หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาระหว่างกาซไฮโดรเจน และกาซออกซิเจนในสภาวะกาซไฮโดรเจนมากเกินพอคือตัวเร่งปฏิกิริยาพลาตินัมเหมาะสมทั้งทางด้านพลังงานที่เกี่ยวข้องใช้น้อย ความปลอดภัยในแง่ทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ประหยัดทั้งทางด้านเศรษฐกิจ เพราะปริมาณใช้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ในอุตสาหกรรม ก็ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พลาตินัม หรือ แพลลาเดียม (Pd) (1), (2) ในปฏิกิริยากำจัดกาซออกซิเจนออกจากกาซไฮโดรเจน สิ่งที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งคือ ถ้าต้องการกำจัดกาซออกซิเจนออกจากบรรยากาศกาซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูง เช่น ตั้งแต่ 150 °ซ ขึ้นไปตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้แทนตัวเร่งปฏิกิริยาพลาตินัมได้ คือ นิเกิล แม้ว่าความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะไม่ดีเท่า และมีความยุ่งยากในการป้องกันไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมคุณภาพ เนื่องจากกาซออกซิเจนมากกว่า ในอุตสาหกรรมก็ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นิเกิลในช่วงอุณหภูมิ 200-400 °ซ

ดังได้กล่าวไว้ในบทก่อนคือ ปฏิกิริยาระหว่างกาซไฮโดรเจน และกาซออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้นั่นเอง แม้ว่าในกรณีการทดลองในที่นี้ก็เป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้กาซไฮโดรเจน บนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา เราทราบว่าปฏิกิริยาเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทันทีทันใด เมื่อสภาวะเหมาะสม ดังนั้นผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนย่อมเข้ามาเกี่ยวข้อง ปฏิกิริยาในการทดลองของเราก็ไม่พ้นกฎเกณฑ์ข้อนี้ การหาสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา หรือกลไกของปฏิกิริยา ที่แท้จริงย่อมกระทำได้ยาก จากผลดังกล่าวการทดลองในที่นี้จึงทำการทดลองในช่วงที่ยังมีผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนเกี่ยวข้องระดับหนึ่ง กล่าวคือการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในตัวเร่งปฏิกิริยา ยังมีผลเกี่ยวข้อง ผลการทดลองได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.2 เป็นการทดลองในช่วงของอัตราการไหล 490 - 4500 ซม.^{3} /นาที ที่อุณหภูมิ 30 °ซ ความดัน 1 บรรยากาศ และสรุปได้ว่าช่วงอัตราการไหลตั้งแต่ประมาณ 1000 ซม.^{3}/นาที ขึ้นไป ที่ถือได้ว่าไม่มีผลของการถ่ายมวลภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้อง วิธีการอันหนึ่งที่เราจะสามารถตรวจได้ว่า สภาวะการทดลองที่เรากำลังสนใจนั้นมีผลของการถ่ายเทมวลและความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องหรือไม่ คือการคำนวณจากสมการขีดจำกัด (28) ในที่นี้จะสนใจการคำนวณ กรณีที่ผลของการถ่ายเทมวลและความร้อน ภายนอกตัวเร่ง

ปฏิกิริยา ตามสมการขีดจำกัด ให้ผลเป็นเช่นไร รายละเอียดและตัวอย่างการคำนวณ แสดงไว้ในภาคผนวก ญ

กรณีไม่มีผลของการถ่ายเทมวลภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา เกี่ยวข้องแล้วสมการขีดจำกัด กล่าวว่า

$$\frac{L}{d_p} > \frac{0.20}{Pe_a} n \ln \frac{C_i}{C_f} \qquad (5.1)$$

และ

$$\frac{(-r)\, r_p}{C_b\, K_c} < \frac{0.15}{n} \qquad (5.2)$$

เมื่อ $(-r)$ = อัตราเร็วปฏิกิริยา ต่อหน่วยปริมาตรตัวเร่งปฏิกิริยา กรัมโมล / วินาที - ซม^3

r_p = รัศมีตัวเร่งปฏิกิริยา, ซม.

