.8955
4:40	0.8986
5:00	0.8875
5:20	0.8816
5:40	0.8815
6:00	0.8825
6:20	0.8816
6:40	0.8814
7:00	0.8833

6. ผลการทดลองเพื่อหาสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา

6.1. ผลการทดลองหาอันดับของปฏิกิริยา เมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา

สภาวะที่กำหนดสำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้

1. อัตราการไหลของสารตั้งต้นมีค่าประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 10% CuO/Al₂O₃, น้ำหนัก 0.1009 กรัม
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช

และมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของการทดลอง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงสัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์ในสารตั้งต้น คือ ประมาณ 0.032%, 0.052%, 0.069%, 0.088% และ 0.115% โดยปริมาตร
2. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ 200, 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองสำหรับการหาอันดับของปฏิกิริยา เมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในสารตั้งต้นในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ถึง 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 200 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิด เทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์



ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1009 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hrg cat.) (x10 ⁻³)
0.0316	150.3400	1 : 36.5053	0.2525	0.2834
0.0502	150.5311	1 : 28.6911	0.3519	0.6284
0.0697	150.6802	1 : 20.3852	0.5007	1.2422
0.0884	151.2512	1 : 14.1494	0.5912	1.8740
0.1138	151.8111	1 : 8.7701	0.6859	2.8002

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการเกิดปฏิกิริยา)
	NO	H ₂	
0.0316	-18.0764	-14.4789	-8.1687
0.0502	-17.6135	-14.2565	-7.3723
0.0697	-17.2854	-14.2705	-6.6909
0.0884	-17.0477	-14.3944	-6.2797
0.1138	-16.7951	-14.6233	-5.8781

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 250 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิด เทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1009 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูปของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.0320	149.8411	1 : 35.5902	0.3032	0.3439
0.0527	151.4203	1 : 27.1946	0.4332	0.8192
0.0708	150.6112	1 : 20.1223	0.5518	1.3896
0.0889	152.2621	1 : 13.9486	0.6522	2.0875
0.1152	151.8811	1 : 8.6624	0.7825	3.2355

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln(ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln(อัตราการเกิดปฏิกิริยา)
	NO	H ₂	
0.0320	-18.0638	-14.4904	-7.9752
0.0527	-17.5649	-14.2586	-7.1072
0.0708	-17.2697	-14.2681	-6.5787
0.0889	-17.0420	-14.4056	-6.1718
0.1152	-16.7828	-14.6235	-5.7336

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และ
อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 300 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิด
เทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1009 กรัม		
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูปของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.0319	150.1126	1 : 36.5681	0.3518	0.3985
0.0527	151.4250	1 : 26.7017	0.4836	0.9123
0.0693	150.9889	1 : 20.4175	0.6579	1.6268
0.0886	151.8152	1 : 13.9563	0.7497	2.3809
0.1155	151.5411	1 : 8.6827	0.8616	3.5628

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln(ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln(อัตราการเกิดปฏิกิริยา)
	NO	H ₂	
0.0319	-18.0669	-14.4664	-7.8278
0.0527	-17.5649	-14.2794	-6.9995
0.0693	-17.2911	-14.2743	-6.4211
0.0886	-17.0454	-14.4099	-6.0403
0.1155	-16.7803	-14.6188	-5.6372

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 350 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1009 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.0321	150.0911	1 : 36.3270	0.4027	0.4582
0.0528	151.0201	1 : 26.8019	0.5636	1.0621
0.0705	151.2102	1 : 20.1973	0.7316	1.8414
0.0888	150.8222	1 : 14.1523	0.8218	2.6013
0.1153	151.8605	1 : 8.6564	0.9124	3.7739

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการเกิดปฏิกิริยา)
	NO	H ₂	
0.0321	-18.0607	-14.4684	-7.6882
0.0528	-17.5630	-14.2740	-6.8475
0.0705	-17.2739	-14.2688	-6.2972
0.0888	-17.0432	-14.3927	-5.9517
0.1153	-16.7820	-14.6236	-5.5796

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และ
อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 400 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิด
เทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1009 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.0318	150.0281	1 : 36.4806	0.4655	0.5242
0.0525	150.6522	1 : 26.9955	0.6318	1.1812
0.0694	150.9821	1 : 20.2861	0.7594	1.8796
0.0893	150.9101	1 : 13.8799	0.8596	2.7364
0.1152	151.8670	1 : 8.6796	0.9259	3.8277

ตารางที่ 4.12 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการเกิดปฏิกิริยา)
	NO	H ₂	
0.0318	-18.0701	-14.4741	-7.5536
0.0525	-17.5687	-14.2724	-6.7412
0.0694	-17.2897	-14.2797	-6.2767
0.0893	-17.0375	-14.4071	-5.9011
0.1152	-16.7829	-14.6216	-5.5655

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2. ผลการทดลองหาอันดับของปฏิกิริยา เมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา

สภาวะที่กำหนดสำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้

1. อัตราการไหลของสารตั้งต้น มีค่าประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ 10% CuO/Al₂O₃ น้ำหนัก 0.1015 กรัม
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช

และมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของการทดลอง ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงสัดส่วนของไนโตรเจนออกไซด์ในสารตั้งต้น คือ ประมาณ 0.100%, 0.118%, 0.135%, 0.160% และ 0.180% ไนโตรเจนออกไซด์โดยปริมาตร
2. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ 200, 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองสำหรับการหาอันดับของปฏิกิริยา เมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในสารตั้งต้นในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา แสดงไว้ในตารางที่ 4.13 ถึง 4.17

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 200 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1015 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.1004	150.0891	1 : 2.5743	0.7342	2.5992
0.1181	151.8599	1 : 1.9125	0.7502	3.1586
0.1352	150.9520	1 : 1.6021	0.7521	3.6044
0.1603	151.2601	1 : 1.2387	0.7712	4.3915
0.1801	151.5560	1 : 1.0029	0.7842	5.0272

ตารางที่ 4.13 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการเกิดปฏิกิริยา)	P
	NO	H ₂		
0.1004	-16.9204	-15.9743	-5.9526	22.9813
0.1181	-16.7580	-16.1098	-5.7576	22.8986
0.1352	-16.6228	-16.1515	-5.6256	22.7994
0.1603	-16.4525	-16.2383	-5.4281	22.7057
0.1801	-16.3360	-16.3329	-5.2929	22.6417

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 250 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิด เทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1015 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.1013	150.0791	1 : 2.5533	0.8201	2.9271
0.1178	151.5126	1 : 1.9211	0.8307	3.4819
0.1338	151.6021	1 : 1.6116	0.8481	4.0405
0.1600	150.8920	1 : 1.2329	0.8318	4.7170
0.1804	151.2026	1 : 1.0037	0.8552	5.4783

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการเกิดปฏิกิริยา)	P
	NO	H ₂		
0.1013	-16.9115	-15.9743	-5.8337	23.0849
0.1178	-16.7606	-16.1075	-5.6602	23.0004
0.1338	-16.6332	-16.1557	-5.5114	22.9314
0.1600	-16.4544	-16.2448	-5.3566	22.7804
0.1804	-16.3344	-16.3306	-5.2069	22.7249

