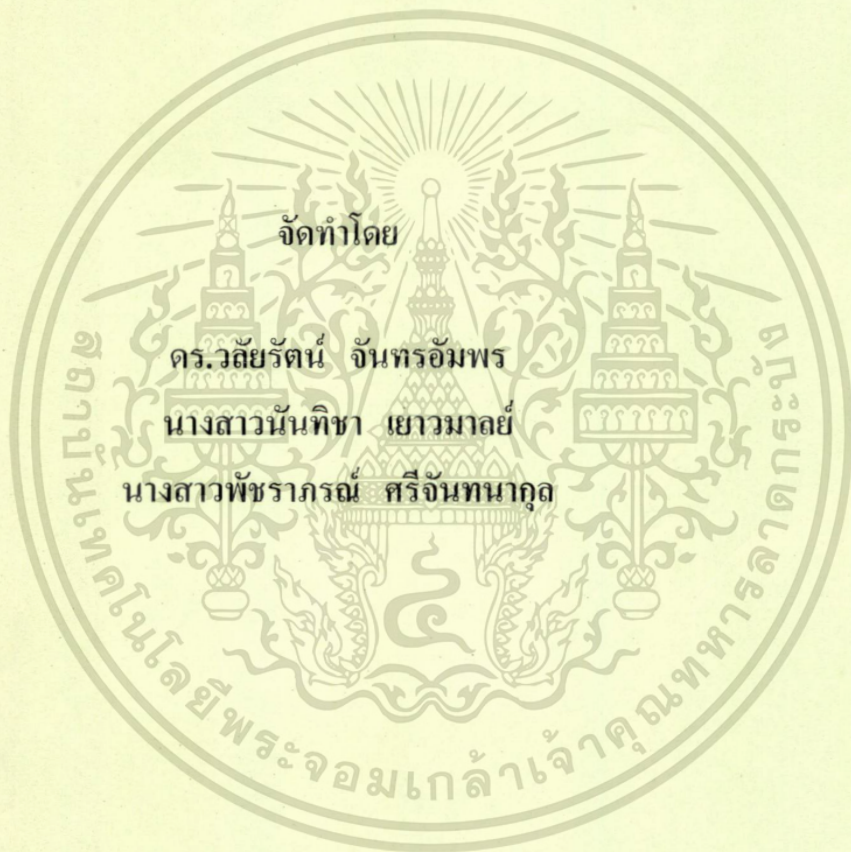


การผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาดีไฮโดร-จิเนชั่นของเมธิลไซโคลเฮกเซน



รายงานผลการดำเนินงานโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปี 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

รายงานนี้ จัดทำขึ้นเพื่อแสดงผลของโครงการวิจัยเรื่อง การผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยา
 ดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
 ประจำปี 2552 โดยเนื้อหาส่วนใหญ่มาจากวิทยานิพนธ์เรื่อง การผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยา
 ดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน ของ นางสาวนันทิชา เขาวมาลย์ และ นางสาวพัชราภรณ์ ศรี
 จันทนากุล นักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2552 ในความดูแลของ ดร. วลัยรัตน์
 จันทรอำพร หัวหน้าโครงการวิจัย โดยในงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการศึกษาสภาวะในการเกิดปฏิกิริยา
 ดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation และใช้
 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยอะลูมินา เพื่อผลิตไฮโดรเจนสำหรับนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน
 ให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงรายละเอียดต่างๆ ไว้ในรายงานนี้ องค์ความรู้และข้อมูลที่ได้สามารถ
 นำไปต่อยอดโดยการออกแบบหน่วยปฏิบัติการ ซึ่งควรรวมระหว่างหน่วยการผลิตไฮโดรเจนจาก
 สารจำพวก Liquid Organic Hydride อันได้แก่ เมทิลไซโคลเฮกเซน กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์
 ของแข็ง การได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้จึงนับว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ทั้งในด้านส่งเสริม
 งานวิจัยของอาจารย์และนักศึกษา และในด้านการพัฒนาการเก็บและขนส่งไฮโดรเจนในรูปเชื้อเพลิง
 อื่นที่มีความพร้อมที่จะแปลงสภาพเป็นไฮโดรเจน (Hydrogen Storage) เพื่อใช้เป็นพลังงานสำหรับ
 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งคาดว่าจะนำไปใช้เป็นหน่วยผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับยานยนต์
 ในอนาคต เมื่อเกิดการขาดแคลนเชื้อเพลิงฟอสซิล

RCH
 TP
 245
 .H9
 ก 345 ก
 ฉ. 1

สงวน.....
 เลขทะเบียน.....115584
 วันเดือนปี.....21 ส.ค. 2554

1931231X
 b.....
 i.....

เอกสารนี้เป็นของหอสมุดกลางพระจอมเกล้าลาดกระบัง การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.....

สารบัญ

หน้า

คำนำ	I
สารบัญ.....	II
สารบัญตาราง.....	IV
สารบัญรูป.....	V
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไฮโดรเจน	3
2.2 การเก็บไฮโดรเจน	4
2.3 การเก็บไฮโดรเจนในรูปของสารประกอบที่เป็นของเหลว	4
2.4 ปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน	7
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน	8
2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation	9
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	13
3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง	13
3.2 ปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	16
4.1 สภาพะในการทดลอง.....	16
4.2 อิทธิพลของปริมาณ โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	23
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	16
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	23
เอกสารอ้างอิง.....	24
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน.....	25
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ	26
ภาคผนวก ค เครื่องมือและอุปกรณ์.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถในการเก็บไฮโดรเจนด้วยเทคโนโลยีต่างๆ [5].....	6
ตารางที่ ข.1 จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0 wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	26
ตารางที่ ข.2 จำนวนโมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0 wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	27
ตารางที่ ข.3 จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	28
ตารางที่ ข.4 จำนวนโมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	29
ตารางที่ ข.5 จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	30
ตารางที่ ข.6 จำนวนโมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	31
ตารางที่ ข.7 จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	32
ตารางที่ ข.8 จำนวนโมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt%.Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็น 3 l/h	33

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน	5
รูปที่ 2.2 รูปแบบของอัตราการเกิดปฏิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่เป็นวง	11
รูปที่ 2.3 การคายซัพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังปฏิริยาดีไฮโดรจีเนชัน.....	12
รูปที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการทำปฏิริยา.....	15
รูปที่ 4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณแก๊สเกิดขึ้นที่สภาวะในการทดลอง คือ เมทิล ไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิริยา 30 wt%Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g ระยะเวลา 120 min....	16
รูปที่ 4.2 อิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆที่ สภาวะในการทดลอง คือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิริยา Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g.....	18
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลที่มีต่อปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆที่สภาวะ ในการทดลอง คือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิริยา %Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g	19
รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลที่มีต่ออัตราส่วนไฮโดรเจนต่อมีเทนที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะในการทดลอง คือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิริยา Ni/Al ₂ O ₃ 0.3 g.....	21
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของ H ₂	25
รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของ CH ₄	25
รูปที่ ค.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation	34
รูปที่ ค.2 อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรแก๊ส.....	34
รูปที่ ค.3 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา [1]

การใช้ไฮโดรเจนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและปราศจากมลพิษ โดยไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานเบื้องต้นที่สำคัญในเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับใช้ในยานพาหนะ มีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวคือน้ำ ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากปฏิกิริยาสันดาปที่ทำให้เกิดแก๊สเรือนกระจกเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น

ปัญหาสำคัญในการจัดการเกี่ยวกับไฮโดรเจน คือยากต่อการจัดเก็บและการขนส่งในพาหนะต่างๆ ปัจจุบันจะใช้วิธีการอัดก๊าซไฮโดรเจนภายใต้ความดันสูงหรือทำให้เป็นของเหลว ซึ่งมีอันตรายและมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการให้พลังงานลดลงเนื่องจากต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการเก็บและเปลี่ยนรูปไฮโดรเจนจากของเหลวเป็นแก๊ส ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการเก็บและขนส่งไฮโดรเจนขึ้นอีกทางเลือกหนึ่งคือการเก็บไฮโดรเจนในรูปเชื้อเพลิงอื่นที่มีความพร้อมที่จะแปลงสภาพเป็นไฮโดรเจน (Hydrogen Storage) และเปลี่ยนเชื้อเพลิงดังกล่าวเป็นไฮโดรเจนในภายหลัง เชื้อเพลิงดังกล่าวอาจเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนที่แตกต่างกันออกไป

การใช้เมทิลไซโคลเฮกเซนที่อยู่ในรูปสารประกอบที่เป็นของเหลว (Liquid Organic Hydride) ด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันเพื่อผลิตไฮโดรเจน จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มียูทิลิตี้ไฮโดรเจนและสารประกอบคาร์บอนที่ถูกดึงไฮโดรเจนออกแล้วเท่านั้นไม่มีสารอื่นเจือปน เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ที่จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์เชื้อเพลิง และเนื่องจากปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนเป็นกระบวนการผันกลับได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโทลูอีน ซึ่งง่ายต่อการเติมไฮโดรเจนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (ไฮโดรจีเนชัน) เป็นสารตั้งต้นอีกครั้ง ทาง US Department of Energy (DOE) ได้วางเป้าหมายในการเก็บไฮโดรเจนสำหรับการนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงในยานพาหนะ โดยใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลวไว้ที่ 6.5 wt%, 62.0 kgH₂/m³ ซึ่งเมทิลไซโคลเฮกเซนนั้น จะมีประสิทธิภาพในการเก็บไฮโดรเจนอยู่ที่ 6.1 wt%, 55.5 kgH₂/m³

