

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ค.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ ๑  
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี ๒๕๕๔

แผนงานวิจัย การกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในรีฟอร์มก๊าซเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกเพื่อใช้  
กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน

CO removal from reformed gas as an alternative fuel for PEM Fuel  
cells

โครงการวิจัย การใช้ก๊าซออกซิเจนในการทำรีฟอร์มก๊าซให้บริสุทธิ์เพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง  
แบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

Preferential oxidation of reformed gas using with PEM Fuel cells

๑๕๔๓๖๙  
19 พ.ย. 2555

โดย

312790

เริ่มบริการ

12 ส.ย. 2556

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. เอกรัตน์ วงษ์แก้ว  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์และซีเรียม ที่มีการเติมโคบอลต์ ออกไซด์เป็นสารโปรโมทร่วมที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักต่างกัน เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ในรีฟอร์มก๊าซสำหรับการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยทำการ วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยา คาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันและการเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยา ถูกเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม จากการทดลอง พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสม ที่มีการเติม โคบอลต์ออกไซด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 132.9 ตารางเมตรต่อกรัม แสดง ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมอื่น และ เมื่อปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการเร่ง ปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันลดลง

คำสำคัญ : ปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน, โคบอลต์ออกไซด์, ซีเรียมออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์, สัดส่วนซีเรียมออกไซด์ต่อโคบอลต์ออกไซด์, การกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

## Abstract

The objective of this work is to study the activities of mixed oxides containing cobalt oxide as a catalyst for CO removal in reformed gas. The mixed oxides with varying amount of cobalt oxide were characterized for their specific surface areas, average pore diameters, chemical structure and average crystallite sizes. All samples were prepared by coprecipitation method. The BET results showed that the samples containing 8% cobalt oxide gave the highest specific surface area of  $132.9 \text{ m}^2/\text{g}$ . Moreover, this catalyst showed the best performance to CO oxidation. CO completely converted to  $\text{CO}_2$  at 170 degree Celsius. However, an increase in amount of cobalt oxide in the catalysts led to decreasing of specific surface area and decreasing in the activity of the catalyst to the reaction.

Key words: CO oxidation reaction, Cobalt oxide, Cerium oxide, Copper oxide, Ratio of Cerium oxide to cobalt oxide, CO removal

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยบูรพา ประเภททุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๔ ภายใต้แผนงานวิจัยเรื่องการจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในรีฟอร์มก๊าซเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกเพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน ชุดโครงการวิจัย เรื่อง “การใช้ก๊าซออกซิเจนในการทำรีฟอร์มก๊าซให้บริสุทธิ์เพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน” เป็นโครงการวิจัยที่มีระยะเวลาดำเนินงาน 2 ปี โดยรายงานนี้เป็นผลงานวิจัยในปีที่ 1 ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณมา ณ.ที่นี้ นอกจากนี้อุปกรณ์และครุภัณฑ์บางชิ้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย จึงขอขอบคุณมา ณ.ที่นี้ด้วย

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณนิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลในงานวิจัย ดังนี้ นางสาวภรณ์ทิพย์ อุ่นบำรุง และ นางสาววารุณี จันทร์เกิด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 วัตถุประสงค์	5
1.2 ขอบเขตของการทำโครงการ	6
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>7</b>
2.1 การเร่งปฏิกิริยา	7
2.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์	8
2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์	10
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิว	11
2.5 การดูดซับและการคาย	12
2.6 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	12
2.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	14
2.7.1 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยวิธี BET	14
2.7.2 การวิเคราะห์ขนาดผลึกของวัสดุด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชัน	17
2.7.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซผสมโดยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ	18
2.8 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	
3.1 สารเคมี	23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	23
3.3 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	24
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา	24
3.5 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา	25
3.6 แผนการทดลอง	25
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง</b>	
4.1 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	26
4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา	26
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดผลึกและโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา	29
4.2 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน	34
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	39
5.1.1 ผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา	39
5.1.2 ผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาต่อขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	39
5.1.3 ผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน	40
5.2 แนวทางการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 2	40

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แผนการทดลองในปีที่ 1	25
4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และ โคบอลต์ออกไซด์ต่างกัน	27
4.2 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ต่อปริมาณซีเรียมออกไซด์ ที่มีโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารโปรโมทร่วมที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักต่างกัน	33

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	2
1.2 แนวทางการผลิตไฮโดรเจนจากแหล่งของไฮโดรเจนชนิดต่างๆ	3
2.1 การดูดซับทางเคมีของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา	11
2.2 การเคลื่อนที่มาพบกันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลใหม่	11
2.3 แผนภาพวิถีตกตะกอนร่วม	13
2.4 ไอโซเทิร์มการดูดซับ และคายซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดมีโซพอร์	15
2.5 การพล็อตกราฟของสมการ BET	15
2.6 ส่วนประกอบพื้นฐานของ GC	19
4.1 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วนเทียบกับตำแหน่งพีคมาตรฐานคอปเปอร์ออกไซด์	29
4.2 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วนเทียบกับตำแหน่งพีคมาตรฐานซีเรียมออกไซด์	30
4.3 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วนเทียบกับตำแหน่งพีคมาตรฐานโคบอลต์ออกไซด์	31
4.4 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันของโลหะออกไซด์ต่างๆ	35
4.5 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันของโลหะออกไซด์ผสม ที่มีโคบอลต์เป็นองค์ประกอบ	36
4.6 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีอัตราส่วนร้อยละของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ	37



## บทที่ 1

### บทนำ

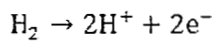
ในปัจจุบันพลังงานจัดเป็นปริมาณพื้นฐานอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญ สำหรับกระบวนการต่างๆในการดำเนินชีวิตประจำวัน โดยช่วงทศวรรษที่ผ่านมาแหล่งพลังงานส่วนใหญ่ได้จาก เชื้อเพลิงฟอสซิล อาทิ น้ำมัน ปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เมื่อจำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และประกอบกับแหล่งเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งเวลาในการเกิดเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นใช้เวลานานนับล้านปี นำไปสู่ปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิง นับว่าเป็นปัญหาระดับโลก ดังนั้นการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือสูงกว่าแหล่งพลังงานเดิมจึงเป็นจุดสนใจของนักวิทยาศาสตร์ ปัจจุบันจากความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์ ทำให้เกิดเทคโนโลยีที่สามารถดึงเอาแหล่งพลังงานใหม่หลายแหล่งมาใช้ ไม่ว่าจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานจากไฮโดรเจน พลังงานนิวเคลียร์ เชื้อเพลิงจากพืช เช่น เอทานอล ไบโอดีเซล ฯลฯ ในจำนวนนี้เทคโนโลยีไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง (Hydrogen and Fuel Cell) เป็นทางเลือกหนึ่ง ที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้งาน และขณะนี้หน่วยงานต่างๆ ทั่วโลก ทั้งทางภาครัฐและเอกชนได้ให้ความสนใจ และร่วมลงทุนในการเตรียมพร้อมการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงเข้าสู่ตลาดพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดและไม่มมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงนับได้ว่าเทคโนโลยีนี้อาจจะเข้ามามีบทบาทอย่างมากในอนาคต ต่อการพัฒนาพลังงานรูปแบบใหม่ขึ้นใช้เองในประเทศ

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ถูกใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง (กฤษยาพร ทินกร, 2547) โดยเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีหลายชนิด เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM) เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) ต้องใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline) นิยมใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและน้ำให้กับยานอวกาศ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide) เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูง และเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อ

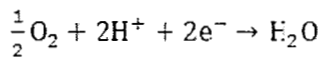
แลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane - PEM) เซลล์ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำและใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งจึงไม่มีปัญหาการรั่วซึมและเกิดการกัดกร่อนน้อย จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในอาคารบ้านเรือนและรถยนต์ แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงคือ ก๊าซไฮโดรเจน

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 คือ ผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าที่ขั้วลบ (แอโนด) และผ่านก๊าซออกซิเจนเข้าไปที่ขั้วบวก (แคโทด) ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาโลหะบนขั้วไฟฟ้าและเกิดการแตกตัวเป็นโปรตอน ( $H^+$ ) และอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปภายนอกเซลล์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ส่วนโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ไปที่ขั้วแคโทดเพื่อรวมตัวกับออกซิเจนและอิเล็กตรอนจะกลายเป็นโมเลกุลน้ำ ( $H_2O$ ) สามารถอธิบายเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

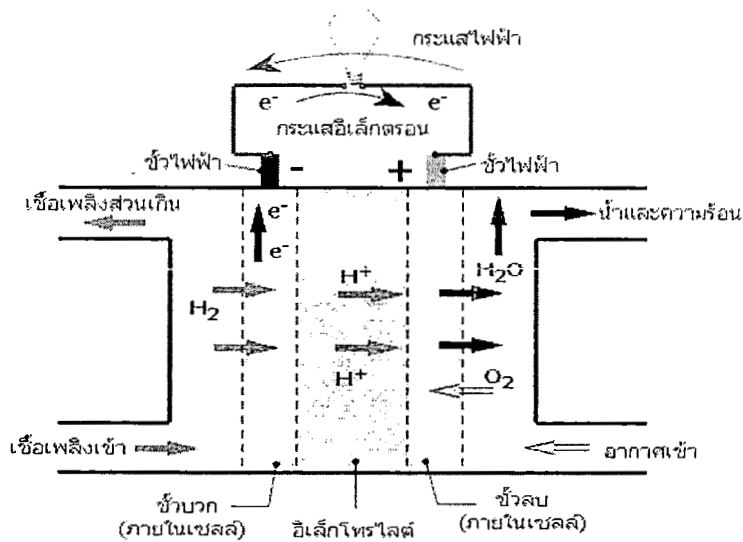
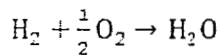
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

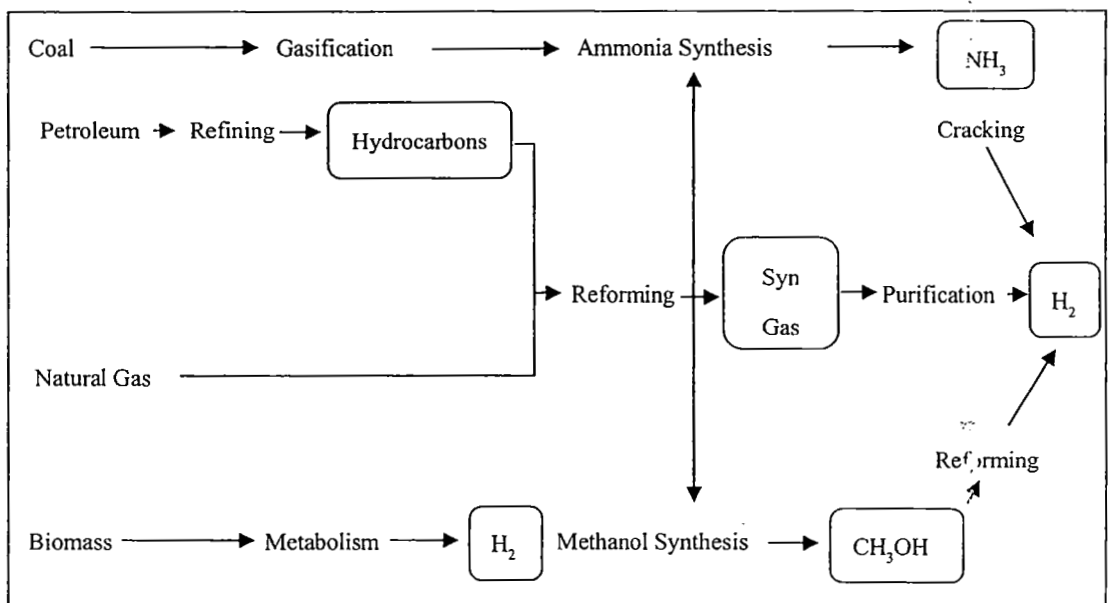


ปฏิกิริยารวม



รูปที่ 1.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน คือก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งไฮโดรเจนนั้นถูกมองว่ามีมากมายในโลกสามารถพบได้ทุกที่ แต่ในธรรมชาติมักพบอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น น้ำ มีเทน เอทานอล หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพื่อนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงโดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสามารถทำได้หลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แนวทางการผลิตไฮโดรเจนจากแหล่งของไฮโดรเจนชนิดต่างๆ (Schwank, 2005)

วิธีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพสูง ได้แก่การผลิตก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิง จะได้ก๊าซไฮโดรเจน น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงร้อยละในล้านส่วน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ทำให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก (Qi และคณะ, 2002; Zamel และ Li, 2008) จึงมีความจำเป็นที่ต้องกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากก๊าซไฮโดรเจน โดยสามารถกำจัดได้หลายวิธี (Cetin และ คณะ, 2006) แต่วิธีที่สะดวกและต้นทุนต่ำคือการใช้ปฏิกิริยาการเลือกเกิดออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Selective CO oxidation or Preferential CO oxidation) เป็นการเติมก๊าซออกซิเจน

ลงไปเพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตามสมการ  $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซผสมมีก๊าซไฮโดรเจน เป็นก๊าซหลักในปริมาณร้อยละ 50-55 โดยปริมาตร ดังนั้นก๊าซออกซิเจนที่เติมเข้าไปอาจเข้าทำปฏิกิริยากับ ก๊าซไฮโดรเจนได้ตามสมการ  $\text{H}_2 - \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ที่ช่วย เร่งปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยที่ไม่มีการเผาไหม้ก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นเชื้อเพลิงหลักเลย นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรจะต้องมีความว่องไวในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนมีส่วนของเยื่อแลกเปลี่ยนที่สามารถทนความร้อนได้ใน อุณหภูมิไม่สูง

ปัจจุบันมีผู้ค้นคว้าในเรื่องการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ในสถานะที่มีก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมากเกินไป โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ผสมระหว่างคอปเปอร์และซีเรียม ( $\text{CuO/CeO}_2$ ) มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกซิเดชันและการเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันได้ดี (Avgouropoulos และคณะ, 2002) พันธะระหว่างคอปเปอร์ ซีเรียม ออกซิเจนในตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์ และซีเรียมออกไซด์ ทำให้เกิดกระบวนการคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำลง (Zheng และคณะ, 2005) นอกจากนี้การ เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Ce ที่เติมโลหะทรานซิชัน พบว่าการเติม โคบอลต์เพียงเล็กน้อยทำให้การเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันสูงขึ้นและเพิ่มความสามารถ ในการต้านทานการเสื่อมสภาพด้วย (Kang และคณะ, 2003 ; Park และคณะ, 2005) และเลขออกซิเดชันของ โคบอลต์ออกไซด์มีผลต่อการเร่งการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันโดยการเกิดปฏิกิริยา คาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันจะลดลงเมื่อเลขออกซิเดชันของโคบอลต์เพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างต่อไปนี้  $\text{CoO} (+2) \geq \text{Co}_3\text{O}_4 \gg \text{CoO}(\text{OH}) (+3) \geq \text{CoO}_x (>+3)$  (Lin และคณะ, 2003)

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีคือการมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เนื่องจากการมีพื้นที่ผิว จำเพาะสูงจะเพิ่มปริมาณการกักเก็บออกซิเจนให้กับซีเรียมออกไซด์ (Zengzan และคณะ, 2006) จาก การศึกษายังพบอีกว่า การเติมโคบอลต์ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น (Radwan และคณะ, 2004) โดยที่พื้นที่ ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้หลายวิธี ด้วยกันได้แก่ วิธีการตกตะกอนร่วม วิธีอิมเพกเนชัน วิธีซิเตรตไฮโดรเทอร์มอล วิธียูเรียไนเตรตคอมบัสชัน วิธีโซลเจล เป็นต้น จากการศึกษาการเตรียมโลหะออกไซด์ผสมระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์และเซอร์โคเนียม ออกไซด์ ด้วยวิธีอิมเพกเนชัน พบว่าคอปเปอร์ออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีบนเซอร์โคเนียมออกไซด์ แม้ว่าจะมีพื้นที่ผิวดำ (Shimokawabe และคณะ, 1990) วิธียูเรียไนเตรตคอมบัสชัน ให้ประสิทธิภาพในการ เลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันสูง และต้านทานการเสื่อมสภาพสูง โดยศึกษาจากการเตรียมตัวเร่ง

ปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ (Avgouropoulos และคณะ, 2005) และสำหรับวิธีการตกตะกอนร่วม ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์พบว่าความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นและค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 100 ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เนื่องจากคอปเปอร์ออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีบนซีเรียมออกไซด์ (Tang และคณะ, 2004) และยังพบว่าวิธีการตกตะกอนร่วมจะให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง (Roh และคณะ, 2004)

จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้นพบว่า การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันได้ดี และมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของโลหะทรานซิชันว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันสูงขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน และจากคุณสมบัติของโคบอลต์ออกไซด์เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงและเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพในสภาวะที่มีน้ำโดยโคบอลต์ออกไซด์ต้องอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมด้วย ดังนั้นในโครงการวิศวกรรมเคมีจึงเลือกพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะออกไซด์ผสมระหว่าง คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) ซีเรียมออกไซด์ ( $\text{CeO}_2$ ) ด้วยการเติมโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) ในปริมาณต่างๆ เพื่อศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสม ทั้งสำหรับปฏิกิริยาการคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันและปฏิกิริยาการเลือกเกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของก๊าซอื่นๆที่อยู่ในรีฟอร์มก๊าซต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในการใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเชื้อเพลิงเปลี่ยนโปรตอนต่อไป

### 1.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย คือ การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะทรานซิชัน ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนมากเกินไป โดยมีวัตถุประสงค์ย่อย ดังนี้

- 1.ศึกษาผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณสมบัติและความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา
- 2.ศึกษาผลกระทบของปริมาณโลหะออกไซด์ต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา
- 3.ศึกษาผลกระทบของก๊าซชนิดต่างๆที่อยู่ในรีฟอร์มก๊าซต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาศึกษา เพื่อก๊าซที่ได้สามารถนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนต่อไป

4.ศึกษาสภาวะในการเร่งปฏิกิริยา เช่น ความเร็วสเปซ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาช่วงสภาวะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้หมด

### 1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ผสมระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
2. ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน
3. ศึกษาผลกระทบของการเติมโคบอลต์ออกไซด์และปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ในโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ซีเรียมต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา โดยปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ที่ใช้ คือ ร้อยละ 4 ร้อยละ 8 ร้อยละ 12 และร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก โดยกำหนดให้ปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์คงที่คือ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
4. ศึกษาผลกระทบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับน้ำ ต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาการเลือกเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน
5. ศึกษาผลกระทบของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซออกซิเจนในสายป้อนต่อการเร่งปฏิกิริยา

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากวิธีการตกตะกอนร่วม
2. ทราบถึงผลกระทบและปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ที่เหมาะสมต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน
3. ทราบถึงวิธีการใช้เครื่องมือที่เกี่ยวกับการทดลองและการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การเร่งปฏิกิริยา องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิว การดูดซับและการคายซับ วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ สารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยที่สารตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะเข้าทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นสารมัธยันตร์ แต่ก็กลับคืนรูปเดิมได้ในปฏิกิริยาย่อยขั้นต่อไป

การเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ และการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

2.1.1 การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous Reaction) คือ ปฏิกิริยาที่ทั้งสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์อยู่ในวัฏภาค (Phase) เดียวกัน

การเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์มีข้อดีหลายประการ เช่น

1. การเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์มักเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะปกติ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ
2. ลดปัญหาเกี่ยวกับการสลายตัวของสารผลิตภัณฑ์ (สารบางตัวอาจสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก)
3. สามารถออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาให้เลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการได้
4. ตัวเร่งมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับโลหะที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เช่น แพลตตินัม (Platinum) และทองคำ (Gold)

2.1.2 การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis) คือ การเร่งปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งมีวัฏภาคต่างกัน ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งที่เป็นของแข็งในการเร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซหรือของเหลว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากันที่ผิวของตัว ปฏิกิริยาที่สำคัญ ๆ ในอุตสาหกรรมผลิต

สารเคมีจะใช้การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนีย การผลิตกรดไนตริก และการผลิตตัวเร่งกำจัดไอเสีย (Catalytic Converter) เป็นต้น

## 2.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือองค์ประกอบว่องไวเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยา (Active Component) และตัวรองรับ (Support) หรือตัวพา (Carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อให้เกิดการถ่ายต่อการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีเพียงสารว่องไวเพียงอย่างเดียว

ตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวอาจมีองค์ประกอบที่ช่วยส่งเสริมการเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้นเรียกว่า โปร-โมเตอร์ (Promoter) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารที่ใส่ลงในปริมาณน้อยๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือกายภาพของสารว่องไวหรือตัวรองรับ ซึ่งอาจเพิ่มกัมมันตภาพ (Activity) สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (Selectivity) และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.1 สารว่องไว สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตามหน้าที่หลัก ได้แก่ โลหะ โลหะออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด และโลหะบนกรด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. โลหะ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ปฏิกิริยาไฮโดรจิโนลิซิส (Hydrogenolysis) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวอย่างคือ นิกเกิล แพลตตินัม ทองแดง แพลเลเดียม และเงิน การที่โลหะเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนได้ เป็นเพราะโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนถูกดูดซับแบบแตกตัว (Dissociative Adsorption) บนโลหะเหล่านี้ได้ และเกิดปฏิกิริยาได้ทันที พันธะที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าไม่แข็งแรงมากเกินไป โมเลกุลของไฮโดรเจนจะแตกตัวได้ทันทีบนแพลเลเดียม นิกเกิล โคบอลต์ และเหล็ก แต่จะแตกตัวได้ช้าบนทองแดง ดังนั้น ทองแดงจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ดีนักสำหรับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน แม้ว่าโลหะบางตัวสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน แต่โดยทั่วไปเราจะไม่สามารถนำโลหะบริสุทธิ์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เนื่องจากโลหะมักจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ซึ่งมีความเสถียรสูงในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา มีเพียงโลหะหมู่แพลตตินัมเท่านั้น ที่มีความสามารถต้านทานการเกิดออกไซด์ได้ โดยแพลเลเดียมและแพลตตินัมเป็นตัวที่สำคัญที่สุด แต่ทองจะมีการดูดซับออกซิเจนได้น้อยจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ดีนัก ออกซิเจนถูกดูดซับบนโลหะได้แข็งแรงกว่า ดังนั้นการเคลื่อนที่ของออกซิเจนบนผิวหน้าของโลหะจึงเกิดขึ้นยากกว่า การเกิดออกซิเดชันจึงต้องใช้อุณหภูมิสูง ออกซิเจนแตกตัวได้ดีบนทองแดงและเงิน และอาจดึงไฮโดรเจนออกมาจากสารประกอบอินทรีย์เพื่อจับกับออกซิเจนบนผิวหน้า เกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ได้ และออกซิเจนที่ถูกดูดซับบนผิวหน้าสามารถจับกับอะตอมคาร์บอนของอัลดีไฮด์และเอสเทอร์ได้



2. โลหะออกไซด์ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) และปฏิกิริยารีดอกซ์ เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของโมลิบเดต (Molybdate) และออกไซด์ของโลหะผสม ออกไซด์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นแบบไอออนิกซึ่งมีจำนวนออกซิเจนไม่แน่นอน (Nonstoichiometric Ionic) ซึ่งออกซิเจนเคลื่อนย้ายออกมาจากโครงผลึกได้ อีกกลุ่มคือ กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาที่เร่งปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจน ออก (Dehydrogenation) ได้แก่  $Fe_2O_3$ ,  $ZnO$ ,  $Cr_2O_3/Al_2O_3$  สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ ออกซิเจนสามารถจับอยู่กับโลหะอย่างแข็งแรงและจะต้องไม่ถูกรีดิวซ์โดยไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิที่ใช้ในสภาวะของการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นตัวเร่งที่ดีสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันมักจะไม่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออก

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด สามารถเร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิด ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มักประกอบด้วยธาตุสองชนิดขึ้นไปเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรงด้วยอะตอมของออกซิเจน ตัวอย่างเช่น สารประกอบของซิลิกา อะลูมินา และซีโอไลต์ชนิดต่างๆนอกจากนี้ของแข็งที่เป็นกรดเตรียมได้โดยการจับไอออนของธาตุแฮโลเจนเข้าไว้ในโครงสร้างของอะลูมินาชนิดของกรดอาจจะเป็นแบบลิวอิส (Lewis) หรือแบบบรอนสเตด (Bronstede) หรือทั้งสองรวมกัน ปฏิกิริยาที่เร่งด้วยกรดมักจะขึ้นกับความแรงและธรรมชาติของกรด แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยามากนัก ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ ได้แก่ เรซินชนิดกรดสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออน (Cation Exchange Resin) เช่น Dowex หรือ Amberlyst-15 ซึ่งเป็นที่รู้จักในการเร่งปฏิกิริยาการผลิต MTBE ในอดีตหรือ  $H_3PO_4$  บนตัวพาซึ่งเร่งปฏิกิริยาของพอลิเมอไรเซชัน หรือ  $SiO_2 \cdot Al_2O_3$  และซีโอไลต์ในรูปของกรด เร่งปฏิกิริยาแครกกิง

4. โลหะและกรด อาจเรียกว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่สองอย่าง (Bifunctional catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ประกอบด้วยโลหะและองค์ประกอบที่เป็นกรด ทั้งสององค์ประกอบต่างก็เร่งขั้นตอนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา แต่อาจเร่งในขั้นตอนที่ต่างกัน ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ได้แก่ แพลตทินัมบนตัวรองรับที่เป็นกรดซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของพาราฟิน (Paraffin Isomerization) และแพลเลเดียมบนซีโอไลต์ (Pd/Zeolite) เร่งปฏิกิริยา ไฮโดรจิโนไลซิส

#### 2.2.2 ตัวรองรับหรือตัวพา

สมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวรองรับหรือตัวพา คือการมีพื้นที่ผิวหน้าสูงสำหรับสารกัมมันต์ แม้ว่าบางครั้งมันอาจทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่พบบ่อยจะเป็นแบบตัวเร่งที่มีหลายเฟส (Multiphasic Catalyst) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาจับอยู่บนตัวรองรับซึ่งมีพื้นที่ผิวสูง สมบัติโดยทั่วไปของตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา มีดังนี้

1. ต้องเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิด
2. มีความแข็งแรงเชิงกล เช่น ทนต่อการขูดขีด (Attrition) หรือการบีบอัด (Compression)

3. มีเสถียรภาพหรือทนต่อสภาวะต่างๆ ได้ในระหว่างการทำปฏิกิริยาและในช่วงของการเปลี่ยนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
4. มีพื้นที่ผิวสูง และมีความพรุน แต่ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานด้วย การมีความพรุนรวมถึงขนาดของรูพรุนและการกระจายของรูพรุนพอเหมาะ การมีพื้นที่ผิวสูงหมายถึงมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้ารูพรุนเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีปริมาณของโลหะตัวเร่งสูง
5. มีราคาถูก ซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าต่ำ หากนำไปสู่การประยุกต์ก็จะเป็นกระบวนการที่ไม่แพง

### 2.3 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

กลไกของการถ่ายเทมวลสารซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยามี 7 ขั้นตอน ขั้นตอนต่างๆมีรายละเอียดดังนี้

1 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น (External Diffusion) เป็นความสามารถของสารขณะไหลผ่านผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่จะแพร่ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจากกระแสของสารตั้งต้นไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

2 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (Internal Pore Diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เข้าไปในรูพรุนของตัวเร่ง

3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นซึ่งอยู่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วเกิดการดูดซับในเชิงเคมี เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น

4 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) หลังจากเกิดการดูดซับแล้ว สารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์

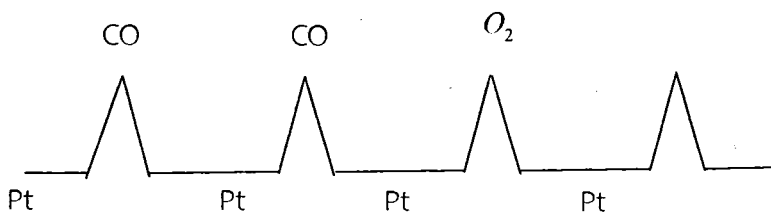
5 การคายซับ (Desorption) เป็นการหลุดออกของสารผลิตภัณฑ์จากผิวตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นตอนสุดท้าย การคายออกถือว่าเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับ

6 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เสมือนเป็นกระบวนการย้อนกลับของขั้นตอนที่ 2 ยกเว้นเพียงสารที่แพร่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น

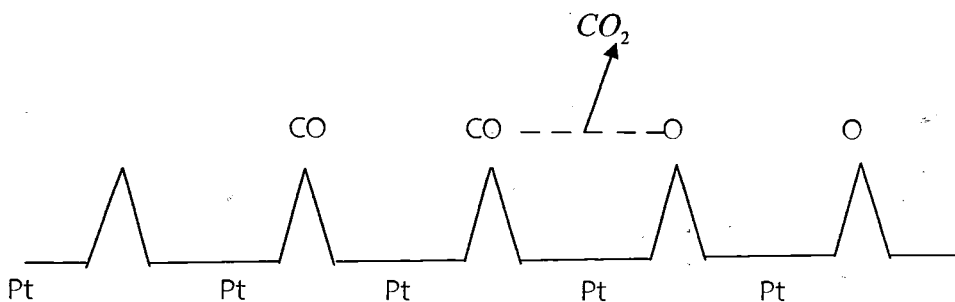
7 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้ก็เป็นเสมือนการย้อนกลับของขั้นตอนที่ 1 ยกเว้นเพียงสารที่แพร่ออกไปเป็นสารผลิตภัณฑ์

## 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิว

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในวิชาภาคก๊าซ และมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็งกลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของของแข็งนั้นๆ เช่น การเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO Oxidation) บนตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทแพลทินัมบนตัวรองรับอลูมินา จะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวของแพลทินัมโดยที่ตำแหน่งของโลหะที่ฝังตัวอยู่ ณ รูพรุนของตัวรองรับ จะทำหน้าที่เป็นตำแหน่งกระตุ้น ซึ่งก่อให้เกิดการดูดซับของสารตั้งต้น (ในที่นี้คือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, CO และก๊าซออกซิเจน,  $O_2$ ) บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นจะแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้น (Active Sites) ซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วเกิดการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับโลหะแพลทินัมมีความรุนแรง ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนอะตอมที่อยู่บริเวณข้างเคียงเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแรงกระทำกับแพลทินัมต่ำกว่า ดังนั้นสามารถคายซับออกไปจากพื้นผิว ทั้งตำแหน่งว่างของแพลทินัมให้โมเลกุลอื่นๆต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการเกิดปฏิกิริยานี้เมื่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนมาดูดซับบนแพลทินัม ก๊าซออกซิเจนจะเกิดการแตกตัว (Dissociate) เป็นออกซิเจน 2 อะตอมเกาะอยู่บนแพลทินัม ดังรูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้เรียกว่า Langmuir Hinshelwood Model



รูปที่ 2.1 การดูดซับทางเคมีของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่มาพบกันและทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นโมเลกุลใหม่

จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบที่พื้นผิวนี้ พบว่าถ้าพื้นที่ผิวของตัวรองรับมีค่ามาก ซึ่งก็คือพื้นที่ผิวมีความพรุนสูง จะทำให้โลหะสามารถกระจายตัวเข้าสู่รูพรุนได้มากขึ้น เป็นการเพิ่มตำแหน่งกัมมันต์ (Active Sites) ให้กับสารตั้งต้น ( $O_2, CO$ ) ทำให้โอกาสในการที่ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) กับ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) จะดูดซับบนตำแหน่งกัมมันต์ที่ติดกัน จากนั้นเกิดปฏิกิริยาได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) มีโอกาสมากขึ้นด้วย นอกเหนือจากนี้ยังอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวยังขึ้นอยู่กับ ค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับ (Activation Energy of Absorption) และความรุนแรงในการดูดซับด้วย ปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องได้แก่ รูปร่าง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะแต่ละตัว เป็นต้น

จากแนวความคิดนี้ พบว่าวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ก็มีผลกระทบต่อความว่องไวของปฏิกิริยาด้วย โดยวิธีการที่ให้พื้นที่มากในการเตรียมตัวรองรับ หรือ วิธีการที่โลหะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ก็น่าจะทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงต่อปฏิกิริยา

## 2.5 การดูดซับและการคายซับ (Adsorption and Desorption)

การดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ การดูดซับของโมเลกุลต่างๆบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ คือการเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับ (Adsorbent) กับตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ (Active Site) เพื่อให้โมเลกุลเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยาต่อไปเช่นเดียวกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ กล่าวคือมีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

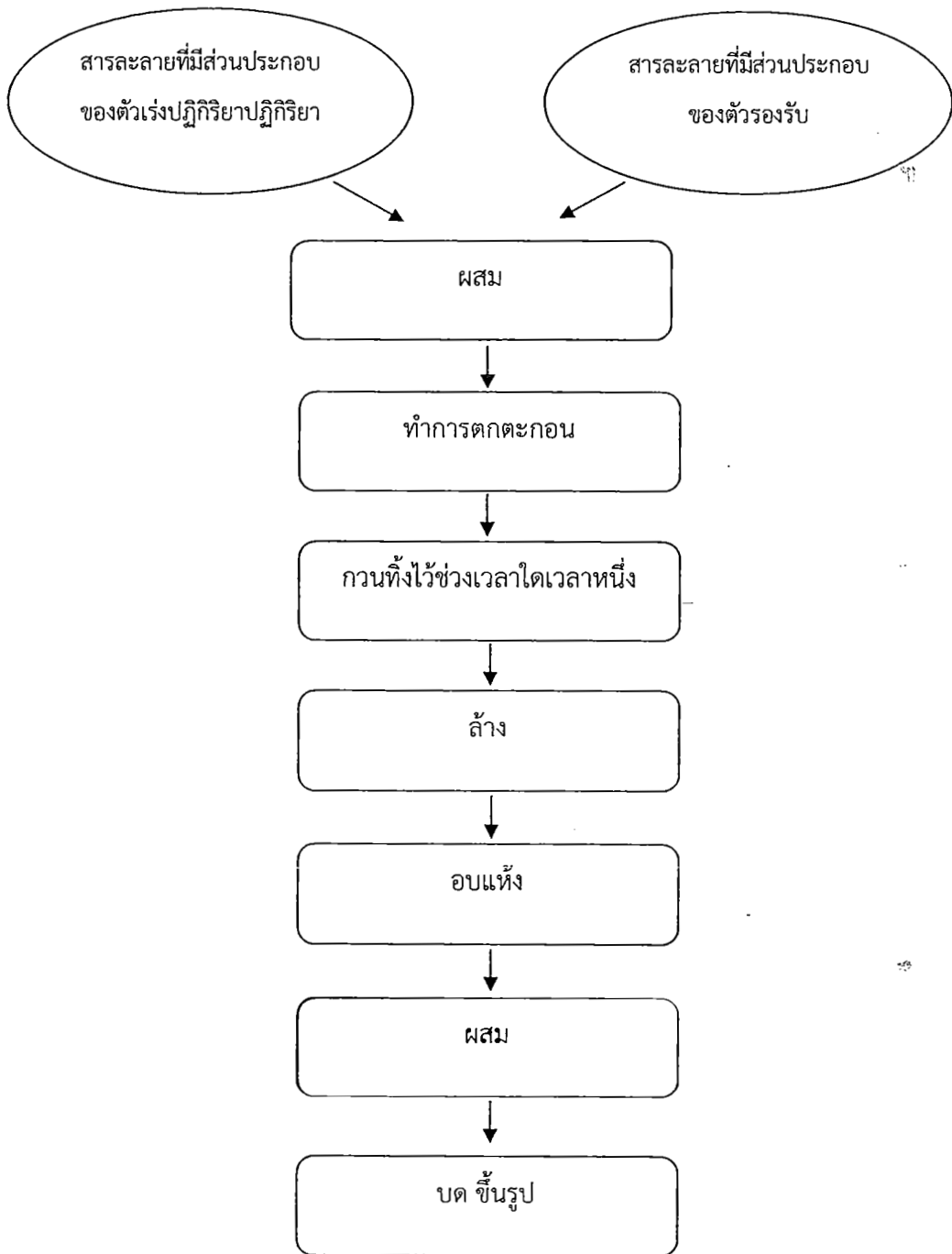
การคายซับของโมเลกุลในตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือการแตกออกของพันธะเคมีระหว่าง ตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมาซึ่งจะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Dissociation) ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์

การก่อกัมมันต์ (Activation) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มีความหมายหลายอย่าง อาจหมายถึงการทำให้โมเลกุลต่างๆที่จับอยู่บนผิวหน้าหลุดออกไป