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 300 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิด เทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1015 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.1004	150.2691	1 : 2.5729	0.8702	3.0822
0.1169	151.5116	1 : 1.9354	0.8765	3.6468
0.1348	150.8620	1 : 1.6072	0.8902	4.2527
0.1601	151.5610	1 : 1.2381	0.8879	5.0882
0.1801	151.6001	1 : 1.0028	0.8954	5.7411

ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการผลิตปฏิกิริยา)	P
	NO	H ₂		
0.1004	-16.9204	-15.9755	-5.7821	23.1518
0.1169	-16.7682	-16.1075	-5.6139	23.0597
0.1348	-16.6257	-16.1509	-5.4602	22.9697
0.1601	-16.4537	-16.2403	-5.2808	22.8550
0.1801	-16.3360	-16.3332	-5.1601	22.7745

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 350 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช				น้ำหนัก 0.1015 กรัม
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.0990	150.3679	1 : 2.6069	0.9209	3.2193
0.1179	150.8790	1 : 1.9274	0.9289	3.8807
0.1345	150.7601	1 : 1.6130	0.9228	4.3924
0.1602	150.5960	1 : 1.2341	0.9480	5.3704
0.1805	150.9670	1 : 1.0028	0.9449	6.0462

ตารางที่ 4.16 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการผลิตปฏิกิริยา)	P
	NO	H ₂		
0.0990	-16.9344	-15.9762	-5.7386	23.2192
0.1179	-16.7597	-16.1034	-5.5517	23.1074
0.1345	-16.6279	-16.1502	-5.4279	23.0058
0.1602	-16.4531	-16.2428	-5.2269	22.9079
0.1805	-16.3338	-16.3309	-5.1083	22.8225

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 400 องศาเซลเซียส เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิด เทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1015 กรัม		
ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส				
สัดส่วน ของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการไหล ของสารตั้งต้น ที่ 34 °ซ (cm ³ /min)	สัดส่วน จำนวนโมล ของ NO:H ₂ (NO:H ₂)	สัดส่วน การเปลี่ยนรูป ของ NO (Conversion of NO)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ STP (Mole NO Reacted / hr g cat.) (x10 ⁻³)
0.0991	149.3520	1 : 2.6215	0.9273	3.2238
0.1177	150.5206	1 : 1.9485	0.9310	3.8475
0.1331	150.9211	1 : 1.6271	0.9411	4.4402
0.1603	151.2694	1 : 1.2385	0.9566	5.4483
0.1804	150.8992	1 : 1.0020	0.9588	6.1284

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

สัดส่วนของ NO ในสาร ตั้งต้น (%)	ln (ความเข้มข้นของสารตั้งต้น)		ln (อัตราการเกิดปฏิกิริยา)	P
	NO	H ₂		
0.0991	-16.9331	-15.9694	-5.7372	23.2184
0.1177	-16.7614	-16.0943	-5.5603	23.1017
0.1331	-16.6384	-16.1513	-5.4171	23.0346
0.1603	-16.4525	-16.2384	-5.2125	22.9213
0.1804	-16.3344	-16.3325	-5.0948	22.8370



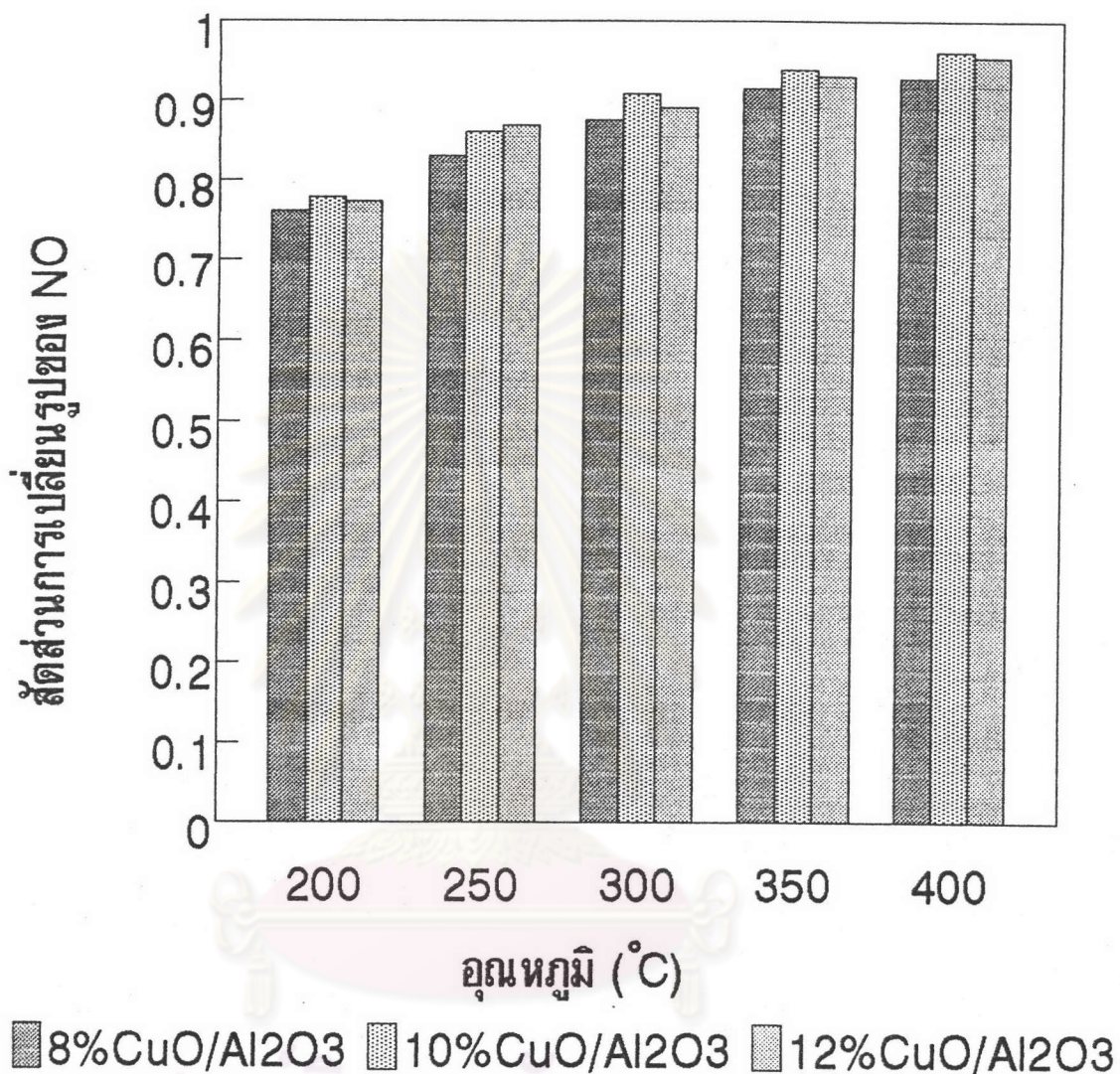
ศูนย์วิจัยชีววิทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. การหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์บนอลูมินา ($\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่มีปริมาณของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ค่าต่างๆ กัน

การทดลองจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์บนอลูมินา ที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 8, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก ขนาด 60/80 เมช น้ำหนัก 0.1 กรัม และอัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองนำมาคำนวณหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.1 เมื่อนำสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไปสร้างกราฟ จะได้กราฟแท่งในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี 10% คอปเปอร์ออกไซด์บนอลูมินา จะให้สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่ากรณีอื่น และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์มีค่าต่างกันมาก เช่น ที่ 400 องศาเซลเซียส สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์กรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.4208 แต่กรณีที่ มีตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์เท่ากับ 0.9588 ดังนั้นในการทดลองหัวข้อต่อไป จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี 10% คอปเปอร์ออกไซด์บนอลูมินา เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ให้สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ สูงที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



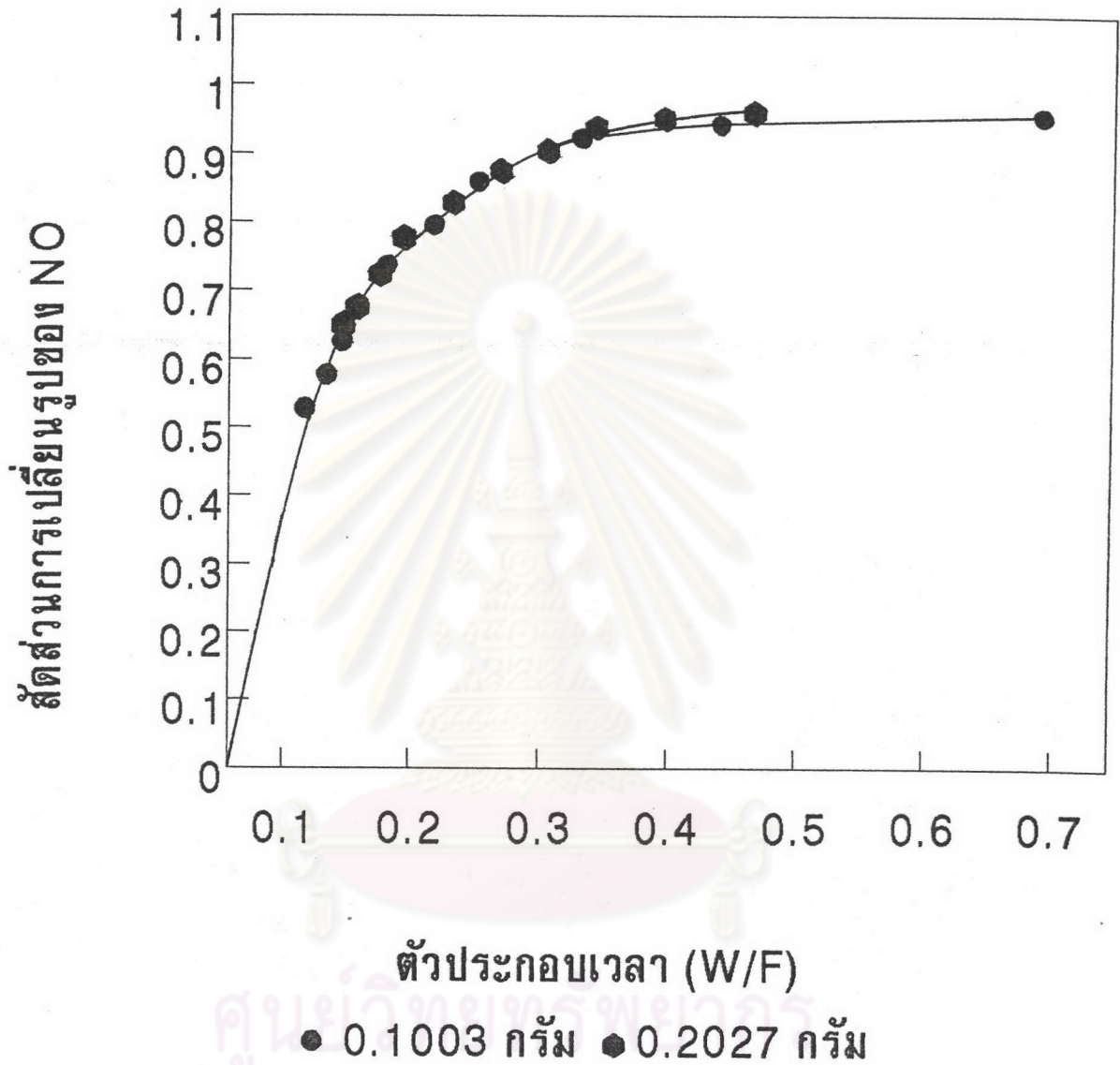
รูปที่ 4.1

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์กับอุณหภูมิ
กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์บนอลูมินา ที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ต่างๆ กัน

2. การหาอัตราการไหลของสารตั้งต้นในสถานะที่ขจัดผลของความต้านทานการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างบรรยากาศของของไหลกับผิวค้ำานอกของตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองโดยการป้อนสารตั้งต้นด้วยอัตราการไหลต่างๆ ที่อุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช น้ำหนัก 0.1003 กรัม และ 0.2027 กรัม ผลที่ได้จากการทดลองเป็นพื้นที่ที่พลในภาคผนวก ข มาคำนวณเป็นสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ ส่วนอัตราการไหลของสารตั้งต้น คำนวณเป็นตัวประกอบเวลา (W/F) โดยได้แสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อนำสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และตัวประกอบเวลาในการทดลองแต่ละชุดมาสร้างกราฟเส้นโค้ง จะได้ในรูปที่ 4.2 พบว่าได้เส้นโค้ง 2 เส้น โดยเส้นโค้งบนเป็นเส้นจากการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหนัก 0.2027 กรัม และเส้นโค้งล่าง 2 เส้น จะทับกันตลอดช่วงตัวประกอบเวลาค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.31 g cat.hr./mole feed ซึ่งจากตัวประกอบเวลาที่เส้นโค้ง 2 เส้นทับกันตลอดในตำแหน่งสุดท้ายที่อ่านได้จากกราฟ คือค่า 0.31 g cat.hr./mole feed สามารถคำนวณเป็นอัตราการไหลของสารตั้งต้นได้เท่ากับ $135.7501 \text{ cm}^3/\text{min}$ สำหรับกรณีการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหนัก 0.1003 กรัม และคำนวณเวลาที่สัมผัส (Contact Time) ได้เท่ากับ 0.0348 วินาที หรือ ความเร็วเชิงสเปซ (Space Velocity) เท่ากับ $28.7356 \text{ วินาที}^{-1}$ ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนต่อมาจะใช้อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่มากกว่าค่าที่ได้นี้ ซึ่งกำหนดให้ประมาณ $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหนักประมาณ 0.1 กรัม เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่สถานะขจัดผลของความต้านทานการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างบรรยากาศของของไหลกับผิวค้ำานอกของตัวเร่งปฏิกิริยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