C_b = ความเข้มข้นในกาซเฟส ของสารตั้งต้นที่สนใจ, $\frac{\text{กรัมโมล}}{\text{ซม.}^3}$

$= P_i / RT$

P_i = ความดันย่อยของกาซสารตั้งต้น

K_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างกาซเฟส และตัวเร่งปฏิกิริยา, ซม / วินาที

R = ค่าคงที่ กาซ = 82.057 $\frac{\text{ซม. - บรรยากาศ}}{\text{กรัมโมล-เคลวิน}}$

การทดลองในที่นี้ได้เป็นไปตามสมการ (5.1) กล่าวคือสภาวะการไหลถือได้ว่าไม่มีการกระจายในแนวแกนเตาปฏิกรณ์เคมี ดังการคำนวณในภาคผนวก จ. ในภาคผนวก ญ แสดงผลการคำนวณตามสมการ (5.2)

กรณีไม่มีผลของการถ่ายเทความร้อนภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้องแล้วสมการขีดจำกัด กล่าวว่า

$$\frac{(-\Delta H)(-r)\, r_p}{h\, T_b} < 0.15\, \frac{R\, T_b}{E_s} \qquad (5.3)$$

$-\Delta H$ = ค่าความร้อนจากปฏิกิริยา = -115,600 $\frac{\text{คาลอรี}}{\text{โมล}}$ (23)

E_s = ค่าพลังงานกระตุ้นแท้จริงของปฏิกิริยา

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพา

T_b = อุณหภูมิของกาซเฟส

ผลการคำนวณ ตามสมการ (5.2) และ (5.3) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ญ พบว่า

$$\frac{(-r)\, r_p}{C_b\, K_c} \approx \frac{0.15}{n} \qquad (5.4)$$

และ $$\frac{-\Delta H\,(-r)\, r_p}{h\, T_b} < \frac{0.15\quad R\, T_b}{E_s} \qquad (5.5)$$

ปริมาณขนาดในสมการ (5.4) มีค่าเท่ากัน ตามสมการขีดจำกัด แสดงว่าผลการทดลองอาจจะมีผลของการถ่ายเทมวล ภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้อง และตามสมการ (5.5) ผลการคำนวณเป็นไปตามสมการขีดจำกัด แสดงว่า ผลของการถ่ายความร้อนภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลเกี่ยวข้องในผลการทดลอง จากการใช้สมการขีดจำกัด จะพบว่าให้ผลไม่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามการคำนวณตามสมการขีดจำกัด อาจจะผิดพลาดได้ เพราะมีการสมมติค่าตัวเลขที่เราไม่สามารถวัดได้บางค่าในที่นี้จะใช้การตัดสิน โดยพิจารณาจากผลการทดลอง ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งจะพบว่าช่วงอัตราการไหล ประมาณ 490 - 1000 ซม^3/นาที ที่อุณหภูมิ 30 °ซ ให้สัดส่วนการเปลี่ยนรูป น้อยกว่ากรณีช่วงอัตราการไหล ประมาณ 1000 ซม^3/นาที ขึ้นไปอย่างชัดเจน ที่ค่าตัวประกอบเวลาเท่ากัน แสดงว่าช่วงอัตราการไหลต่ำกว่า 1000 ซม^3/นาที ลงไปมีผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อพิจารณาช่วงอัตราการไหลประมาณ 1000 ซม^3/นาที ขึ้นไป พบปรากฏการณ์ตรงกันข้าม กล่าวคือ ที่ค่าตัวประกอบเวลาเท่ากัน สัดส่วนของการเปลี่ยนรูปกาซออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบเท่ากัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ช่วงสภาวะการทดลองตั้งแต่อัตราการไหล ประมาณ 1000 ซม^3/นาที ขึ้นไป ไม่มีผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้อง