## 2.6 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ วิธีการตกตะกอนร่วม สามารถทำได้ตามรูปที่ 2.3 คือการนำเอาสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 1 ชนิด และสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารที่จะใช้เป็นตัวรองรับผสมเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นทำการเติมสารก่อกองตะกอน (Precipitant) ลงไป ในบางครั้งการ

ตกตะกอนร่วมอาจจะมีเพียงส่วนประกอบของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 ชนิดเท่านั้น โดยไม่มีส่วนประกอบของตัวรองรับก็ได้ หลังจากที่ได้ตะกอนแล้วก็จะทำการล้าง อบ ขึ้นรูป และเผาต่อไป



รูปที่ 2.3 แผนภาพวิธีตกตะกอนร่วม (ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา, 2546)

## 2.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและเคมี เป็นสิ่งสำคัญสำหรับอธิบายการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ในที่นี้จะแสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน ขนาดของผลึก องค์ประกอบของก๊าซผสม และคุณสมบัติของสาร

### 2.7.1 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller Method, BET)

ปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของแข็งกับก๊าซหรือของเหลว โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือการดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี ทั้งนี้การดูดซับเชิงกายภาพเป็นการดูดซับแบบอ่อนที่ไม่เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเหมือนการดูดซับเชิงเคมีทำให้การดูดซับเชิงกายภาพง่ายต่อการดูดซับ ดังนั้นการหาพื้นที่ผิวและการกระจายตัวปริมาตรของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงมักใช้วิธีการดูดซับเชิงกายภาพมากกว่า โดยปกติแล้วก๊าซไนโตรเจนมักถูกใช้เป็นตัวถูกดูดซับ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นก๊าซเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวที่ต้องการทดลอง สำหรับวิธีบีอีที เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งสมการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V = \frac{V_m Cx}{(1-x)(1-x+Cx)} \quad (1)$$

เมื่อ

$$x = \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

กำหนด  $V$  คือ ปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับที่ความดัน  $P$

$V_m$  คือ ปริมาณที่ตัวถูกดูดซับปกคลุมพื้นที่ผิวในลักษณะชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

$P$  คือ ค่าความดันย่อยของตัวถูกดูดซับ

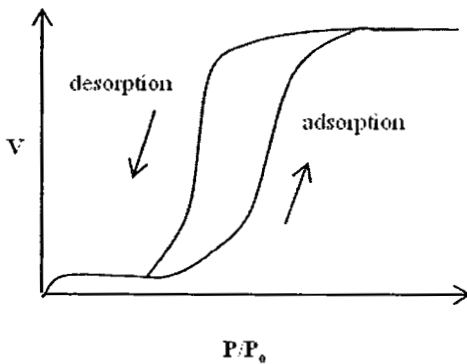
$P_0$  คือ ค่าความดันไออิ่มตัวของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิใดๆ ที่มีการดูดซับ

$C$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์ของการควบแน่น การสั่นสะเทือน และค่าความร้อนของการดูดซับในชั้นที่ 1 ( $E_1$ ) รวมถึงค่าความร้อนของการดูดซับตั้งแต่ชั้นที่ 2 ( $E_2$ ) ขึ้นไป ซึ่งถูกนิยามไว้ดังนี้

$$C = C_0 e^{(E_1 - E_2)/RT} \quad (3)$$

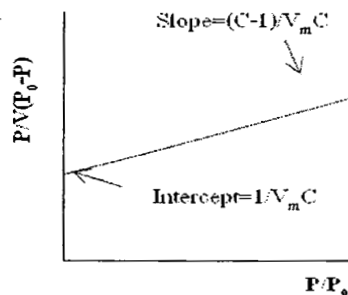
โดยปกติสารที่มีรูพรุนที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีอีที จะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาด 2-50 นาโนเมตร (Mesopore) ดังแสดงในรูป 2.4 ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ จะจัดเทอมของสมการที่ (3) จะได้

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_m C} + \left[ \frac{C-1}{V_m C} \right] \frac{P}{P_0} \quad (4)$$



รูปที่ 2.4 ไอโซเทิร์มการดูดซับและคายซับของมีโซพอร์ส

จากนั้นนำข้อมูลจากการทดลองที่ค่า  $P/P_0$  อยู่ระหว่าง 0.05-0.30 มาพล็อตกราฟตามสมการที่ (4) โดยกำหนดให้  $\frac{P}{V(P_0-P)}$  อยู่ในแนวแกนตั้ง และ  $\frac{P}{P_0}$  อยู่ในแนวราบ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน (S) เท่ากับ  $\frac{C-1}{V_m C}$  และจุดตัดแกนตั้งฉาก (I) ที่  $\frac{1}{V_m C}$  ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การพล็อตกราฟในรูปเส้นตรงของสมการ BET ซึ่งมีค่า  $P/P_0$  อยู่ระหว่าง 0.05-0.30 เพื่อใช้คำนวณหาค่าการปกคลุมแบบชั้นเดียว ( $V_m$ )

จากค่าความชันและจุดตัดแกนตั้งฉากจะทำให้ทราบค่า  $V_m$  ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (5)

$$V_m = \frac{1}{I+S} \quad (5)$$

หลังจากนั้นคำนวณหาค่า  $V_m$  ที่สภาวะ STP และเปลี่ยนปริมาตรของสารที่ถูกดูดซับไปเป็นจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับโดยการหาร  $V_m$  ด้วย  $V=22,400$  ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ ) และคูณด้วยค่า Avogadro's Number ( $N_0$ ) อย่างไรก็ตาม เพื่อที่สามารถหาค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เราจำเป็นต้องทราบค่าพื้นที่ของหนึ่งโมเลกุลของก๊าซที่ถูกฉายลง (Project Area) ซึ่งเขียนแทนด้วย  $\sigma$  และมีหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุล

พื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $S_g$ ) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$S_g = \left[ \frac{V_m N_0}{V} \right] \frac{\sigma}{w} \quad (6)$$

เมื่อ  $N_0$  คือ Avogadro's Number ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  โมเลกุลต่อโมล (molecules/mole)

$w$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการหาพื้นที่ผิว

บรุนออเนอร์ เอมเมตต์และเทลเลอร์ ได้เสนอว่า  $\sigma$  คือพื้นที่ของโมเลกุลที่ฉายลงบนพื้นผิวในขณะที่โมเลกุลถูกจัดเรียงใน 2 มิติ อยู่ใกล้ชิดกันมาก (Close Two-Dimensional Packing) ค่าที่หาโดยวิธีนี้จะมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้จากการสมมติให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับเป็นรูปทรงกลม และพื้นที่ที่ฉายลงบนพื้นผิววงกลมเล็กน้อย โดยได้เสนอค่า  $\sigma$  ดังสมการ (7)

$$\sigma = 1.09 \left[ \frac{M}{N_0 \rho} \right]^{2/3} \quad \text{ตารางเซนติเมตรต่อโมเลกุล (cm}^2/\text{molecules)} \quad (7)$$



เมื่อ  $M$  คือน้ำหนักโมเลกุล (g/mol) และ  $\rho$  คือความหนาแน่นของก๊าซที่ถูกดูดซับ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) โดยปกติความหนาแน่นมักจะใช้ความหนาแน่นของของเหลวบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในกรณีของ  $\text{N}_2$  ที่อุณหภูมิ  $-198.5^\circ\text{C}$  ค่า  $\rho = 0.808$  กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ดังนั้นค่าพื้นที่ต่อหนึ่งโมเลกุล ( $\sigma$ ) สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (7) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $16.2 \times 10^{-16}$  ตารางเซนติเมตรต่อโมเลกุล ( $\text{cm}^2/\text{molecule}$ ) หรือ  $16.2$  อังสตรอมต่อโมเลกุล ( $\text{\AA}/\text{molecule}$ ) และเมื่อแทนค่า  $\sigma$  ของ  $\text{N}_2$  พร้อมทั้งแทนค่า  $N_0$  และ  $V$  นี้ลงในสมการ (6) จะได้

$$S_g = 4.35 \times 10^4 \left( \frac{V_m}{w} \right) \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (cm}^3/\text{g-solid)} \quad (8)$$

### 2.7.2 การวิเคราะห์ขนาดผลึกของวัสดุด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD)

เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงมาก เพราะสามารถบอกเฟส ตำแหน่ง และขนาดเฉลี่ยของผลึกได้ ซึ่งสามารถวัดขนาดเฉลี่ยของผลึกได้ดังสมการ

$$\bar{d}_{\text{R(hkl)}} = \frac{K\lambda}{B_d \cos \theta} \quad (9)$$

กำหนดให้

$\bar{d}_{\text{R(hkl)}}$  = ขนาดผลึกเฉลี่ย มีหน่วยนาโนเมตร

$K$  = Scherer constant (ถ้าความกว้างที่ใช้ ได้จากความกว้างที่ระยะครึ่งหนึ่งของจุดสูงสุด,  $K=0.9$ )

$\lambda$  = ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์

$B_d$  = ความกว้างที่ได้ครึ่งหนึ่งของความสูงจุดยอดสัญญาณ หน่วยเป็นเรเดียน

$\theta$  = The Bragg angle หน่วยเป็นดีกรี

### 2.7.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซผสมโดยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph, GC)

เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิคโครมาโทกราฟสำหรับแยกสารผสมที่มีคุณสมบัติที่สามารถเป็นก๊าซได้ โดยใช้เฟสเคลื่อนที่ที่เป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารผสม เช่น ฮีเลียม จะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารผสม ส่วนเฟสอยู่กับที่อาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ เมื่อทั้งตัวพาและสารผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นี้ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จะดึงดูดด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตตามขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน สารผสมจะแยกออกจากกัน เทคนิคโครมาโทกราฟแบบก๊าซใช้ในการวิเคราะห์ทั้งคุณภาพและปริมาณในหลายด้าน เช่น ทางด้านอาหาร ยา ยาฆ่าแมลง น้ำมันหอมระเหย ทางการแพทย์ ปีโตรเลียม และทางสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

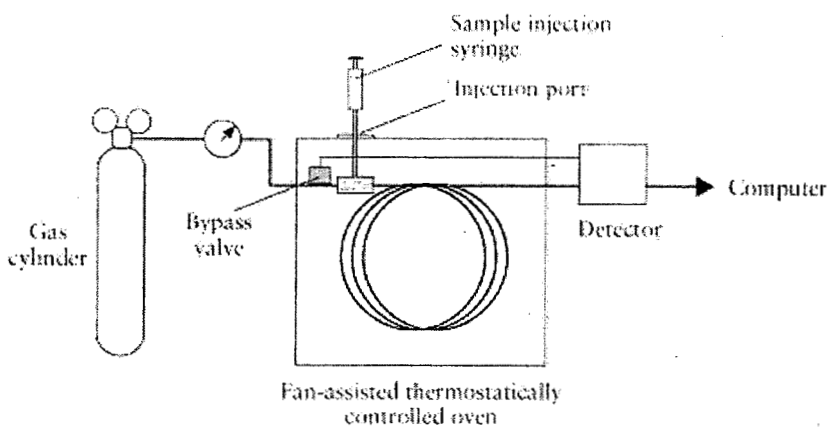
องค์ประกอบหลักที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. อินเจคเตอร์ (Injector) คือส่วนที่สารผสมตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องมือ และระเหยกลายเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่คอลัมน์ อุณหภูมิที่เหมาะสมของอินเจคเตอร์ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้ตัวอย่างระเหยได้ แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว เช่น Split Splitless injector On column injector เป็นต้น

2. โอเวน (Oven) คือส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุคอลัมน์และส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับวิธีการที่ต้องการวิเคราะห์สารผสม การควบคุมอุณหภูมิของโอเวนนี้นี้มี 2 แบบ คือ ไอโซเทอร์มอล (Isothermal) จะใช้อุณหภูมิเดียวตลอดการทดลอง และแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Program) จะสามารถเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างการวิเคราะห์ มักจะนิยมใช้กับสารผสมที่มีช่วงจุดเดือดกว้าง ทำให้โครมาโทแกรม (Chromatogram) ที่ได้มีพีคในลักษณะชัดเจน ไม่กว้าง และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์

3. ดีเทคเตอร์ (Detector) คือส่วนที่ใช้สำหรับวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และดูว่าสารตัวอย่างที่สนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด มีหลายชนิดตามความเหมาะสมดังนี้