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทดสอบสถานะในการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยอะลูมินา

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยอะลูมินา โดยใช้ปริมาณเมทิลไซโคลเฮกเซนซึ่งเป็นสารตั้งต้นในปริมาณ 1.2 ml ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.3 g ช่วงอุณหภูมิในการดีไฮโดรจีเนชัน 350 – 450 °C

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟเพื่อหาปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.4.1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน
- 1.4.2 ออกแบบติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์และทำการทดลองเบื้องต้น
- 1.4.3 ทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันในช่วง 350 – 450 °C
- 1.4.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาในปริมาณ 0, 10, 20 และ 30%wtNi
- 1.4.5 ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่มีผลต่อการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์
- 1.4.6 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ
- 1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไฮโดรเจน [2]

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด เป็นโมเลกุลที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยบรรยากาศโลกมีแก๊สไฮโดรเจนประมาณ 0.1 ppm มีความแข็งแรงในการยึดโมเลกุลเท่ากับ 104 kcal/mol สภาพปกติเป็นแก๊ส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่เป็นพิษ เมื่อเผาไหม้ร่วมกับออกซิเจนจะได้พลังงานและน้ำออกมา

ในด้านพลังงานไฮโดรเจนเป็นพาหะพลังงานหรือเชื้อเพลิงที่ใช้ร่วมกับเครื่องจักรที่ติดตั้งอยู่กับที่ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในบ้านเพื่อผลิตไฟฟ้า ความร้อน และแบบที่เคลื่อนที่ได้ เช่น เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ ทั้งนี้ปัญหาที่พบบ่อยที่สุดในการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนคือ ปัญหาในเรื่องของการจัดเก็บ เนื่องจากวิธีการจัดเก็บไฮโดรเจนไม่ได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักจำเพาะหรือปริมาตรจำเพาะของหน่วยเก็บพลังงานเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับราคา พฤติกรรมการใช้งาน ลักษณะ โครงสร้างหรือการออกแบบมุมมองด้านความปลอดภัย และความบริสุทธิ์ของเชื้อเพลิงอีกด้วย

การใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานให้กับเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ได้มีการประมาณปริมาณไฮโดรเจนที่ต้องใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงมาตรฐาน โดยในการใช้งานสำหรับขับเคลื่อนเครื่องยนต์เป็นระยะทาง 480 km จะต้องใช้ไฮโดรเจนประมาณ 3.58 kg ซึ่งการใช้ไฮโดรเจนสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะนั้นจะมีการติดตั้งระบบการเก็บไฮโดรเจนแยกจากระบบของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วจ่ายไฮโดรเจนให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงในระหว่างการทำงาน

2.2 การเก็บไฮโดรเจน [2-3]

เทคโนโลยีในปัจจุบันจะเก็บไฮโดรเจนในรูปแบบต่างๆ ได้แก่

1. การเก็บในรูปแบบแก๊ส ดังเก็บต้องมีปริมาตรมากพอสมควร เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนมีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อยกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อให้สามารถเก็บไฮโดรเจนได้มากจึงต้องใช้ความดันสูงเพื่อลดปริมาตรของถังเก็บ

2. การเก็บในรูปแบบไฮโดรเจนเหลว จะต้องเก็บในถังความดันซึ่งทำให้มีปัญหาในการปล่อยแก๊สทิ้งเพื่อควบคุมความดันในถังเก็บ ทั้งยังต้องเก็บที่อุณหภูมิต่ำมากถึง -273°C และต้องเสียค่าพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ

3. การเก็บไว้ในท่อคาร์บอนนาโน (Carbon Nanotube) โดยใช้คุณสมบัติการดูดซับทางกายภาพของคาร์บอนซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันที่อุณหภูมิ -100°C ความดัน 40 Bar จะเก็บไฮโดรเจนได้ประมาณ 5 wt %. ซึ่งอยู่ระหว่างการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้เก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นและนำมาใช้งานต่อไป

4. การเก็บในรูปสารประกอบอินทรีย์ที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ (Organic Hydride) สามารถเก็บได้ในรูปของแข็งและของเหลว แล้วใช้ปฏิกิริยาทางเคมีหรือการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนรูปให้ได้แก๊สไฮโดรเจนออกมา การใช้สารประกอบที่เป็นของแข็งดูดซับไฮโดรเจนไว้ทำได้โดยการนำโลหะไฮไดรด์ มาอัดเม็ดและเคลือบผิวเพื่อความสะดวกในการขนส่ง วิธีนี้สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ประมาณ 2-3 % ของน้ำหนักถังทำให้เกิดปัญหาในเรื่องน้ำหนักของถังเก็บ และในการจ่ายไฮโดรเจนออกจากถังเก็บนั้นต้องให้ความร้อนกับโลหะไฮไดรด์ เพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนออกมา

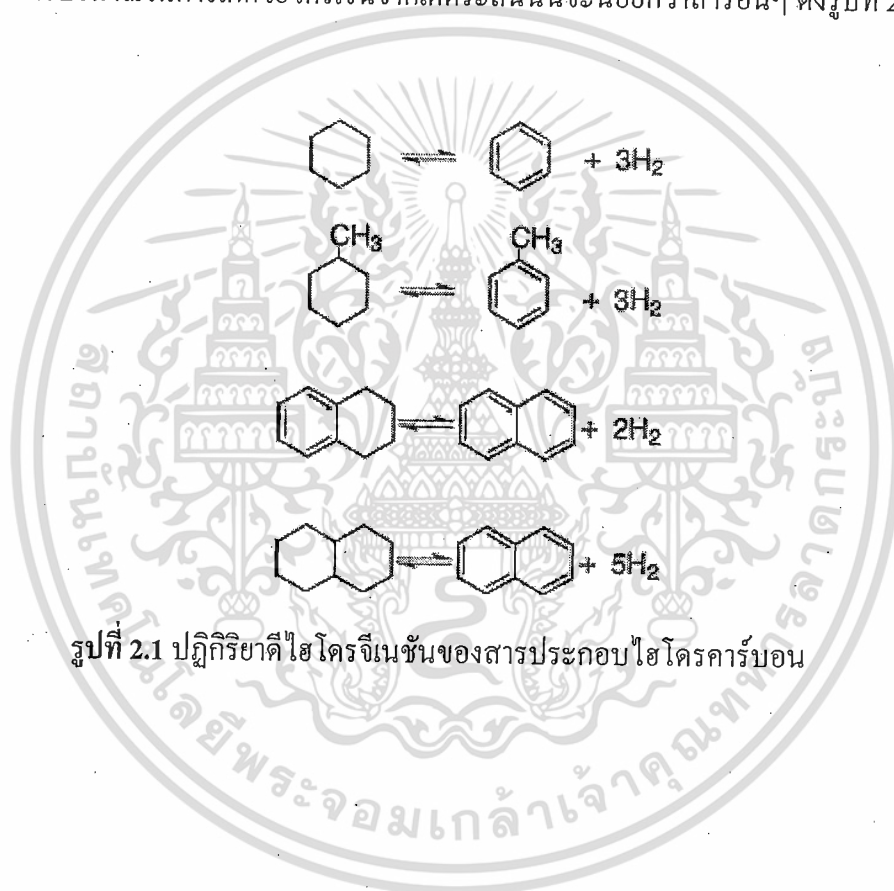
2.3 การเก็บไฮโดรเจนในรูปของสารประกอบที่เป็นของเหลว [4]

การเก็บไฮโดรเจนในรูปของสารประกอบที่เป็นของเหลวในยานพาหนะ แล้วใช้ปฏิกิริยาทางเคมีในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สไฮโดรเจนสำหรับการนำไปใช้ ปฏิกิริยาที่ใช้กันมาก ได้แก่

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จะผลิตไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนของสารประกอบของไฮโดรเจนกับน้ำ ทำให้มีน้ำอยู่ในเครื่องยนต์ซึ่งจะเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้แก่เครื่องยนต์และลดปริมาตรในเครื่องยนต์ลง

2. ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่มีการดูดความร้อนสูง ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากจึงมักใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และปัญหาที่สำคัญคือ เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

3. ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังเป็นที่สนใจและเริ่มศึกษาสำหรับการผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะได้เพียงไฮโดรเจน และสารประกอบคาร์บอนที่ถูกดึงไฮโดรเจนออกแล้วเท่านั้น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ยังมีประโยชน์ในแง่ของความสะดวกในการเก็บและขนส่ง โดยเฉพาะปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มไซโคลอัลเคนซึ่งเป็นกระบวนการผันกลับได้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้ (เบนซีน โทลูอิน แนพทาลิน) ยังง่ายต่อการเติมไฮโดรเจนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็นสารตั้งต้นอีกครั้ง โดยสารในกลุ่มไซโคลอัลเคนจะให้ปริมาณไฮโดรเจนที่แตกต่างกันโดย 1 โมลของ ไซโคลเฮกเซน เมทิลไซโคลเฮกเซน เตตระลิน และเดคาลิน จะผลิตไฮโดรเจนได้ 3, 3, 2 และ 5 mol ตามลำดับ โดยปริมาณในการเกิดไฮโดรเจนจากเตตระลินนั้นจะน้อยกว่าสารอื่นๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