การใช้สมการขีดจำกัดช่วยในการทำนายผลของการถ่ายเทมวลและความร้อนนิยมใช้กัน ในกรณีที่ เราไม่มีความมั่นใจว่า ช่วงอัตราการไหลที่ทำการทดลองนั้นมีความว่องไวในการตรวจสอบผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนเพียงพอหรือไม่ เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำ ๆ นั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก (25) การทดลองในที่นี้มีความมั่นใจว่าช่วงอัตราการไหลที่ทำการทดลองมีความว่องไว ในการตรวจสอบผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงพอ เพราะที่ค่าตัวประกอบเวลาเท่ากัน สัดส่วนการเปลี่ยนรูปของกาซออกซิเจน ในช่วงอัตราการไหล 490 - 1000 ซม^3/นาที ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 2 เท่า น้อยกว่ากรณีช่วงอัตราการไหล ประมาณ 1000 - 4500 ซม^3/นาที ซึ่งเปลี่ยนแปลงไป 4.5 เท่า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อย่างชัดเจน

ผลการทดลองหาสมการอัตราเร็วของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.005 % Pt/Al_2O_3 ในการทดลองนี้ สรุปได้ว่า สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอยู่ในรูป

$$-r_{O_2} = 2.9979 \exp(-1187/RT) P_{O_2}^{1.7269} \qquad (5.6)$$

รูปสมการ (5.6) เป็นรูปสมการอัตราเร็วอย่างง่ายแบบสมการยกกำลัง การเสนอสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา ในลักษณะเช่นนี้ จะสะดวกและง่าย เหมาะสำหรับกรณีที่ไม่สามารถหากลไกของปฏิกิริยาแท้จริงได้ อาจเป็นเพราะช่วงการทดลองยังมีผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนเกี่ยวข้องอยู่ หรือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาแท้จริงอยู่ในรูปที่ยุ่งยากมาก แม้จะเป็นสมการอัตราเร็วอย่างง่าย แต่ก็นำไปใช้งานได้ ในอุตสาหกรรมเองการใช้งานส่วนใหญ่ยังอยู่ในสภาวะที่มีผลของการถ่ายเทมวลและความร้อนปรากฏด้วย สภาวะที่ใช้งานได้ของสมการ (5.6) แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการเปรียบเทียบสภาวะ และผลการทดลองในที่นี้และการทดลองของ J.A.Maymo และ J.M.Smith(23) ตามตารางที่ 5.1 พบว่าข้อแตกต่างของการทดลองและผลการทดลองในที่นี้กับของ J.A.Maymo และ J.M.Smith มีด้วยกัน 3 ประการ คือ ประการแรกพื้นที่ผิวซับพอร์ทที่ใช้น้อยกว่า กล่าวคือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของซับพอร์ทเท่ากับ 70 เมตร^2/กรัม และ 350 เมตร^2/กรัม ตามลำดับ ประการที่สองค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้น้อยกว่ากล่าวคือ 1187 และ 5230 คาลอรี/โมล ตามลำดับ ประการที่สาม ช่วงอัตราการไหลมากกว่า กล่าวคือ $4.02 - 18.098\times10^{-4}$ โมล/วินาที ตามการทดลองของ J.A.Maymo และ J.M.Smith ถือว่าไม่มีผลการถ่ายเทมวล และความร้อนเกี่ยวข้องภายในเตาปฏิกรณ์เคมี เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้น ทั้งสองสภาวะค่าที่ได้จากการทดลองในที่นี้มีค่าน้อยกว่า ผลอันนี้อาจจะมีสาเหตุเนื่องมาจากการทดลองในที่นี้ยังมีผลของการถ่ายเทมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้มีค่าน้อยกว่าปกติ(11) ในสภาวะที่มีผลของการถ่ายเทมวลสารและความร้อนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้องแล้ว ค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จะมีค่าประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าพลังงานกระตุ้นแท้จริง(11) เมื่อพิจารณาตามเหตุผลดังกล่าวแล้ว ค่าพลังงานกระตุ้นที่แท้จริงตามการทดลองในที่นี้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสภาวะการทดลอง และผลการทดลอง ของ J.A. Maymo & J.M. Smith (15) กับการทดลองในที่นี้ สำหรับปฏิกิริยาระหว่างกาซไฮโดรเจนและกาซออกซิเจน ในสภาวะกาซไฮโดรเจนมากเกินพอ