1. Flame Ionization Detector (FID) เหมาะสำหรับการตรวจวัดสารที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจน (C-H bonds) ในโมเลกุลหรือที่เรียกว่าสารอินทรีย์ (Organic Compounds)
2. Thermal Conductivity Detector (TCD) มีฟิลาเมนต์ (Filament) ที่มีการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ และจะเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟของฟิลาเมนต์ในเซลล์อ้างอิงและเซลล์ตัวอย่าง การเปลี่ยนแปลงนี้ จะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารที่ต้องการวิเคราะห์กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซพา (Carrier Gas) ทำให้ดีเทคเตอร์ ชนิดนี้ สามารถตรวจสอบสารได้ทุกชนิดยกเว้นตัวก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซตัวพา
3. Nitrogen Phosphorus Detector (NPD) เป็นเครื่องตรวจวัดที่ใช้ตรวจวัดเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ โดยสารตัวอย่างจะถูกเผาในพลาสมา (Plasma) ที่เกิดจากรูบิเดียมเบด (Rubidium Bead) ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฮโดรเจนและอากาศ ทำให้สารที่มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสกลายเป็นไอออน
4. Flame Photometric Detector (FPD) สารที่มีซิลเฟอร์หรือฟอสฟอรัสในองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาในเปลวไนโตรเจนและอากาศจะให้แสงในช่วงคลื่นเฉพาะ แสงนี้จะผ่านโมโนโครมาติกฟิลเตอร์ (Monochromatic Filter) ไปยังท่อโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier Tube) เพื่อทำการตรวจวัด
5. Electron Capture Detector (ECD) เป็นดีเทคเตอร์เฉพาะที่ใช้วัดสารประกอบอิเล็กโตรฟิลิก (Electrophilic Compounds)



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบพื้นฐานของ GC

(<http://www.kmitl.ac.th/sisc/GC-MS/main.html>)

## 2.8 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (Activity Test)

เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่เกิดขึ้นตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งอัตราการไหลของก๊าซผสมที่เปลี่ยนแปลงไปตามที่กำหนด ส่วนประกอบของเครื่องมือนี้จะมีก๊าซที่ต้องการศึกษา คือ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยก๊าซเหล่านี้จะเจือจางด้วยก๊าซเฉื่อย การไหลของก๊าซจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมการไหลก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ซึ่งบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวตรวจวัดก๊าซจะเป็นเครื่องวัดการนำความร้อน (TCD) หรือเป็นแบบ FID ก็ได้ขึ้นอยู่กับประเภทของโมเลกุลของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งจะวัดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนหรือก๊าซออกซิเจนหลังการเกิดปฏิกิริยาหรือน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน หรือก๊าซที่ถูกดูดซับและคายออกมาหลังจากให้ความร้อน ผลที่ได้คือกราฟของปริมาณก๊าซกับอุณหภูมิหรือเวลา แต่ก่อนที่จะทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาจำเป็นต้องรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านเพื่อกำจัดน้ำออกเนื่องจากน้ำอาจทำให้เกิดการหลอมรวมตัวกันหรือซินเทอริง (เป็นการลดลงของพื้นที่ผิวที่ผิวสัมผัส โดยมีการปรับโครงสร้างภายในของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการเคลื่อนที่มารวมกันของโลหะไปเป็นอะตอมที่ใหญ่ขึ้น) หลังจากนั้นก๊าซผสมที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แล้ว จะถูกโดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟ (GC)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Butch และคณะ (1995) ศึกษาการเผาไหม้มีเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยาพลาสมาเดี่ยวโดยศึกษาผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำต่อการเร่งปฏิกิริยา พบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีผลกระทบต่อการเร่งปฏิกิริยาในสภาวะทำงานปกติ แต่น้ำที่มีในสายป้อนจะลดอัตราการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงอุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส น้ำจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาน้อยมาก

Gulari และคณะ (1999) ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันโดยสารประกอบซิลเวอร์และโคบอลต์ออกไซด์ พบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำจะเข้าไปดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซออกซิเจน

Lin และคณะ (2003) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันบนโคบอลต์ออกไซด์ โดยเตรียมโคบอลต์ออกไซด์ผสมจากสารละลายโคบอลต์ไนเตรต ด้วยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอก

ไซด์ และทำการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเร่งการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันจะลดลงเมื่อเลขออกซิเดชันของโคบอลต์เพิ่มขึ้น  $\text{CoO}(+2) \geq \text{Co}_3\text{O}_4 \gg \text{CoO}(\text{OH})(+3) \geq \text{CoO}_x(>+3)$

Kang และคณะ (2003) ทำการทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบไปด้วยซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์พบว่า โคบอลต์ออกไซด์มีการกระจายที่ดีบนซีเรียมออกไซด์ และยังพบอีกว่าการเติมโคบอลต์ออกไซด์ส่งผลให้ความจุก๊าซออกซิเจนของซีเรียมออกไซด์ดีขึ้น

Avgouropoulos และคณะ (2005) ศึกษาผลกระทบของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuO-CeO}_2$  สำหรับการเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) วิธีซิเตรต ไฮโดรเทอร์มอล (Citrate-hydrothermal) วิธียูเรีย ไนเตรตคอมบัสชัน (Urea-nitrate Combustion) และวิธีอิมเพรกเนชัน (Impregnation) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธียูเรียไนเตรตคอมบัสชัน (Urea-nitrate Combustion) ให้ประสิทธิภาพในการเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันและต้านทานการเสื่อมสภาพสูงสุด และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด

Park และคณะ (2005) ศึกษาการเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Cu-Ce}$  ที่เติมโลหะทรานซิชัน โดยทำการเติมโคบอลต์ในตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Cu-Ce}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  พบว่าการเติมโคบอลต์เพียงเล็กน้อยทำให้การเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันสูงขึ้น และการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือน้ำจะทำให้เลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันลดลงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส

Zheng และคณะ (2005) ศึกษาการเตรียมและลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuO-CeO}_2$  ในการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน โดยเตรียมซีเรียมออกไซด์จากการสลายตัวของซีเรียมไนเตรตและนำมาเป็นตัวรองรับให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CuO/CeO}_2$  ที่เตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน (impregnation) พบว่าการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของซีเรียมออกไซด์ โดยปริมาณของคอปเปอร์ออกไซด์บนซีเรียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะมีการกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์มากที่สุด และเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิที่มากกว่า 800 องศาเซลเซียสจะส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากจะได้ผลึกขนาดใหญ่และคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ไม่เกิดพันธะซึ่งกันและกัน

Zou และคณะ (2006) ศึกษาการเลือกเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันที่มีก๊าซไฮโดรเจน มากเกินพอของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO/CeO<sub>2</sub> ที่สัดส่วนต่างกันซึ่งเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม พบว่า ตัวเร่ง ปฏิกิริยา CuO(10%)/CeO<sub>2</sub> ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และค่าร้อยละการเลือกเกิดสูงสุด ที่อุณหภูมิ 140 และ 160 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเติมน้ำในสายป้อน ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ลดลง

Chung และ Yeh (2008) ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-CeO<sub>2</sub> สำหรับการเร่งปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิต่ำ โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-CeO<sub>2</sub> ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม ภายใต้สภาวะก๊าซผสม ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 0.5, ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 0.5, ก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 48, ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 24, น้ำร้อยละ 12 โดยปริมาตร และก๊าซไนโตรเจน ที่ความเร็วสเปซเท่ากับ 10,000 ต่อชั่วโมง โดยทำการปรับค่าความเป็นกรดต่าง เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในก๊าซไฮโดรเจน การตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรดต่างสูงจะทำให้ความเข้มข้นของซีเรียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่ง เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและอะตอมของคอปเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาได้มาก การวัดการ เปลี่ยนแปลงของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าความเป็นกรดต่าง พบว่าที่ค่าความเป็น กรดต่างเท่ากับ 12 จะมีการเปลี่ยนแปลงของของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าร้อยละ 99 และการเลือก เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันเท่ากับร้อยละ 88 ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส

Liu และคณะ (2008) ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปะปนอยู่ในก๊าซ ไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-CeO<sub>2</sub> ที่มีโครงสร้างระดับนาโนและมีพื้นที่ผิวสูง โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CuO-CeO<sub>2</sub> ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 100-170 องศาเซลเซียส โดยที่ความเร็ว สเปซเท่ากับ 120,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมต่อชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า 100 ล้านส่วน และค่าการเลือกเกิดก๊าซออกซิเจนเป็นร้อยละ 100 ใน สภาวะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 8 และน้ำร้อยละ 20 นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างระดับนาโนทำให้ CuO สามารถกระจายตัวได้ดีใน CeO<sub>2</sub>

Radwan และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบของปริมาณโคบอลต์ต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา มี Cordierite (2MgO-2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5SiO<sub>2</sub>) เป็นตัวรองรับ เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีอิมเพกเนชัน โดยใช้ ปริมาณโคบอลต์ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของโคบอลต์ให้พื้นที่ผิวของ ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และ ส่วนสุดท้ายจะอธิบายวิธีการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา รวมถึงสถานะต่างๆที่ใช้ในการศึกษา ทดลองสำหรับการดำเนินงานในปีที่ 1 โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้อถูกแสดงตามลำดับดังนี้

3.1 สารเคมี

1. คอปเปอร์ไนเตรต (Copper(II)Nitrate 3-hydrate)  
สูตรเคมี :  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$   
บริษัทผู้ผลิต : BDH Laboratory Supplies, England
2. ซีเรียมไนเตรต (Cerium(III)Nitrate 6-hydrate)  
สูตรเคมี :  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   
บริษัทผู้ผลิต : Sigma-Aldrich
3. โคบอลต์ไนเตรต (Cobalt(III)Nitrate 6-hydrate)  
สูตรเคมี :  $\text{Co}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   
บริษัทผู้ผลิต : Asia Pacific Specialty Chemicals Limited
4. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate)  
สูตรเคมี :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$   
บริษัทผู้ผลิต : scharlua chemie S.A.

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ปีกเกอร์
2. ขวดรูปخمพู่
3. ข้อนตักสาร
4. บิวเรต
5. ขาดั่งและที่จับยึดบิวเรต
6. กระดาษวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง
7. แผ่นพาราฟิล์ม

๒๓. ๓๑๒๔๒๙  
๐ ๘๘๑ ก  
๓. 3

3 1 2 7 9 0

8. ที่บดสาร
9. ถ้วยเซรามิกส์ทนไฟ
10. ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
11. เตาอบ และเตาเผา
12. เครื่อง Gas Sorption Analyzer NOVA-1200
  - ใช้วัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา
13. เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วย X-Ray
  - ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของปฏิกิริยา
14. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี
  - ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซผสม
15. เครื่องปฏิกรณ์แก้ว
  - ใช้ทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา

### 3.3 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม โดยกล่าวเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชั่งคอปเปอร์ไนเตรต ซีเรียมไนเตรต และโคบอลต์ไนเตรต ให้ได้ปริมาณที่ต้องการ
2. ปรับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ไนเตรต ซีเรียมไนเตรต โคบอลต์ไนเตรต ที่ชั่งในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ น้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized Water) ให้ได้ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
3. เติมโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ลงในสารละลายผสมของคอปเปอร์ไนเตรต ซีเรียมไนเตรต และโคบอลต์ไนเตรต กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยวัดค่าความเป็นกรด – ต่างของสารละลายให้มีค่าประมาณ 9 และกวนตะกอนที่ได้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำตะกอนที่ได้มาทำความสะอาดและแยกตะกอนออก
5. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. นำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
7. นำสารที่ได้มาบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 100 เมช ได้สารประกอบโลหะผสม คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์

### 3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถวัดได้ด้วยการใช้เครื่อง Gas Sorption Analyzer NOVA-1200 ในการวัดจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 100 มิลลิกรัม โดยใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารให้ความเย็น นอกจากนี้



แล้วยังได้มีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบชนิดธาตุ โครงสร้างทางเคมีและปริมาณธาตุที่อยู่ในผงโลหะ ออกไซด์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) Bruker AXS, Germany Model D8 Advance

### 3.5 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (Activity Test) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากวิธีดังกล่าวข้างต้นจะถูกทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์แก้ว (Tubular Micro Reactor) สำหรับการทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสามารถวัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-Type Thermocouple) ที่สัมผัสด้านบนตัวเร่งปฏิกิริยา องค์ประกอบของก๊าซผสมที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์แก้วจะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้ดีเทคเตอร์แบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) และคอลัมน์ที่ใช้ในการแยกก๊าซ คือ Molecular Sieve คอลัมน์นี้ใช้ในการตรวจสอบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันในสภาวะดังนี้ ในการทดลองจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 80 มิลลิกรัม ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน ภายใต้สภาวะก๊าซผสมที่ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1 โดยปริมาตร และก๊าซฮีเลียมร้อยละ 98 โดยปริมาตร อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที คิดเป็นความเร็วสเปซเท่ากับ 75000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมต่อชั่วโมง