เทคโนโลยีการเก็บและขนส่งไฮโดรเจนแต่ละวิธีนั้นสามารถเก็บไฮโดรเจนได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยปริมาณในการเก็บไฮโดรเจนเมื่อเปรียบเทียบวิธีต่างๆ และสมบัติทางกายภาพเป็นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถในการเก็บไฮโดรเจนด้วยเทคโนโลยีต่างๆ [5]

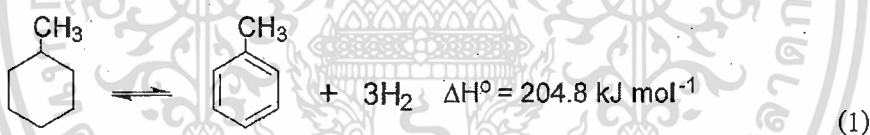
Storage media	Hydrogen content		Boiling point (°C)	Melting point (°C)
	wt%	mol/l		
Cyclohexane	7.2	27.77	80.7	6.5
Methylcyclohexane	6.2	23.29	101	-126.6
Tetralin	3.0	14.72	207	-35.8
<i>cis</i> -decalin	7.3	32.44	193	-43.0
<i>trans</i> -Decalin	7.3	31.46	185	-30.4
cyclohexylbenzene	3.8	17.63	237	4
bicyclohexyl	7.3	32.0	227	3
LiH + H ₂ O	7.8	4.1	—	680
LiBH ₄ + 4H ₂ O	8.6	2.4	—	268
LaNi ₃ H ₆	1.4	6.2	—	—
MmNi _{4.5} Al _{0.25} Co _{0.25} H _{3.4}	1.2	4.8	—	—
Liquid H ₂ (with tank)	100 (5.11)	—	-252.9	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน [6-7]

การศึกษาในปัจจุบันจะเลือกใช้สารตั้งต้นสำหรับปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันเป็นสารในกลุ่มไซโคลอัลเคนเนื่องจากมีความจุในการเก็บไฮโดรเจนสูง (6-7.5 wt%) และจุดเดือดสูง (80-190°C) เช่น ไซโคลเฮกเซน เมทิลไซโคลเฮกเซน และเตทราลิน ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของไซโคลอัลเคนเป็นปฏิกริยาเชิงเร่ง ประสิทธิภาพในการเก็บและปลดปล่อยไฮโดรเจนโดยพื้นฐานแล้วจะขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกริยาที่เลือกใช้ สภาพะในการทำปฏิกริยา และปริมาณสารตั้งต้นที่ได้นำมาใช้ สำหรับปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของไซโคลอัลเคนนั้นเป็นปฏิกริยาคูดความร้อนและผันกลับได้ โดยที่ปฏิกริยาจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง และจะเกิดในสถานะแก๊ส

โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เมทิลไซโคลเฮกเซนเป็นสารตั้งต้น เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันจะเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ โทลูอินและไฮโดรเจน เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างโทลูอินกับเบนซีนที่เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันเหมือนกัน พบว่าโทลูอินมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า และเมทิลไซโคลเฮกเซนจะมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจนในรูปแบบที่เสถียรสำหรับการนำไปใช้ในยานพาหนะ และมีศักยภาพในการเก็บและเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนสูงกว่าวิธีการอื่นๆ เช่น การเก็บในรูปแบบแก๊ส หรือการเก็บในรูปแบบสารประกอบที่เป็นของเหลว ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน เป็นดังสมการ (1)



ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์เนื่องจากปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยาคูดความร้อน ปฏิกริยาจึงมักเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง โดยปฏิกริยานี้เกิดในสถานะแก๊ส เพื่อให้ปฏิกริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากปฏิกริยานี้จึงมักเกิดที่ความดันปกติ เนื่องจากจะมีผลทำให้สมดุลเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์จึงเกิดได้มากกว่าที่ความดันสูง โดยค่าเอนทาลปีมาตรฐานสำหรับปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชันของ เมทิลไซโคลเฮกเซนมีค่าเท่ากับ 204.8 kJ/mol

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน [8-9]

การใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้นจะแตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้ง Monometallic (Pt, Pd, Ru, and Pt) และ Bimetallic (Pt with Ni, Pt, Pd, Rh or Ir) โดยนิกเกิลและแพลทินัมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดเนื่องจากสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาได้ดี นิกเกิลจะมีราคาถูกกว่าแพลทินัมและมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมากกว่า ถึงแม้ว่าจะมีความว่องไวน้อยกว่า แต่นิกเกิลมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ความว่องไวของนิกเกิลจะแปรผันตามพื้นที่ผิวที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้ามีพื้นที่ผิวมากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงเชิงกลลดลง เนื่องจากนิกเกิลสามารถเข้าไปจับกับโมเลกุลของเมทิลไซโคลเฮกเซนแล้วดึงอะตอมของไฮโดรเจนให้หลุดออกจากโมเลกุลได้ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยา ดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน

ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนจะเกิดบริเวณผิวโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโลหะและวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและค่าการเลือกเกิดในปฏิกิริยา

อะลูมินา (Alumina)

อะลูมินามีสูตรทั่วไปคือ Al_2O_3 เป็นตัวรองรับที่นิยมใช้กันมากชนิดหนึ่ง เนื่องจากราคาไม่แพง สามารถเตรียมให้อุณหภูมิขนาดเล็กได้ง่าย อีกทั้งในการเตรียมสามารถกำหนดพื้นที่ผิวและการกระจายในรูพรุนได้ตามต้องการ อะลูมินาที่มีจำหน่ายมีพื้นที่ผิวระหว่าง 100-600 m^2/g การเลือกใช้อะลูมินามีข้อดีคือทำให้อุณหภูมิของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกระจายตัวได้ดี

อะลูมินามีหลายเฟส แต่ที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวรองรับคือ แกมมาอะลูมินา ($\gamma-Al_2O_3$) ซึ่งเตรียมได้จากการกำจัดน้ำจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 °C อะลูมินาชนิดนี้มีความเป็นรูพรุนสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ส่วนอะลูมินาที่เสถียรที่สุด คือ แอลฟาอะลูมินา ($\alpha-Al_2O_3$)

2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation

Reactive Distillation เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สออกจากสารที่ผสมอยู่ในขณะเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการแยกโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยขั้นตอนการกลั่น จึงเป็นการประหยัดพลังงานและสารตั้งต้นที่นำมาใช้ เทคนิคนี้มีประโยชน์มากโดยเฉพาะกรณีที่ปฏิกิริยานั้นถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุล ค่าการแปลงผันที่ได้จากการใช้ Reactive Distillation จะมากกว่าค่าการแปลงผันที่สมดุล เนื่องจากมีการดึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาตลอดเวลา ทำให้สมดุลเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์ เป็นการเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มากขึ้น เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาและลดปริมาณของผลิตภัณฑ์ข้างเคียงลง



2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

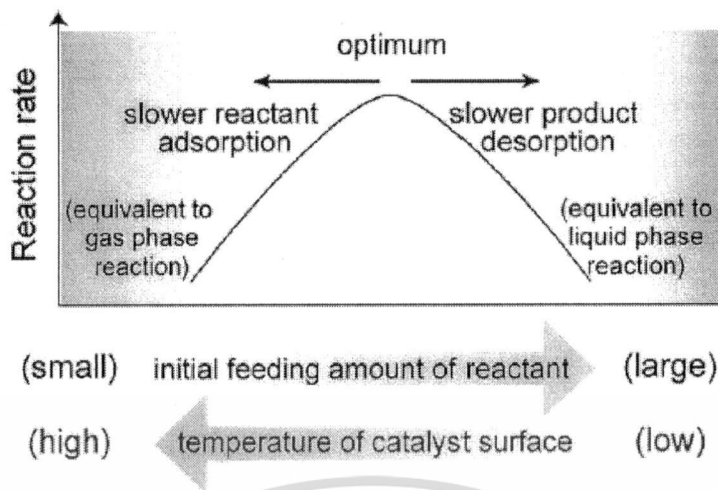
การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนนั้น ปริมาณสารตั้งต้น สภาวะในการทำปฏิกิริยา รวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นอย่างมาก ทั้งปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้และผลิตภัณฑ์ข้างเคียง โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.7.1 อิทธิพลของปริมาณสารตั้งต้น

Lá zaro M.P. และคณะ [10] ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเดคาลินด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้แพลทินัมบนคาร์บอนนาโนไฟเบอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า อัตราส่วนของเดคาลินต่อตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญมาก เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องใช้อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจึงจะให้ค่าการแปลงผันสูงที่สุด หากอัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อตัวเร่งปฏิกิริยาสูงมากเกินไป จะทำให้เกิดการท่วมของสารตั้งต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอที่จะทำให้สารตั้งต้นถึงจุดเดือดและกลายเป็นไอเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้ โดยที่อัตราส่วนของเดคาลินต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ml/g จะมีค่าการแปลงผันต่ำสุดเพียง 17% ในขณะที่อัตราส่วนของเดคาลินต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ml/g จะมีค่าการแปลงผันสูงถึง 30%