สภาวะ	การทดลองในที่นี้	การทดลองของ J.A.Maymo & J.M. Smith
ช่วงอุณหภูมิ (°ซ)	36 -222	80 - 140
ความเข้มข้นของกาซออกซิเจน (% โดยปริมาตร)	0 - 3	0 - 6
ตัวเร่งปฏิกิริยา		
- พื้นที่ผิวซับพอร์ท อะลูมินา (เมตร^2/กรัม)	70	300
- ความเข้มข้นของพลาตินัม บนซับพอร์ท (% โดยน้ำหนัก)	0.005	0.005
- ขนาด (เมช)	200-250	80-250
- อุณหภูมิเผาที่อุณหภูมิสูง (°ซ)(5 ชั่วโมง)	500	550
- อุณหภูมิรีดิวซ์ (°ซ) (5 ชั่วโมง)	300	330
สมการอัตราเร็วปฏิกิริยา	$-r_{O_2}=2.9979 \exp\frac{(-1187)}{RT}P_{O_2}^{1.7269}$	$-r_{O_2}=0.655\exp\frac{(-5230)}{RT}P_{O_2}^{0.802}$
ช่วงอัตราการไหลเข้าของกาซ (10^5โมล/วินาที)	40.21-180.98	2.81-5.82

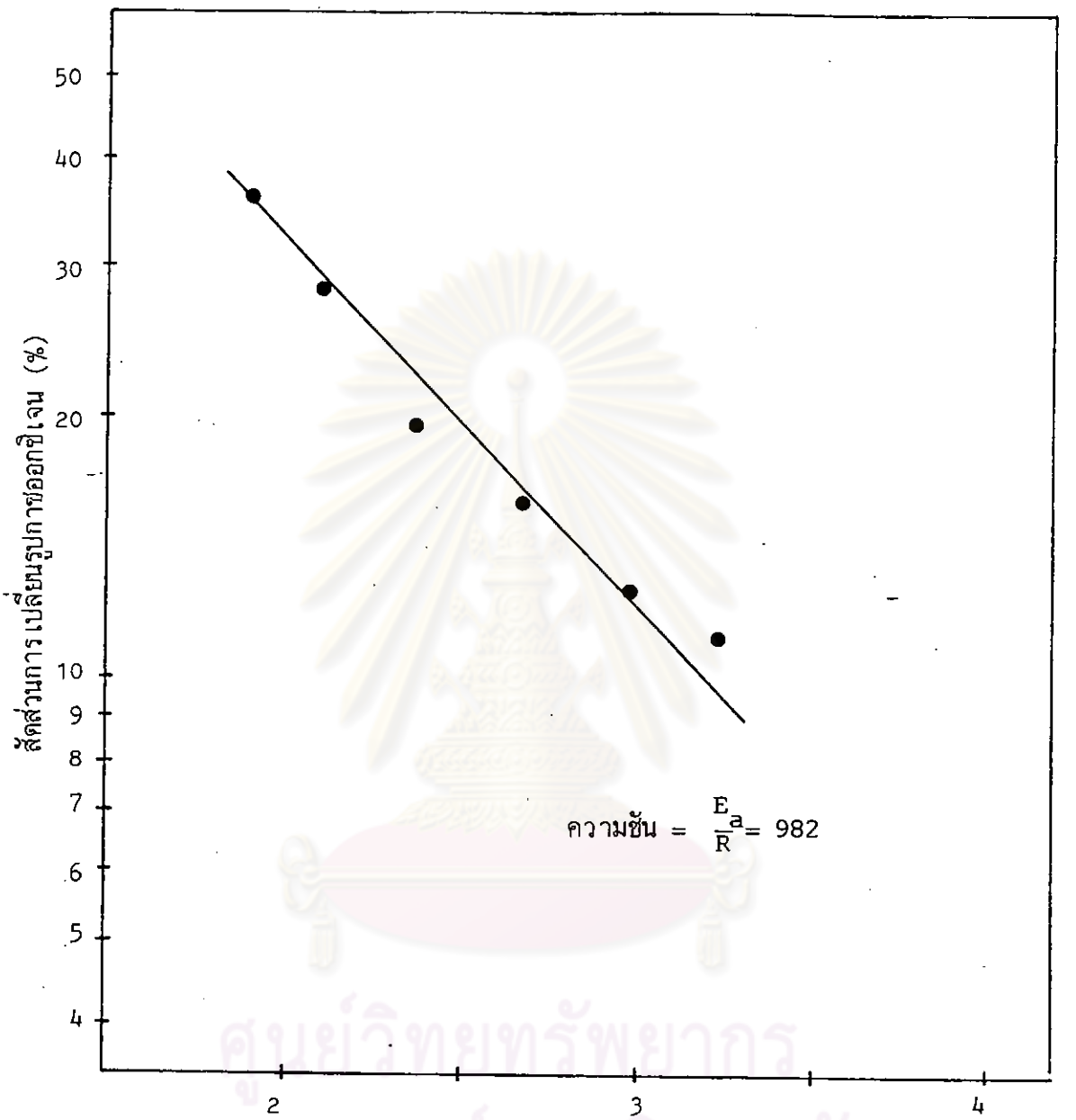
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก็มีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นตามการทดลองของ J.A.Maymo และ J.M.Smith สาเหตุอีกประการหนึ่งอาจเนื่องมาจาก ผลของการใช้ซับพอร์ทที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดต่างกัน ทำให้มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผลึกโลหะบนซับพอร์ทต่างกัน ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงต่างกันไปด้วย เพื่อพิสูจน์ผลดังกล่าวการทดลองในที่นี้ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาพลาตินัม โดยใช้ซับพอร์ทที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมด 350 เมตร^2/กรัม แทนซับพอร์ท 70 เมตร^2/กรัม ความเข้มข้นของโลหะพลาตินัมบนซับพอร์ท และวิธีการเตรียมเหมือนกันทุกประการ ทำการทดลองหาค่าพลังงานกระตุ้นในสภาวะที่มีผลของการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้อง เปรียบเทียบผลการทดลองกับการทดลองเดิมที่ใช้ซับพอร์ท 70 เมตร^2/กรัม ดังแสดงการทดลองในรูปที่ 5.1 ผลการทดลองพบว่า กรณีใช้ซับพอร์ท 350 เมตร^2/กรัม ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 1952 คาลอรี/โมล มากกว่ากรณีใช้ซับพอร์ท 70 เมตร^2/กรัม ซึ่งให้ค่าพลังงานกระตุ้น 1187 คาลอรี/โมล แสดงว่าการใช้ซับพอร์ทที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าอาจมีผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่างกัน

พิจารณาสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาที่หาได้ในการทดลองที่นี้ กับการทดลองของ J.A. Maymo และ J.M. Smith ดังแสดงในตารางที่ 5.1 จะพบว่าเมื่อสภาวะของระบบเหมือนกันแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองนี้ ให้ค่าอัตราเร็วปฏิกิริยาดีกว่า หรือกล่าวได้ว่า มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่า โดยทั่วไปในสภาวะที่มีผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้องด้วยแล้ว ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าพลังงานกระตุ้นแท้จริง (3),(11) หรือค่าพลังงานกระตุ้นกรณีไม่มีผลของการถ่ายเทมวล และความร้อนเกี่ยวข้องเลย ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4.2.4 พลังงานกระตุ้นที่กล่าวมาทั้งหมดนี้อาจเป็นพลังงานกระตุ้นปรากฏ โดยเฉพาะกรณีรูปสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาแบบยกกำลัง ในการทดลองที่นี้ ค่าพลังงานกระตุ้นปรากฏตามสมการ (5.5) เมื่อไม่มีผลของการถ่ายเทมวลและความร้อนเกี่ยวข้องก็จะมีค่าประมาณ 2 กิโลคาลอรี/โมล ซึ่งจะพบว่ามีค่าน้อย เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะมีเหตุผลคล้ายดังการพิจารณาในหัวข้อ 2.4.2.4

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ารูปสมการอัตราเร็วปฏิกิริยานี้รูปทั่วไปตามสมการ (5.6)

$$-r = \frac{(\text{เทอมทางจลนพลศาสตร์})(\text{ความต่างศักย์})}{(\text{เทอมการดูดซับสาร})^{n}} \qquad (5.6)$$



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังชันลอการิทึมของเปอร์เซนต์สัดส่วนการเปลี่ยนรูปกาซออกซิเจนกับส่วนกลับของอุณหภูมิ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.005% Pt/Al_2O_3 350 เมตร^2/กรัม อัตราการไหลเข้าของการรวม 2364 ซม^3/นาที ที่ 30 °ซ ความดัน 1 บรรยากาศ ความเข้มข้นกาซออกซิเจน,กาซไฮโดรเจน,กาซไนโตรเจน 1.99,17.72,80.29 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ n เป็นค่าคงที่

สำหรับการทดลองในที่นี้ รูปสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาที่แท้จริง อาจจะมีรูปแบบไม่แตกต่างจากสมการ (5.6) มากนัก จากผลงานของ Norton (35) กล่าวว่า ปฏิกิริยาระหว่างกาซไฮโดรเจนและกาซออกซิเจนบนผิวโลหะ ปฏิกิริยาควบคุมเป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของธาตุทั้งสองบนผิวโลหะ เมื่อประยุกต์กับ กลไกตามแบบของแลงเมียร์-ไฮเชนวูด หรือแบบอื่น รูปสมการอัตราเร็วที่ได้จะคล้ายกับสมการ (5.6) และอัตราส่วนระหว่างเทอมทางจลนพล-ศาสตร์ ต่อ เทอมการดูดซับสาร อาจจะอยู่ในรูป

$$\frac{(\text{เทอมทางจลนพลศาสตร์})}{(\text{เทอมการดูดซับสาร})^n} = \frac{k\,K_O K_H}{(1+K_O P_O+K_H P_H)^n} \qquad (5.7)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา

K_O = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับกาซออกซิเจน

K_H = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับกาซไฮโดรเจน

P_H, P_O = ความดันย่อยของกาซไฮโดรเจน และออกซิเจน ตามลำดับ

กรณีสภาวะกาซไฮโดรเจนมากเกินพอ อาจถือได้ว่า $K_H P_H \gg 1+K_O P_O$ สมการ (5.7) กลายเป็น

$$\frac{(\text{เทอมทางจลนพลศาสตร์})}{(\text{เทอมการดูดซับสาร})^n} = \frac{k\,K_O K_H}{(K_H P_H)^n} \qquad (5.8)$$

เมื่อเปรียบเทียบ สมการ (5.8) กับ สมการอัตราเร็วแบบยกกำลังแล้ว จะพบว่า

$$k' = \frac{k\,K_O K_H}{(K_H)^n} \qquad (5.9)$$

k' = ค่าคงที่ของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาแบบยกกำลัง

โดยการพิจารณาเปรียบเทียบกับหัวข้อ 2.4.2.4 และการใช้สมการอาเรนเนียสกับสมการ(5.9)จะพบว่า

$$\begin{aligned} -E_a' &= -E_a-(n-1)\,\lambda_H + \lambda_O \\ &= -[E_a+ (n-1)\,\lambda_H- \lambda_O] \end{aligned} \qquad (5.10)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ λ_o , λ_H = ความร้อนของการดูดซับกาซออกซิเจนและไฮโดรเจน ตามลำดับ ปกติมีค่าเป็นบวก (11)