### 3.6 แผนการทดลอง

แผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองในปีที่ 1

ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ตัวแปรควบคุม
อัตราส่วนร้อยละของ $\text{CuO}:\text{CeO}_2:\text{Co}_3\text{O}_4$ ที่ทำการศึกษาเป็นดังนี้	1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต
- 20 : 76 : 4	2. ความเป็นกรดต่างของสารละลาย
- 20 : 72 : 8	3. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบสาร
- 20 : 68 : 12	4. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา
- 20 : 64 : 16	5. ขนาดของตะแกรงร่อน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ โดยทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของคุณสมบัติของโลหะออกไซด์ และส่วนความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์ต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง Gas Sorption Analyzer NOVA-1200 Ver.3.70 และขนาดผลึกและโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) รายละเอียดแสดงดังนี้

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะผสมคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ที่มีการใช้โคบอลต์ออกไซด์เป็นสารโปรโมทอร์วม ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ต่างกัน เตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วม และหลังจากล้างตะกอนสะอาด ตะกอนถูกอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้เครื่อง Gas Sorption Analyzer NOVA-1200 ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ต่างกัน

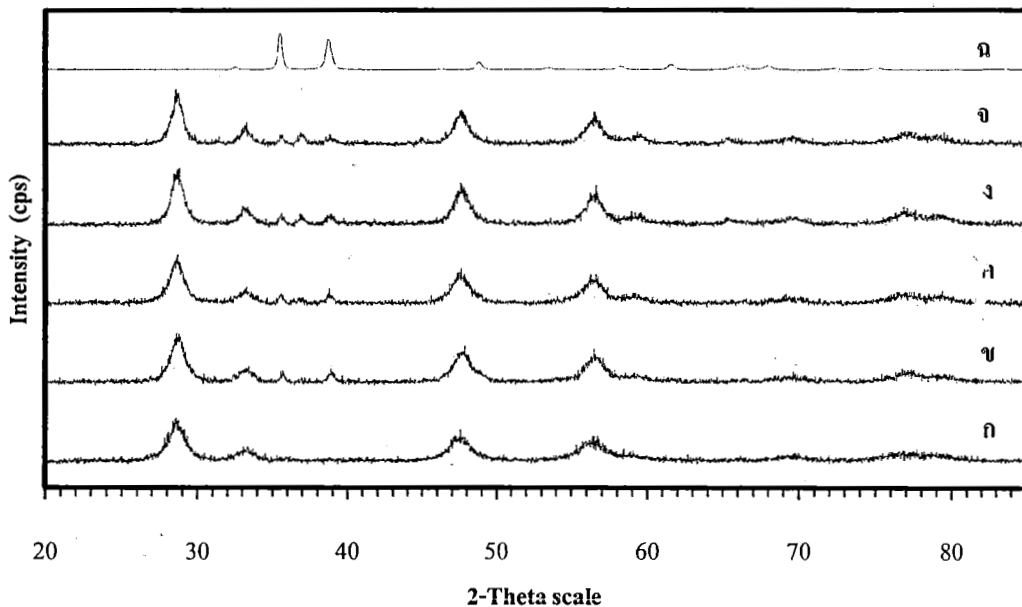
สารตัวอย่าง	สารประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร /กรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)
	CuO	CeO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		
1	20	80	0	97.1	13.7
2	20	76	4	160.4	35.6
3	20	72	8	132.9	14.1
4	20	68	12	95.4	9.4
5	20	64	16	82.5	14.2
6	20	0	80	32.9	46.2
1	0	0	100	29.9	40.9

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่าง โดยศึกษาปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ต่อซีเรียมออกไซด์ที่มีโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารโปรโมทร่วมในเทอมสัดส่วนโดยน้ำหนัก โดยให้ปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์คงที่ ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และสารตัวอย่างทั้งหมดถูกเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่างที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ต่างกัน จะได้พื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกัน เมื่อปริมาณของสารโปรโมทโคบอลต์ออกไซด์ในสารประกอบออกไซด์ผสมมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบบให้พื้นที่ผิวจำเพาะของออกไซด์โลหะผสมลดลง ดังนี้ที่สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์เป็นร้อยละ 20:80:0 ร้อยละ 20:76:4 ร้อยละ 20:72:8 ร้อยละ 20:68:12 ร้อยละ 20:64:16 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 97.1 ตารางเมตรต่อกรัม 160.4 ตารางเมตรต่อกรัม 132.9 ตารางเมตรต่อกรัม 95.4 ตารางเมตรต่อกรัม และ 82.5 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนสารตัวอย่างที่ 6 ประกอบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ร้อยละ 20:80 มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเหลือเพียง 32.9 ตารางเมตรต่อกรัม และสารตัวอย่างที่ 7 อัตราส่วนโคบอลต์ออกไซด์ร้อยละ 100 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 29.9 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้พื้นที่ผิว

จำเพาะน้อยที่สุด สาเหตุของการมีพื้นที่ผิวว้น้อย อาจเป็นเพราะไม่มีซีเรียมออกไซด์ผสมอยู่ จึงทำให้ผนังของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่แข็งแรงเกิดการพังทลายของผนังในขณะที่ทำการเผา หรือกล่าวได้ว่า ซีเรียมออกไซด์ช่วยทำให้ผนังโครงสร้างของโลหะผสมออกไซด์มีความเสถียรในระหว่างการเผานั้นเอง (Varma และคณะ, 1991) จากผลการทดลองพบว่า ที่ปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 4 และร้อยละ 8 แสดงการทนทานต่ออุณหภูมิได้มากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่ามาก โดยทั้ง 2 อัตราส่วนให้พื้นที่ผิวจำเพาะใกล้เคียงกัน นอกจากวิเคราะห์ผลจากพื้นที่ผิวจำเพาะแล้ว การทดลองนี้ยังให้ค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วย ซึ่งจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ สารตัวอย่างที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ในทางตรงกันข้ามถ้าสารตัวอย่างมีรูพรุนขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวจำเพาะจะน้อย และจากการทดลองยังพบว่า เมื่อปริมาณของสารโปรโมทโคบอลต์ออกไซด์ในสารประกอบออกไซด์ผสมมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของสารตัวอย่างเพิ่มขึ้น ดังนี้ ที่สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์เป็นร้อยละ 20:80:0 ร้อยละ 20:72:8 ร้อยละ 20:68:12 ร้อยละ 20:64:16 ร้อยละ 20:0:80 และร้อยละ 0:0:100 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 13.7 นาโนเมตร 14.1 นาโนเมตร 9.4 นาโนเมตร 14.2 นาโนเมตร 46.2 นาโนเมตร และ 40.9 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับสารตัวอย่างที่ประกอบด้วยคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์เป็นร้อยละ 20:72:4 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ที่สุดคือ 356.2 นาโนเมตร จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณของสารโปรโมทโคบอลต์ออกไซด์ในออกไซด์ผสมมีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของสารตัวอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้น มีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของออกไซด์โลหะผสมลดลง ยกเว้นในกรณีของสารตัวอย่างที่ 2 ที่มีปริมาณของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์เป็นร้อยละ 20:72:4 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ที่สุด แต่กลับมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของออกไซด์โลหะผสมมากที่สุด สาเหตุอาจเกิดจากขนาดอนุภาคของโลหะออกไซด์แต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมจากเครื่องมือวิเคราะห์อื่น และจากการศึกษาของ Radwan และคณะ(2004) เรื่องผลกระทบของปริมาณโคบอลต์ต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่มี Cordierite ( $2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$ ) เป็นตัวรองรับ เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีอิมเพกเนชัน โดยใช้ปริมาณโคบอลต์ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของโคบอลต์ทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย

#### 4.1.2 ผลของการวิเคราะห์ขนาดผลึกและโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ในตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดผลึกและโครงสร้างทางเคมี โดยตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม เมาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เหมือนกันทั้ง 7 สัดส่วน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) Bruker AXS, Germany Model D8 Advance แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดผลึกแสดงดังรูป 4.1-4.3 และตาราง 4.2

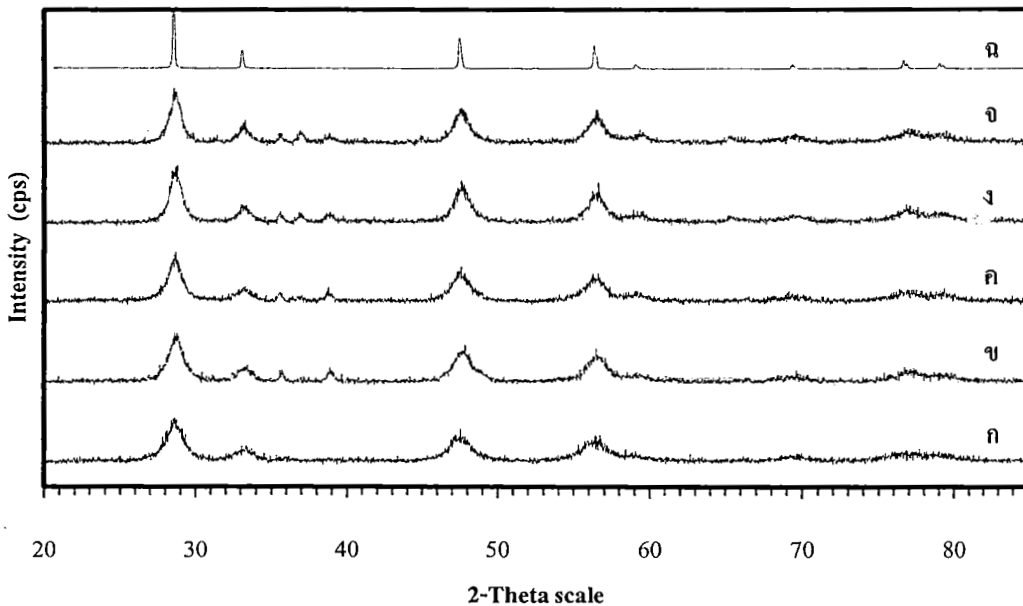


รูปที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วน เทียบกับตำแหน่งพีคมาตรฐานของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) (ก) CuO/CeO<sub>2</sub> (20:80) (ข) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:76:4) (ค) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:72:8) (ง) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:68:12) (จ) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:64:16) (ฉ) CuO 100%

จากรูป 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วน โดยแกนแนวนอน แสดงมุม 2-Theta และแกนแนวตั้ง แสดงค่าความเข้มของสัญญาณจาก XRD (Intensity) ที่ตำแหน่งยอดพีคที่มุม 2-Theta เท่ากับ 32.5, 35.6, 38.9,

58.3, 65.8, 68.1, 72.4 และ 82.4 ซึ่งเป็นพีคมาตรฐานของสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ ที่มีรูปแบบโครงสร้างแบบ Monoclinic ดังรูปที่ 4.1 ฉ. ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 อัตราส่วน มีการเติมคอปเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เท่ากันคือ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าตำแหน่งของยอดพีคที่เกิดขึ้นตรงกับตำแหน่งพีคมาตรฐานของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีรูปแบบโครงสร้างแบบ Monoclinic ดังรูป 4.1 ก-จ.