2.7.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

Kariya N. และคณะ [11] ศึกษาปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไซโคลเฮกเซนและเดคาลินโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิมิผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน เนื่องจากปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทวงนั้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะช่วยไล่สารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอะโรมาติกและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นให้ออกไปจากบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นซึ่งจะเป็นการป้องกันการผันกลับของปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิสูงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแห้งเป็นการป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ดังรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการแปลงผันทางเคมีเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



รูปที่ 2.2 รูปแบบของอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นวง

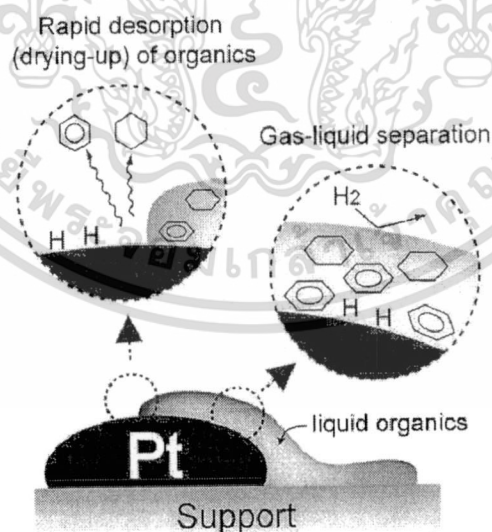
2.7.3 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

Yolcular S. และคณะ [12] ได้ศึกษาไฮโดรเจนที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed-Bed Catalytic Reactor พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งกระตุ้นด้วยอากาศจะเกิดเป็นผลึก NiO-phase กับ Amorphous Al_2O_3 แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้เป็น 823 K จะมีการสร้างพันธะระหว่างของแข็ง Al_2O_3 กับ NiO เกิดเป็นผลึกของ $NiAl_2O_4$ ส่วน NiO ที่มากเกินไปจะปรากฏออกมาในรูปของผลึก NiO ซึ่งจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการกระตุ้นด้วยไฮโดรเจน แต่มีข้อแตกต่างเล็กน้อยคือ การที่อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงมากเกินไปจะส่งผลให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปของออกไซด์ของนิกเกิล ซึ่งมีความสามารถในการกระตุ้นปฏิกิริยาค่ำ

ในปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนพบว่าเมทิลไซโคลเฮกเซนสามารถติดไปกับ NiO ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระตุ้นด้วยอากาศบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาจแสดงถึงการกระตุ้นที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระตุ้นด้วยไฮโดรเจน และการดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนจะเกิดบริเวณผิวโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มปริมาณของนิกเกิลที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา จะส่งผลให้ค่าการแปลงผันทางเคมีเพิ่มขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิล 20% บนตัวรองรับจะให้ผลลัพท์ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณนิกเกิลค่าอื่นๆ

2.7.4 อิทธิพลของ Wet-Dry Condition

Kariya N. และคณะ [12] ได้เปรียบเทียบผลของปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชัน โดยใช้เคลคาตินและไซโคลอัลเคนที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิบัติงานภายใต้สภาวะไม่คงตัวด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยอุณหภูมิที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 250–350 °C ซึ่งสูงกว่าจุดเดือดของสารตั้งต้นก่อนที่จะฉีดสารตั้งต้นลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่แห้งสนิท ที่จุดนี้ส่วนหนึ่งของสารตั้งต้นจะระเหยก่อนที่จะสัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ขณะที่สารตั้งต้นอีกส่วนหนึ่งในจะตกลงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาพที่เป็นของเหลวและจะถูกทำให้ระเหยอย่างรวดเร็วเนื่องจากได้รับความร้อนจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนที่จะเกิดการแพร่อย่างสมบูรณ์บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้วสารตั้งต้นที่เหลืออยู่ และผลิตภัณฑ์จะถูกคายซับและดึงออกจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะพร้อมทำปฏิกิริยาใหม่อีกครั้ง เรียกสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ว่า Wet-Dry Condition ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันคือ การระเหยของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดความดันย่อยที่สูงมากทำให้สามารถไล่แก๊สที่เกิดขึ้นออกจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ไม่เกิดปฏิกิริยาผันกลับและเป็นการเลื่อนสมดุลให้เกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้น นอกจากนี้ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาสารตั้งต้นที่ถูกควบแน่นเป็นของเหลวจะตกกลับลงมาปกคลุมบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถย้อนกลับมาทำปฏิกิริยาย้อนกลับได้อีก และการที่พื้นผิวดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงจะทำให้การคายซับของผลิตภัณฑ์เกิดได้เร็วขึ้นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การคายซับของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation)

3.1.1 สารเคมี

1. $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เกรดวิเคราะห์ ของบริษัท Ajax Finechem
2. Al_2O_3 ของบริษัท Saint-Gobain Norpro

3.1.2 อุปกรณ์

1. ครกบดสารเคมี
2. ตะแกรงคัดขนาด (Sieve)
3. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
4. เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
5. ปิ๊มแบบหยด

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง

มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. บดและคัดขนาดตัวรองรับ หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เติมน้ำให้ท่วมตัวรองรับ ค่อยๆหยดสารละลาย $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ลงไปอย่างช้าๆ พร้อมกับกวนสารทั้งสองด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก
3. นำของผสมที่ได้ไปประเหยให้แห้งในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 70°C จนกว่าจะแห้งเป็นผง
4. นำผงที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และแคลไซน์ (Calcine) ต่อที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
5. นำสารที่ได้ไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 550°C นาน 10 ชั่วโมง

3.2 ปฏิกริยาดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน

3.2.1 สารเคมี

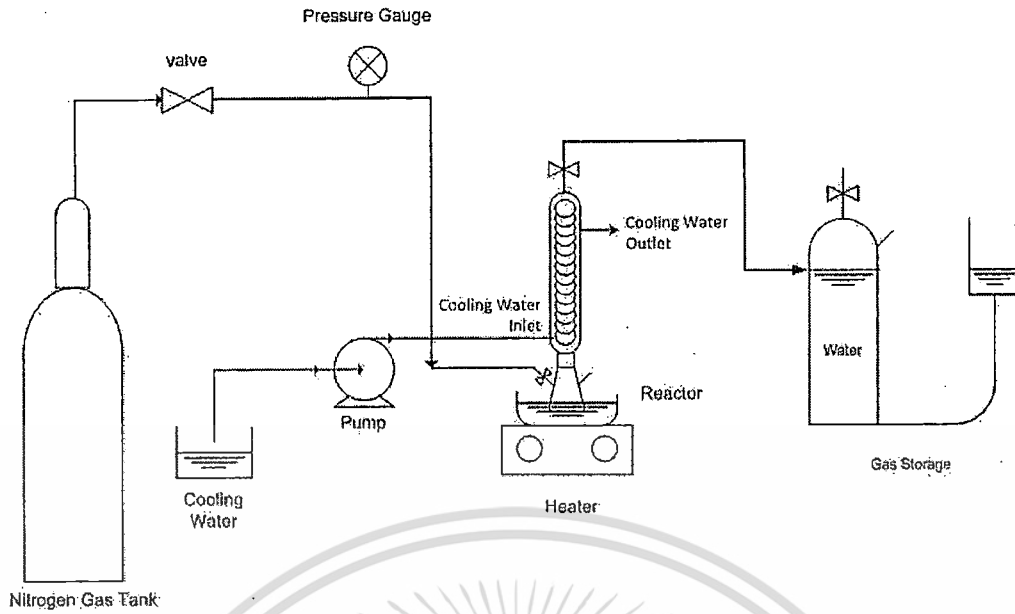
1. เมทิลไซโคลเฮกเซน (C_7H_{14}) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ 99.999% ของบริษัท Labscan
2. แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.999%
3. Silicone Oil

3.2.2 อุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation
2. อุปกรณ์เก็บแก๊ส
3. วาล์วปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
4. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
5. ปุ่ม
6. เครื่องทำความร้อน

3.2.3 การทดลอง

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลรองรับด้วยอะลูมินาที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนและอากาศ
2. บรรจุตัวเร่งปฏิกริยาลงใน Reactor
3. จัดอุปกรณ์ให้พร้อมดังรูปที่ 3.1 แล้วเปิดวาล์วการไหลของไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 30 นาที
4. ปิดวาล์วการไหลของไนโตรเจน แล้วให้ความร้อนแก่ Reactor จนได้อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา แล้วป้อนเมทิลไซโคลเฮกเซนเข้าสู่ Reactor
5. ปลดปล่อยให้สารทำปฏิกริยากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกริยาทั้งส่วนที่เป็นแก๊สและของเหลวไปวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 3.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการทำปฏิกิริยา

3.2.4 การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

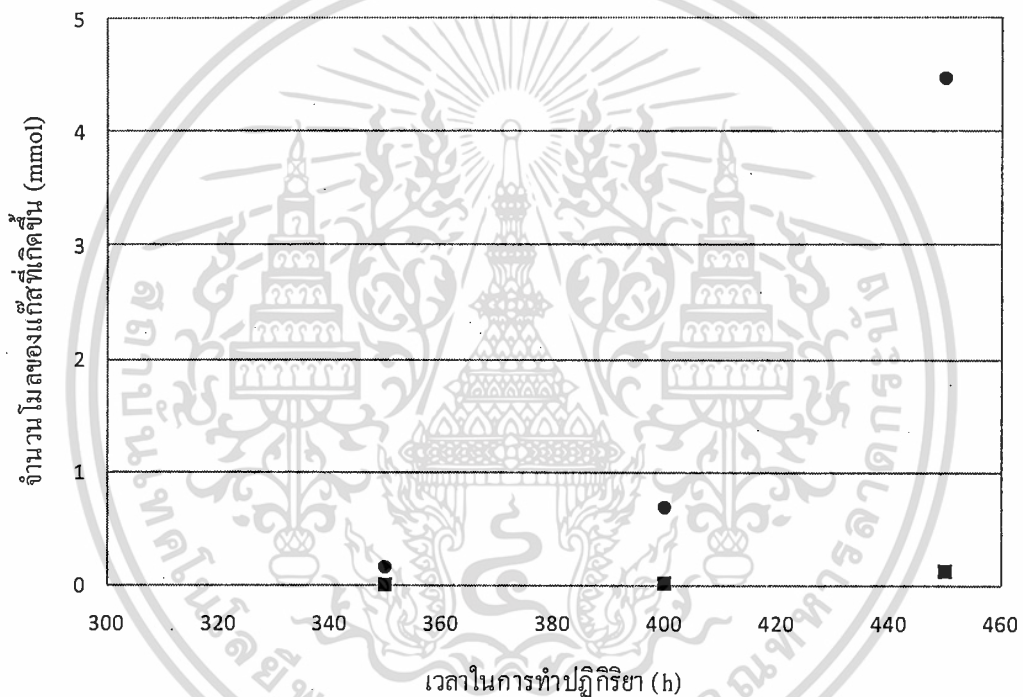
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีหลักการทำงานคือตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกบรรจุอยู่ภายใน Reactor มีการให้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อนและใช้แก๊สไนโตรเจนป้อนเข้าภายใน Reactor เพื่อไล่อากาศภายในระบบก่อนปิดวาล์วการไหลของไนโตรเจนแล้วฉีดเมทิลไซโคลเฮกเซนเข้าสู่ Reactor ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกจากบริเวณที่ทำปฏิกิริยาโดยผ่านเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ 0°C แก๊สที่ไม่ควบแน่นจะเข้าสู่ที่เก็บแก๊สซึ่งใช้หลักการการแทนที่น้ำ ส่วนสารอื่นที่ควบแน่นเป็นของเหลวจะตกกลับไปยัง Reactor

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

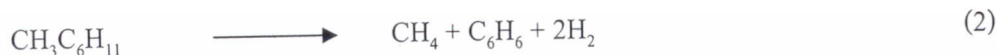
4.1 สภาวะในการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450°C พบว่ามีแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนเกิดขึ้น โดยปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากกว่ามีเทนและปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น ที่สภาวะในการทดลองคือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g ระยะเวลา 120 min (● ไฮโดรเจน และ ■ มีเทน)

สภาวะในการเกิดปฏิกิริยาคีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซนที่ใช้ในการทดลอง คือ สารตั้งต้นเมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml และตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt%. นิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา 0.3 g ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350 – 450°C ในแต่ละอุณหภูมิใช้เวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ พบว่าในผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาคีไฮโดรจิเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลัก และมีเทนที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียง ดังสมการ 2

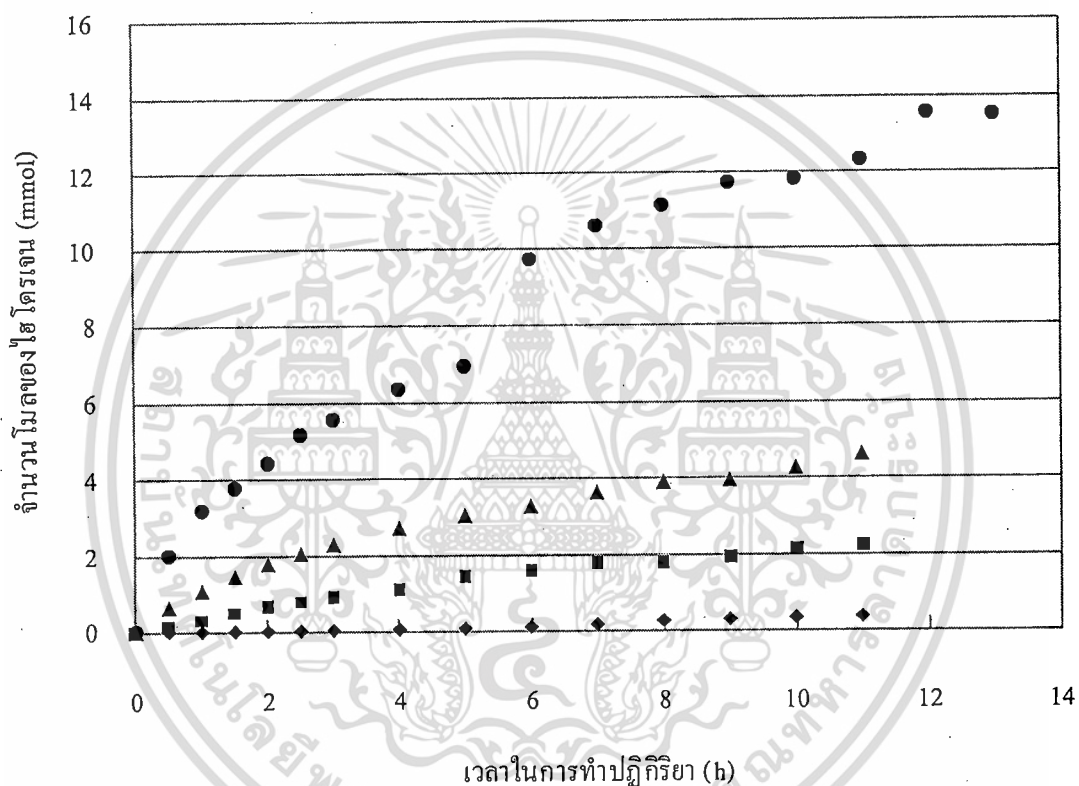


และมีผลิตภัณฑ์อื่นที่เกิดขึ้นคือ โทลูอิน จากปฏิกิริยาหลักและเบนซีน จากปฏิกิริยาข้างเคียง แต่สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation จะควบคุมไม่ให้เบนซีนและและโทลูอินที่เกิดขึ้นเจือปนไปกับผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น โดยทั้งเบนซีนและโทลูอินจะถูกควบแน่นเมื่อผ่านเครื่องควบแน่นให้เป็นของเหลวก่อนที่จะออกไปยังที่เก็บแก๊ส ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่นำไปวิเคราะห์จึงมีเพียงแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนเท่านั้น

สำหรับปฏิกิริยาคีไฮโดรจิเนชันนั้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจึงมากขึ้นตามไปด้วย

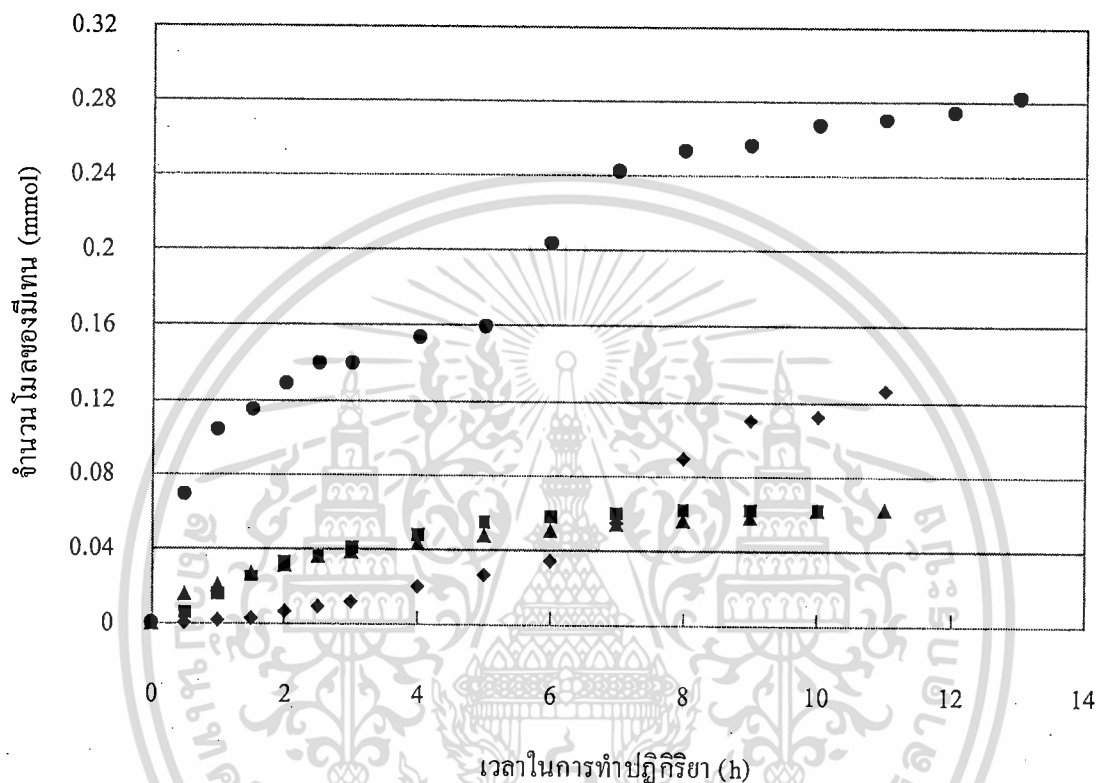
4.2 อิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา

จากรูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา ที่มีผลต่อการเกิดแก๊สไฮโดรเจน พบว่าปริมาณโลหะนิกเกิลมีผลต่อการเกิดขึ้นของแก๊สไฮโดรเจน โดยที่ 30 wt%Ni จะให้ปริมาณไฮโดรเจนสูงที่สุดคือ 13.5 mmol และมีปริมาณลดลงเมื่อลดปริมาณโลหะนิกเกิลเป็น 20%, 10% และ 0% โดยจะให้ปริมาณไฮโดรเจน 4.63, 2.26 และ 0.37 mmol ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะในการทดลองคือเมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ 0.3 g ที่มีปริมาณโลหะนิกเกิล (◆) 0%, (▲) 10%, (■) 20% และ (●) 30%

จากรูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา ที่มีผลต่อการเกิดแก๊สมีเทน พบว่าที่ 30 wt%Ni จะให้ปริมาณมีเทนสูงสุดคือ 0.28 mmol และที่ 20%, 10% และ 0 wt%Ni จะให้ปริมาณมีเทน 0.062, 0.062 และ 0.13 mmol ตามลำดับ ซึ่งที่ 10% และ 20 wt%Ni จะให้ปริมาณมีเทนใกล้เคียงกัน และน้อยกว่าปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นของ 0 wt%Ni

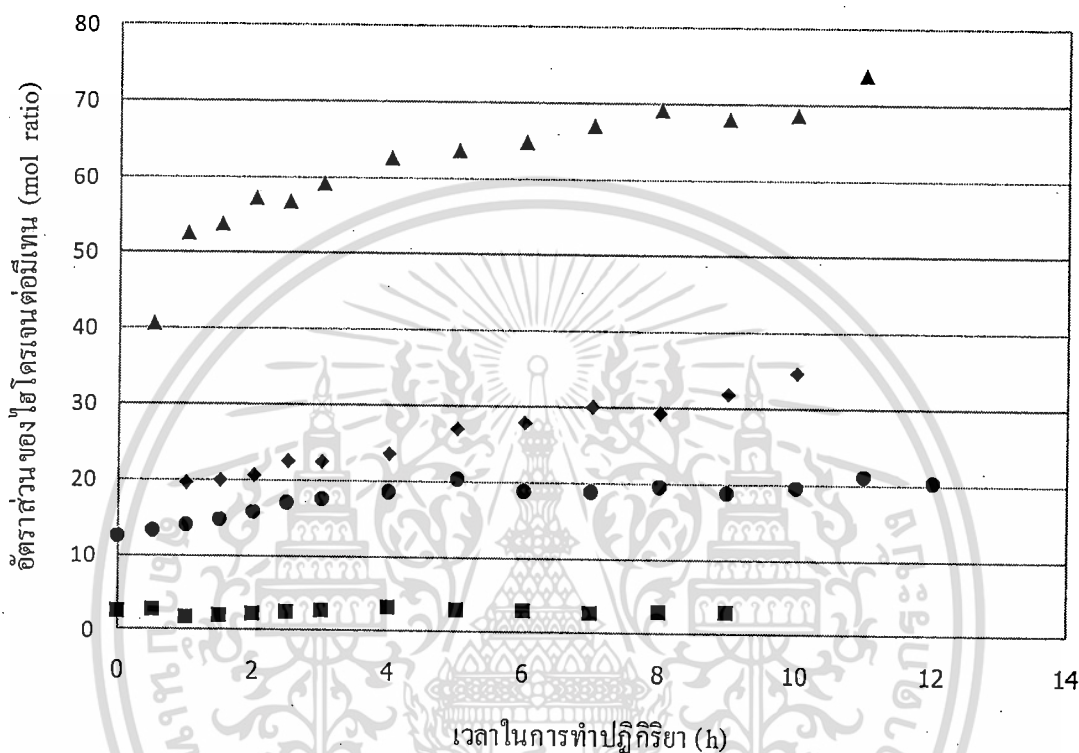


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณ โลหะนิกเกิลที่มีต่อปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะในการทดลองคือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ 0.3 g ที่มีปริมาณ โลหะนิกเกิล (◆) 0% , (▲) 10%, (■) 20% และ (●) 30%

ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา โดยใช้สภาวะในการทดลองคือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา 0.3 g ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 450°C พบว่าปริมาณโลหะนิกเกิลมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณโลหะจะมีผลให้พื้นที่ว่างไว (Active Site) ในการกระตุ้นปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี โดยปริมาณนิกเกิลที่ 30 wt% จะให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนสูงกว่าที่ปริมาณนิกเกิล 0%, 10% และ 20 wt%Ni และจากกราฟจะสังเกตได้ว่าที่ 30 wt%Ni จะมีบางช่วงที่ปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นค่อนข้างคงที่ก่อนที่จะเพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่กราฟคงที่อาจเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นปฏิกิริยาได้ไม่ดีและหลังจากนั้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดการคืนสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและช่วยให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาคลับคืนมา ปริมาณไฮโดรเจนจึงเกิดเพิ่มขึ้น สำหรับที่ปริมาณโลหะนิกเกิลในปริมาณอื่น ๆ นั้นก็เกิดในลักษณะคล้ายกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kariya N. และคณะ ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของไซโคลเฮกเซน พบว่าการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแห้งซึ่งเป็นการทำความสะอาดและป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

สำหรับผลิตภัณฑ์แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นนั้นจะพบว่าที่ 30 wt%Ni จะให้ปริมาณมีเทนสูงสุดเช่นเดียวกับไฮโดรเจน แต่ที่ปริมาณ 0 wt%Ni จะให้ปริมาณแก๊สมีเทนมากกว่าที่ปริมาณโลหะนิกเกิล 10% และ 20% ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากตัวรองรับอะลูมินามีผลในการกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดมีเทนได้ดี เมื่อปริมาณอะลูมินามากจึงอาจเป็นผลให้เกิดแก๊สมีเทนมากขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลที่มีผลต่ออัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนที่เกิดขึ้น ที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณโลหะนิกเกิลเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราส่วนของแก๊สที่เป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น แต่ที่ปริมาณโลหะนิกเกิล 30% จะให้อัตราส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าการใช้ปริมาณโลหะนิกเกิลในปริมาณอื่นๆ



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของปริมาณโลหะนิกเกิลที่มีต่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อมีเทนที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะในการทดลองคือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al₂O₃ 0.3 g ที่มีปริมาณโลหะนิกเกิล (◆) 0%, (▲) 10%, (■) 20% และ (●) 30%

ที่ปริมาณโลหะนิกเกิลที่ 30% นั้นจะให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากกว่าการใช้ที่ปริมาณโลหะอื่นๆ แต่ในขณะเดียวกันก็ให้ปริมาณแก๊สมีเทนในปริมาณมากเช่นเดียวกัน จึงมีผลต่ออัตราส่วนระหว่างแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ทำให้มีอัตราส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ต่ำลง ซึ่งอาจมีผลต่อการนำผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนไปใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากการใช้เซลล์เชื้อเพลิงบางชนิด เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) มีการทำงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 80°C ดังนั้นการที่มีมีเทนปะปนเข้าไปกับไฮโดรเจนด้วยจึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ แต่หากเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความว่องไวต่อสารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการทำงานที่อุณหภูมิสูง เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) การที่มีมีเทนปนไปกับไฮโดรเจนก็อาจทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ได้ หากต้องการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะนิกเกิล 30% ก็อาจต้องกำจัดมีเทนออกไปก่อนที่จะนำไฮโดรเจนไปใช้



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของเมทิลไซโคลเฮกเซน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยอะลูมินา ทำการทดลองภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ที่ 450°C ปริมาณสารตั้งต้นคือ เมทิลไซโคลเฮกเซน 1.2 ml และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 g โดยใช้ปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0%, 10%, 20% และ 30 wt.% Ni ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นมีเพียงไฮโดรเจนและมีเทน

พบว่าการใช้ปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับในปริมาณที่แตกต่างกันจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นทั้งไฮโดรเจนและมีเทน โดยในการศึกษาพบว่าปริมาณโลหะนิกเกิลที่ 30 wt.% Ni จะให้ปริมาณไฮโดรเจนและมีเทนมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้โลหะนิกเกิลในปริมาณอื่นๆ โดยให้ปริมาณไฮโดรเจน 13.5 mmol และมีเทน 0.28 mmol และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 12 ชั่วโมง

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาเพิ่มเติม ควรศึกษาอิทธิพลเนื่องจากปัจจัยอื่นๆ เช่น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ รวมถึงการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันด้วย