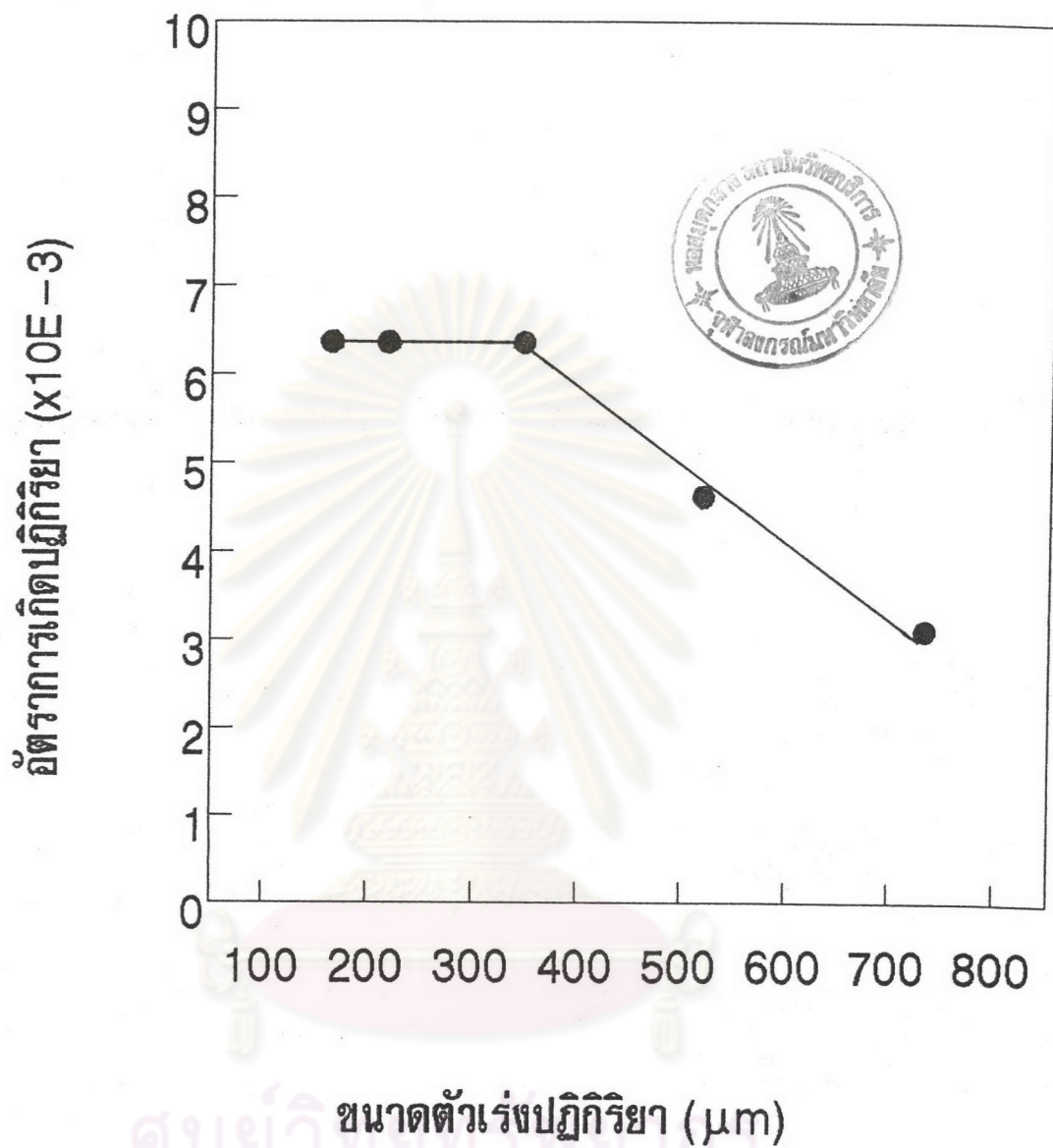


รูปที่ 4.2
 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนรูป
 ของไนโตรเจนออกไซด์กับตัวประกอบเวลา

3. การหาขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสภาวะขจัดผลของความต้านทานการถ่ายเทมวลและความร้อนจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ผ่านรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดต่างๆและมีน้ำหนักประมาณ 0.1 กรัม ซึ่งได้แสดงน้ำหนักที่แน่นอนสำหรับการทดลองของแต่ละขนาดตัวเร่งปฏิกิริยาในตารางที่ 4.4 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลของสารตั้งต้นประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากผลการทดลอง นำมาคำนวณเป็นสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ และแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.5 เมื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 4.3 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ขนานกับแกนนอนตั้งแต่ขนาด 165×10^{-6} เมตร ถึง 337.5×10^{-6} เมตร แล้วมีความชันลดลงอย่างมาก แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า 337.5×10^{-6} เมตร ทำให้ได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่ที่สภาวะการทดลองที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กกว่า 337.5×10^{-6} เมตร ในการทดลองขั้นต่อมา คือเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเฉลี่ยเป็น 215×10^{-6} เมตร หรือ 70 เมช หรือตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดเล็กกว่า 60 เมช และใหญ่กว่า 80 เมช เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเฉลี่ยเป็น 70 เมช ตามต้องการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยาศาสตร์การ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.3

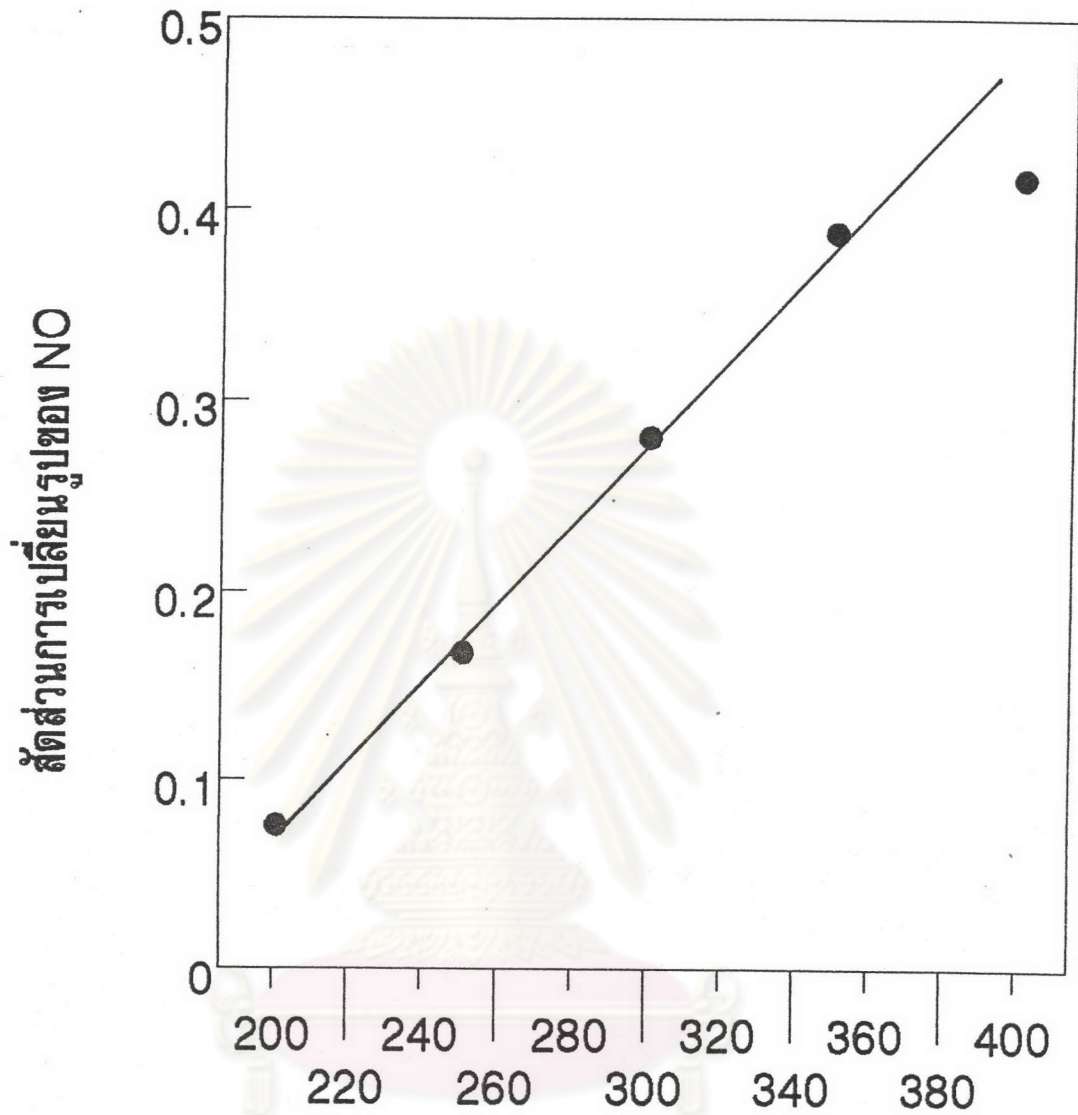
กราฟแสดงขนาดลำแสงปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยเกิดสภาวะขจัดผลของความต้านทาน
การถ่ายเทมวลและความร้อนจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ผ่านรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

4. การหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกรณี ที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองโดยการป้อนสารตั้งต้นด้วยอัตราการไหลประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที ที่อุณหภูมิต่างๆ และไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา ได้ผลการทดลองเป็นพื้นที่ พิกที่นำมาคำนวณเป็นสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ได้ และแสดงผลการคำนวณ ในตารางที่ 4.6 เมื่อนำสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ไปสร้างกราฟเส้นโค้งใน รูปที่ 4.4 พบว่าสัดส่วนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการเพิ่มคงที่เมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.4

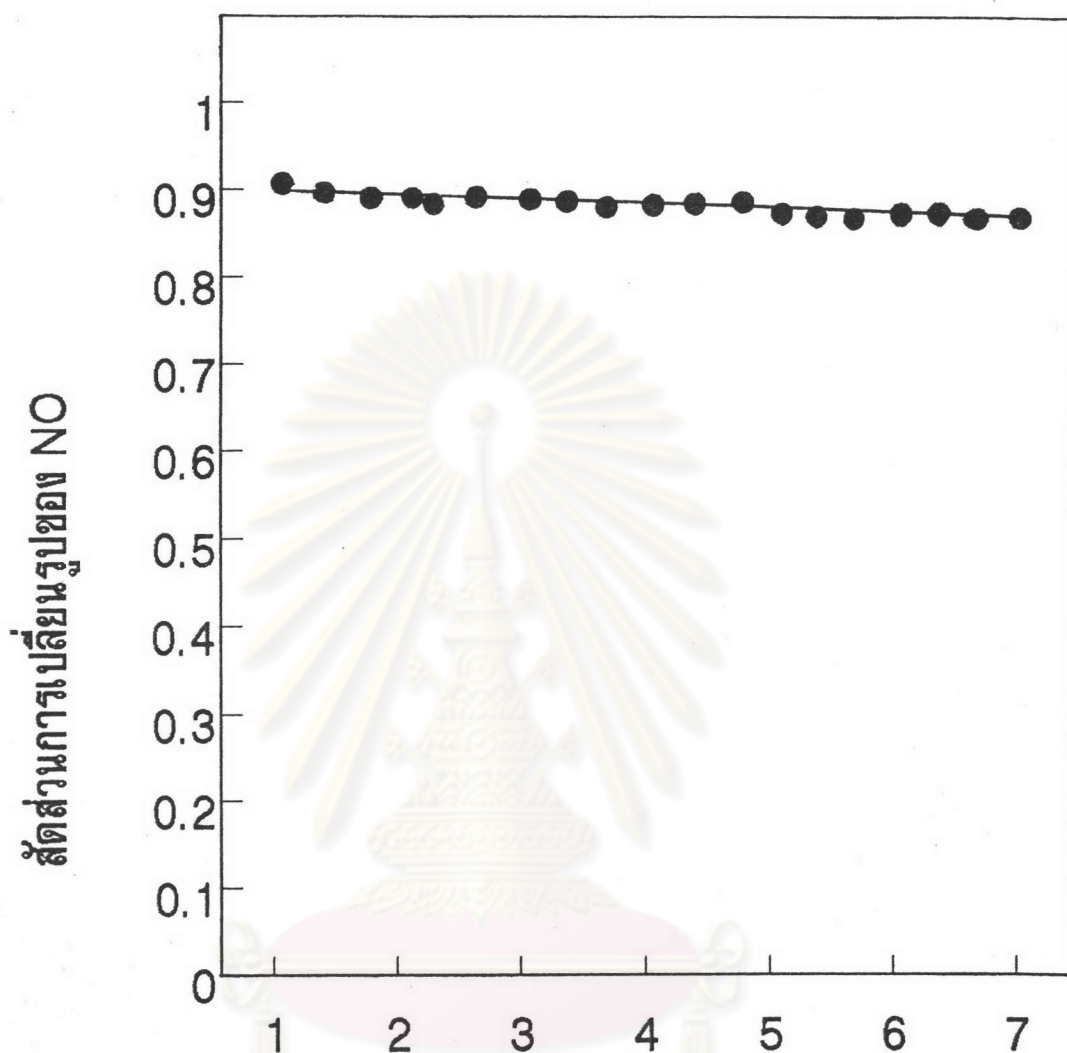
กราฟแสดงผลการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

5. การหาอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง

เป็นการทดลองโดยการป้อนสารตั้งต้นด้วยอัตราการใช้ไฮโดรเจนที่ประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิคงที่ 300 องศาเซลเซียส และผลจากการทดลองในข้อ 4.2.3 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช หนัก 0.1011 กรัม ได้ผลการทดลองเป็นพื้นที่ฟิคที่น่ามาคำนวณเป็นสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณไว้ในตารางที่ 4.7 เมื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องในรูปที่ 4.5 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงมีความชันลดลงน้อยมาก ในช่วงระยะเวลาทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 0 ถึง 7 ชั่วโมง ซึ่งแสดงว่าในการทดลองขั้นต่อมาสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างน้อย 7 ชั่วโมง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา (ชั่วโมง. นาที)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.5