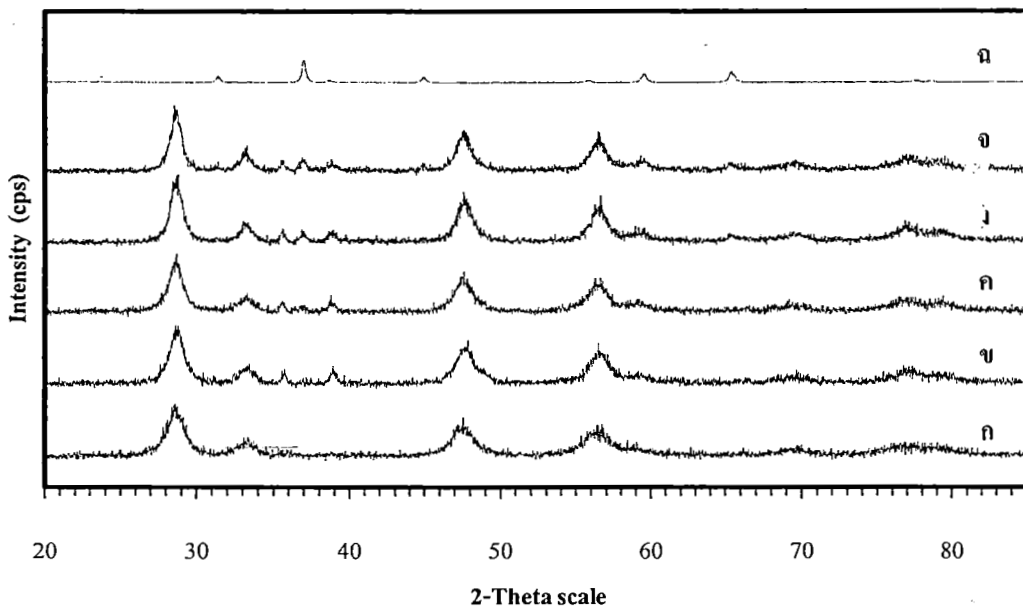
ในตัวเร่งปฏิกิริยายังมีออกไซด์อื่นเจือปน ได้แก่ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เพื่อหาโครงสร้างของซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วน เทียบกับตำแหน่งพีคมาตรฐานของซีเรียมออกไซด์ (CeO<sub>2</sub>) (ก) CuO/CeO<sub>2</sub> (20:80) (ข) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:76:4) (ค) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:72:8) (ง) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:68:12) (จ) CuO:CeO<sub>2</sub>:Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (20:64:16) (ฉ) CeO<sub>2</sub> 100%

รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วน ที่ตำแหน่งยอดพีคที่มุม 2-Theta เท่ากับ 28.6, 33.1,

47.5, 56.4, 59.1, 69.4 และ 76.7 เป็นพีคมาตรฐานของสารประกอบซีเรียมออกไซด์ ที่มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ Cubic แสดงดังรูปที่ 4.1 ฉ. ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 อัตราส่วน มีการเติมซีเรียมออกไซด์ในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่าตำแหน่งของยอดพีคที่เกิดขึ้นตรงกับตำแหน่งพีคมาตรฐานของซีเรียมออกไซด์ ( $\text{CeO}_2$ ) ที่มีรูปแบบโครงสร้างแบบ Cubic และพีคจะเห็นได้เด่นชัดเมื่อปริมาณของซีเรียมออกไซด์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วน เทียบกับตำแหน่งพีคมาตรฐานของโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) (ก)  $\text{CuO}/\text{CeO}_2$  (20:80) (ข)  $\text{CuO}:\text{CeO}_2:\text{Co}_3\text{O}_4$  (20:76:4) (ค)  $\text{CuO}:\text{CeO}_2:\text{Co}_3\text{O}_4$  (20:72:8) (ง)  $\text{CuO}:\text{CeO}_2:\text{Co}_3\text{O}_4$  (20:68:12) (จ)  $\text{CuO}:\text{CeO}_2:\text{Co}_3\text{O}_4$  (20:64:16) (ฉ)  $\text{Co}_3\text{O}_4$  100%

รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์ อัตราส่วนทั้ง 5 สัดส่วน ที่ตำแหน่งยอดพีคที่มุม 2-Theta เท่ากับ 31.4, 36.9, 44.9, 55.8, 59.5, 65.4, 68.8, 69.9, 74.3, 77.6, 78.6, และ 82.9 เป็นพีคมาตรฐานของสารประกอบโคบอลต์ออกไซด์

(Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) และมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ Cubic แสดงดังรูปที่ 4.1 ฉ. ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 5 อัตราส่วน มีการเติมโคบอลต์ออกไซด์ในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่า มีตำแหน่งของยอดพีคที่เกิดขึ้นตรงกับตำแหน่งพีค มาตรฐานของโคบอลต์ออกไซด์ (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ที่มีรูปแบบโครงสร้างแบบ Cubic และพีคจะเห็นได้เด่นชัดเมื่อ ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์เพิ่มขึ้น

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม จะได้คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) มีรูปแบบ โครงสร้างแบบ Monoclinic ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Porta และคณะ (1988) ซีเรียมออกไซด์(CeO<sub>2</sub>) มี รูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ Cubic ตรงกับงานวิจัยของ Gidinho และคณะ (2007) และโคบอลต์ออกไซด์ (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) มีรูปแบบโครงสร้างแบบ Cubic ตรงกับงานวิจัยของ Mirzaei และคณะ (2006) จากการวิเคราะห์ ขนาดผลึกและโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นว่า ปริมาณของโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกันในแต่ละ อัตราส่วน ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ แต่ อัตราส่วนของปริมาณโลหะออกไซด์ส่งผลต่อขนาดของผลึก และนอกจากนี้ โลหะทั้ง 3 ชนิดไม่มีการสร้าง พันธะระหว่างกันขึ้น

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อลดปริมาณซีเรียมออกไซด์และเพิ่มปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ความกว้าง ของพีคจะแคบลง จึงสรุปได้ว่า ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ที่เติมลงในตัวเร่งปฏิกิริยา มี ผลต่อขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพิจารณาจากสมการของ Scherrer คือ 
$$d_B(hkl) = \frac{K\lambda}{B_d \cos\theta}$$
 ซึ่งใช้ในการคำนวณขนาดของผลึก มีตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อขนาดผลึกคือ ค่าความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูง จุดสัญญาณ ( $B_d$ ) เมื่อขนาดความกว้างของพีคแคบลงจะส่งผลให้ค่าความกว้างที่ได้ครึ่งหนึ่งของความสูงจุด สัญญาณมีค่าน้อยลงไปด้วย และค่าขนาดผลึกเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากกราฟ พบว่าค่าความกว้างของพีค แคบลงตามปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์และปริมาณซีเรียมออกไซด์ที่เปลี่ยนไป เมื่อปริมาณอัตราส่วนของ ซีเรียมออกไซด์ลดลงปริมาณอัตราส่วนของโคบอลต์ออกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงดังตาราง

4.2



ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์ต่อปริมาณซีเรียมออกไซด์ ที่มีโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารโปรโมทร่วมที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักต่างกัน

สารประกอบ (ร้อยละโดยปริมาตร)			ขนาดผลึก (นาโนเมตร)		
CuO	CeO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CuO	CeO <sub>2</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
20	80	0	13.4	3.8	-
20	76	0	13.9	4.5	< 3
20	72	8	15.1	5.0	11.9
20	68	12	11.5	5.3	10.8
20	64	16	14.9	5.3	12.4
20	0	80	12.8	-	13.8
0	0	100	-	-	16.6

ตารางที่ 4.2 พบว่า ขนาดผลึกของซีเรียมออกไซด์ที่มีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ ร้อยละ 20:80 คือ 3.8 นาโนเมตร เมื่อลดปริมาณของซีเรียมออกไซด์ลง เพิ่มปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ โดยปริมาณคอปเปอร์ออกไซด์คงเดิม ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของ คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ร้อยละ 20:76:4 ขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 13.9 นาโนเมตร ซีเรียมออกไซด์ 4.5 นาโนเมตร และโคบอลต์ออกไซด์ น้อยกว่า 3 นาโนเมตร ที่อัตราส่วนร้อยละ 20:72:8 ขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 15.1 นาโนเมตร ขนาดผลึกซีเรียมเพิ่มขึ้นเป็น 5.0 นาโนเมตร และขนาดผลึกของโคบอลต์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 11.9 นาโนเมตร เมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของ คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ เป็นร้อยละ 20:68:12 ร้อยละ 20:64:16 มีขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 11.5, 14.9 นาโนเมตร ตามลำดับ ขนาดผลึกของซีเรียมออกไซด์เพิ่มขึ้นตามลำดับดังนี้ 5.3 นาโนเมตรและ 5.5 นาโนเมตร ขนาดผลึกของโคบอลต์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ที่เติมลงไปคือ 10.8, 12.4 นาโนเมตร ตามลำดับ ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของคอป

เปอร์ออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์เป็น 20:80 ทำให้ขนาดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์เป็น 12.8 นาโนเมตร และขนาดผลึกของโคบอลต์ออกไซด์เป็น 13.8 นาโนเมตร เมื่อปริมาณโคบอลต์ออกไซด์เป็นหนึ่งในร้อยเปอร์เซ็นต์ ขนาดผลึกของโคบอลต์ออกไซด์ใหญ่ที่สุดคือ 16.6 นาโนเมตร จากการศึกษาพบว่าปริมาณของโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ส่งผลกระทบต่อขนาดผลึก และพบว่าขนาดผลึกมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เมื่อผลึกมีขนาดเล็กจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด เช่น ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ร้อยละ 20:76:4 มีขนาดผลึกที่เล็กที่สุดในจำนวนอัตราส่วนทั้งหมด และพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดด้วย

#### 4.2 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน

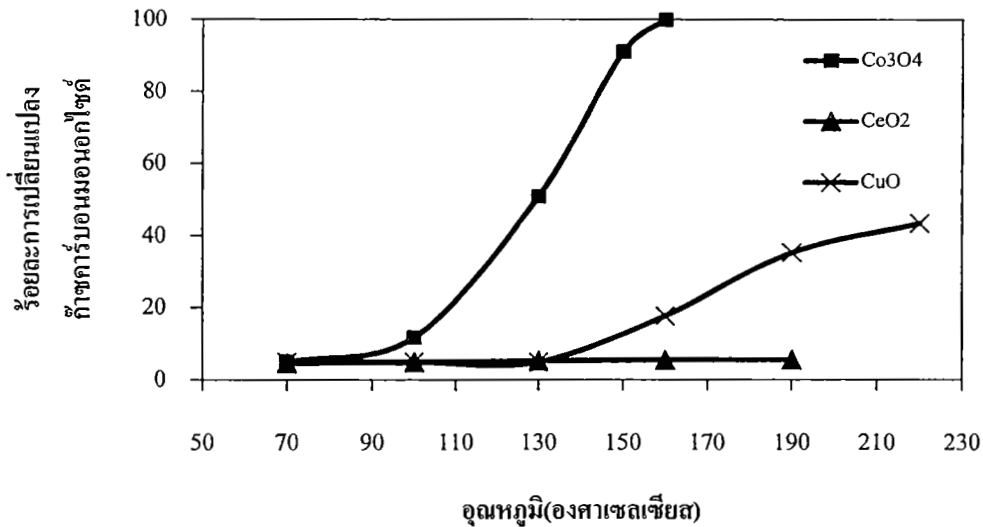
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันของสารประกอบโลหะออกไซด์ผสมที่เตรียมได้ โดยการทดสอบที่สภาวะก๊าซผสมในสายป้อน ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1 โดยปริมาตร และก๊าซฮีเลียมร้อยละ 98 โดยปริมาตร ความเร็วสเปซที่ใช้คือ 75,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมต่อชั่วโมง ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่

- ชนิดของโลหะออกไซด์
- ผลของโคบอลต์ออกไซด์ในโลหะออกไซด์ผสม
- ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์ในโลหะออกไซด์ผสม

ผลการทดลองของแต่ละกรณีแสดงดังต่อไปนี้

- ชนิดของโลหะออกไซด์

ในการทดลองนี้สารประกอบโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ถูกนำมาทดสอบการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



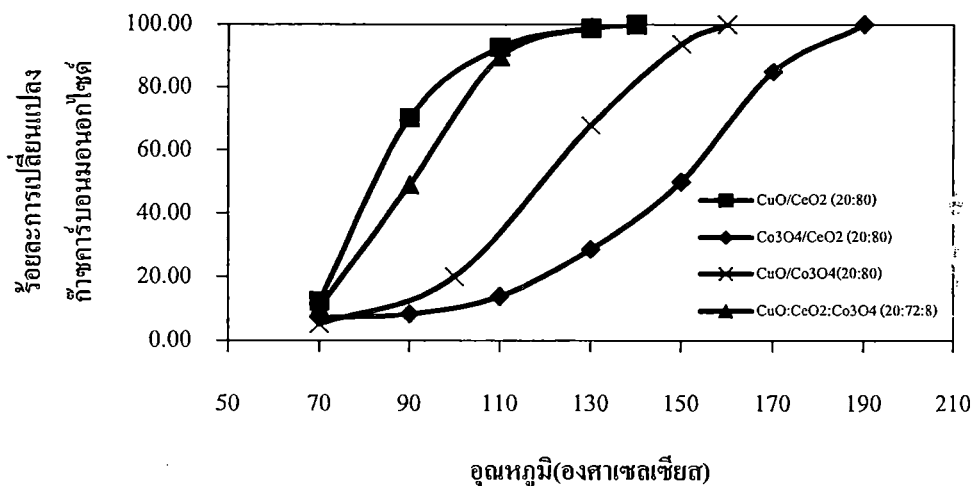
รูปที่ 4.4 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันของโลหะออกไซด์ต่างๆ

รูปที่ 4.4 แสดงผลการเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยแกนนอนแสดงค่าอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และแกนตั้งแสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น กล่าวคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามซีเรียมออกไซด์ไม่แสดงการเร่งปฏิกิริยานี้เลย ขณะที่โคบอลต์ออกไซด์เร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด โดยให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 100 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นร้อยละ 20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 สำหรับคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ ตามลำดับ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า โคบอลต์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันได้ดีกว่าคอปเปอร์ออกไซด์ ส่วนซีเรียมออกไซด์ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยานี้ได้เลย ในช่วงอุณหภูมิ 70-190 องศาเซลเซียส

- ผลของโคบอลต์ในโลหะออกไซด์ผสม

ในการทดลองนี้สารประกอบโลหะออกไซด์ผสม 4 ชนิด ได้แก่ คอปเปอร์ออกไซด์ซีเรียมออกไซด์, โคบอลต์ออกไซด์ซีเรียมออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์โคบอลต์ออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ซีเรียมออกไซด์ที่

เติมโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารโปรโมทร่วม ถูกนำมาทดสอบการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



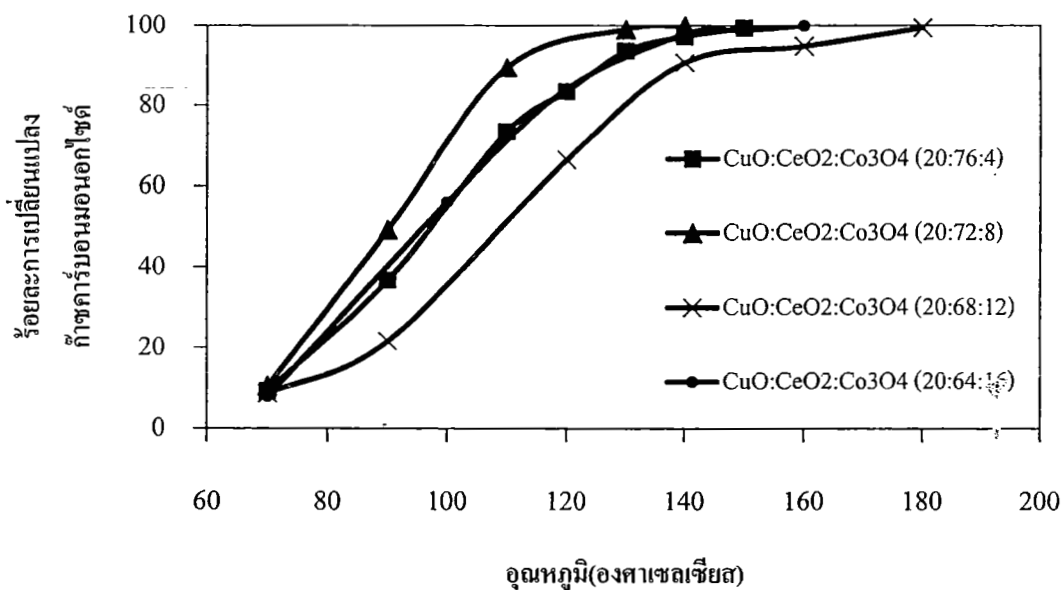
รูปที่ 4.5 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันของโลหะออกไซด์ผสมที่มีโคบอลต์เป็นองค์ประกอบ

รูปที่ 4.5 โลหะออกไซด์ผสมต่างๆ 4 ตัวอย่าง เมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน พบว่า การนำโลหะออกไซด์มาใช้ร่วมกันส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาดีขึ้นโดยพิจารณา คอปเปอร์ออกไซด์ซีเรียมออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์โคบอลต์ออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ซีเรียมออกไซด์ สารประกอบโลหะออกไซด์ผสมทั้ง 3 ตัวอย่างต่างให้ผลการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่ากรณีที่ใช้แบบตัวเดียว (รูปที่ 4.4) โดยสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส, 150 องศาเซลเซียส และ 190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ แสดงการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุด เพราะกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิต่ำที่สุดคือ 140 องศาเซลเซียส ทั้งนี้การที่คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ เร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า โคบอลต์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ อาจสืบเนื่องมาจากคุณสมบัติการกักเก็บออกซิเจนของซีเรียมออกไซด์และขนาดผลึกของโลหะออกไซด์ โดยผลึกขนาดเล็กของโลหะออกไซด์ นำไปสู่การเพิ่มการกักเก็บก๊าซออกซิเจนของซีเรียมออกไซด์ ทำให้การเร่งปฏิกิริยาดีขึ้น (Zengzan และคณะ, 2006 )

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาที่มี 3 องค์ประกอบ ซึ่งพบว่า การเติมโคบอลต์ออกไซด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ให้ผลการเร่งปฏิกิริยาใกล้เคียงกับคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียออกไซด์ โดยสามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นไปตามงานวิจัยของ Bielun และคณะ (2010) พบว่า  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$  เป็นการเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของคอปเปอร์ออกไซด์และยังส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง และขนาดของโลหะออกไซด์ผสมมีขนาดเล็ก ซึ่งผลการทดลองนี้ตรงกับใจความสำคัญของงานวิจัยดังกล่าว

- ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์ในโลหะออกไซด์ผสม

เนื่องจากการเติมโคบอลต์ออกไซด์ในโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ซีเรียออกไซด์ ทำให้ขนาดผลึกของโลหะเล็กลง ดังนั้นในการทดลองนี้จะศึกษาปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ในโลหะออกไซด์ผสมต่อการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนร้อยละของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ

รูปที่ 4.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนร้อยละของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ ออกไซด์เป็นร้อยละ 20:76:4 โดยน้ำหนัก, ร้อยละ 20:72:8 โดยน้ำหนัก, ร้อยละ 20:68:12 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 20:64:16 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกซิเดชัน พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือ สามารถกำจัดก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส, 180 องศาเซลเซียส และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนร้อยละของคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียม ออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์เป็น ร้อยละ 20:72:8 โดยน้ำหนัก แสดงการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุด เพราะกำจัดก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิต่ำที่สุด ทั้งนี้เหตุที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนร้อยละของโคบอลต์เป็นร้อย ละ 8 โดยน้ำหนักมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุดอาจจะสืบเนื่องมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง และ ขนาดของรูพรุนที่เล็ก (พิจารณาดารางที่ 4.1) สำหรับอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสม ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ร้อยละ 20:76:4 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่จำเพาะสูงแต่มีขนาด ของรูพรุนที่ใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วน ร้อยละ 20:72:8 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิว จำเพาะสูงใกล้เคียงกับตัวเร่งอัตราส่วนร้อยละ 20:76:4 โดยน้ำหนัก แต่มีขนาดของรูพรุนที่เล็กกว่ามาก จึงทำ ให้มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่า โดยสังเกตได้จากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิต่างกัน ซึ่ง Park และคณะ (2003) ได้กล่าวไว้ใน งานวิจัยของเขาว่า ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งมีความสัมพันธ์กับ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรู พรุน และขนาดของโลหะออกไซด์

ผลการทดลองการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันทำให้สรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี โคบอลต์ออกไซด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ในโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ ซีเรียม แสดงความว่องไวในการเร่ง ปฏิกิริยาได้ดีที่สุด ดังนั้น โครงการวิจัยในปีที่ 2 จะเป็นการทดสอบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่มากเกินไป รวมถึงการศึกษาการเร่ง ปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ในสภาวะที่มีก๊าซอื่นๆเจือปน เพื่อใช้ในการทำก๊าซไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ต่อไป

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงาน และแนวทางการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 2 จากการศึกษาทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมของคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ โดยใช้โคบอลต์ออกไซด์เป็นสารโปรโมทร่วม ในอัตราส่วนต่างๆ โดยทำการศึกษา 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนของคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ และส่วนความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ศึกษาปริมาณและผลกระทบบของโคบอลต์ออกไซด์ต่อคุณสมบัติเฉพาะความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

##### 5.1.1 ผลกระทบบของตัวแปรที่ศึกษาต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ ที่เติมโคบอลต์ออกไซด์เป็นสารโปรโมทร่วมในอัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 20:76:4 และร้อยละ 20:72:8 ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น
2. ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมของคอปเปอร์ออกไซด์ และซีเรียมออกไซด์ ส่งผลกระทบต่อปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์มากขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

##### 5.1.2 ผลกระทบบของตัวแปรที่ศึกษาต่อขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

1. ปริมาณของโคบอลต์ออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมของคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ ขนาดผลึกของโคบอลต์ออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้น
2. สารประกอบโลหะออกไซด์ผสมมีรูปแบบโครงสร้างผลึกดังนี้ คอปเปอร์ออกไซด์มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ Monoclinic ซีเรียมออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ Cubic

### 5.1.3 ผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมคอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 20:74:8 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ใกล้เคียงกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมของคอปเปอร์ออกไซด์และซีเรียมออกไซด์ที่มีอัตราส่วนร้อยละ 20:80
2. ปริมาณโคบอลต์ออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมของคอปเปอร์ออกไซด์ และซีเรียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชัน โดยส่งผลให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนมอนอกไซด์ออกซิเดชันลดลง

### 5.2 แนวทางการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 2

แผนการดำเนินงานวิจัยในปีที่ 2 จะเป็นการทดสอบความว่องไวในปฏิกิริยาการเลือกเกิดการเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยลำดับการทดลองเป็นดังนี้

1. การศึกษาความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา เมื่อก๊าซผสมในสายป้อนประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 1 ก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 50 ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1 และที่เหลือเป็นก๊าซฮีเลียม สำหรับการทดลองนี้เพื่อพิจารณาว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากน้อยเพียงใด เมื่อมีก๊าซไฮโดรเจนผสมอยู่ในปริมาณมาก และมีก๊าซออกซิเจนในปริมาณจำกัด ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความว่องไวต่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มาก จะพบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนมอนอกไซด์ จะสูงด้วย แสดงว่ามีการเลือกเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี โดยค่าการเลือกเกิดปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นิยามดังนี้

$$S_{CO}(\%) = \frac{0.5([CO]_{in} - [CO]_{out})}{([O_2]_{in} - [O_2]_{out})} \times 100\%$$

โดยที่

$[CO]_{in}$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในสายป้อนเริ่มต้น

$[CO]_{out}$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกเครื่องปฏิกรณ์

$[O_2]_{in}$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในสายป้อนเริ่มต้น

$[O_2]_{out}$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ทางออกเครื่องปฏิกรณ์



2. การศึกษาผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในก๊าซผสมต่อการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20 น้ำร้อยละ 2.8 โดยปริมาตร ทั้งนี้สารทั้งสองเป็นสารที่มีอยู่ในก๊าซผสมที่มาจากรีฟอร์มเมอร์
3. การศึกษาผลกระทบของความเร็วสเปซต่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
4. การศึกษาความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ใช้เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
5. การศึกษาเสถียรภาพหรือความคงทนของตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะศึกษา

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

แบบรายงานโครงการวิจัย งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๔ (Research Project)

1) ชื่อโครงการวิจัย

การใช้ก๊าซออกซิเจนในการทำรีฟอร์มก๊าซให้บริสุทธิ์เพื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน  
Preferential oxidation of reformed gas using with PEM Fuel cells

2) รายชื่อคณะผู้วิจัยพร้อมทั้งหน่วยงานที่สังกัด หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และE-mail

นางเอกรัตน์ วงษ์แก้ว (หัวหน้าโครงการ)  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยบูรพา  
บางแสน ชลบุรี 20131  
โทร 038-102222 ต่อ 3358 กด 13  
โทรสาร 038-102222 ต่อ 3350

3) ได้รับอนุมัติจัดสรรงบประมาณประจำปี ๒๕๕๔ จำนวนเงิน ๑๒๔,๖๐๐ บาท (หนึ่งแสนสองหมื่นสี่พันหกบาทถ้วน)

4) เริ่มทำการวิจัยเมื่อ ๒๔ พฤศจิกายน ๒๕๕๓ ถึง ๒๓ พฤศจิกายน ๒๕๕๔