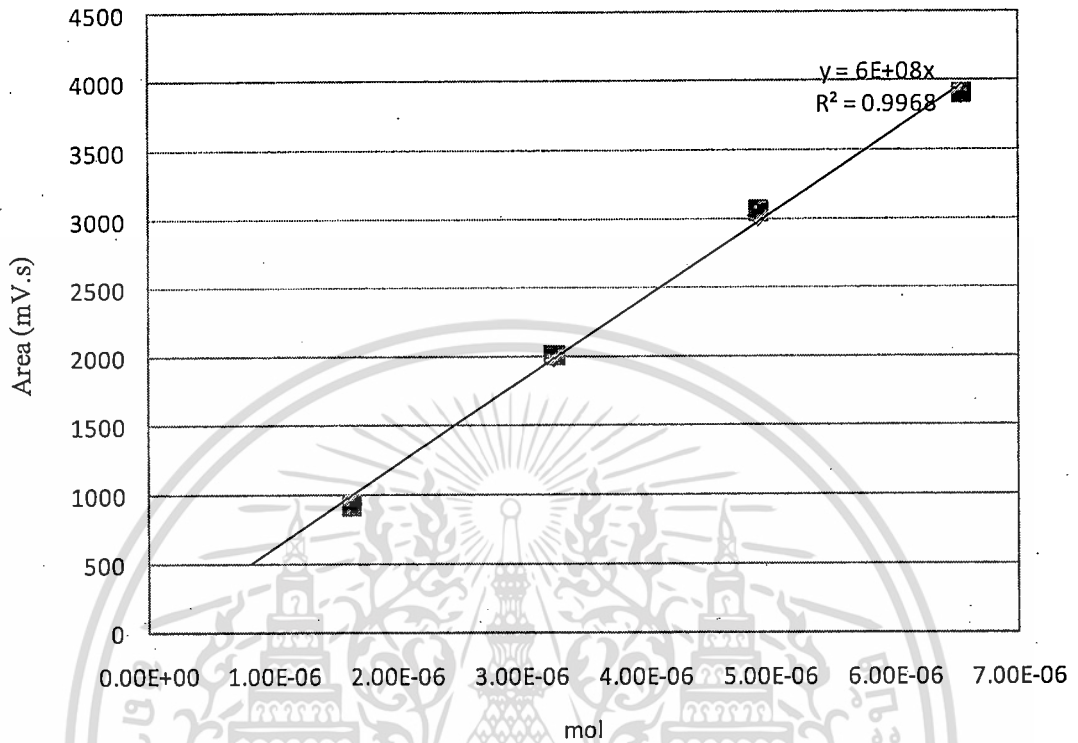
เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรัตน์ ขวัญเมือง, ธนิษฐา ปราณินรารัตน์, อธิคม เพียงใจ และวรรณศิริ ถิ่มสุขนิรันดร์, “Fuel Cells พลังงานแห่งอนาคต” [online] Available: encyclopedia.learn.net.in.th
- [2] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และมานิจ ทองประเสริฐ, “ไฮโดรเจน: เชื้อเพลิงสำหรับอนาคต” [online] Available: www.navy22.com
- [3] นายเจิม ตรงนิตย์, “เทคโนโลยี Fuel Cell กักเก็บพลังงาน (มูลนิธิสถาบันพลังงานแห่งประเทศไทย)” [online] Available: www.eeit.or.th
- [4] Y. Okada, E. Sasaki, E. Watanabe, S. Hyodo and H. Nishijima (2006). “Development of dehydrogenation catalyst for hydrogen generation in organic chemical hydride method” International Journal of Hydrogen Energy. 2006(31): 1348 – 1356.
- [5] R.B. Biniwale, S. Rayalu, S. Devotta and M. Ichikawa (2007). “Chemical hydrides: A solution to high capacity hydrogen storage and supply.” International Journal of Hydrogen Energy. 2008(33) : 360-365.
- [6] M.P. Lá zaro, E. García-Bordejé, D. Sebastiá, M.J. Lá zaro and R. Moliner (2008). “In situ hydrogen generation from cycloalkanes using a Pt/CNF catalyst.” Catalysis Today. 2008(138): 203-209
- [7] L. Zhang, G. Xu, A. Yue, C. Chen and Q. Wang (2006). “Dehydrogenation of methylcyclohexane under multiphase reaction conditions.” International Journal of Hydrogen Energy. 2006(31): 2250-2255.
- [8] จตุพร วิชาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์, 2547, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [9] สมชัย อัครทิวา, ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง, สำนักพิมพ์ท็อป, 2003
- [10] H.-J Neef. (2009). “International overview of hydrogen and fuel cell research.” Energy. 2009(34): 327–333
- [11] N. Kariya, A. Fukuoka and M. Ichikawa (2002). “Efficient evolution of hydrogen from liquid cycloalkanes over Pt-containing catalysts supported on active carbons under “wet–dry multiphase conditions”.” Applied Catalysis A: General. 2002 (233) : 91–102
- [12] S. Yolcular and Ö. Olgun (2008). “Ni/Al₂O₃ catalysts and their activity in dehydrogenation of methylcyclohexane for hydrogen production.” Catalysis Today. 2008(138): 198–202

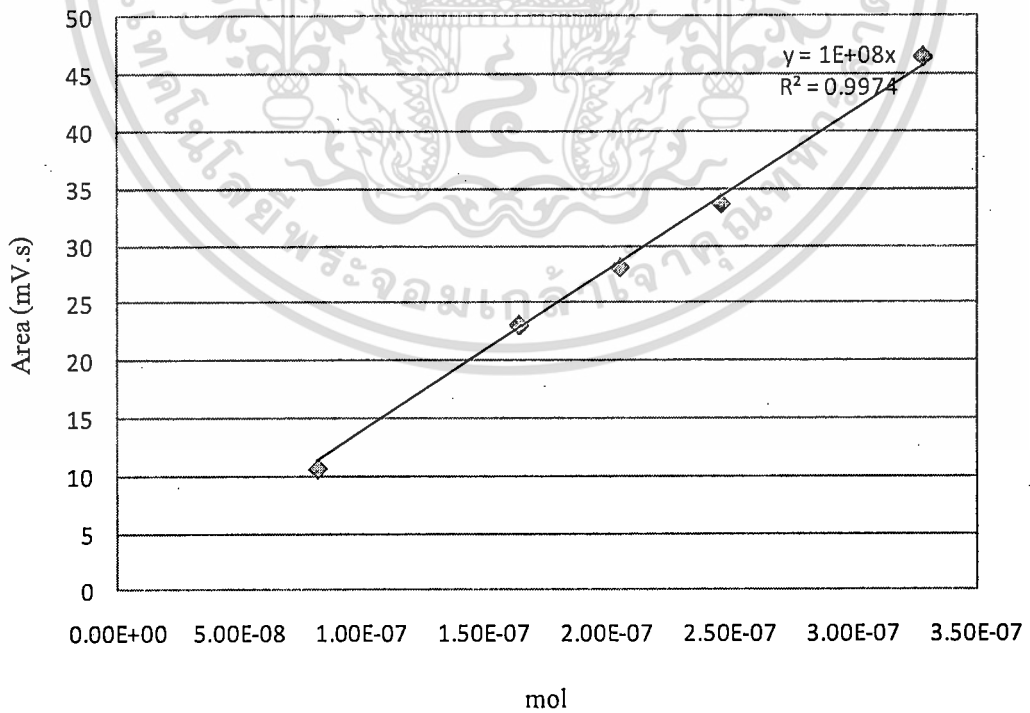
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของ H₂



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของ CH₄

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 จำนวน โมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3 l/h

Reaction time (h)	Area (mV.s)	mol CH ₄ in sample 0.5 ml (mol)	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ml)	mol CH ₄ ในผลิตภัณฑ์ (mol)
0	0	0.00E+00	150.00	0.00E+00
0.5	0	0.00E+00	185.90	0.00E+00
1	0.36	3.60E-09	185.90	1.34E-06
1.5	0.65	6.50E-09	183.50	2.39E-06
2	1.70	1.70E-08	183.50	6.24E-06
2.5	2.42	2.42E-08	183.50	8.88E-06
3	3.10	3.10E-08	183.50	1.14E-05
4	5.47	5.47E-08	181.11	1.98E-05
5	7.26	7.26E-08	181.11	2.63E-05
6	9.35	9.35E-08	181.11	3.39E-05
7	15.25	1.53E-07	178.72	5.45E-05
8	25.33	2.53E-07	176.32	8.93E-05
9	31.23	3.12E-07	176.32	1.10E-04
10	31.89	3.19E-07	176.32	1.12E-04
11	36.35	3.64E-07	173.93	1.26E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3 l/h

Reaction time (h)	Area (mV.s)	mol H ₂ in sample 0.5 ml (mol)	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ml)	mol H ₂ ในผลิตภัณฑ์ (mol)
0	0	0.00E+00	150.00	0.00E+00
0.5	240.41	4.01E-07	212.22	1.70E-04
1	434.62	7.24E-07	217.01	3.14E-04
1.5	680.27	1.13E-06	221.79	5.03E-04
2	912.54	1.52E-06	224.19	6.82E-04
2.5	1057.18	1.76E-06	226.58	7.98E-04
3	1209.09	2.02E-06	228.97	9.23E-04
4	1453.45	2.42E-06	231.37	1.12E-03
5	1867.53	3.11E-06	236.15	1.47E-03
6	2047.93	3.41E-06	236.15	1.61E-03
7	2266.91	3.78E-06	238.55	1.80E-03
8	2249.87	3.75E-06	240.94	1.81E-03
9	2441.70	4.07E-06	240.94	1.96E-03
10	2683.70	4.47E-06	240.94	2.16E-03
11	2817.50	4.70E-06	240.94	2.26E-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 จำนวน โมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3 l/h