และถ้าปฏิกิริยาควบคุมเป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของธาตุทั้งสองบนผิวโลหะแล้ว n = 2 สมการ(5.10) จะได้

$$-E_a' = -[E_a + \lambda_H - \lambda_o] \quad (5.11)$$

นั่นหมายความว่า ค่าพลังงานกระตุ้นปรากฏในสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาแบบยกกำลัง จะมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นแท้จริง, E_a' และขนาดจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า λ_H, λ_o จากผลงานของ Norton(35) พบว่า การดูดซับกาซไฮโดรเจน บนผิวโลหะหมู่ธาตุ-ทรานสิชั่น ค่า λ_H จะอยู่ในช่วง 50-90 กิโลจูล/โมล หรือประมาณ 12-22 กิโลคาลอรี่/โมล และ λ_o มีค่าประมาณ 250 กิโลจูล/โมล สำหรับโลหะพลาตินัม หรือแพลลาเดียม ตามสมการ (5.11) จะพบว่าค่า λ_o มีผลทำให้ค่า E_a' มีค่าน้อยมากพอสมควร สาเหตุนี้อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นปรากฏในการทดลองมีค่าน้อย

สาเหตุอีกประการหนึ่งที่คาดว่าสนับสนุนค่าพลังงานกระตุ้นปรากฏในที่นี้ว่า ทำไมถึงมีค่าต่ำ คือ พิจารณาตามทฤษฎีทรานสิชั่นสเตท (3),(11) ปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าจะเกิดขึ้นได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาการทดลองในที่นี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ พลาตินัม พบว่าสามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ แม้ที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่าปฏิกิริยาเกิดได้ดี ค่าพลังงานกระตุ้นจึงมีค่าต่ำ

สิ่งที่น่าสังเกตในการทดลองนี้คือ ถ้าเราสามารถหาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลหรือทองแดง ให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาดีขึ้น อาจจะสามารถใช้แทนตัวเร่งปฏิกิริยาพลาตินัมได้ เช่น อาจจะเป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ 2 ชนิด เช่น นิเกิลกับพลาตินัม หรือมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป ก็จะเป็นแนวทางใหม่อันหนึ่งทางด้านการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 ชนิด สำหรับปฏิกิริยานี้คือ นิเกิล-เบส อันมีองค์ประกอบเป็น 14% Ni-3.4% Ce_2O_3-0.4% Pt บนซับพอร์ทเซรามิกส์ไฟเบอร์ ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย T.Inui และคณะ(36) สามารถกำจัดกาซออกซิเจนในบรรยากาศไฮโดรเจนจาก 1.3 เปอร์เซนต์ โดยปริมาตรเหลือต่ำกว่า 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) แม้ว่าจะใช้ความเร็วเชิงสเปซสูงถึง 410,000 ชั่วโมง$^{-1}$ และสามารถกำจัดกาซออกซิเจนได้ แม้อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะพบว่ามีคุณสมบัติ

ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลชนิดเดียว การทดลองในที่นี้ได้ทดลองเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะนี้ขึ้นโดยใช้โลหะนิเกิล-พลาตินัม ผลปรากฏว่า ไม่ช่วยให้คุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาดีขึ้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิล การศึกษาแนวทางนี้ต้องอาศัยความรู้ ความเข้าใจทางวิทยาศาสตร์พื้นผิว (surface science) เข้าช่วย และต้องมีความเข้าใจวิธีการเตรียมตัวเร่ง-ปฏิกิริยาพอสมควร จึงสมควรจะได้ทำการศึกษาวิจัยต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย