

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและอภิปราย

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาปฏิกิริยามี เอนสตีร์ฟอรัมมิงในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเองและที่ใช้ในอุตสาหกรรม พบว่า ที่สภาวะความดัน 5 บรรยากาศสัมบูรณ์ อุณหภูมิ 760 °ซ อัตราส่วนไอน้ำต่อก๊าซมี เอน 3.06 ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งที่เตรียมขึ้นเองและใช้ในอุตสาหกรรม ให้ความว่องไวเชิงปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน และจากการเปรียบเทียบชุดของตัว เร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ พบว่า ชุดของ 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 ให้ % การเปลี่ยนรูปของมี เอนสูงสุดคือ 91.83 % เมื่อนำตัว เร่งปฏิกิริยาชุดนี้มาศึกษาสมการอัตรา เร็วของปฏิกิริยาแบบยกกำลัง ได้ว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาแบบยกกำลังมีค่าเป็น $1.83 P_{CH_4}^{1.27} P_{H_2O}^{1.24}$

7.2 อภิปราย

7.2.1 ขนาดของตัว เร่งปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง

การเลือกขนาดของตัว เร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมควรพิจารณาปัจจัย 2 อย่างคือ

1. ความดันลด ถ้าขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กความดันลดยิ่งมาก
2. ช่องว่างที่ผนังเตาปฏิกรณ์เคมี (Channeling) การที่ของไหลไหลผ่านเตา

ปฏิกรณ์เคมีอาจจะวิ่งผ่านเบดโดยไม่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าขนาดของอนุภาคของตัว เร่งปฏิกิริยาใกล้เคียงเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์เคมี :

จากการศึกษา (6) อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์เคมีต่อขนาดของตัว เร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 5-10

สำหรับเตาปฏิกรณ์เคมีที่สร้างขึ้นในการวิจัยนี้ ลักษณะ เป็นท่อสองท่อซ้อนกันอยู่ ดังนั้น ระยะระหว่างท่อทั้ง 2 แทนเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์เคมีซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3175 ซม. และขนาดของอนุภาคตัว เร่งปฏิกรณ์เคมี 40/60 เมช ประมาณ 0.0335 ซม.

นั่นคือ อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์เคมีต่อขนาดของตัว เร่ง

ปฏิกริยามีค่า $\frac{0.3175}{0.0335} = 9.48$ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5-10

7.2.2 ความสูงของชั้นตัวเร่งปฏิกริยาในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

เมื่อดูในภาคผนวก ผ.ข.2.3.1.1 จะเห็นได้ว่า ยิ่งค่า L/d_p มีค่ามาก โอกาสที่จะลดผลของการถ่ายเทมวลตามแนวแกนระหว่างของไหลที่อยู่ระหว่างอนุภาคก็มากขึ้น จากการคำนวณความสูงของชั้นตัวเร่งปฏิกริยาเคมี (L) มีค่า 2.19 ซม. ขนาดของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกริยา (d_p) มีค่า 0.0335 ซม. ดังนั้น อัตราส่วนของความสูงของชั้นตัวเร่งปฏิกริยาเคมีต่อขนาดของตัวเร่งปฏิกริยาเท่ากับ 65.37 ซึ่งทำให้พ้นจากอิทธิพลของการถ่ายเทมวลตามแนวแกนระหว่างของไหลที่อยู่ระหว่างอนุภาค (รายละเอียดดูในภาคผนวก ผ.ข.2.3.1.1)

7.2.3 การเช็คปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับอะลูมินา

เป็นความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเช็คปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับอะลูมินาก่อนเตรียมตัวเร่งปฏิกริยา เพราะการดูจากรายละเอียดที่แนบมากับตัวรองรับอะลูมินาจากโรงงานผลิตไม่เพียงพอ ก่อนการทดลองทุกครั้งสำหรับตัวรองรับอะลูมินาครั้งหนึ่งๆ ควรทำการเช็คปริมาตรของรูพรุน การเช็คปริมาตรของรูพรุนในการวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเป็นตัวเช็ค (เครื่องมือเหมือนกัน) โดยถือว่าน้ำและสารละลายนิเกิลไนเตรด (นิเกิลไนเตรดละลายน้ำ) มีแรงดึงผิวเท่ากัน

ในการเช็คปริมาตรของรูพรุนถ้าให้ถูกต้องต้องเช็คด้วยวิธีของ ปรอท-ฮีเลียม (Mercury-Helium Method) (6)

7.2.3.1 ผลเสียของการใช้ค่าปริมาตรของรูพรุนผิด

ในกรณีนี้จะทำให้การกระจายของสารละลายนิเกิลไนเตรดในรูพรุนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้ตัวเร่งปฏิกริยาที่ได้ออกมานั้น % ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกริยาแต่ละจุดไม่เท่ากัน (local concentration)

7.2.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกริยานิเกิลโดยวิธีซัพชิตแห้ง

จุดบกพร่องของการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยานิเกิลโดยวิธีซัพชิตแห้งนี้คือ ไม่สามารถเตรียมให้มี % สูงได้ ซึ่งสามารถแก้ได้โดยทำการซัพชิตแห้งหลายครั้ง แต่จุดเด่นของการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาโดยวิธีซัพชิตแห้งคือ เตรียมได้ง่าย ควบคุมสภาวะการเตรียมได้ง่าย ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้ลักษณะการเตรียมเป็นศาสตร์มากขึ้น

7.2.5 สภาวะการเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination Condition)

การเผาที่อุณหภูมิสูงนี้มีส่วนสำคัญมากสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการเปลี่ยนรูปนิเกิลไฮดรอกไซด์เป็นรูปนิเกิลออกไซด์ซึ่งเป็นรูปของนิเกิลที่ไม่ละลายน้ำ อุณหภูมิที่ใช้ต้องสูงกว่าอุณหภูมิไฮดรอกไซด์สลายตัวเป็นนิเกิลออกไซด์ การควบคุมสภาวะการเผาที่อุณหภูมิสูงมีผลอย่างมากต่อตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ได้ แบบแผนการเผาที่อุณหภูมิสูงของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชุดต้องเหมือนกันคือ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 °C/นาที ปล่อยให้คงที่ที่ 500 °C (6) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งการควบคุมสภาวะการเผาที่อุณหภูมิสูงดีเพียงใด ลักษณะการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นศาสตร์มากขึ้น แบบแผนการเผาที่อุณหภูมิสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชุดแสดงไว้ในรูปที่ 6.12-6.18

นอกจากนี้แล้วการเผาที่อุณหภูมิสูงยังช่วยกำจัดมลทินที่ไม่ต้องการออกไป

สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งของการเลือกอุณหภูมิของการเผาที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมินั้นต้องเป็นอุณหภูมิที่เริ่มต้นการเกิดการรวมตัวของผลึกนิเกิลออกไซด์ด้วยความร้อน ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไป อาจเกิดการรวมตัวของผลึกนิเกิลออกไซด์ด้วยความร้อนมากเกินไปทำให้พื้นที่ผิวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาลดลงหลังจากการทำการรีดักชันแล้ว นั่นคืออัตราเร็วของปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้นิเกิลออกไซด์อาจสามารถทำปฏิกิริยากับตัวรองรับอะลูมินาเป็นนิเกิลอะลูมิเนต ซึ่งต้องใช้สภาวะที่ค่อนข้างรุนแรงในการรีดักชันนิเกิลอะลูมิเนตเป็นนิเกิล นั่นคือเกิดการรวมตัวของผลึกนิเกิลด้วยความร้อนมากเกินไป (6)

7.2.6 การรีดักชัน (Reduction)

การรีดักชันเป็นการเปลี่ยนรูปนิเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาเป็นนิเกิล การรีดักชันสามารถทำได้ทั้งในเตาปฏิกรณ์เคมีหรือเครื่องเผาที่อุณหภูมิสูง การวิจัยนี้ทำในเตาปฏิกรณ์เคมีโดยใช้อุณหภูมิ 600 °C ความดัน 1 บรรยากาศ เวลา 3 ชั่วโมง(9)

7.2.7 การเปรียบเทียบ % Ni จากการทดลองกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิค แอบซอร์ปชัน

จากตารางที่ 6.2 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบ % Ni บนตัวรองรับ จากการทดลองและจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิค แอบซอร์ปชัน เห็นได้ว่าค่าที่ได้จากเครื่องอะตอมมิค แอบซอร์ปชัน ให้ค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเสมอ ซึ่งสามารถตั้งเป็นข้อสังเกตได้ว่า ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลขึ้นเองในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการซัพพิดแทนท์ จะมีการสูญเสียนิเกิลบางส่วนเสมอ และยิ่งจะสูญเสียนิเกิลมากขึ้นถ้าเป็นการเตรียมโดยวิธีการซัพพิดแทนท์หลายครั้ง ซึ่งสามารถ

แสดงได้ในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงจำนวนครั้งของการชุบของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีการชุบชนิดแห้ง

ชุดของตัวเร่งปฏิกิริยา	จำนวนครั้งของการชุบ	ผลการวิเคราะห์โดยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์ชัน
8% Ni/Al ₂ O ₃ บนตัวรองรับ SA-3232	1	7.67
12% Ni/Al ₂ O ₃ บนตัวรองรับ SA-3232	1	11.35
16% Ni/Al ₂ O ₃ บนตัวรองรับ SA-3232	2	14.18
24% Ni/Al ₂ O ₃ บนตัวรองรับ SA-3232	2	21.13
12% Ni/Al ₂ O ₃ บนตัวรองรับ CS303	3	10.29

หมายเหตุ ข้อจำกัดที่จะต้องเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการชุบชนิดแห้งก็ขึ้นอยู่กับความพร้อมของตัวรองรับ

จากตารางที่ 7.1 เป็นเครื่องยืนยันข้อสังเกต การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีชุบชนิดแห้ง 1 ครั้ง การสูญเสียนิกเกิลในระหว่างการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะน้อยกว่าโดยวิธีการชุบชนิดแห้งมากกว่า 1 ครั้ง

7.2.8 การวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการหลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน

จุดประสงค์ของการวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อต้องการดูว่าหลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง นิกเกิลที่ได้จะอยู่ในรูปอะไร จากตารางที่ 6.3 แสดงให้เห็นว่านิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชุดรวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ในรูปของ NiO หมด

7.2.9 การทดลองเพื่อทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาและการเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม

ตัวเร่งปฏิกิริยาใดที่ให้ % การเปลี่ยนรูปสูงสุด นั้นหมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น

มีความว่องไวในเชิงปฏิกิริยาสูงสุด จากตารางที่ 6.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง ชุดของ 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 ให้ % การเปลี่ยนรูปสูงสุด ซึ่งแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชุดนี้ให้ความว่องไวเชิงปฏิกิริยาสูงสุด ซึ่งหมายถึงการมีพื้นที่ผิวของนิเกิลที่เป็นตำแหน่งเกิดปฏิกิริยามากที่สุด อันเนื่องมาจากเตรียมบนตัวรองรับอะลูมินาที่มีพื้นที่ผิวสูงและ % Ni บนตัวรองรับสูงด้วย ทำให้มีการกระจายของนิเกิลบนตัวรองรับได้ดี มีผลให้พื้นที่ผิวของนิเกิลสูงด้วย แต่ก็มีข้อว่า % Ni บนตัวรองรับยิ่งสูง ความว่องไวเชิงปฏิกิริยาจะสูงตามไปด้วย % Ni บนตัวรองรับสูงขึ้นอาจทำให้ความว่องไวเชิงปฏิกิริยาลดลง อันเนื่องจากการกระจายของนิเกิล (Nickel Dispersion) ลดลง ซึ่งสิ่งเหล่านี้ถูกควบคุมด้วยการรวมตัวของผลิกนิเกิลจากความร้อน เพราะ % Ni บนตัวรองรับสูงเกินไป ทำให้เกิดการรวมตัวของผลิกเนื่องจากความร้อนได้ดีขึ้น ผลทำให้พื้นที่ผิวของนิเกิลที่เป็นตำแหน่งเกิดปฏิกิริยาลดลง ดูได้จากตารางที่ 6.4 ซึ่งเป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลบนตัวรองรับ SA-3232 มีพื้นที่ผิวของตัวรองรับ 30 ± 5 เมตร²/กรัม เมื่อเพิ่ม % Ni บนตัวรองรับจาก 8% เป็น 12% % การเปลี่ยนรูปสูงขึ้น แต่ถ้าเพิ่ม % Ni บนตัวรองรับเป็น 16% , 24% % การเปลี่ยนรูปลดลง นั้นหมายถึงที่สภาวะการทดลองนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการบนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิว 30 ± 5 เมตร²/กรัม ทั้ง 4 ชุด จะได้ว่าชุดของ 12% Ni บนตัวรองรับเหมาะสมที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น 12% Ni บนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวต่างกันคือ ตัวรองรับ SA-3232 พื้นที่ผิว 30 ± 5 เมตร²/กรัม และตัวรองรับ CS303 พื้นที่ผิว 3-10 เมตร²/กรัม เห็นได้ว่า ชุดของ 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 ให้ % การเปลี่ยนรูปสูงกว่าชุดของ 12% Ni บนตัวรองรับ CS303 นั้นหมายถึงพื้นที่ผิวของตัวรองรับมีผลต่อพื้นที่ผิวของนิเกิลที่เป็นตำแหน่งเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าย่อมให้ความว่องไวเชิงปฏิกิริยาสูงกว่า อันเนื่องจากนิเกิลสามารถกระจายบนตัวรองรับให้พื้นที่ผิวของนิเกิลที่เป็นตำแหน่งเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า และถ้าดู % การเปลี่ยนรูปของตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในอุตสาหกรรม และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง 12% Ni บนตัวรองรับ CS303 (ตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในอุตสาหกรรมชุดนี้ใช้ตัวรองรับ CS303 ด้วย) จะเห็นได้ว่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าในการวิจัยนี้สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความว่องไวเชิงปฏิกิริยาได้ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรม เมื่อมองดู % การเปลี่ยนรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวซึ่งให้ % การเปลี่ยนรูปสูง นั่นคือความว่องไวเชิงปฏิกิริยาสูงด้วย หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลที่ใช้ในปฏิกิริยามี เบนสตีมรีฟอร์มมิงมีความว่องไวเชิงปฏิกิริยาสูง จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูงๆ

7.2.10 การหาสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาแบบยกกำลัง (Power Law Rate Equation)

ลักษณะอย่างหนึ่งของวิศวกรเคมีคือ การหาความสัมพันธ์ของข้อมูลทางจลนพลศาสตร์สำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ การที่จะได้มาซึ่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาดัง เช่นหัวข้อ 2.3 นั้น ค่อนข้างลำบาก แต่วิธีการที่นิยมใช้มากและยอมรับว่าใช้ได้ดีคือ การหาสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาแบบยกกำลัง ซึ่งถือว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันของความดันย่อยของสารตั้งต้น

จากการทดลองตัว เร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง (12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) ได้

$$\text{Rate} = 1.83 P_{\text{CH}_4}^{1.27} P_{\text{H}_2\text{O}}^{1.24} \quad (7.1)$$

7.2.11 การวิเคราะห์แบบถดถอยและสหสัมพันธ์ (Regression Analysis and Correlation)

เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ผ.ข.1 จากตารางที่ 6.6 แสดงการวิเคราะห์แบบถดถอยและสหสัมพันธ์ของข้อมูลการเปลี่ยนรูปของตัว เร่งปฏิกิริยานิกเกิล ที่เตรียมขึ้นเอง (12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) ส่วนตารางที่ 6.8 แสดงผลการวิเคราะห์แบบถดถอยและสหสัมพันธ์ของตัว เร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่เตรียมขึ้นเอง (12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232) เพื่อให้ได้มาซึ่งสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาแบบยกกำลัง

7.2.11.1 การทดสอบโดยใช้ค่าสถิติ F

เพื่อต้องการทดสอบว่า การวิเคราะห์แบบถดถอยนั้นยอมรับด้วย % ความเชื่อมั่นเท่าไร (ผลการทดสอบดูในตารางที่ 7.2)

จะเห็นได้ว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด $F > F_{\alpha}(t-1, n-t)$ นั่นคือมีความเชื่อมั่น 99% ว่า สมการที่ได้แต่ละชุดเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด

ตารางที่ 7.2 การทดสอบสถิติ F (ด้วย % ความเชื่อมั่น 99%)

	t-1	n-t	F	$F_{\alpha}(t-1, n-t)$
1 สมการการเปลี่ยนรูปของตัวเร่งปฏิกิริยา 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 (รูปที่ 6.19)	3	2	5316	99.17
2 สมการหาอัตราเร็วปฏิกิริยาแบบยกกำลังของตัวเร่งปฏิกิริยา 12% Ni บนตัวรองรับ SA-3232 (ตารางที่ 6.7)	2	3	61	30.82

7.2.12 การทดสอบบรรทัดฐานของการถ่ายเทมวลและความร้อนในเตาปฏิกรณ์เคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง (6,38)

มีความสำคัญมากต่อการศึกษากลศาสตร์เคมีโดยการทดสอบนั้น ซึ่งลักษณะการถ่ายเทของมวลและความร้อนแบ่งเป็น 3 เขตใหญ่ๆคือ

1. การถ่ายเทในอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การถ่ายเทระหว่างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและของไหลที่อยู่ติดกัน
3. การถ่ายเทระหว่างของไหลที่อยู่ระหว่างอนุภาค

รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ผ.ข.2

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 7.3



ตารางที่ 7.3 การทดสอบบรรทัดฐานของการถ่ายเทมวลและความร้อนในเตาปฏิกรณ์เคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้อง

ลักษณะการถ่ายเท	มาตรฐานการทดสอบในกรณีที่ไม่มีผล	ผลการทดสอบ
<p>1. การถ่ายเทภายในอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา</p> <p>1.1 การถ่ายเทมวล</p> <p>1.2 การถ่ายเทความร้อน</p>	$\frac{R_o r_p^2}{C_s D_e} < \frac{1}{ n }$ $\frac{ \Delta H R_o r_p^2}{\lambda_p T_s} < \frac{T_s R}{E}$	<p>สำหรับมีเทน $\frac{R_o r_p^2}{C_s D_e} > \frac{1}{ n }$</p> <p>สำหรับน้ำ $\frac{R_o r_p^2}{C_s D_e} < \frac{1}{ n }$</p> $\frac{ \Delta H R_o r_p^2}{\lambda_p T_s} < \frac{T_s R}{E}$
<p>2. การถ่ายเทระหว่างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและของไหลที่อยู่ติดกัน</p> <p>2.1 การถ่ายเทมวล</p> <p>2.2 การถ่ายเทความร้อน</p>	$\frac{R_o r_p}{C_b k_c} < \frac{0.15}{n}$ $\frac{ \Delta H R_o r_p }{h T_b} < \frac{0.15 R T_b}{E}$	<p>ทั้งมีเทนและน้ำ $\frac{R_o r_p}{C_b k_c} < \frac{0.15}{n}$</p> $\frac{ \Delta H R_o r_p }{h T_b} < \frac{0.15 R T_b}{E}$
<p>3. การถ่ายเทระหว่างของไหลที่อยู่ระหว่างอนุภาค</p> <p>3.1 การถ่ายเทมวลของแนวแกน</p> <p>3.2 การถ่ายเทมวลของแนวรัศมี</p> <p>3.3 การถ่ายเทความร้อน</p>	$\frac{L}{d_p} > 20n \ln \frac{C_{b,in,i}}{C_{b,out,i}}$ $\frac{ \Delta H R_b r^2}{k_e T_w} < \frac{0.4 T_w}{E}$	<p>ทั้งมีเทนและน้ำ</p> $\frac{L}{d_p} > 20n \ln \frac{C_{b,in,i}}{C_{b,out,i}}$ $\frac{ \Delta H R_b r^2}{k_e T_w} < \frac{0.4 T_w}{E}$

จากการทดสอบจะเห็นว่า มีเฉพาะการถ่ายเทมวลภายใน (ของมีเทน) เท่านั้น ที่มีผลต่อสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีแบบยกกำลัง นั่นคือ สมการที่ (7.1) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\text{Rate} = 1.83 f P_{\text{CH}_4}^{1.27} P_{\text{H}_2\text{O}}^{1.24} \quad (7.2)$$

เมื่อ f เป็นฟังก์ชันที่มีผลจากการถ่ายเทมวลภายในซึ่งมีมีเทนเป็นตัวจำกัด (Limitation)

7.2.13 การเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยา

จากรูปที่ 6.20, 6.21 ตารางที่ 6.9 และ 6.10 แสดงถึงการเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยามีเทนสติมูริฟอร์มมิงและปฏิกิริยาออกเตอร็อก๊าซซิฟเมื่อตัวประกอบเวลาเปลี่ยนไป การศึกษาการเข้าใกล้สมดุลของปฏิกิริยาเป็นตัวชี้บอกถึงความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาได้เหมือนกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามากยอมให้สัดส่วนของก๊าซผสมที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์เคมีได้ใกล้เคียงค่าคงที่สมดุลที่อุณหภูมินั้นมาก ในทางตรงข้ามตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจะให้สัดส่วนของก๊าซผสมไม่ใกล้เคียงค่าคงที่สมดุล จากตารางที่ 6.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 6 ชุดต่างให้สัดส่วนของก๊าซผสมที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์เคมีได้ใกล้เคียงค่าคงที่สมดุล (ดูค่า ΔT เข้าใกล้ 0) จะแตกต่างกันบ้างก็ตรงที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าจะให้ ΔT ได้ใกล้ 0 มากกว่า ซึ่งการที่จะศึกษาว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชุดใดว่องไวต่อปฏิกิริยามากที่สุดก็สามารถดูได้จากค่าของการเข้าใกล้สมดุล เช่นเดียวกันกับการดูจาก % การเปลี่ยนรูป

การศึกษাজลนพลศาสตร์เคมีนั้นจำเป็นต้องศึกษาการเข้าใกล้สมดุล เพราะการดูจาก % การเปลี่ยนรูปยังไม่สามารถบอกได้ว่า ก๊าซผสมที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์เคมีแต่ละชุดไม่อยู่ในสมดุลต้องดูจากการเข้าใกล้สมดุล เพราะข้อมูลที่นำมาศึกษาจลนพลศาสตร์ต้องไม่ใกล้สมดุล

การวิจัยนี้ เป็นการเริ่มต้นการศึกษาศาสตร์ทางตัวเร่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งต่อไปสามารถที่จะเป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในภาคหน้าได้