Reaction time (h)	Area (mV.s)	mol CH ₄ in sample 0.5 ml (mol)	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ml)	mol CH ₄ ในผลิตภัณฑ์ (mol)
0	0	0.00E+00	150.00	0.00E+00
0.5	1.44	1.44E-08	212.22	6.11E-06
1	3.70	3.70E-08	217.01	1.61E-05
1.5	5.69	5.69E-08	221.79	2.52E-05
2	7.39	7.39E-08	224.19	3.31E-05
2.5	7.84	7.84E-08	226.58	3.55E-05
3	8.99	8.99E-08	228.97	4.12E-05
4	10.30	1.03E-07	231.37	4.77E-05
5	11.56	1.16E-07	236.15	5.46E-05
6	12.27	1.23E-07	236.15	5.80E-05
7	12.60	1.26E-07	238.55	6.01E-05
8	12.84	1.28E-07	240.94	6.19E-05
9	12.80	1.28E-07	240.94	6.17E-05
10	12.92	1.29E-07	240.94	6.23E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3 l/h

Reaction time (h)	Area (mV.s)	mol H ₂ in sample 0.5 ml (mol)	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ml)	mol H ₂ ในผลิตภัณฑ์ (mol)
0	0	0.00E+00	150.00	0.00E+00
0.5	837.40	1.40E-06	228.97	6.39E-04
1	1370.50	2.28E-06	236.15	1.08E-03
1.5	1806.37	3.01E-06	243.33	1.47E-03
2	2171.48	3.62E-06	248.12	1.80E-03
2.5	2471.09	4.12E-06	250.51	2.06E-03
3	2701.61	4.50E-06	255.30	2.30E-03
4	3117.02	5.20E-06	262.48	2.73E-03
5	3428.19	5.71E-06	267.26	3.05E-03
6	3629.03	6.05E-06	272.05	3.29E-03
7	3952.80	6.59E-06	276.84	3.65E-03
8	4168.80	6.95E-06	281.62	3.91E-03
9	4182.79	6.97E-06	284.02	3.96E-03
10	4511.24	7.52E-06	284.02	4.27E-03
11	4885.61	8.14E-06	284.02	4.63E-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 จำนวน โมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3 l/h

Reaction time (h)	Area (mV.s)	mol CH ₄ in sample 0.5 ml (mol)	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ml)	mol CH ₄ ในผลิตภัณฑ์ (mol)
0	0	0.00E+00	150.00	0.00E+00
0.5	3.43	3.43E-08	228.97	1.57E-05
1	4.34	4.34E-08	236.15	2.05E-05
1.5	5.59	5.59E-08	243.33	2.72E-05
2	6.31	6.31E-08	248.12	3.13E-05
2.5	7.24	7.24E-08	250.51	3.63E-05
3	7.59	7.59E-08	255.30	3.88E-05
4	8.28	8.28E-08	262.48	4.35E-05
5	8.95	8.95E-08	267.26	4.78E-05
6	9.31	9.31E-08	272.05	5.07E-05
7	9.80	9.80E-08	276.84	5.43E-05
8	10.02	1.00E-07	281.62	5.64E-05
9	10.22	1.02E-07	284.02	5.81E-05
10	10.93	1.09E-07	284.02	6.21E-05
11	11.00	1.10E-07	284.02	6.25E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3 l/h

Reaction time (h)	Area (mV.s)	mol H ₂ in sample 0.5 ml (mol)	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ml)	mol H ₂ ในผลิตภัณฑ์ (mol)
0	0	0.00E+00	150.00	0.00E+00
0.5	2397.19	4.00E-06	255.30	2.04E-03
1	3442.64	5.74E-06	279.23	3.20E-03
1.5	3870.87	6.45E-06	295.98	3.82E-03
2	4307.15	7.18E-06	310.34	4.46E-03
2.5	4826.52	8.04E-06	322.31	5.19E-03
3	5034.11	8.39E-06	331.88	5.57E-03
4	5496.30	9.16E-06	346.24	6.34E-03
5	5791.72	9.65E-06	360.60	6.96E-03
6	6618.98	1.10E-05	441.96	9.75E-03
7	6377.56	1.06E-05	499.40	1.06E-02
8	6380.48	1.06E-05	525.72	1.12E-02
9	6666.85	1.11E-05	528.12	1.17E-02
10	6722.85	1.12E-05	528.12	1.18E-02
11	7003.60	1.17E-05	528.12	1.23E-02
12	7697.45	1.28E-05	528.12	1.36E-02
13	7670.80	1.28E-05	528.12	1.35E-02

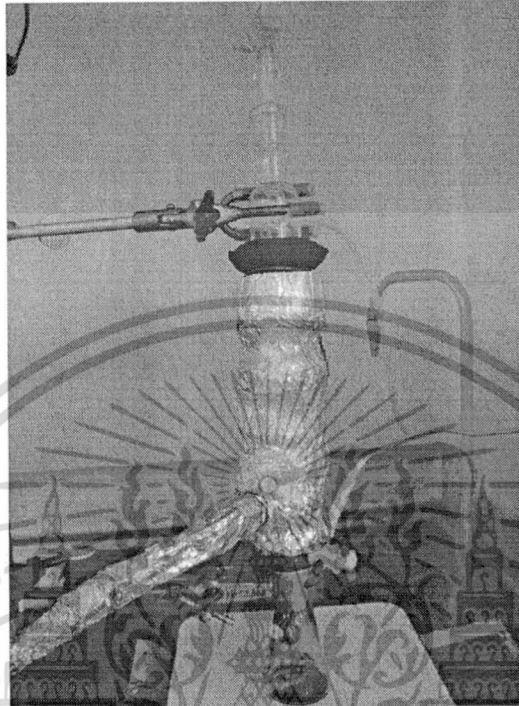
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 จำนวน โมลของมีเทนที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt%Ni/Al₂O₃ 0.3 g
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3 l/h

Reaction time (h)	Area (mV.s)	mol CH ₄ in sample 0.5 ml (mol)	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ml)	mol CH ₄ ในผลิตภัณฑ์ (mol)
0	0	0.00E+00	150.00	0.00E+00
0.5	13.49	1.35E-07	255.30	6.89E-05
1	18.60	1.86E-07	279.23	1.04E-04
1.5	19.51	1.95E-07	295.98	1.15E-04
2	20.76	2.08E-07	310.34	1.29E-04
2.5	21.78	2.18E-07	322.31	1.40E-04
3	21.10	2.11E-07	331.88	1.40E-04
4	22.27	2.23E-07	346.24	1.54E-04
5	22.24	2.22E-07	360.60	1.60E-04
6	23.03	2.30E-07	394.10	1.82E-04
7	24.26	2.43E-07	451.54	2.19E-04
8	24.16	2.42E-07	477.86	2.31E-04
9	24.35	2.44E-07	480.25	2.34E-04
10	25.34	2.53E-07	480.25	2.43E-04
11	25.58	2.56E-07	480.25	2.46E-04
12	26.00	2.60E-07	480.25	2.50E-04
13	26.73	2.67E-07	480.25	2.57E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
เครื่องมือและอุปกรณ์

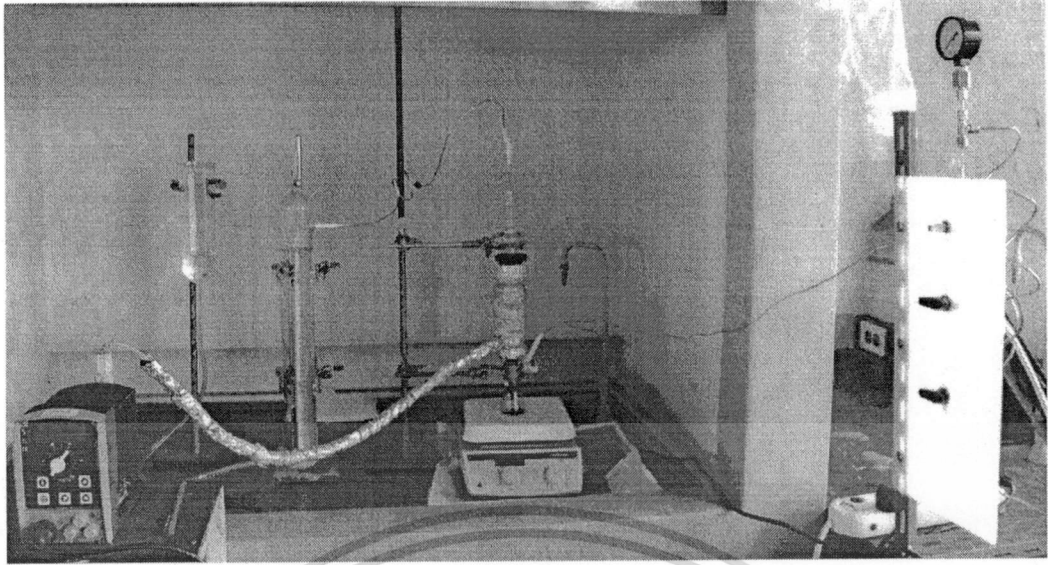


รูปที่ ค.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบ Reactive Distillation



รูปที่ ค.2 อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้