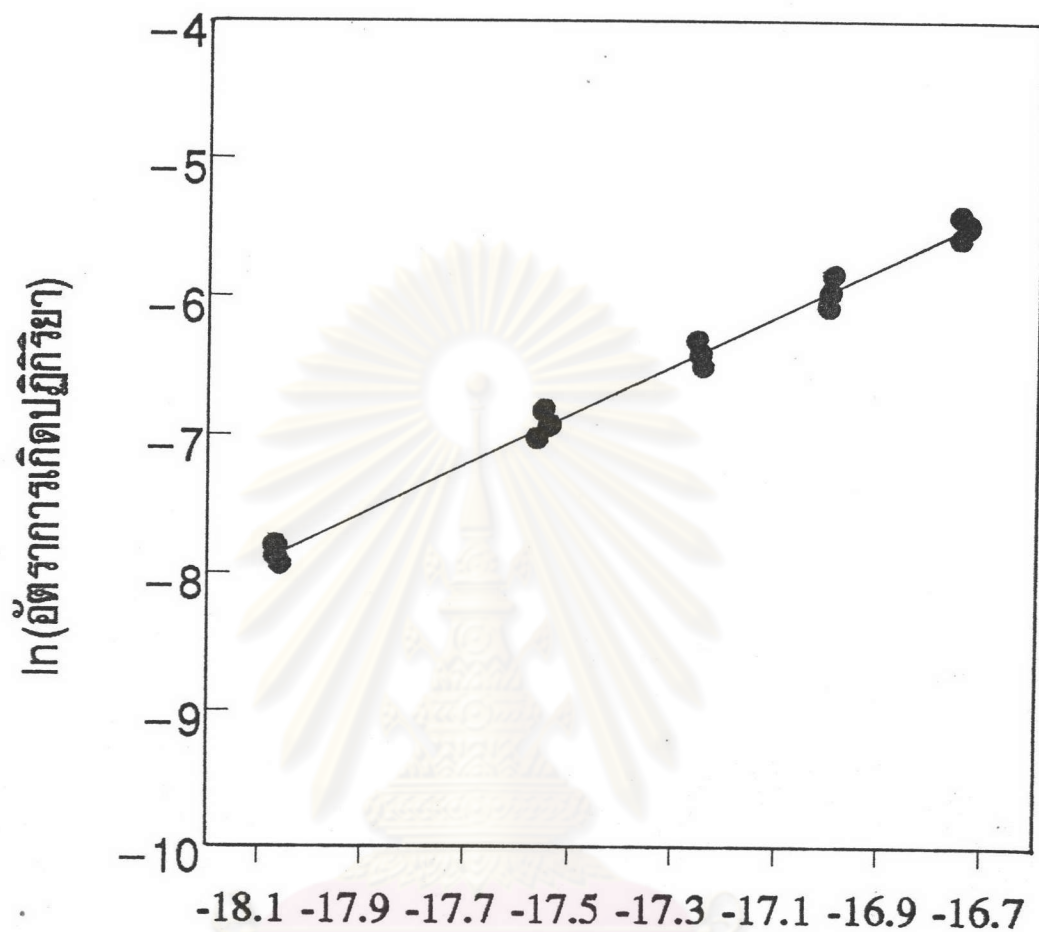
กราฟแสดงอายุการใช้งานสำหรับการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยา

6. การหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นในไตรเจนออกไซด์ในสมการ อัตราการเกิดปฏิกิริยา

ในการทดลองโดยการป้อนสารตั้งต้นด้วยอัตราคงที่ ประมาณ 150 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาด 60/80 เมช น้ำหนัก 0.1009 กรัม ได้ผลการทดลองเป็นพื้นที่ที่พิกัด นำมาคำนวณเป็น สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยานำมาคำนวณเป็นค่าลอการิทึมได้ แสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.8 ถึง 4.12 เมื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเข้มข้นไนโตรเจนออกไซด์กับลอการิทึมของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 4.6 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น และจากกราฟรูปที่ 4.6 หรือจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Linear Regression สามารถหาค่าความชันและจุดตัดแกนตั้งได้ โดยได้แสดงผลไว้ในตารางที่ 4.18 จากสมการคณิตศาสตร์ในภาคผนวก ข ทำให้ทราบอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นในไตรเจนออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความชันที่ได้

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการคำนวณหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา ด้วยวิธีการ Linear Regression

ผลการคำนวณด้วยวิธีการ Linear Regression	
ค่าความชัน	1.7096
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความชัน	0.0793
จุดตัดแกนตั้ง	23.0507
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของจุดตัดแกนตั้ง	0.1760
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.9528
จำนวนข้อมูล	25



ln(ความเข้มข้น NO ในสารตั้งต้น)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.6

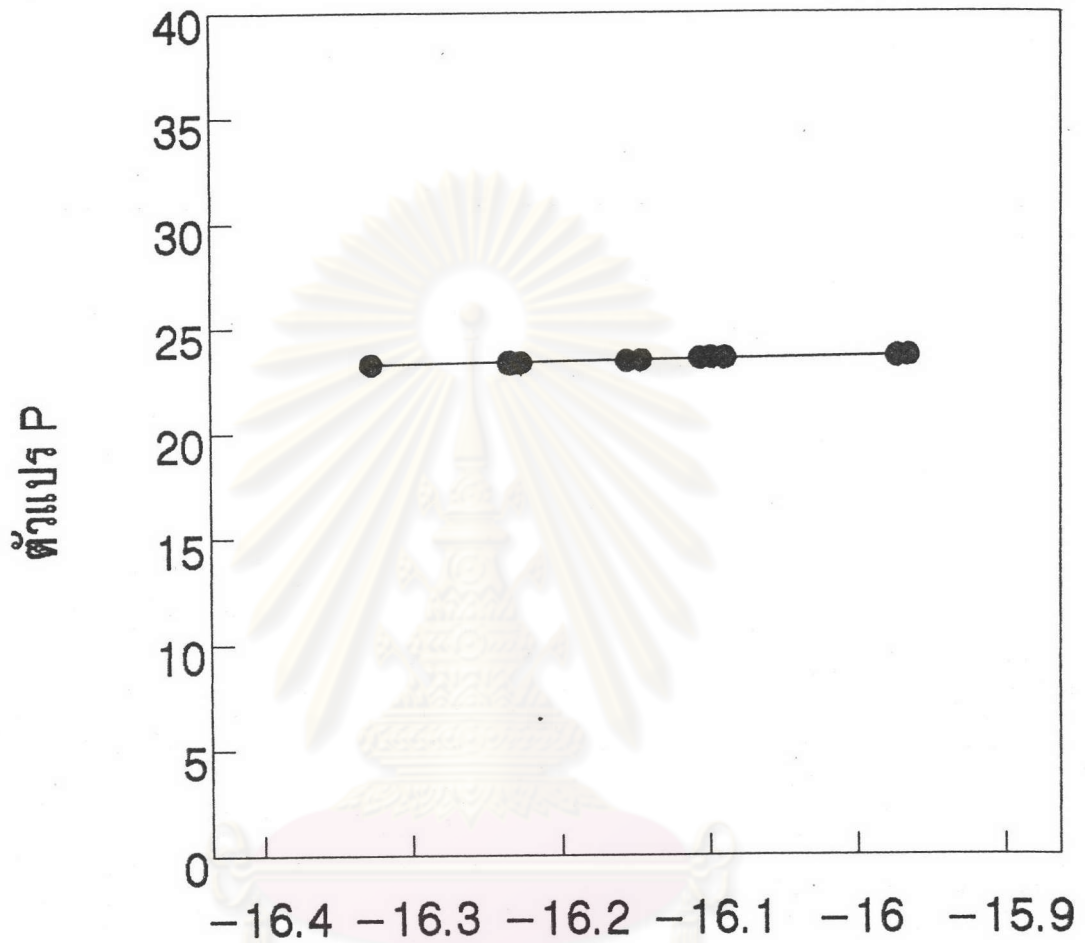
กราฟแสดงการหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้น
ในไตรเจนออกไซด์ในสมการอัตราเร็ว

7. การหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นไฮโดรเจนในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองโดยป้อนสารตั้งต้นด้วยอัตราการไหลคงที่ ประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาหนัก 0.1006 กรัม ได้ผลการทดลองเป็นพื้นที่ผิวที่สามารถคำนวณเป็นสัดส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนออกไซด์ได้ เมื่อคำนวณเป็นลอการิทึมของอัตราการเกิดปฏิกิริยาพร้อมก็นำอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่ได้จากหัวข้อ 6 มาคำนวณเป็นตัวแปร P ซึ่งกำหนดไว้เพื่อใช้หาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน โดยแสดงสมการคณิตศาสตร์ของตัวแปร P ไว้ในภาคผนวก ข ค่าของตัวแปร P แสดงในตารางที่ 4.13 ถึง 4.17 นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเข้มข้นไฮโดรเจนกับตัวแปร P ได้เป็นเส้นตรงในรูปที่ 4.7 พบว่ามีความชันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และด้วยการคำนวณวิธี Linear Regression หรือจากกราฟ สามารถหาค่าความชันและจุดตัดแกนตั้งได้ ทำให้ทราบอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจน ซึ่งเท่ากับค่าความชัน และได้แสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการคำนวณหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา ด้วยวิธีการ Linear Regression

ผลการคำนวณด้วยวิธีการ Linear Regression	
ค่าความชัน	1.0922
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความชัน	0.1397
จุดตัดแกนตั้ง	40.5926
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของจุดตัดแกนตั้ง	0.0849
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.7266
จำนวนข้อมูล	25



ln(ความเข้มข้นของ H₂ ในสารตั้งต้น)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.7

กราฟแสดงการหาอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้น
ไฮโดรเจนในสมการอัตราเร็ว

8. การหาแฟคเตอร์แห่งความถี่และพลังงานกระตุ้น

จากการคำนวณในหัวข้อ 5 และ 6 ทำให้ทราบอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์และไฮโดรเจน โดยได้แสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองในตารางที่ 4.8 ถึง 4.12 และตารางที่ 4.13 ถึง 4.17 รวมทั้งอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้ง 2 ค่า แทนลงในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา สามารถคำนวณเป็นตัวแปร Q แสดงในตารางที่ 4.20 เมื่อนำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร Q กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ของปฏิกิริยา จะได้กราฟเส้นตรงในรูปที่ 4.8 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิลดลง และจากการคำนวณด้วยวิธีการ Linear Regression สามารถหาความชันและจุดตัดแกนตั้งได้ จากสมการคณิตศาสตร์ในภาคผนวก ข ทำให้ทราบว่า ความชันเท่ากับค่าลบของสัดส่วนระหว่างพลังงานกระตุ้นกับค่าคงที่ของก๊าส และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับลอการิทึมของแฟคเตอร์แห่งความถี่ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าแฟคเตอร์แห่งความถี่และพลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส ได้ และได้แสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการคำนวณหาตัวแปร Q เพื่อหาแพกเตอร์แห่งความถี่และพลังงาน
กระตุ้นของปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1009 กรัม	
สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °ซ	สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 °ซ
0.0316	38.5239	0.0320	38.7084
0.0502	38.2864	0.0527	38.4707
0.0697	38.4219	0.0708	38.5047
0.0884	38.5618	0.0889	38.6721
0.1138	38.7809	0.1152	38.9046

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1009 กรัม	
สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °ซ	สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 °ซ
0.0319	38.8349	0.0321	38.9662
0.0527	38.6010	0.0528	38.7439
0.0693	38.7057	0.0705	38.7942
0.0886	38.8141	0.0888	38.8802
0.1155	38.9916	0.1153	39.0573

ตารางที่ 4.20 (ต่อ)

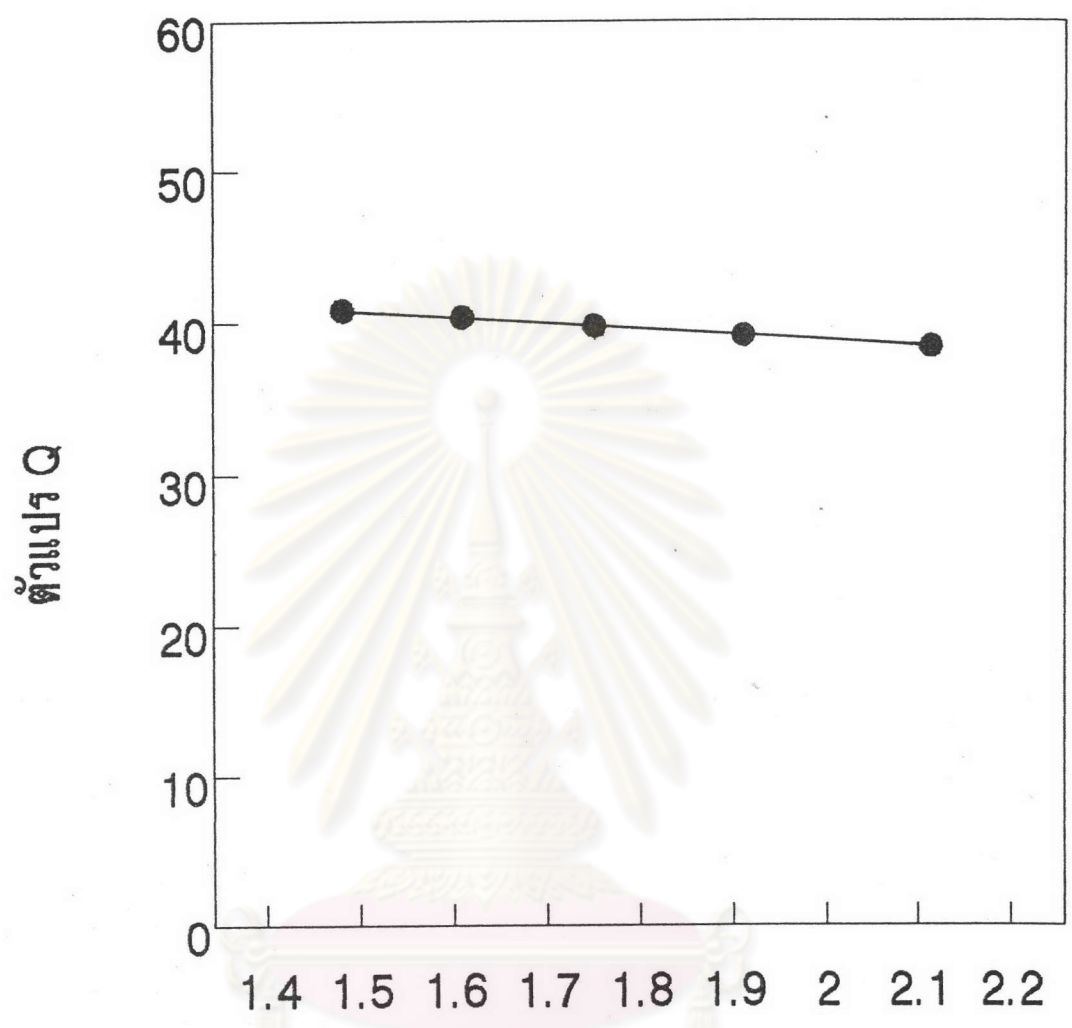
ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1009 กรัม	
สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °ซ		
0.0318	39.1230		
0.0525	38.8582		
0.0694	38.8536		
0.0893	38.9368		
0.1152	39.0708		

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1015 กรัม	
สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °ซ	สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 °ซ
0.1004	40.3933	0.1013	40.4969
0.1181	40.4583	0.1178	40.5576
0.1352	40.4045	0.1338	40.5411
0.1603	40.4054	0.1600	40.4873
0.1801	40.4445	0.1804	40.5253

ตารางที่ 4.20 (ต่อ)

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1015 กรัม	
สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °ซ	สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 °ซ
0.1004	40.5651	0.0990	40.6333
0.1169	40.6169	0.1179	40.6601
0.1348	40.5742	0.1345	40.6095
0.1601	40.5569	0.1602	40.6126
0.1801	40.5776	0.1805	40.6232

ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 60/80 เมช		น้ำหนัก 0.1015 กรัม	
สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	ตัวแปร Q ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °ซ		
0.0991	40.6250		
0.1077	40.6445		
0.1331	40.6395		
0.1603	40.6211		
0.1804	40.6394		



ศูนย์วิจัยและพัฒนาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.8

กราฟแสดงการหาแฟคเตอร์แห่งความถี่และพลังงานกระตุ้นในสมการอาร์เรเนียส

ตารางที่ 4.21 แสดงผลการคำนวณเพื่อหาแฟกเตอร์แห่งความถี่และพลังงานกระตุ้นด้วยวิธี

Linear Regression

ผลการคำนวณด้วยวิธีการ Linear Regression	
ค่าความชัน	-538.9680
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความชัน	586.4559
จุดตัดแกนตั้ง	41.4952
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของจุดตัดแกนตั้ง	0.9219
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0173
จำนวนข้อมูล	50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. การคำนวณทดสอบสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้

จากผลการคำนวณในหัวข้อ 5, 6 และ 7 ทำให้ทราบอันดับของปฏิกิริยาเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์และไฮโดรเจน แพกเตอร์แห่งความถี่ และพลังงานกระตุ้น ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.18, 4.19 และ 4.21 ตามลำดับ ทำให้ทราบสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส ดังนี้

$$\begin{aligned}
 -r_A &= A e^{-E/RT} C_{\text{NO}}^\alpha C_{\text{H}_2}^\beta \\
 &= 1.0499 \times 10^{18} \times e^{-538.9680/T} \times C_{\text{NO}}^{1.71} \times C_{\text{H}_2}^{1.09}
 \end{aligned}$$

และเมื่อนำความเข้มข้นของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของปฏิกิริยาไปแทนค่าในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา สามารถคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยแสดงไว้ในตารางที่ 4.22 ถึง 4.26 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความผิดพลาดน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบความผิดพลาดของสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยากับผล
การทดลองที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 200 องศาเซลเซียส

สัดส่วนของ NO ใน สารตั้งต้น (%)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °ซ (Mole NO Reacted / hr g cat.)		เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)
	จากการทดลอง ($\times 10^{-3}$)	จากการคำนวณ ($\times 10^{-3}$)	
0.1004	2.5992	2.5034	-3.6857
0.1181	3.1586	2.8510	-9.7385
0.1352	3.6044	3.4329	-4.7581
0.1603	4.3915	4.1789	-4.8412
0.1801	5.0272	4.6004	-8.4898

ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบความผิดพลาดของสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยากับผล
การทดลองที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส

สัดส่วนของ NO ใน สารตั้งต้น (%)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 °ซ (Mole NO Reacted / hr g cat.)		เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)
	จากการทดลอง ($\times 10^{-3}$)	จากการคำนวณ ($\times 10^{-3}$)	
0.1013	2.9271	2.8342	-3.1738
0.1178	3.4819	3.1728	-8.8773
0.1338	4.0405	3.7431	-7.3605
0.1600	4.7170	4.6114	-2.2387
0.1804	5.4783	5.1562	-5.8796

ตารางที่ 4.24 แสดงผลการทดสอบความผิดพลาดของสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยากับผล
การทดลองที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส

สัดส่วนของ NO ใน สารตั้งต้น (%)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 °ซ (Mole NO Reacted / hr g cat.)		เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)
	จากการทดลอง ($\times 10^{-3}$)	จากการคำนวณ ($\times 10^{-3}$)	
0.1004	3.0822	3.0502	-1.0382
0.1169	3.6468	3.4268	-6.0327
0.1348	4.2527	4.1702	-1.9399
0.1601	5.0882	5.0767	-0.2260
0.1801	5.7411	5.6106	-2.2731

ตารางที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบความผิดพลาดของสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยากับผล
การทดลองที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส

สัดส่วนของ NO ใน สารตั้งต้น (%)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 °ซ (Mole NO Reacted / hr g cat.)		เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)
	จากการทดลอง ($\times 10^{-3}$)	จากการคำนวณ ($\times 10^{-3}$)	
0.0990	3.2193	3.2089	-0.3231
0.1179	3.8807	3.7661	-2.9531
0.1345	4.3924	4.4836	2.0763
0.1602	5.3704	5.4652	1.7652
0.1805	6.0462	6.0883	0.6963



ตารางที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบความผิดพลาดของสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยากับผลการทดลองที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส

สัดส่วนของ NO ในสารตั้งต้น (%)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °ซ (Mole NO Reacted / hr g cat.)		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
	จากการทดลอง ($\times 10^{-3}$)	จากการคำนวณ ($\times 10^{-3}$)	
0.0991	3.2238	3.4548	7.1655
0.1177	3.8475	4.0440	5.1072
0.1331	4.4402	4.6901	5.6281
0.1603	5.4483	5.8613	7.5803
0.1804	6.1284	6.4739	5.6377

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย