

ผลของ ZnO และ Fe₂O₃/Al₂O₃ เพื่อเป็นตัวพาออกซิเจนต่อการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปีง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ZnO
AND Fe₂O₃/Al₂O₃ AS OXYGEN CARRIERS ON CHEMICAL LOOPING COMBUSTION

Mr. Sujinda Thongsermsuk



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของ ZnO และ Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ เพื่อเป็นตัวพาออกซิเจน
	ต่อการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง
โดย	นายสุจินดา ทองเสริมสุข
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชำรงรัตน์ มุ่งเจริญ)

สุจินดา ทองเสริมสุข : ผลของ ZnO และ Fe_2O_3/Al_2O_3 เพื่อเป็นตัวพาออกซิเจนต่อการเผาไหม้แบบเคมี
 คัลลูบิง (EFFECTS OF ZnO AND Fe_2O_3/Al_2O_3 AS OXYGEN CARRIERS ON CHEMICAL LOOPING
 COMBUSTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 ร่วม: ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคัลลูบิง โดยการผสมโลหะมากกว่า 1 ชนิดเพื่อเตรียมตัวพาออกซิเจน โดยมีโลหะหลักคือเหล็ก โลหะรองคือสังกะสี และมีอะลูมินาเป็นตัวรองรับ จากนั้นนำตัวพาออกซิเจนไปทดสอบประสิทธิภาพต่อการเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ จากการทดลองทำการผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 พบว่า สัดส่วนที่ดีที่สุดเมื่อทำการผสมเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) กับอะลูมินา (Al_2O_3) คือที่สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า ได้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด และตัวพาออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ เมื่อทำการผสมซิงค์ออกไซด์ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า สัดส่วนที่ดีที่สุดที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ ที่สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก โดยที่ซิงค์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุนช่วยส่งเสริมการรีดักชันให้กับเหล็กออกไซด์ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเหล็กออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ คือ $ZnFe_2O_4$ สามารถเกิดการรีดักชันได้ง่ายกว่าเหล็กออกไซด์ จากการศึกษาในตัวพาออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ สัดส่วนการผสมที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเผาไหม้ และปริมาณตัวพาออกซิเจน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิมีผลต่อการทำปฏิกิริยารีดักชัน เพราะว่าปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ที่อุณหภูมิสูงการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลกระทบต่อในเรื่องการเกิดการรวมตัวกันของตัวพาออกซิเจนได้ ส่วนการเพิ่มปริมาณของตัวพาออกซิเจนจะเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น ทำให้มีออกซิเจนในการทำปฏิกิริยากับมีเทนที่มากขึ้น จึงทำให้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้นตามปริมาณตัวพาออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ท้ายสุดทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวพาออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ โดยนำตัวพาออกซิเจนมาทำการทดสอบปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิงพบว่า ตัวพาออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้เพราะมีอะลูมินาช่วยยับยั้งการเกิดการรวมตัวกันของตัวพาออกซิเจน ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5772182423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CHEMICAL LOOPING COMBUSTION, OXYGEN CARRIER, IRON OXIDE, ALUMINA, ZINC OXIDE

SUJINDA THONGSERMSUK: EFFECTS OF ZnO AND Fe₂O₃/Al₂O₃ AS OXYGEN CARRIERS ON CHEMICAL LOOPING COMBUSTION. ADVISOR: PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., pp.

This research is to develop oxygen carrier for chemical looping by studying the effects of mixing more than one type of metals for preparing oxygen carriers. The main metal is iron and zinc is used as a supplement. Alumina is a support material. The oxygen carriers would then be tested by combustion in a fixed bed reactor. Carbon dioxide production would be measured to determine its effectiveness. From the experiment with various mixtures of iron oxide with 20, 40, 60 and 80 wt.%, it was found that the suitable proportions that gave the highest carbon dioxide production was 60 wt.% of iron oxide and 40 wt.% alumina. Then, adding ZnO with 5, 10, 15 and 20 wt.% to replace some portion of iron oxide in the former Fe₂O₃/Al₂O₃ oxygen carriers, it was found that the suitable proportion of the mixed metal was 45 wt.% of iron oxide, 40 wt.% of alumina, and 15 wt.% of zinc oxide. The role of the ZnO in the oxygen carrier is to promote the reduction of metal oxides since it formed ZnFe₂O₄ which is easily to be reduced. Thus it improves the reactivity of the oxygen carriers. Moreover, the effect of temperature and the amount of oxygen carrier was also studied. The results showed that increasing temperatures in the reduction reaction increases carbon dioxide production since it is an endothermic reaction. Thus, at high temperature, the reaction move more forward. However, high temperature might have impacted on the agglomeration of the oxygen carriers. Increasing the amount of oxygen carrier in the reduction reaction also promote the reaction since more oxygen was provided to the reactor. Lastly, the effectiveness of Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ oxygen carrier was investigated by conducting reduction and oxidation reaction alternately several cycles and observed their regenerative effect. It was found that Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ can be used for recycles without agglomeration. Thus, ZnO would help prolong the life of the developed oxygen carriers.

Department: Chemical Technology

Field of Study: Chemical Technology

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์และสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้ดำเนินงานวิจัยต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำงานรวมถึงให้คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขเป็นอย่างดีมาโดยตลอดการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบตลอดจนให้ ให้คำแนะนำ รวมถึงชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆของงานวิจัย ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่จ้อย และพี่นิก นักวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทดสอบด้วย XRD และ SEM-EDS

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา(The Scholarship from the Graduate School, Chulalongkorn University to commemorate the 72nd anniversary of his Majesty King Bhumibol Adulyadej is gratefully acknowledged) และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช (The 90th Anniversary Chulalongkorn University Fund (Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund))

ขอขอบคุณขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ และพี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา ทำให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง รวมถึงกำลังใจที่ดี และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ปัญหาสภาวะโลกร้อน (Global warming).....	6
2.2 เทคโนโลยีการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage technology).....	7
2.2.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ถ่านหินสะอาด	7
2.2.1.1 กระบวนการก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture)	8
2.2.1.2 กระบวนการหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture).....	9
2.2.1.3 กระบวนการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจน (oxy-fuel combustion capture).....	10
2.2.2 การขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์.....	11
2.2.3 การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์.....	11

2.2.3.1 เก็บไว้ในทะเลลึก.....	12
2.2.3.2 เก็บไว้ในพื้นดิน.....	12
2.2.3.3 ส่งออกไปสู่อวกาศ.....	12
2.3 การเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง (Chemical-looping combustion).....	12
2.4 ตัวพาออกซิเจน.....	14
2.5 ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์(Fe_2O_3).....	15
2.6 การใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง.....	16
2.6.1 ปัญหาของการใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจน.....	17
2.7 อะลูมินา.....	17
2.8 ซิงค์ออกไซด์.....	18
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	24
3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	24
3.3.2 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET).....	25
3.3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD).....	25
3.3.4 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปี(X-ray fluorescence spectroscopy, XRF).....	26
3.3.5 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (Micro – Gas Chromatography, Micro GC)....	27
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.4.1 การเตรียมตัวพาออกซิเจน.....	29

3.4.2 การศึกษาการใช้ตัวพาทออกซิเจนในการทำปฏิกิริยารีดักชัน	29
3.4.3 การศึกษาการใช้ตัวพาทออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง โดยทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง	30
3.4.4 การศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการเผาไหม้โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาทออกซิเจน	31
3.4.5 การศึกษาการใช้ตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ / ZnO/ Al ₂ O ₃ ในการเผาไหม้.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	32
4.1 ปริมาณธาตุและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทออกซิเจนที่สังเคราะห์ขึ้นมา.....	33
4.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ ...	34
4.2.1 ตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์.....	35
4.2.2 ตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	39
4.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ ที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์.....	51
4.3.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃	53
4.4 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน.....	64
4.5 ปริมาณตัวพาทออกซิเจน.....	70
4.6 ผลของการนำตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃ มาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง	72
4.7 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ และ Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการทดลอง	84
5.1.1 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	84

5.1.2 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃	84
5.1.3 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน	85
5.1.4 ผลของปริมาณตัวพาทออกซิเจน	85
5.1.5 ผลของการนำตัวพาทออกซิเจน Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃ มาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับ ออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปีง	85
ข้อเสนอแนะ	85
.....	86
รายการอ้างอิง	86
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	146



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture).....	9
รูปที่ 2.2 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (post-combustion capture).....	10
รูปที่ 2.3 กระบวนการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง (oxy-fuel combustion capture).....	11
รูปที่ 2.4 กระบวนการเคมีคัลลูบิงสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	13
รูปที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์.....	15
รูปที่ 2.6 รูปแบบการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิงโดยใช้ตัวพาออกซิเจน.....	16
รูปที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของอะลูมินา.....	18
รูปที่ 2.8 ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	19
รูปที่ 3.1 เครื่อง Scanning Electron Microscope.....	24
รูปที่ 3.2 เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer.....	25
รูปที่ 3.3 เครื่อง X-Ray Diffractometer, XRD.....	26
รูปที่ 3.4 เครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy.....	27
รูปที่ 3.5 เครื่อง Micro – Gas Chromatography.....	28
รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองของการทดลองการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง.....	31
รูปที่ 4.1 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจนประเภทเหล็กออกไซด์.....	35
รูปที่ 4.2 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์.....	36

รูปที่ 4.3 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์.....	37
รูปที่ 4.4 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า	37
รูปที่ 4.5 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	38
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 ที่สัดส่วนน้ำหนักแตกต่างกัน	40
รูปที่ 4.7 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (20/80)	41
รูปที่ 4.8 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (20/80)	41
รูปที่ 4.9 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (40/60)	42
รูปที่ 4.10 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (40/60)	42
รูปที่ 4.11 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (60/40)	43
รูปที่ 4.12 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (60/40)	43
รูปที่ 4.13 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (80/20)	44
รูปที่ 4.14 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (80/20)	44
รูปที่ 4.15 โครงสร้างสัณฐานอะลูมินา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า	45
รูปที่ 4.16 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 (20/80) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	46

รูปที่ 4.17 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20/80) หลังทำปฏิกิริยา	
(ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	46
รูปที่ 4.18 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/60) ก่อนทำปฏิกิริยา	
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	47
รูปที่ 4.19 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/60) หลังทำปฏิกิริยา	
(ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	47
รูปที่ 4.20 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60/40) ก่อนทำปฏิกิริยา	
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	48
รูปที่ 4.21 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60/40) หลังทำปฏิกิริยา	
(ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	48
รูปที่ 4.22 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80/20) ก่อนทำปฏิกิริยา	
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	49
รูปที่ 4.23 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80/20) หลังทำปฏิกิริยา	
(ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	49
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สัดส่วนน้ำหนักแตกต่างกัน	54
รูปที่ 4.25 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40).....	55
รูปที่ 4.26 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40).....	56
รูปที่ 4.27 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40).....	56
รูปที่ 4.28 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40).....	57
รูปที่ 4.29 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40).....	57

รูปที่ 4.30 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40).....	58
รูปที่ 4.31 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40).....	58
รูปที่ 4.32 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40).....	59
รูปที่ 4.33 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	60
รูปที่ 4.34 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	60
รูปที่ 4.35 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	61
รูปที่ 4.36 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	61
รูปที่ 4.37 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	62
รูปที่ 4.38 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	62
รูปที่ 4.39 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	63
รูปที่ 4.40 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	63
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันแตกต่างกัน.....	65
รูปที่ 4.42 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	66

รูปที่ 4.43 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ (45/15/40) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	67
รูปที่ 4.44 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ (45/15/40) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	67
รูปที่ 4.45 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า	69
รูปที่ 4.46 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า	69
รูปที่ 4.47 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า	70
รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ ที่ปริมาณตัวพาทออกซิเจนแตกต่างกัน	71
รูปที่ 4.49 ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ ในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยาเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น	72
รูปที่ 4.50 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นรอบที่ 1 และรอบที่ 4 ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง	73
รูปที่ 4.51 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนรอบที่ 4	74
รูปที่ 4.52 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศรอบที่ 4.....	75
รูปที่ 4.53 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ (45 : 15 : 40) หลังทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันเป็นจำนวนครบ 4 รอบ (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า	75

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟ..	28
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบธาตุและปริมาณของตัวพาทอกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3	33
ตารางที่ 4.2	พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทอกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3	34
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบธาตุและปริมาณของตัวพาทอกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$	52
ตารางที่ 4.4	พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทอกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$	53
ตารางที่ 4.5	ตารางแสดงพื้นที่ได้กราฟความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจนแต่ละชนิดของตัวพาทอกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของ Fe_2O_3 และ ร้อยละการใช้ออกซิเจน.....	77
ตารางที่ 4.6	ตารางแสดงพื้นที่ได้กราฟความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจนแต่ละชนิดของตัวพาทอกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของ Fe_2O_3 และร้อยละการใช้ออกซิเจน.....	78
ตารางที่ 4.7	ประสิทธิภาพของตัวพาทอกซิเจนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้อุณหภูมิของโลกที่มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี สาเหตุหลักเกิดจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศที่เพิ่มขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์จัดเป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ทั้งจากภาคการขนส่ง ภาคอุตสาหกรรมและภาคพลังงาน ดังนั้นจึงได้มีการรณรงค์ลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก โดยหันมาใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และชีวมวล แทนที่การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตพลังงานโดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้า ในขณะเดียวกันมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสู่ชั้นบรรยากาศ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยปกติจะแบ่งออกเป็น กระบวนการก่อนการเผาไหม้ กระบวนการหลังการเผาไหม้ และกระบวนการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเหล่านี้มีข้อจำกัดในเรื่องของ การสูญเสียประสิทธิภาพการใช้งาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ การขนส่งและการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเทคโนโลยีใหม่ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ควรมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้ประโยชน์และลดภาระทางเศรษฐกิจ จึงได้มีการเสนอเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูป ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่มีศักยภาพสูง ไม่มีค่าใช้จ่ายในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และยังได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง[1]

การเผาไหม้ในกระบวนการเคมีคัลลูปเป็นการประยุกต์มาจากการเผาไหม้แบบธรรมดา ปฏิกิริยาการเผาไหม้ทั่วไป จะเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้น กับออกซิเจนจากอากาศได้ผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นความร้อน ioni และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ภายในแก๊สเผาไหม้ยังมีไนโตรเจนที่มาจากอากาศผสมอยู่ สำหรับการประยุกต์การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในกระบวนการเคมีคัลลูป ในขั้นตอนแรกเชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนที่ได้จากวัสดูโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในเครื่องปฏิกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว โลหะออกไซด์จะเปลี่ยนรูปกลายเป็นออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนลดลงหรือเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดย

แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจะยังคงเป็นไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดิมแต่ไม่มีไนโตรเจนเข้ามาในกระบวนการ ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะเกิดการควบแน่นภายในหน่วยควบแน่นที่ติดตั้งไว้และแยกตัวออกจากคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่พร้อมจะส่งต่อไปเก็บหรือใช้ผลิตเป็นสารเคมีตัวอื่นต่อไป ข้อดีของกระบวนการนี้ที่เหนือกว่ากระบวนการอื่นที่ใช้งานกันในปัจจุบันคือ การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการผลิตพลังงานที่ได้รับและเป็นการเผาไหม้ที่มีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกโดยกลไกภายในกระบวนการเอง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการแยกแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ ขั้นตอนต่อมาโลหะบริสุทธิ์หรือออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนลดลงถูกนำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศเพื่อทำการเติมออกซิเจนโดยให้ทำปฏิกิริยากับอากาศจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นออกไซด์ของโลหะเดิมที่พร้อมจะนำไปป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการต่อไป[2]

ตัวพาออกซิเจนหรือวัสดุโลหะออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ถือว่ามีความสำคัญมากสำหรับกระบวนการเคมีคลูบิงเพราะจะถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในกระบวนการ ตัวพาออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ สามารถกักเก็บออกซิเจนจากการทำปฏิกิริยากับอากาศสูง มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีที่สูง มีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ มีความแข็งแรง ทนทานต่อการแตกหัก มีช่วงอายุการใช้งานที่เหมาะสม มีเสถียรภาพทางความร้อน และมีราคาถูก โดยออกไซด์ของโลหะที่มีการใช้งานกันในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น นิกเกิล เหล็ก ทองแดง แมงกานีส เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยค้นพบว่าเหล็กมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวพาออกซิเจนเพราะ ทนความร้อนสูง มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพต่ำ และราคาถูกกว่าโลหะชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามเหล็กยังมีจุดอ่อนในเรื่องการเสื่อมประสิทธิภาพภายหลังจากการทำปฏิกิริยารวนซ้ำหลายๆ ครั้ง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การใช้โลหะอื่นมาผสมร่วมด้วยสามารถช่วยให้ตัวพาออกซิเจนใช้งานได้นานขึ้น[3]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเคมีคลูบิงที่ผ่านมาพบว่า การใช้โลหะออกไซด์ผสมจะทำให้ตัวพาออกซิเจนมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่ดีขึ้น แต่ยังไม่มียงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของการผสมวัสดุโลหะออกไซด์ที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันต่อประสิทธิภาพของตัวพาออกซิเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นจะทำการ

พัฒนา โลหะผสม สัดส่วนที่เหมาะสมของโลหะผสม สมบัติเชิงกล ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติของตัวพาทอกซิเจน โดยอาศัยการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปปรับใช้งานสำหรับการผลิตตัวพาทอกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์เคมีคลูบิงเพื่อให้ได้ตัวพาทอกซิเจนที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาผลของการผสมโลหะออกไซด์ต่อประสิทธิภาพของตัวพาทอกซิเจนเหล็กออกไซด์ในการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง
- 2) ศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณตัวพาทอกซิเจนต่อการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงที่ใช้ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดเป็นตัวพาทอกซิเจน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีสัดส่วนการผสมของเหล็กออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ไปทดสอบการทำปฏิกิริยารีดักชันในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาผสมกับซิงค์ออกไซด์
- 2) ตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมจากข้อแรก นำมาผสมกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ไปทดสอบการทำปฏิกิริยารีดักชันในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อศึกษาผลของการผสมซิงค์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพของตัวพาทอกซิเจนเหล็กออกไซด์
- 3) ตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนที่เหมาะสมจากข้อที่สอง มาทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและปริมาณตัวพาทอกซิเจนต่อการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง ซึ่งจะทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ
- 4) ตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนที่เหมาะสมจากข้อที่สองมาศึกษาการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง โดยทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาเสถียรภาพการใช้งานของตัวพาทอกซิเจน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) สังเคราะห์ตัวพาทออกซิเจนจากเหล็กออกไซด์ โดยนำผงเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และผงอะลูมินา (Al_2O_3) ในสัดส่วนที่แตกต่างกันผสมในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องเขย่าสาร หลังจากผสมเข้ากันดีแล้วไปกรองน้ำออกเหลือแต่สารที่ผสม นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง นำสารที่อบแห้งแล้วไปบดละเอียดและคัดขนาดให้ได้เล็กกว่า 0.42 มิลลิเมตร หลังจากนั้น นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) เตรียมโลหะออกไซด์ผสมโดยวิธีการเดียวกันกับขั้นตอนข้างต้น แต่ในขั้นตอนนี้เพิ่มผงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยศึกษาสัดส่วนการเติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก
- 4) ตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจนที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้ เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน ทดสอบโครงสร้างผลึกโดยใช้ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และวิเคราะห์องค์ประกอบของสารโดยใช้ เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี
- 5) นำตัวพาทออกซิเจนที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้ไปทดสอบใน เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ของมีเทนสำหรับกระบวนการเคมีคัลลูปีง โดยศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้ ได้แก่ อุณหภูมิ (900 - 1000 องศาเซลเซียส) ปริมาณตัวพาทออกซิเจน (0.8 - 1.2 กรัม) เป็นต้น
- 6) วิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph, GC)
- 7) นำตัวพาทออกซิเจนที่ผ่านการทดลองไปทดสอบลักษณะสัณฐานโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
- 8) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย จัดทำรายงานวิจัย และวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

ได้ตัวพลาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาที่มีประสิทธิภาพ และเสถียรภาพสำหรับใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาสภาวะโลกร้อน (Global warming)

ปรากฏการณ์โลกร้อน เป็นนิยามของอุบัติการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก โดยที่ "การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ" หมายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทุกช่วงเวลาของโลก คำว่า "ปรากฏการณ์โลกร้อน" จะใช้ในการอ้างถึงสภาวะที่อุณหภูมิของโลกร้อนขึ้นซึ่งมีความเกี่ยวข้อง มาจากการกิจกรรมของมนุษย์[4] สภาวะโลกร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโลกไม่สามารถ ระบายความร้อนที่ได้รับจากรังสีดวงอาทิตย์ออกไปได้อย่างปกติ จึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้น และทำให้สภาพอากาศของโลกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก

ปัจจัยที่ทำให้ภูมิอากาศโลกเปลี่ยนแปลง มีทั้งผลจากปัจจัยภายนอกและปัจจัยภายใน ปัจจัย ภายนอกได้แก่ พลังงานจากดวงอาทิตย์และวงโคจรของโลก ปัจจัยภายในได้แก่ การเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบของแก๊สในบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลก สรุปรวมได้ดังนี้[5]

- (1) พลังงานจากดวงอาทิตย์
- (2) วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์
- (3) องค์ประกอบของบรรยากาศ
- (4) ความสามารถในการสะท้อนแสงของบรรยากาศและพื้นผิวโลก
- (5) น้ำในมหาสมุทร
- (6) การเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก

ทุกปัจจัยที่กล่าวมามีผลกระทบต่อบรรยากาศของโลกโดยตรง และมีผลกระทบบอกันและกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในภาพรวม

จากที่กล่าวมาข้างต้นส่วนใหญ่แล้วปัญหาสภาวะโลกร้อนจะมาจาก กิจกรรมในการดำรงชีวิต ของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และมีเทน (CH_4) เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณา ในแง่ของปริมาณที่ถูกปล่อยและเวลาช่วงชีวิตที่คงอยู่ในชั้นบรรยากาศ (life time) พบว่า คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สเรือนกระจกก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อนที่มีปริมาณมากที่สุด ช่วงอายุ ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในบรรยากาศจะคงอยู่เป็นเวลา 50 ถึง 200 ปี นอกจากนี้ยังพบว่า

คาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์ปล่อยออกสู่บรรยากาศมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อการผลิตพลังงานและการขนส่งเป็นหลัก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการพิจารณาทางเลือกใหม่ในการผลิตพลังงาน หรือการลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งในปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานหลักของอุตสาหกรรม โดยเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Non-renewable energy) ซึ่งเราสามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อแก้ปัญหาภาวะโลกร้อน โดยรณรงค์ให้แต่ละประเทศนั้นหันมาใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่วันหมดไป เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม เป็นต้น พลังงานหมุนเวียนเหล่านี้มีข้อดี คือ จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ แต่ยังมีข้อเสียคือ ไม่สามารถผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง และต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง เพื่อเป็นการบรรเทาปัญหาดังกล่าว ทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรกำลังพัฒนาขึ้นเป็นเทคโนโลยีที่จะสามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศได้ โดยใช้เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์[6]

2.2 เทคโนโลยีการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage technology)

เทคโนโลยีการดักจับและการจัดเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกระบวนการของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เทคโนโลยีนี้ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน 1. การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ถ่านหินสะอาด 2. การขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์ 3. การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

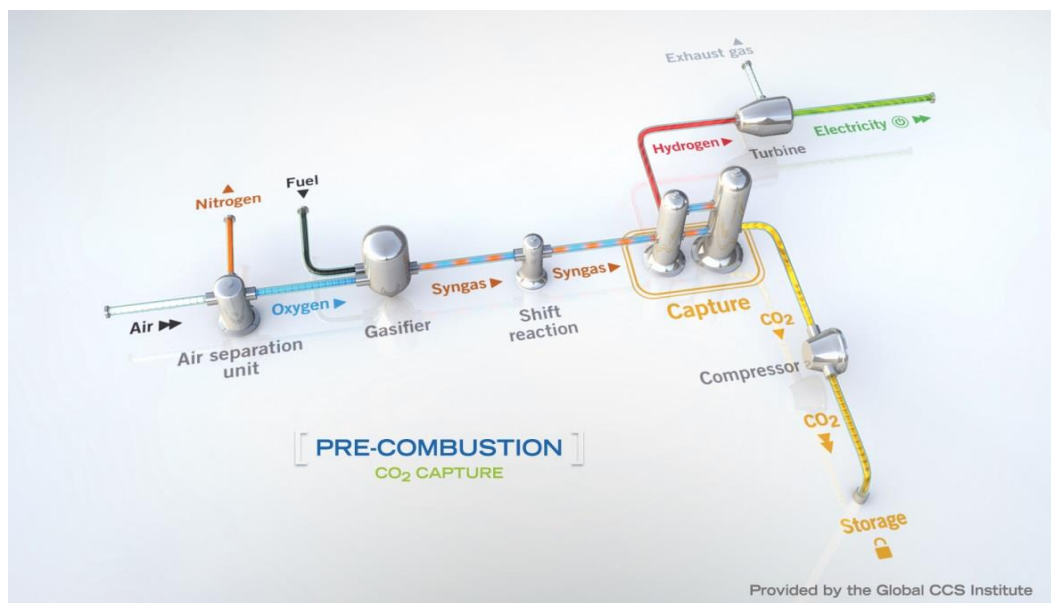
2.2.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ถ่านหินสะอาด

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ควรเริ่มจากจุดที่เป็นแหล่งกำเนิด[7] เช่น โรงผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะทำให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าไกลออกไปจากแหล่งกำเนิดความเข้มข้นที่ต่ำลงจะทำให้ต้องเพิ่มปริมาณการไหลของมวลอากาศที่จะต้องทำการดักจับ

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยปกติจะแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลัก[8] ได้แก่ กระบวนการก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture) กระบวนการหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture) และกระบวนการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง (oxy-fuel combustion capture)

2.2.1.1 กระบวนการก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture)

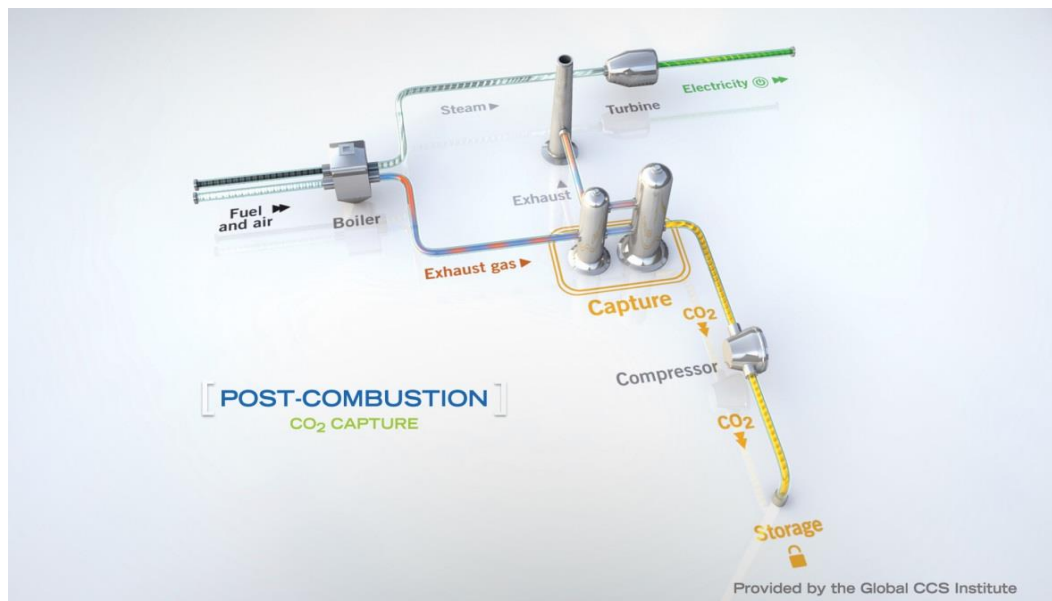
กระบวนการก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างมากในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (H_2 , CH_4) และการผลิตไฟฟ้า ในกรณีเหล่านี้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะถูกออกซิไดซ์บางส่วน (partial oxidation reaction) เปลี่ยนรูปไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์หรือแก๊สสังเคราะห์ (syngas) ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำผ่านปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (water-gas shift reaction) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่มากขึ้น จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกจากไฮโดรเจน ไฮโดรเจนตอนนี้ก็สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานได้ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดออกก่อนที่การเผาไหม้จะเกิดขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์สามารถถูกกำจัดออกหลังจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล ก่อนที่แก๊สจะขยายไปสู่ความดันบรรยากาศ วิธีการนี้จะนำไปใช้กับโรงไฟฟ้าที่เผาเชื้อเพลิงฟอสซิลสร้างใหม่หรือโรงไฟฟ้าที่มีอยู่เดิมแต่วิธีการจ่ายเชื้อเพลิงยังเป็นตัวเลือก การดักจับก่อนการขยายตัวเป็นมาตรฐานในเกือบทุกกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทางอุตสาหกรรมในระดับเดียวกับที่ใช้ในโรงไฟฟ้าสาธารณูปโภค



รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้
(pre-combustion capture)[7]

2.2.1.2 กระบวนการหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture)

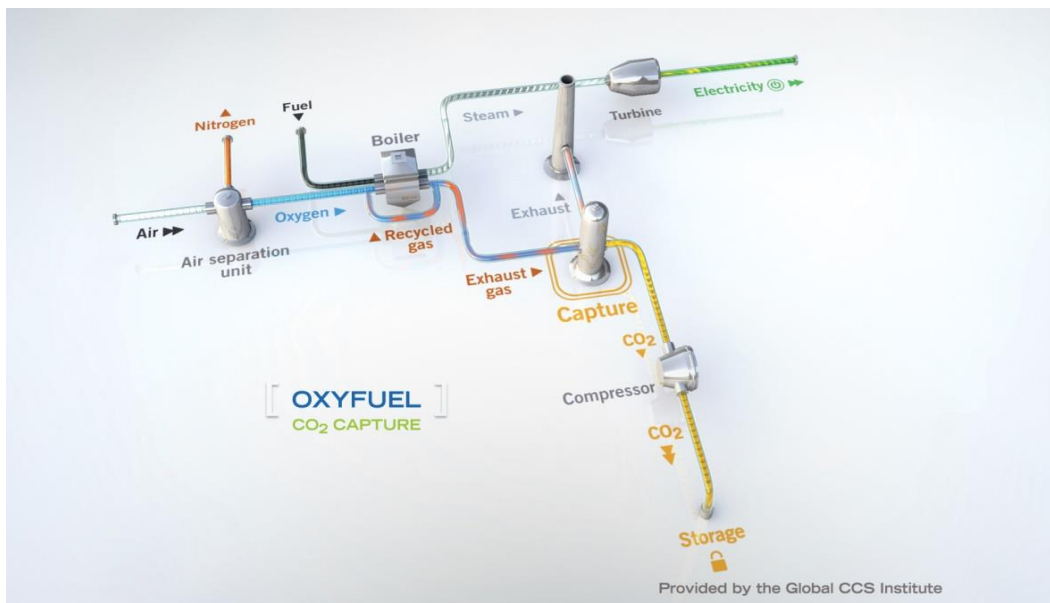
กระบวนการหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture) คาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกกำจัดออกหลังจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล การดำเนินการแบบนี้จะนำไปใช้กับ โรงไฟฟ้าที่เผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ในโรงไฟฟ้างกล่าวคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดักจับจาก แก๊สที่ปล่อยควัน (flue gas) ที่โรงไฟฟ้า เทคโนโลยีนี้เป็นที่เข้าใจกันดีและขณะนี้ถูกนำมาใช้ใน งานอุตสาหกรรมอื่น ๆ แม้ว่าจะไม่ได้อยู่ในระดับเดียวกันกับที่ใช้กับโรงไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.2 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้
(post-combustion capture)[7]

2.2.1.3 กระบวนการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจน (oxy-fuel combustion capture)

ในกระบวนการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนแทนการใช้อากาศ การเผาไหม้ดังกล่าวมักเกิดเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดขึ้นให้อยู่ในระดับที่พบทั่วไปในระหว่างการเผาไหม้ธรรมดา แก๊สปล่องควัน (flue gas) ที่ถูกทำให้เย็นลงจะนำมามหุนเวียนและป้อนเข้าไปในเตาเผาไหม้ แก๊สปล่องควันจะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นส่วนใหญ่ ไอน้ำจะถูกควบแน่นโดยการทำให้เย็น ผลที่ได้คือคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกือบจะบริสุทธิ์ที่สามารถเคลื่อนย้ายไปยังสถานที่จัดเก็บและจะถูกเก็บเอาไว้ โรงไฟฟ้า ที่มีกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับการเผาไหม้แบบ oxy-fuel บางครั้งจะถูกเรียกว่า มีวัฏจักร "การปล่อยเป็นศูนย์" เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ที่เก็บเอาไว้ไม่ได้เป็นส่วนย่อยที่ถูกกำจัดออกจากแก๊สปล่องควัน (อย่างเช่นในกรณีของการดักจับก่อนและหลังการเผาไหม้) แต่มันเป็นตัวแก๊สปล่องควัน ส่วนย่อยที่แน่นอนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้จะจบลงอย่างไม่มีทางหลีกเลี่ยงได้ในน้ำที่ควบแน่น ในการที่จะรับรองได้ว่า "การปล่อยเป็นศูนย์" นี้จะต้องได้รับการบำบัดหรือกำจัดอย่างเหมาะสม เทคนิคมีแนวโน้มที่ดี แต่ขั้นตอนการแยกอากาศในช่วงเริ่มต้นมีความต้องการพลังงานมาก



รูปที่ 2.3 กระบวนการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง
(oxy-fuel combustion capture)[7]

2.2.2 การขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์

หลังจากที่ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้แล้วจะต้องมีการเคลื่อนย้ายแก๊สไปยังสถานที่จัดเก็บที่เหมาะสม การขนส่งนี้จะใช้ท่อในการขนส่ง ซึ่งโดยทั่วไปเป็นรูปแบบของการขนส่งที่ถูกที่สุดในสหรัฐอเมริกาที่มีการใช้ท่อในการขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังเขตการผลิตน้ำมันในที่ซึ่งมันจะถูกฉีดเข้าไปในแหล่งน้ำมันเก่าเพื่อสกัดน้ำมัน การฉีดคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตน้ำมันโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่าการสูบน้ำมันอย่างก้าวหน้าหรือ Enhanced Oil Recovery (EOR) นอกจากนี้ยังมีหลายโครงการนำร่องในขั้นตอนต่างๆเพื่อทดสอบการจัดเก็บในระยะยาวของคาร์บอนไดออกไซด์ในโพรงใต้ดินที่ไม่ใช่สำหรับการผลิตน้ำมัน

2.2.3 การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

หลังจากที่ผ่านกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ทางเลือกในการกำจัดหรือกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในระยะยาว[9]มีดังต่อไปนี้คือ

2.2.3.1 เก็บไว้ในทะเลลึก

มหาสมุทรมีความสามารถเพียงพอในการรองรับเพื่อกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากโรงไฟฟ้าฟอสซิลได้ เนื่องจากมหาสมุทรเป็นพื้นที่กว้างใหญ่จึงเหมาะสมกับการเป็นสถานที่เก็บคาร์บอนไดออกไซด์แห่งหนึ่ง

2.2.3.2 เก็บไว้ในพื้นดิน

ทางเลือกแรก กรณีที่สารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีราคาไม่แพง เช่น การใช้สารดูดซับธรรมชาติ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ เมื่อใช้งานสารดูดซับแล้ว สารดูดซับเหล่านี้สามารถนำไปฝังไว้ในเหมืองร้างได้ อีกกรณีหนึ่งคือการเก็บฝังคาร์บอนไดออกไซด์ลงในหลุมแก๊สหรือน้ำมันดิบที่หมดสภาพไปแล้ว โดยเก็บไว้ในลักษณะแก๊สความดันสูง ในบางกรณีการอัดคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปหลุมแก๊สหรือน้ำมันดิบที่หมดสภาพแล้ว อาจได้น้ำมันหรือแก๊สที่ค้างหลุมเป็นผลพลอยได้ด้วย จึงทำให้การฝังเก็บคาร์บอนไดออกไซด์วิธีนี้มีความคุ้มค่ามากขึ้น

2.2.3.3 ส่งออกไปสู่อวกาศ

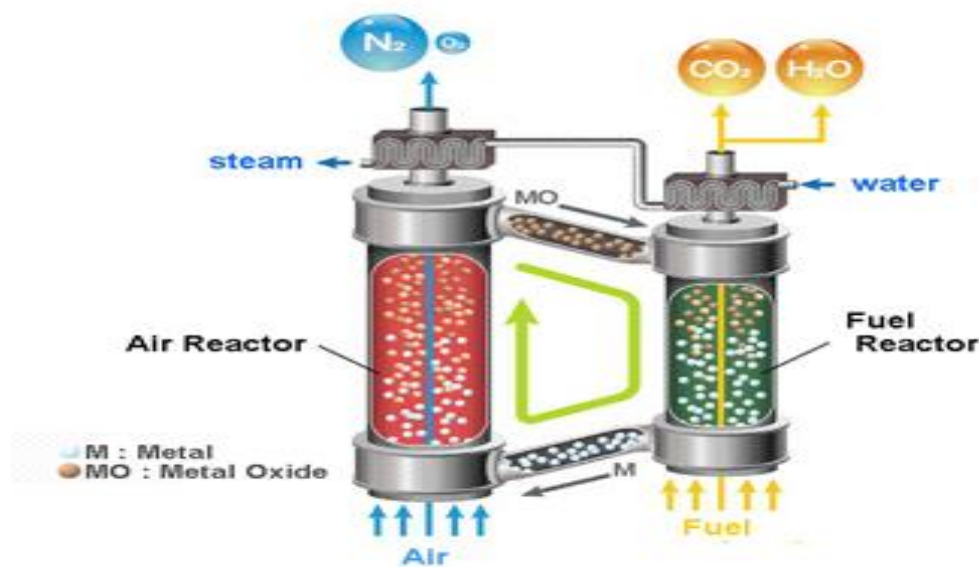
เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้คือ บรรจุคาร์บอนไดออกไซด์ในภาชนะแล้วส่งออกไปนอกบรรยากาศโลก แต่จากการศึกษาและวิเคราะห์แล้วพบว่าทางเลือกนี้ไม่นิยมและไม่ตอบโจทย์ความคุ้มค่าเพราะต้องใช้พลังงานมากเกินกว่าจะคุ้มค่า

2.3 การเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง (Chemical-looping combustion)

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยทั่วไปมีข้อจำกัดในเรื่องของการสูญเสียประสิทธิภาพการใช้งานและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ การขนส่งและการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ควรจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการทางเศรษฐกิจ จึงได้มีการเสนอเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง

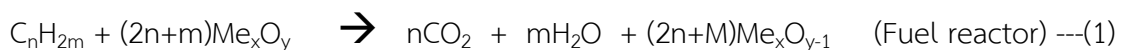
การเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง (Chemical-looping combustion, CLC) เป็นการนำเทคโนโลยีเคมีคัลลูปิงมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิง ข้อดีของกระบวนการนี้ที่เหนือกว่ากระบวนการอื่นคือไม่ต้องแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สจากการเผาไหม้ เนื่องจากกระบวนการถูกออกแบบไม่ให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศโดยตรง โดยในการเผาไหม้จะใช้ตัวพาออกซิเจน (Oxygen carrier) เป็นตัวกลางในการนำออกซิเจนเข้าสู่การเผาไหม้ ดังนั้น จึงไม่ต้อง

แยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไนโตรเจนทำให้ไม่ต้องเสียพลังงานไปในกระบวนการแยกนี้ จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการมากกว่าการเผาไหม้แบบดั้งเดิม อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานอีกด้วย[9]



รูปที่ 2.4 กระบวนการเคมีคัลลูปีงสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้[9]

สำหรับการประยุกต์การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในกระบวนการเคมีคัลลูปีง[10] ในขั้นตอนแรก เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนจากวัสดุโลหะออกไซด์หรือตัวพาออกซิเจน (Metal oxide, Me_xO_y) ในกระบวนการซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว วัสดุของแข็งจะเปลี่ยนรูปกลายเป็นโลหะบริสุทธิ์ หรือออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนลดลง ดังสมการที่ 1



โดยแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจะยังคงเป็นไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดิม ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะเกิดการควบแน่นภายในส่วนควบแน่นที่ติดตั้งไว้และแยกตัวออกจากคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูง ที่พร้อมจะส่งต่อไปเก็บหรือใช้ผลิตเป็นสารเคมีตัวอื่น อีกทั้งเป็นการเผาไหม้ที่มีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกด้วยกลไกภายในกระบวนการเองทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการแยกแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ ขั้นตอนต่อมา โลหะบริสุทธิ์หรือ

ออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนลดลง ($\text{Me}_x\text{O}_{y-1}$) ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ เพื่อทำการเติมออกซิเจนโดยให้ทำปฏิกิริยากับอากาศจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นออกไซด์ของโลหะเดิมที่พร้อมจะนำไปป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการต่อไป ดังสมการที่ 2



โดยปฏิกิริยาฝั่งนี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) และแก้สมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นไนโตรเจนและออกซิเจนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อทำการพิจารณาปฏิกิริยาเคมีรวมทั้งกระบวนการจะพบว่า ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ยังเหมือนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยตรงด้วยอากาศ ความร้อนที่ได้รับจะยังมีปริมาณเท่ากับความร้อนที่ได้จากกระบวนการปกติ แต่จะไม่มี การสูญเสียความร้อนเนื่องจากไนโตรเจนที่ป้อนไปกับอากาศในกระบวนการ ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงสูงตามไปด้วย

2.4 ตัวพาออกซิเจน

ตัวพาออกซิเจนหรือวัสดุโลหะออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ถือว่ามีความสำคัญมากสำหรับกระบวนการเคมีคลูบิงเพราะตัวพาออกซิเจนเป็นสื่อกลางในการนำออกซิเจนเข้าสู่กระบวนการเพื่อนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในกระบวนการ

การเลือกตัวพาออกซิเจนที่นำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งตัวพาออกซิเจนที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้[11]

- 1) มีความสามารถกักเก็บออกซิเจนจากการทำปฏิกิริยากับอากาศสูง
- 2) มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีที่สูง
- 3) มีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ มีความแข็งแรง ทนทานต่อการแตกหัก
- 4) มีช่วงอายุการใช้งานที่เหมาะสม
- 5) มีเสถียรภาพทางความร้อนภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง
- 6) มีราคาถูก
- 7) มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพต่ำ

โดยทั่วไปวัสดุของแข็งหรือออกไซด์ของโลหะที่มีการใช้งานกันในปัจจุบัน ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล ทองแดง โคบอลต์ และแมงกานีส รวมถึงโลหะผสมต่างๆ แต่ละออกไซด์ของโลหะก็จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังนั้นความรู้เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการคัดเลือกออกไซด์ของโลหะมาใช้ และการพัฒนาวัสดุของแข็งใหม่จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการทำตัวพาทออกซิเจนมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง

2.5 ตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์(Fe_2O_3)

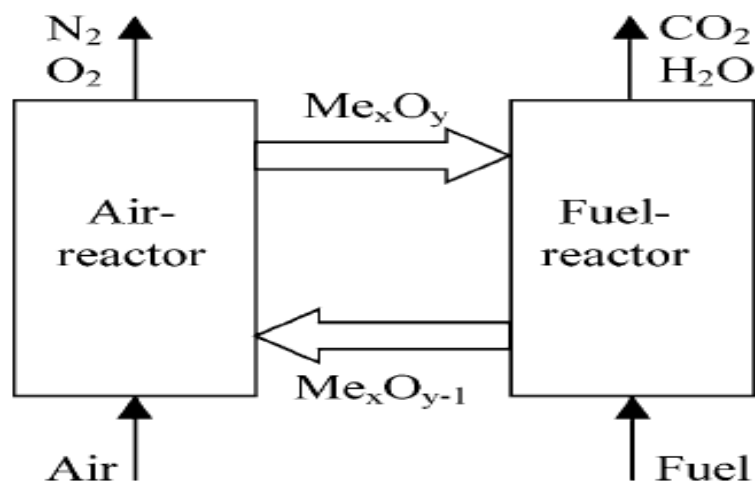
ตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์(Fe_2O_3) เป็นที่นิยมโดยทั่วไปของการนำมาใช้เป็น ตัวพาทออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง เนื่องจากมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [11]

- 1) มีจุดหลอมเหลวที่สูงทำให้ทนความร้อนได้ดีภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง
- 2) มีสมบัติเชิงกลที่ดี
- 3) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพต่ำ
- 4) ราคาถูกกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ที่นำมาใช้เป็นตัวพาทออกซิเจน



รูปที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์[11]

2.6 การใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง



รูปที่ 2.6 รูปแบบการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงโดยใช้ตัวพาออกซิเจน[11]

การใช้ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ในการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงโดยใช้มีเทน (CH₄) เป็นเชื้อเพลิง ชั้นแรกเหล็กออกไซด์(Fe₂O₃) จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นเหล็ก(Fe) ด้วยมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel Reactor) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 3



เหล็กที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กออกไซด์และมีเทนจะถูกส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์อากาศเพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศได้เหล็กออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ ดังสมการที่ 4



การเกิดปฏิกิริยาหมุนเวียนเป็นวัฏจักรระหว่างปฏิกิริยารีดักชันในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะเป็นการส่งผ่านออกซิเจนจากอากาศสู่เชื้อเพลิงจากระบวนการเคมีคลูบิงสามารถได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติมในการแยก และไม่ต้องเสียพลังงานแยกออกซิเจนออกจากอากาศเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงอีกด้วย

2.6.1 ปัญหาของการใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจน

เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนที่มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิงแต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและการทนทานต่อการขัดสี ภายหลังจากการทำปฏิกิริยารวนซ้ำหลายๆ ครั้งทำให้เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพของตัวพาออกซิเจนได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำตัวรองรับ (supporting material) เช่น อะลูมินา ไททาเนียมออกไซด์ เซอร์โคเนียมออกไซด์ เป็นต้น มาผสมกับเหล็กออกไซด์เพื่อช่วยให้ตัวพาออกซิเจนใช้งานได้นานขึ้น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า อะลูมินาได้รับความนิยมและนำมาใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเหล็กออกไซด์

2.7 อะลูมินา

ในการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิงตัวพาออกซิเจนนอกจากจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่ดีแล้ว ต้องมีช่วงอายุการใช้งานที่เหมาะสมด้วย ซึ่งตัวพาออกซิเจนที่ผลิตจากเหล็กออกไซด์ที่ถูกใช้ร่วมกับอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวรองรับเหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง เพราะว่ามี [11]

- 1) ช่วยยับยั้งการเกิดการรวมตัวกันของเหล็กออกไซด์
- 2) ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล ทำให้สามารถทนทานต่อการขัดสีได้มากขึ้น
- 3) ทำให้ตัวพาออกซิเจนมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น
- 4) ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวพาออกซิเจน

ในการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง อะลูมินาไม่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวพาออกซิเจนในระบบการเผาไหม้ อะลูมินาจะเป็นตัวรองรับหรือ supporting material ซึ่งออกซิเจนในโครงสร้างของอะลูมินาจะไม่หลุดออกไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง[12]



รูปที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของอะลูมินา[12]

2.8 ซิงค์ออกไซด์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการผสมโลหะออกไซด์ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเข้าด้วยกัน จะช่วยทำให้ตัวพาทอกซิเจนมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นด้วย ซิงค์ (Zn) จัดเป็นธาตุทรานซิชัน เช่นเดียวกับ เหล็ก นิกเกิล ทองแดง โคบอลต์ และแมงกานีส ที่นิยมนำออกไซด์ของโลหะเหล่านี้มาใช้เป็นตัวพาทอกซิเจนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง จากการศึกษาสมบัติของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) พบว่า มีความสามารถในการทนความร้อนและอุณหภูมิได้ดี[13] โดยวัสดุที่มีซิงค์ออกไซด์ผสมอยู่จะมีความเสถียรทางอุณหภูมิแม้ว่าอุณหภูมิสูงถึง 1800 องศาเซลเซียส ทำให้มีสมบัติในการเป็นตัวกลางไฟฟ้าได้ดี รวมทั้งทนความร้อนได้ดีและสามารถนำไปใช้ได้หลายอุตสาหกรรม อีกทั้งการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเป็นลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดง่ายขึ้น ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น ซึ่งมาจากคุณสมบัติของการเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ของซิงค์ออกไซด์ และเนื่องจากมีราคาที่ถูก ทำให้ตอบโจทยในเรื่องของความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจอีกด้วย[14]



รูปที่ 2.8 ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์[14]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chiu และคณะ [11] ศึกษาตัวพาออกซิเจนที่เตรียมจากเหล็กออกไซด์ โดยใช้อะลูมินาเป็นตัวรองรับเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการเป็นตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคัลลูบิง โดยวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและทำการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง อนุภาคเหล็กออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นภาวะที่เหมาะสมของการใช้เป็นตัวพาออกซิเจน กลไกการเกิดรีดักชันของตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ถูกเสนอเป็นข้อมูลของสมบัติทางความร้อนและการพิสูจน์เอกลักษณ์ XRD การเตรียมตัวพาออกซิเจนอนุภาคเหล็กออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์ แสดงให้เห็นถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความสัมพันธ์กับการเผาไหม้ด้วย แก๊สเชื้อเพลิงผสมและมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งโดยดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ความแข็งแรงของอนุภาคและสมบัติทางความร้อนของอนุภาคเหล็กออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์ได้มีการตรวจสอบ ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า อนุภาคเหล็กออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์มีความแข็งแรงที่เหมาะสมและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในฐานะตัวพาออกซิเจนสำหรับใช้ในกระบวนการเคมีคัลลูบิง

Hu และคณะ[15] ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการเคมีคัลลูปิงที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงผสมที่มาจากชีวมวล โลหะเหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวพาออกซิเจนมีความสำคัญมากที่จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเหล็กออกไซด์โดยใช้อะลูมินาเป็นตัวรองรับใน 2 วิธีการ คือ (1) วิธีการผสมแบบเปียกและ (2) วิธีการผสมแบบแห้ง สัดส่วนน้ำหนักของเหล็กออกไซด์เท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำตัวพาออกซิเจนไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำปฏิกิริยารีดักชันกับไฮโดรเจน (H_2 -Temperature Programmed Reduction (TPR)) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียส ถึง 950 องศาเซลเซียสโดยดำเนินการในเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่จะพบการรีดักชันสูงสุด นำตัวพาออกซิเจนที่ได้จากการเตรียมทั้งสองวิธีการไปทดสอบต่อในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง โดยดำเนินการจำนวน 10 รอบ ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคที่เตรียมโดยวิธีการผสมแห้งเกิดปฏิกิริยาสูงในการผลิตไฮโดรเจน

Pans และคณะ[16] ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของแร่เหล็ก ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเหล็กออกไซด์สำหรับเป็นตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคัลลูปิงแบบเผาไหม้ด้วยแก๊สเชื้อเพลิงมีการทดสอบคุณสมบัติของตัวพาออกซิเจนโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและในกระบวนการเคมีคัลลูปิงแบบเผาไหม้โดยใช้มีเทน แก๊สเชื้อเพลิงผสม และ PSA off-gas เป็นเชื้อเพลิง ตัวพาออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิงผสมได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ยังมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของมีเทน นอกจากนี้ การใช้นิกเกิลออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนจะเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาของตัวพาออกซิเจนกับมีเทน แม้ในกรณีที่ไม่ได้มีผลของการเร่งปฏิกิริยา ประสิทธิภาพการทำงานของแร่เหล็กในเรื่องเกี่ยวกับการขจัดสีและพฤติกรรมคาร์บอนเป็นที่น่าสนใจตลอด 50 ชั่วโมงของการดำเนินงานในโรงงานด้วยกระบวนการเคมีคัลลูปิงแบบเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นวัสดุเหล็กออกไซด์นี้มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่านิกเกิลออกไซด์เหมาะสำหรับเป็นตัวพาออกซิเจนในกระบวนการเคมีคัลลูปิงแบบเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสมที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์

Cho และคณะ[17] ศึกษากระบวนการเคมีคัลลูปิงสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ กระบวนการนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่าง

ของตัวพาทออกซิเจนที่ผลิตจากเหล็กออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ ทองแดงออกไซด์ และ แมงกานีสออกไซด์ ที่ถูกใช้ร่วมกับ อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวรองรับ จากการทดลองพบว่า ตัวพาทออกซิเจนที่ผลิตจากนิกเกิลออกไซด์และทองแดงออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์แสดงให้เห็น ว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ในขณะที่เหล็กออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำเช่นกัน แต่เหล็กออกไซด์บนอะลูมิเนียมออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าเกิดการรวมตัวกัน รวมทั้ง ทองแดงออกไซด์ก็จับรวมเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นอาจจะไม่เหมาะที่จะเป็นตัวพาทออกซิเจน ตัวพาทออกซิเจนที่ผลิตจากนิกเกิลออกไซด์มีอัตราการรีดักชันสูงสุด แต่แสดงความแข็งแรงที่จำกัด โดยถ้าสามารถเพิ่มความแข็งแรงของอนุภาคได้ มีแนวโน้มมากที่สุดที่จะนำมาใช้เป็นตัวพาทออกซิเจน

Forutan และคณะ[18] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโลหะออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินามาเป็นตัวพาทออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการเคมีคลูบิงโดยมีมีเทนเป็นเชื้อเพลิง โลหะที่ใช้ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ และ ทองแดง กระบวนการนี้จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ เครื่องปฏิกรณ์อากาศ และเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ซึ่งตัวพาทออกซิเจนอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เบดหนึ่ง มีการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวพาทออกซิเจนก่อนและหลังกระบวนการ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน(EDX) นอกจากนี้ได้มีการตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งานได้แก่ อุณหภูมิ เวลาและประเภทของตัวพาทออกซิเจน ผลการศึกษา พบว่า ตัวพาทออกซิเจนที่ผลิตจากโลหะที่ต่างกันมีอายุการใช้งานที่แตกต่างกันไปในเครื่องปฏิกรณ์อากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของการดูดซับและคายออกซิเจนในแต่ละขั้นตอน ผลการทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าตัวพาทออกซิเจนที่ทำมาจากเหล็กออกไซด์มีความต้านทานต่อการเกิดหลอมเหลวรวมกันสูงสุดและความสามารถในการดูดซับออกซิเจนสูงสุดในโลหะทั้งหมดที่กล่าวถึง นอกจากนี้ยังพบว่าทองแดงมีความสามารถในการขนส่งออกซิเจนแต่ความต้านทานต่อการหลอมเหลวรวมกันและการรวมตัวกันค่อนข้างต่ำ จึงเลือกใช้เหล็กเป็นตัวพาทออกซิเจนที่ดีที่สุด

Wei และคณะ[19] ศึกษาตัวพาทออกซิเจนโลหะเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา และเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาที่มีการเติมโลหะนิกเกิลลงไปเล็กน้อย (ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เตรียมโดยการผสมเชิงกลและวิธีการเคลือบผง ทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวพาทออกซิเจนที่สังเคราะห์ได้ด้วย XRD XRF SEM BET และ TPR นอกจากนี้ความสามารถของการเกิดปฏิกิริยา

รีดอกซ์และประสิทธิภาพการทำงานของเคมีคัลลูบิงเพื่อการผลิตสารใหม่ของมีเทนของตัวพาออกซิเจนได้ทำการศึกษาใน TGA และเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นที่สังเกตว่าการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของตัวพาออกซิเจนจะดีขึ้นเมื่อทำการเพิ่มโลหะนิกเกิลเข้าไป เพราะผลของการทำงานร่วมกันระหว่างนิกเกิลออกไซด์และเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาไปเป็น NiFe_2O_4 และ NiAl_2O_4 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มโลหะนิกเกิลไปไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะไม่เห็นร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เพราะนิกเกิลที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวของมีเทนไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอน ผลจาก SEM และ BET แสดงให้เห็นว่าอนุภาค NiFe_2O_4 และ NiAl_2O_4 กระจายเข้าไปในช่องว่างของอนุภาคเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาในช่วงของการเตรียมสาร นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อการหลอมเหลวของตัวอย่างเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของนิกเกิลเข้าไป ผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณนิกเกิลลงบนตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินาทำให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายรอบ

Yang และคณะ[20] ศึกษาเกี่ยวกับแร่เหล็กซึ่งเป็นตัวพาออกซิเจนที่มีราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับกระบวนการเคมีคัลลูบิงแบบเผาไหม้ ถึงแม้ว่าแร่เหล็กจะใช้ในการทำปฏิกิริยาวนรอบซ้ำได้หลายรอบแต่ก็มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาในระดับต่ำในกระบวนการเคมีคัลลูบิงแบบเผาไหม้ แร่ทองแดงมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิที่สูง (900-1000 องศาเซลเซียส) ในระหว่างทำปฏิกิริยาได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผสมแร่เหล็กและทองแดงเข้าด้วยกันนำมาใช้เป็นตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคัลลูบิงแบบเผาไหม้โดยใช้แก๊สสังเคราะห์ และถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสเพื่อทดสอบการรีดอกซ์ใน TGA พบว่าผลของการทำงานร่วมกันระหว่างแร่เหล็กและแร่ทองแดง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่ออัตราส่วนการผสมของแร่ทองแดงอยู่ที่ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ขณะที่อัตราส่วนผสมของแร่ทองแดงเป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยารีดอกซ์ของตัวพาออกซิเจนที่เป็นสารผสม จะไม่ดูดความร้อนอีกต่อไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดได้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบปฏิกิริยาของตัวพาออกซิเจนที่เป็นสารผสมที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีข้อสังเกตว่าตัวพาออกซิเจนที่เป็นสารผสมระหว่างแร่เหล็กกับแร่ทองแดง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีการเกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้น ดังนั้นสารผสมระหว่างแร่เหล็กและแร่ทองแดงจะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่สูง สามารถทำปฏิกิริยาวนซ้ำได้หลายรอบ มีราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการผสมโลหะมากกว่า 1 ชนิดในการเตรียมโลหะออกไซด์โดยมีโลหะหลักคือเหล็ก โลหะรองคือสังกะสี และมีอะลูมินาเป็นตัวรองรับ เพื่อใช้เป็นตัวพาออกซิเจนต่อประสิทธิภาพกับการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูป และนำสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของปริมาณตัวพาออกซิเจนและอุณหภูมิต่อการเผาไหม้ในกระบวนการเคมีคัลลูป ซึ่งจะทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ

3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.1.1 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) จากบริษัท Sigma-Aldrich
- 3.1.2 อะลูมินา (Al_2O_3) จากบริษัท Sigma-Aldrich
- 3.1.3 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากบริษัท QReC
- 3.1.4 ไนโตรเจน (N_2) 99.99% จากบริษัทแพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.5 ออกซิเจน (O_2) 99.99% จากบริษัทแพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.6 มีเทน (CH_4) 99.995% จากบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
- 3.1.7 อะลูมินาบอลชนิดไม่ว่องไว (inactive alumina) ขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร
- 3.1.8 ซิลิกาเจล จากบริษัทวิทยาศาสตร์ จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ทำจากแก้วควอทซ์ (quartz) ทนความร้อน มีความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 เซนติเมตร
- 3.2.2 อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ของมีเทน
- 3.2.3 อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ของไนโตรเจน

3.2.4 อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหล (mass flow controller) ของออกซิเจน

3.2.5 เตาเผาแบบท่อ (tube furnace)

3.2.6 อุปกรณ์ดักจับของเหลวที่ควบแน่นได้ (condensable liquid)

3.2.7 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก (bubble flow)

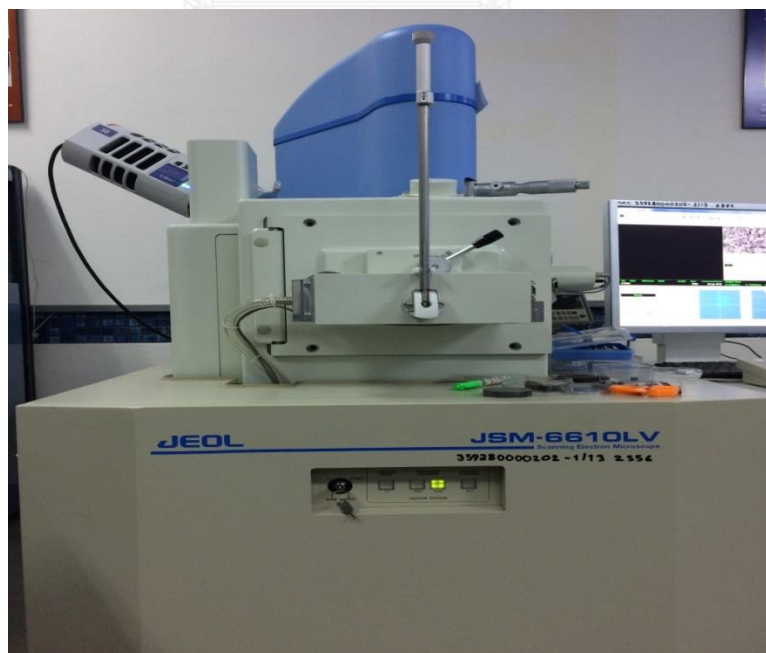
3.2.8 อุปกรณ์ดูดความชื้น

3.2.9 ใยแก้ว (quartz wool)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ 5000 เท่า ในการตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังการเผาไหม้ทั้งกรณีที่มีการผสมโลหะและไม่มีการผสมโลหะซึ่งคอกไซด์



รูปที่ 3.1 เครื่อง Scanning Electron Microscope

3.3.2 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET)

ใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพวออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ทั้งกรณีที่มีการผสมโลหะและไม่มีการผสมโลหะซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.2 เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

ใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ทำการทดสอบโดยใช้อัตราการสแกน (scan speed) 0.5 องศาต่อนาที มุมที่ใช้ในการทดสอบ 10 – 90 องศา วิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกในตัวพวออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังการเผาไหม้ทั้งกรณีที่มีการผสมโลหะและไม่มีการผสมโลหะซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.3 เครื่อง X-Ray Diffractometer, XRD

3.3.4 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี(X-ray fluorescence spectroscopy, XRF)

ใช้เครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy ยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 Tiger ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของตัวพลาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ทั้งกรณีที่มีการผสมโลหะและไม่มี การผสมโลหะซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.4 เครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy

3.3.5 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (Micro – Gas Chromatography, Micro GC)

ใช้เครื่อง Micro Gas Chromatography โมเดล 490 ยี่ห้อ Agilent ในการหาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยคอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์เป็นคอลัมน์ชนิด PoraPLOT Q (PPQ) ในงานวิจัยนี้ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 เครื่อง Micro – Gas Chromatography

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

ชนิดคอลัมน์	PoraPLOT Q (PPQ)
แก๊สพา (carrier gas)	ฮีเลียม
อุณหภูมิการฉีด (injection temperature)	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (oven column temperature)	80 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (detector)	TCD

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมตัวพาทออกซิเจน

สังเคราะห์ตัวพาทออกซิเจนจากเหล็กออกไซด์ โดยนำผงเหล็กออกไซด์และผงอะลูมินาในสัดส่วนที่ต่างกันมาผสมในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องเขย่าสาร หลังจากผสมเข้ากันดีแล้ว นำของผสมไปกรองน้ำออก นำของผสมที่เหลือไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง นำของผสมที่อบแห้งแล้วไปบดละเอียดและคัดขนาดให้ได้เล็กกว่า 0.42 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำของผสมไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

สำหรับกรณีที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ด้วย สัดส่วนการผสมของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 ที่มีผลการดำเนินการในฐานะตัวพาทออกซิเจนที่ดีที่สุดจะถูกนำมาใช้กับการผสมซิงค์ออกไซด์โดยวิธีทางกายภาพ (physical mixing) โดยซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการผสมมีร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ ดังนี้ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20

3.4.2 การศึกษาการใช้ตัวพาทออกซิเจนในการทำปฏิกิริยารีดักชัน

3.4.2.1 ชั่งน้ำหนักตัวพาทออกซิเจนเพื่อบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ก่อนบรรจุตัวพาทออกซิเจนลงในเครื่องปฏิกรณ์จะมีการรองรับด้วยใยแก้ว (quartz wool) และอะลูมินาบอล 2 กรัมโดย 1 กรัมวางบนใยแก้วและอีก 1 กรัม วางบนตัวพาทออกซิเจน

3.4.2.2 นำเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวพาทออกซิเจนใส่ในเตาเผาแบบท่อ

3.4.2.3 เปิดไนโตรเจนและมีเทนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ในอัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ รวมอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

3.4.2.4 เปิดสวิตช์เตาเผา รอจนเมื่ออุณหภูมิถึงที่กำหนด จึงเริ่มทำการวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง Micro GC โดยจะมีการนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ทุก 120 วินาที

3.4.2.5 ดำเนินการทดลองจนไม่พบปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์

3.4.2.6 ปิดมีเทนและปิดสวิทช์เตาเผา

3.4.2.7 รอกจนอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสจึงปิดไนโตรเจน

3.4.3 การศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง โดยทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง

3.4.3.1 ดำเนินการทดลองในส่วนปฏิกิริยารีดักชันตามการทดลองในข้อ 3.4.2

3.4.3.2 เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันเสร็จแล้วจะเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวพาออกซิเจนที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใส่ในเตาเผา

3.4.3.3 เปิดไนโตรเจนเข้าระบบด้วยอัตราการไหล 39.5 มิลลิลิตรต่อนาทีและเปิดออกซิเจนเข้าระบบด้วยอัตราการไหล 10.5 มิลลิลิตรต่อนาที รวมอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

3.4.3.4 เปิดสวิทช์เตาเผาถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

3.4.3.5 ดำเนินการทดลองจนความเข้มข้นของแก๊สขาออกคงที่

3.4.3.6 ปิดออกซิเจนและปิดสวิทช์เตาให้ความร้อน

3.4.3.7 รอกจนอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสจึงปิดไนโตรเจน

3.4.3.8 ชั่งน้ำหนักของตัวพาออกซิเจนเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

3.4.3.9 ทำปฏิกิริยารีดักชันต่อด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน นับเป็นหนึ่งรอบการทดลอง ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3.1 – 3.4.3.8 อีก 3 รอบ จนครบ 4 รอบการทดลอง

3.4.4 การศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการเผาไหม้โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจน

การทดลอง การเผาไหม้โดยใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจน มีตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังนี้

3.4.4.1 ผลของสัดส่วนการผสมอะลูมินาที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ (ร้อยละ 0, 20, 40, 60 และ 80) กับตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ ในปฏิกิริยารีดักชัน ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวพาออกซิเจน 1 กรัม

3.4.4.2 ผลของสัดส่วนการผสมซิงค์ออกไซด์ที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ (ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20) กับ ตัวพาออกซิเจนตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในสัดส่วนที่ดีที่สุดจากข้อ 3.4.4.1 ในปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณตัวพาออกซิเจน 1 กรัม

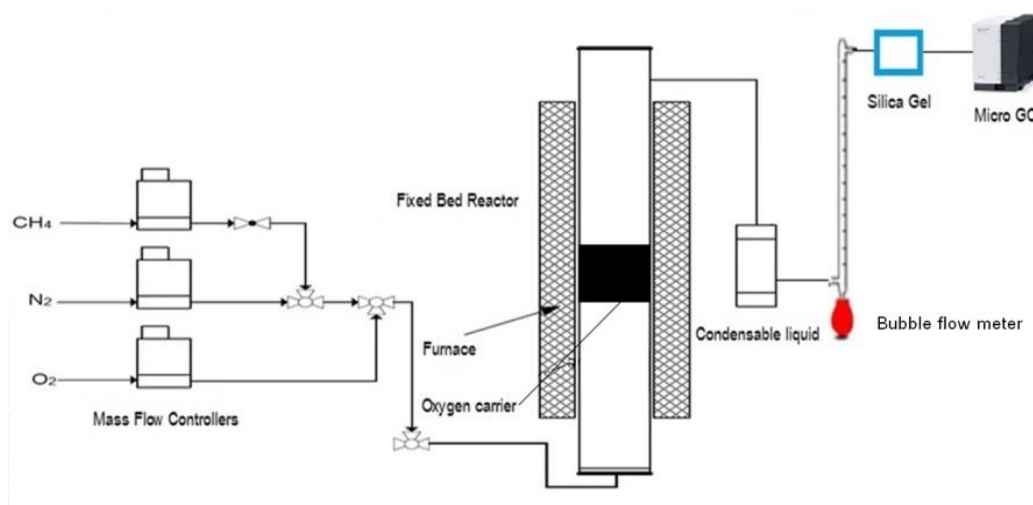
3.4.5 การศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในการเผาไหม้

นำตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ได้ผลดีที่สุดจากข้อ 3.4.4.2 ทำการศึกษา

3.4.5.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยารีดักชัน (900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส)

3.4.5.2 ปริมาณตัวพาออกซิเจน (0.8, 1 และ 1.2 กรัม)

3.4.5.3 ผลของการผสมซิงค์ออกไซด์กับตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองของการทดลองการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูป

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการผสมโลหะมากกว่า 1 ชนิดในการเตรียมตัวพาทอกซิเจนโดยมีโลหะหลักคือเหล็ก โลหะรองคือสังกะสี และมีอะลูมินาเป็นตัวรองรับ เพื่อใช้เป็นตัวพาทอกซิเจนต่อประสิทธิภาพกับการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง และนำสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของปริมาณตัวพาทอกซิเจน และอุณหภูมิต่อการเผาไหม้ในกระบวนการเคมีคลูบิง ซึ่งจะทำให้การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยเครื่องมือโครแมทโทกราฟีแก๊สโครมาโทกราฟี (Micro – Gas Chromatography, Micro GC) และมีการวิเคราะห์ลักษณะของตัวพาทอกซิเจนด้วยเครื่องมือต่างๆ ซึ่งการทดลองนี้สามารถแบ่งการทดลอง ออกเป็น 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) วิเคราะห์เบื้องต้นของตัวพาทอกซิเจนที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยดูปริมาณธาตุและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทอกซิเจน
- 2) หาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้เหล็กออกไซด์ผสมกับอะลูมินาเป็นตัวพาทอกซิเจนในการเผาไหม้
- 3) สัดส่วนที่เหมาะสมของตัวพาทอกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 จากข้อที่ (2) นำมาผสมกับซิงค์ออกไซด์เป็นตัวพาทอกซิเจนในการเผาไหม้เพื่อหาสัดส่วนการผสมซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการศึกษาต่อไป
- 4) ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้ตัวพาทอกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ ที่ดีที่สุดจากข้อที่ (3)
- 5) ผลของปริมาณของตัวพาทอกซิเจน โดยใช้ตัวพาทอกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ ที่ดีที่สุดจากข้อที่ (3)
- 6) ผลของการนำตัวพาทอกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ มาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง

4.1 ปริมาณธาตุและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทออกซิเจนที่สังเคราะห์ขึ้นมา

สารที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมตัวพาทออกซิเจน ด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ตัวพาทออกซิเจนที่เตรียมได้นำมาตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณของธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของสารเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบธาตุและปริมาณของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตัวพาทออกซิเจน	โครงสร้างผลึก	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (100 : 0)	Fe_2O_3	95.8
	Al_2O_3	0
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80 : 20)	Fe_2O_3	77.0
	Al_2O_3	19.6
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60 : 40)	Fe_2O_3	60.7
	Al_2O_3	36.3
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40 : 60)	Fe_2O_3	35.7
	Al_2O_3	62.1
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20 : 80)	Fe_2O_3	13.6
	Al_2O_3	85.3

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนน้ำหนักของ Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ในตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นไปตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากเหล็กออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นมีความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมินามีความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นตัวพาทออกซิเจนที่เตรียมได้จึงยังมีสิ่งปนเปื้อนทำให้ผลรวมของสัดส่วนไม่ได้ร้อยละ

จากสัดส่วนการผสมที่แน่นอนของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ จึงทำการวิเคราะห์หา พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทออกซิเจนด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (BET) รุ่น ASAP 2020 ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตัวพาทอกซิเจน	BET Surface Area (m^2/g)
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (100 : 0)	1.3270
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80 : 20)	5.3781
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60 : 40)	3.6114
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40 : 60)	4.8354
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20 : 80)	6.6835

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าตัวพาทอกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่มีอะลูมินาเป็นตัวรองรับจะมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น แต่เนื่องจากเหล็กเป็นโลหะหลักที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ การมีอะลูมินามากไป อาจไปลดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กออกไซด์ได้ ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาสัดส่วนในการผสมเหล็กออกไซด์กับอะลูมินาที่เหมาะสมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งจะอธิบายต่อในหัวข้อ 4.2

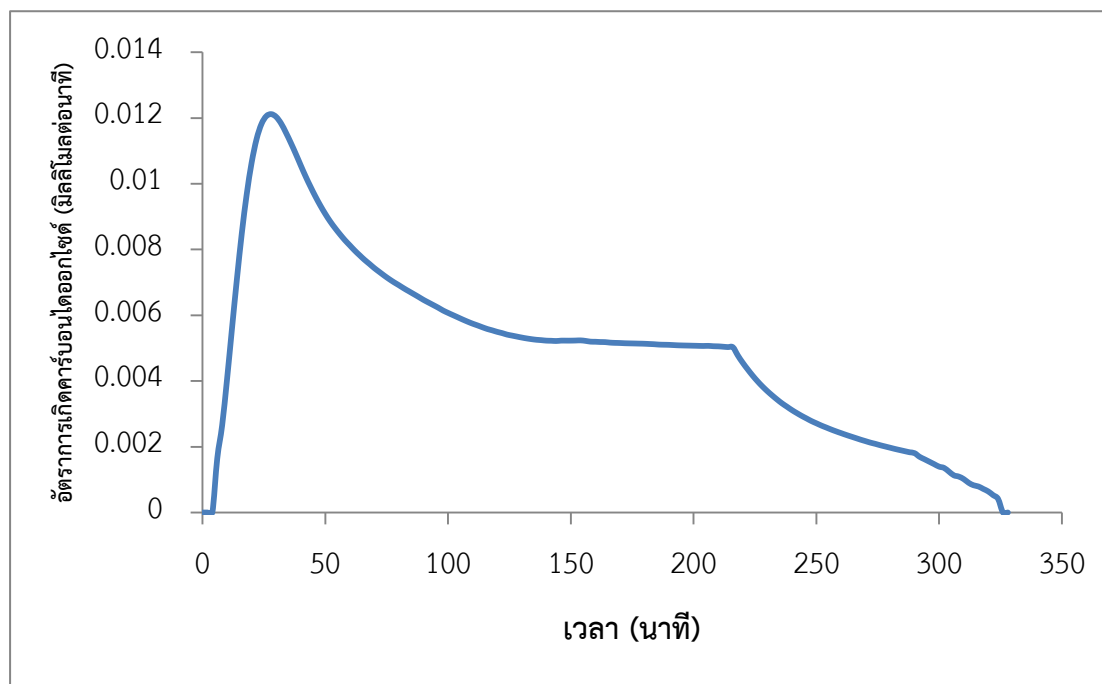
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตัวพาทอกซิเจนที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.4.1 จะถูกบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งเพื่อตรวจสอบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ในการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ จะควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ปริมาณของตัวพาทอกซิเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจน โดยในการทดลองทำที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาทอกซิเจนปริมาณ 1 กรัม และแก๊สเชื้อเพลิงเป็นการป้อนแก๊ส 2 ชนิดเข้าด้วยกันคือไนโตรเจนกับมีเทน โดยป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ในอัตราการไหล 40 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ รวมอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที และวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเพื่อมาวิเคราะห์หาความจุออกซิเจนของตัวพาทอกซิเจน

4.2.1 ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์

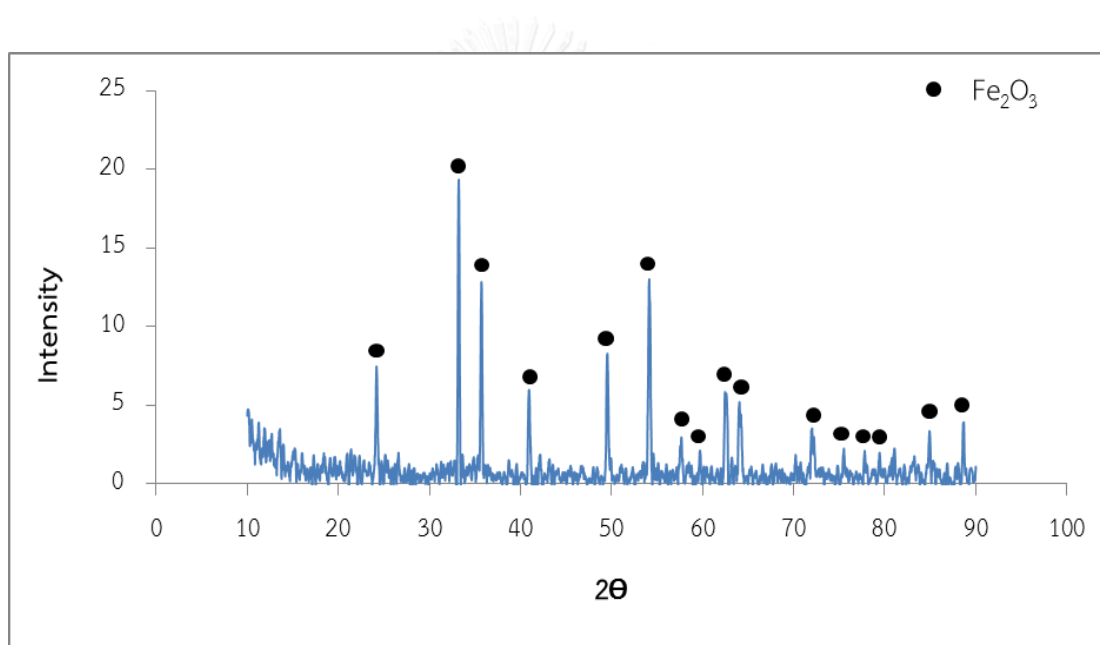
การศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยใช้ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ 1 กรัม ทำปฏิกิริยากับมีเทนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1



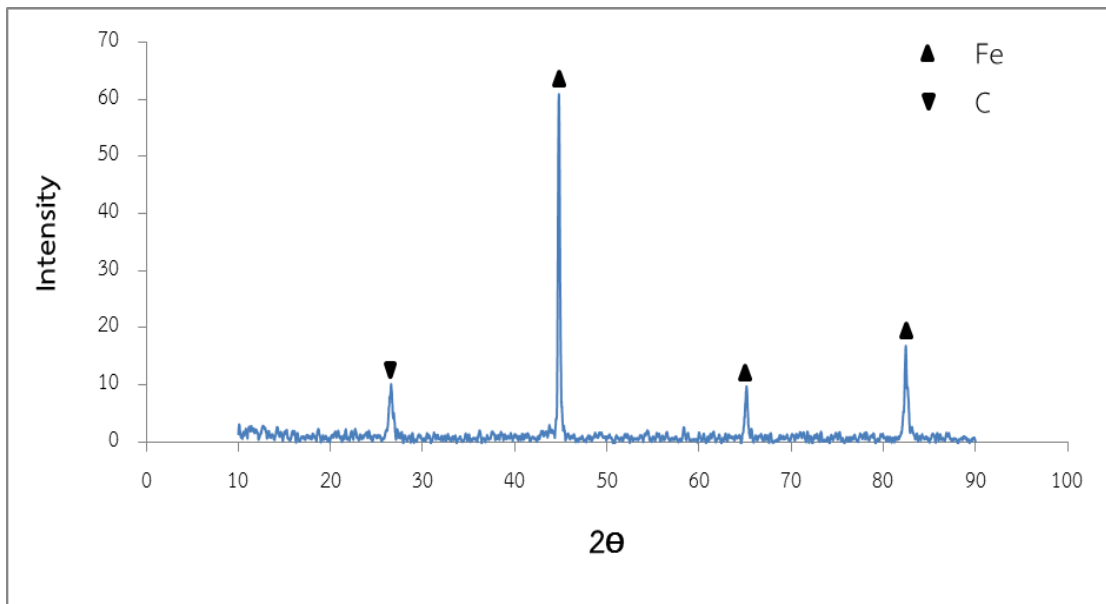
รูปที่ 4.1 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจนประเภทเหล็กออกไซด์

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจนประเภท เหล็กออกไซด์ โดยพิจารณาได้จากอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็น 1.645 มิลลิโมล คิดเป็นการใช้ออกซิเจนร้อยละ 35.1 ของออกซิเจนทั้งหมดที่มีในตัวพาออกซิเจน ซึ่งความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันแสดงถึงความสามารถการเป็นตัวพาออกซิเจนที่ดีได้ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel Reactor) แต่ถึงแม้เหล็กออกไซด์จะเป็นตัวพาออกซิเจนที่ดี ในงานวิจัยที่ผ่านมา[11] พบว่า การใช้งานเหล็กออกไซด์มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพเพราะเกิดการเกาะติดกันของโลหะ (sintering) ได้หลังการทำปฏิกิริยากับมีเทน ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำอะลูมินา (Al_2O_3) มาผสมเพื่อช่วยให้มีเสถียรภาพในการใช้งานที่นานขึ้น ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อที่ 4.2.2

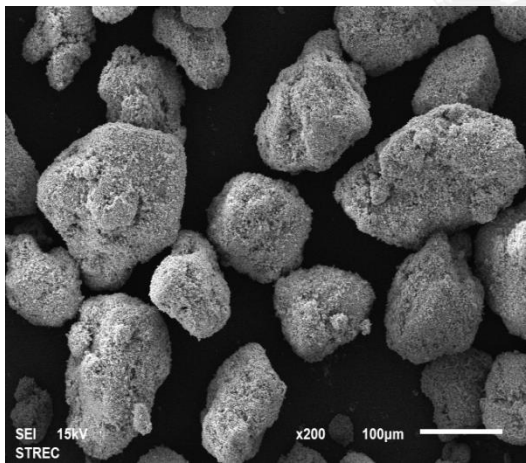
เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันแล้ว นำตัวพาทออกซิเจนก่อนและหลังผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกในตัวพาทออกซิเจนประเภทเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 - 4.3 และตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 - 4.5



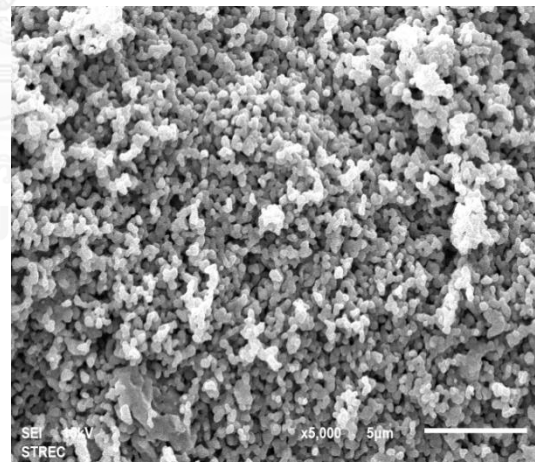
รูปที่ 4.2 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.3 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์

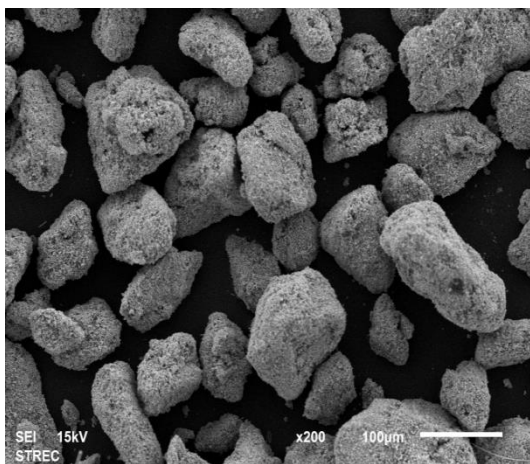


(ก)

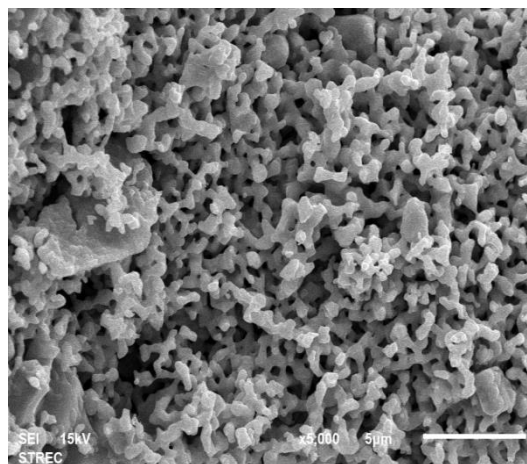


(ข)

รูปที่ 4.4 โครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.5 โครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจนประเภทเหล็กออกไซด์ ก่อนการทำปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งพบเห็นแต่เพียงรูปผลึกของเหล็กออกไซด์ ส่วนตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์หลังการทำปฏิกิริยารีดักชันแสดงในรูปที่ 4.3 จะพบผลึกของเหล็กที่เกิดจากเหล็กออกไซด์ที่มีการสูญเสียออกซิเจนไปในการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.1



ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นได้ทำการควบแน่นไปในกระบวนการแล้ว ก่อนการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์

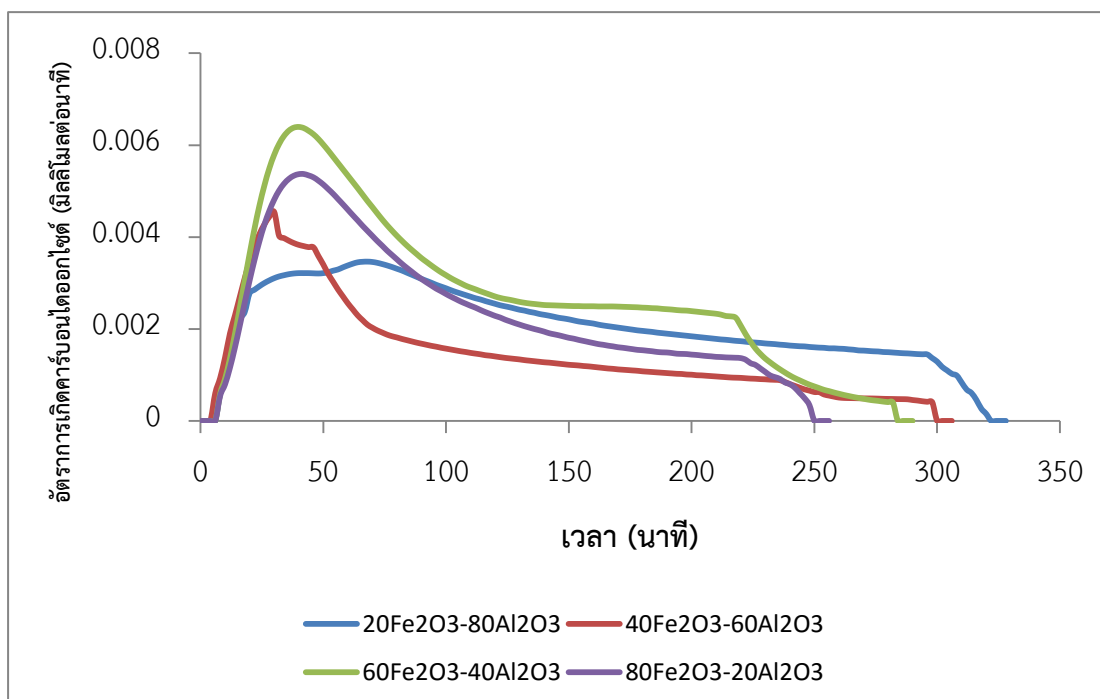
จากรูปที่ 4.3 มีข้อสังเกตว่า พบผลึกแกรไฟต์ (คาร์บอน) แสดงให้เห็นว่า จากการเผาไหม้มีคาร์บอนเกิดขึ้นและมีคาร์บอนเหลือจากการเผาไหม้มาเกาะอยู่บนตัวพาออกซิเจนหลังการทำปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งจะใช้อธิบายในส่วนของความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจากกราฟรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกกราฟจะขึ้นสูงที่สุด (High Peak) ซึ่งเกิดจากในช่วงแรกตัวพาออกซิเจนมีออกซิเจนอยู่มากและมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาอยู่มาก จากนั้นตัวพาออกซิเจนจะเสียออกซิเจนออกไป

ใช้ในการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน และเกิดการพอกของโค้กบนพื้นผิว ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของตัวพาออกซิเจนลดต่ำลง

จากรูปที่ 4.4 แสดงสัณฐานวิทยาของเหล็กออกไซด์ก่อนการทำปฏิกิริยาที่กำลังขยาย 200 เท่า จะเห็นว่าเหล็กออกไซด์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนคล้ายทรงกลมโดยมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อขยายไปที่ 5000 เท่า จะเห็นว่าไม่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเหล็กออกไซด์ แต่หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชัน เหล็กออกไซด์ที่กำลังขยาย 200 เท่าดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะพบว่าผิวดูขรุขระและมีรอยแตก ซึ่งเกิดจากความเครียดทางความร้อน (thermal stress)[21] และเมื่อขยายไปที่ 5000 เท่าจะเห็นว่าเกิดการรวมตัวเกาะติดกัน (sintering) ของเหล็กออกไซด์ ซึ่งจะไปลดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของตัวพาออกซิเจนได้ ดังนั้นจึงต้องหาตัวรองรับมาผสมเพื่อช่วยให้มีเสถียรภาพการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ซึ่งในที่นี้เลือกใช้อะลูมินา

4.2.2 ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

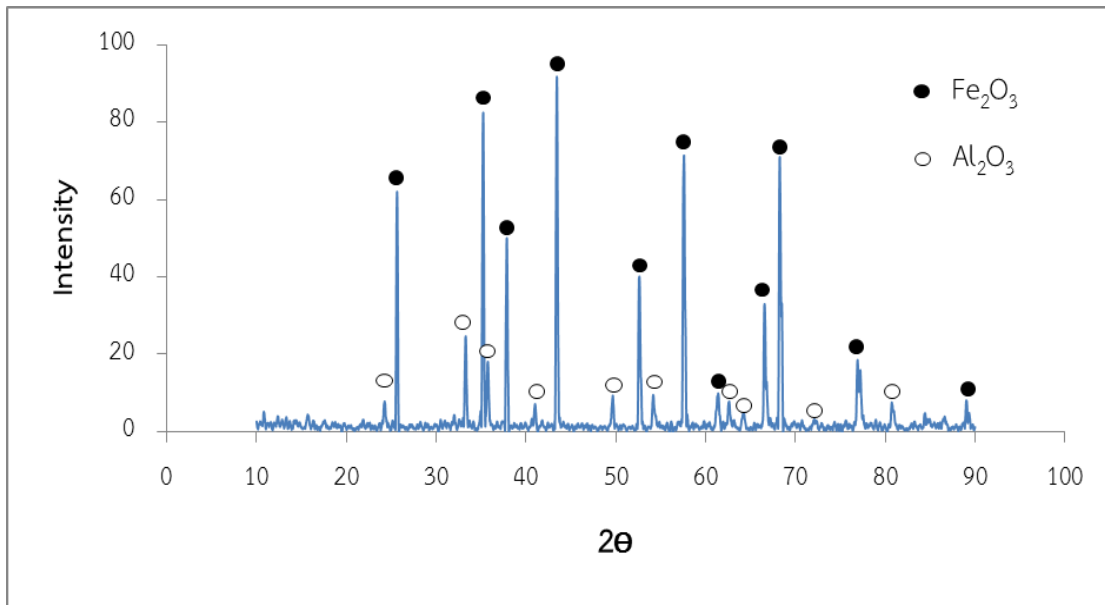
การศึกษาความสามารถของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยการผสมเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) กับอะลูมินา (Al_2O_3) และหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการผสมในที่นี้ อะลูมินาทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ (support material) เพื่อช่วยให้เหล็กออกไซด์มีเสถียรภาพการใช้งานที่ยาวนานขึ้น แต่ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวให้ออกซิเจนเหมือนเหล็กออกไซด์ การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการผสมสัดส่วนอะลูมินาที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ (ร้อยละ 20, 40, 60 และ 80) กับเหล็กออกไซด์ และนำไปทำปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวพาออกซิเจนปริมาณ 1 กรัม ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6



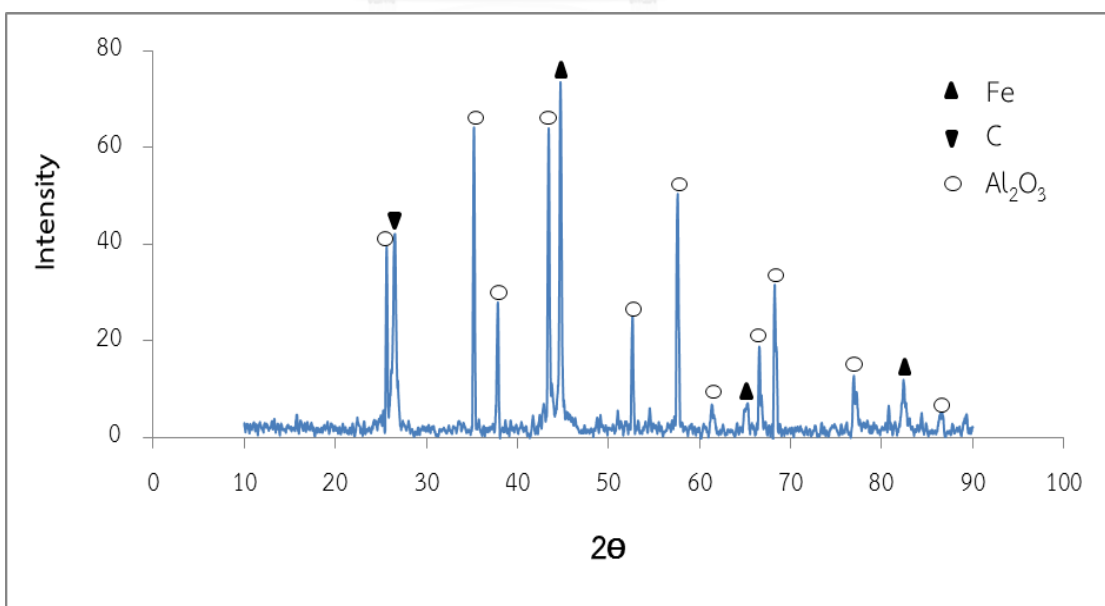
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สัดส่วนน้ำหนักแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.6 พบว่าตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีสัดส่วนการผสมของเหล็กผสมอยู่ร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนักพบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ แสดงถึงว่าตัวพาออกซิเจนมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีขึ้น แต่ที่ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 80 ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยกว่าสัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก พิจารณาจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและอัตราในการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า เหล็กออกไซด์เกิดการรวมตัวเกาะติดกัน (sintering) ในระหว่างการทำปฏิกิริยารีดักชันทำให้พื้นผิวของตัวพาออกซิเจนที่สามารถนำมาใช้เกิดปฏิกิริยาได้มีน้อยลง ยิ่งปริมาณของเหล็กออกไซด์ที่มากขึ้นส่งผลให้โอกาสการรวมกันเป็นก้อนยิ่งมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของตัวทำปฏิกิริยาไม่ได้ช่วยให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาดีขึ้นเสมอไป[11] ดังนั้นตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดคือที่ สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

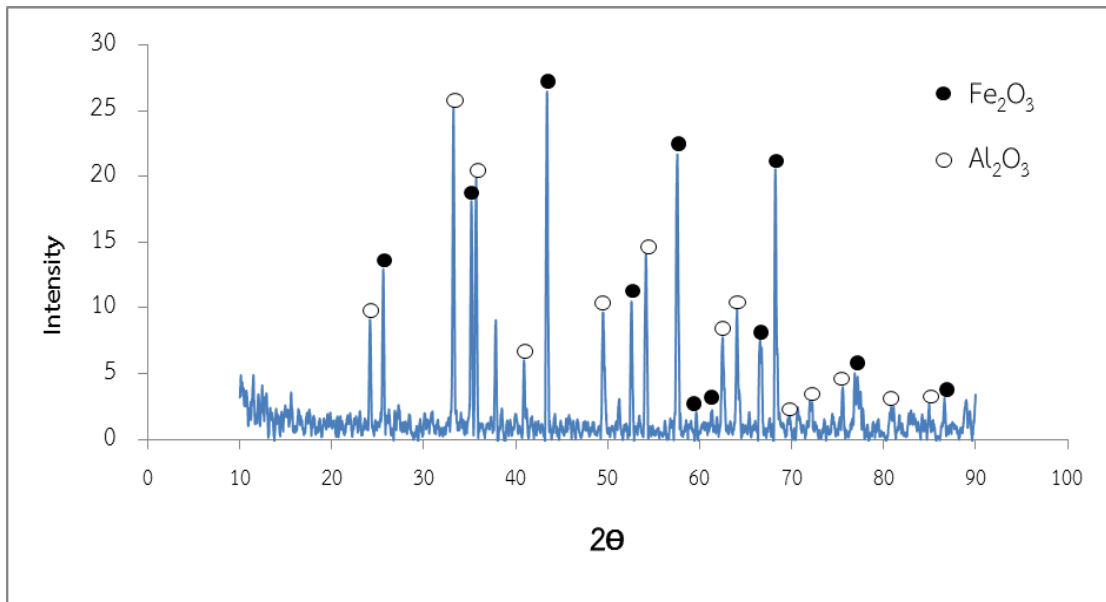
เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเสร็จแล้วและนำตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทั้งก่อนและหลังผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกในตัวพาทออกซิเจน เหล็กออกไซด์ก่อนและหลังการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 - 4.14



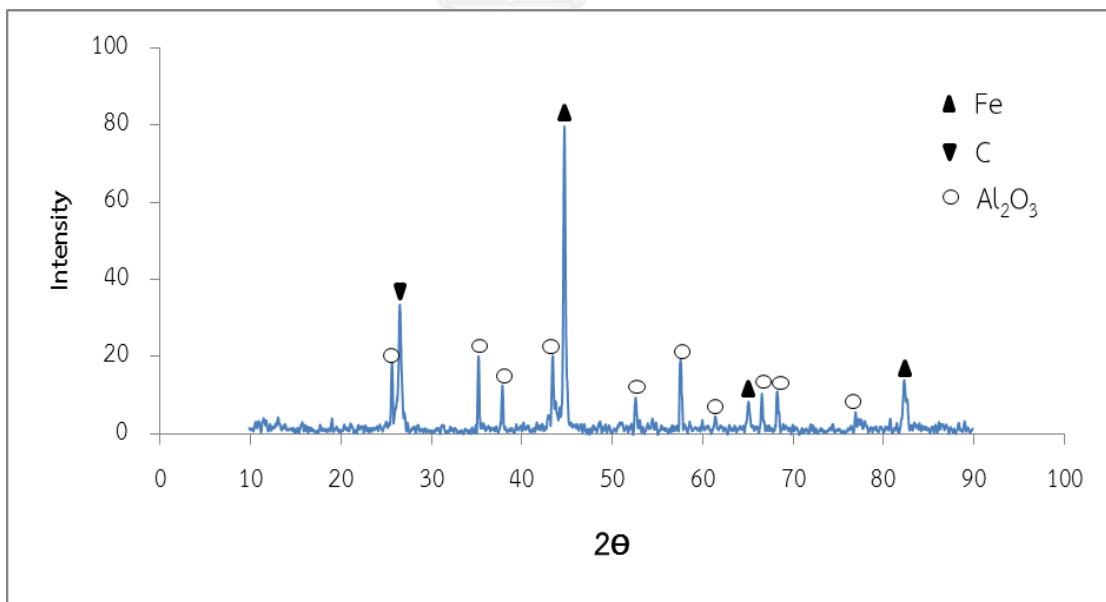
รูปที่ 4.7 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20/80)



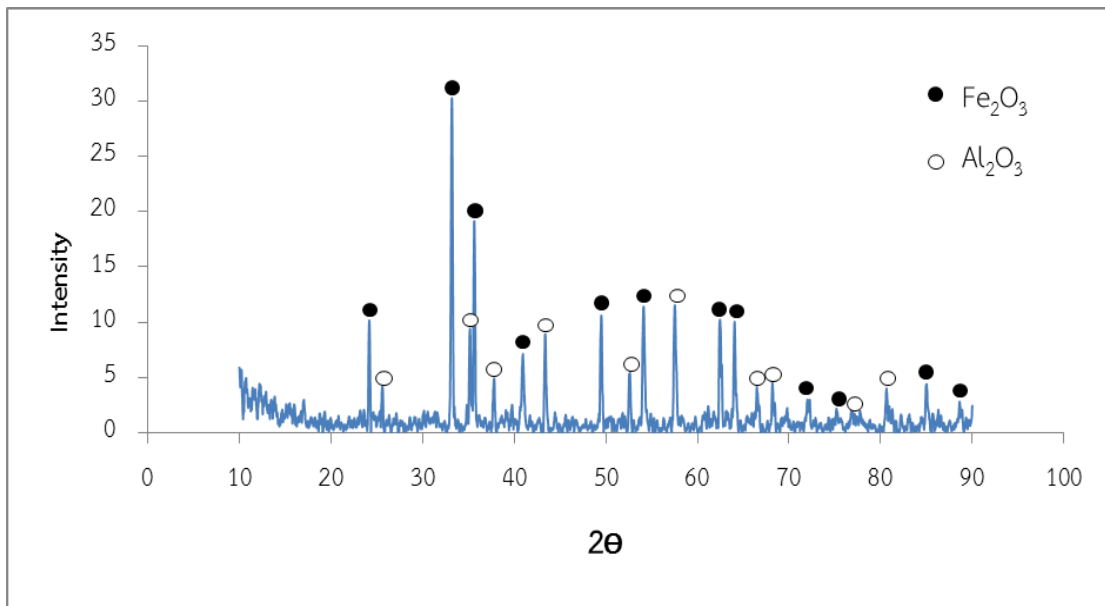
รูปที่ 4.8 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20/80)



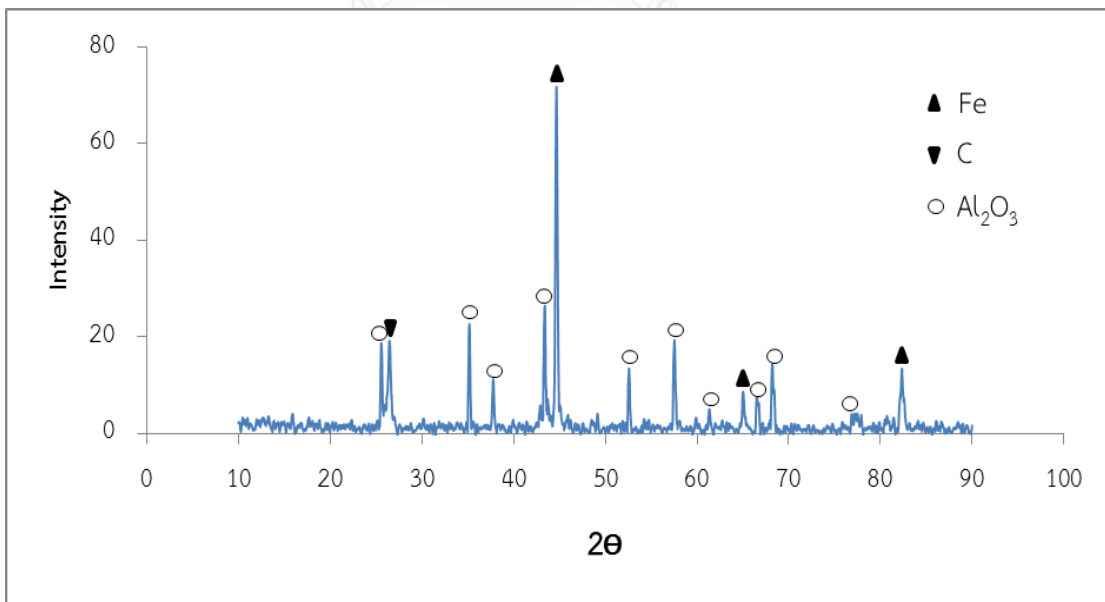
รูปที่ 4.9 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/60)



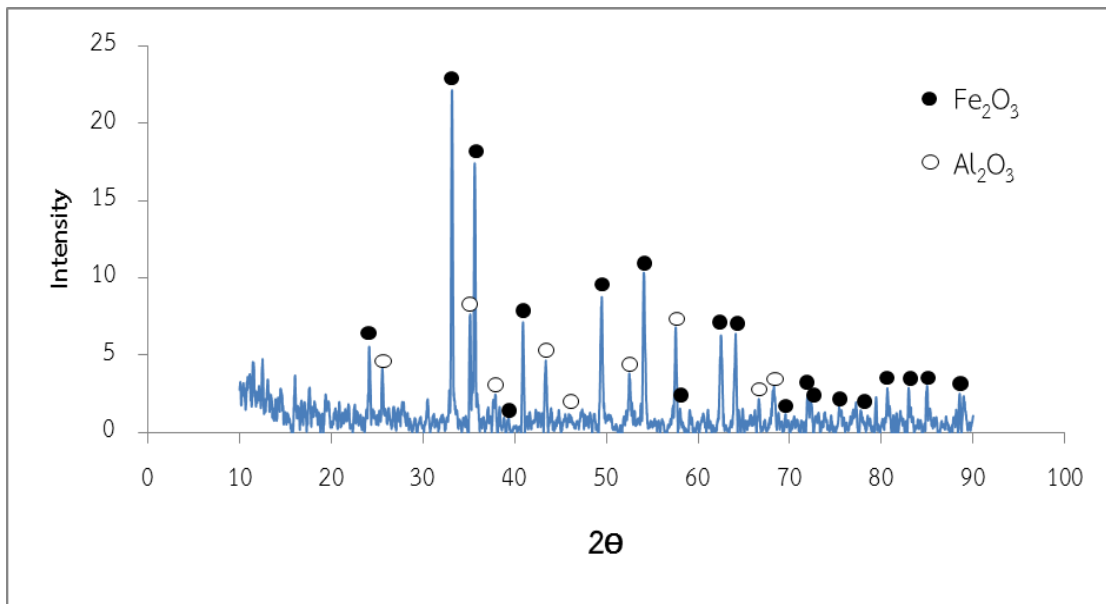
รูปที่ 4.10 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/60)



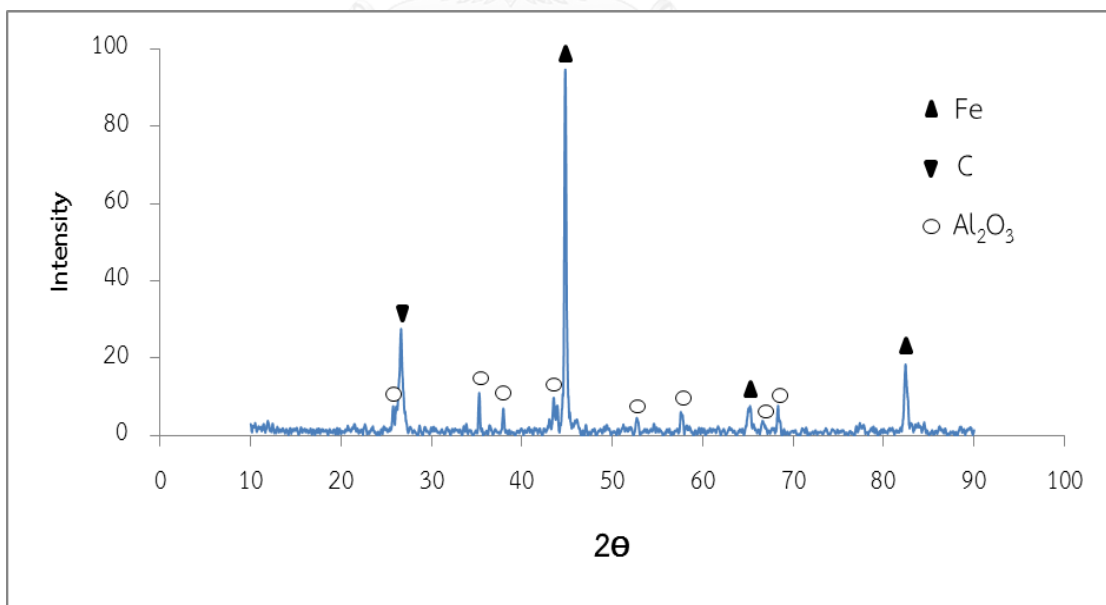
รูปที่ 4.11 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60/40)



รูปที่ 4.12 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60/40)

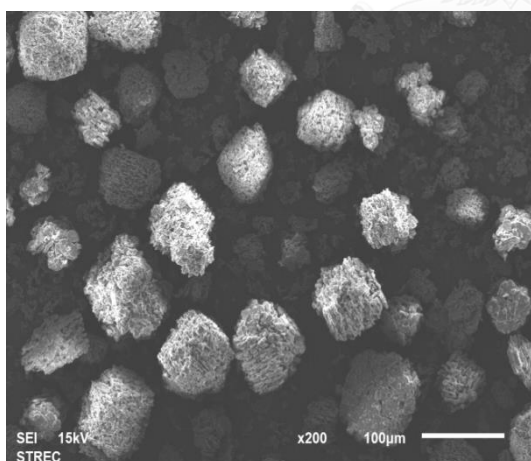


รูปที่ 4.13 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80/20)

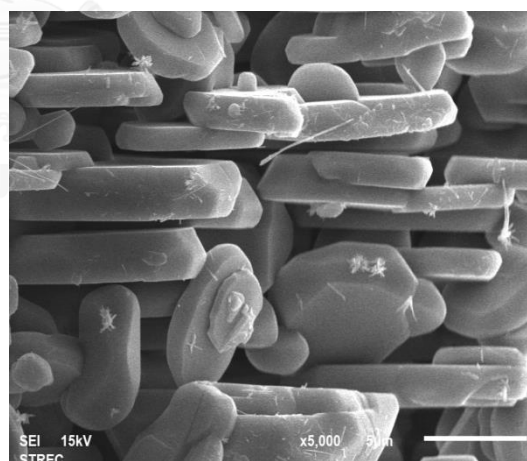


รูปที่ 4.14 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80/20)

จากผลของ XRD ในรูป 4.7-4.14 พบว่าสิ่งที่พบในเชิงโครงสร้างผลึกของตัวพวออกซิเจนมีลักษณะเหมือนๆ กันกล่าวคือ ก่อนการทำปฏิกิริยาไม่มีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเหล็กออกไซด์และอะลูมินาเพราะว่าอะลูมินาเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา แต่อะลูมินามีส่วนช่วยให้เหล็กออกไซด์มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากขึ้น และหลังการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน พบว่าจะมีผลึกของเหล็กที่เกิดจากการรีดิวซ์เหล็กออกไซด์กับมีเทน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำดังแสดงในสมการที่ 4.1 ดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้น และพบว่าผลึกของอะลูมินาที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เพราะอะลูมินาเป็นสารประกอบที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา แต่ช่วยทำให้เหล็กมีเสถียรภาพในการใช้งานที่ยาวนานขึ้น อีกทั้งยังพบการเกิดผลึกแกรไฟต์ (คาร์บอน) แสดงให้เห็นว่ามีการเกาะของคาร์บอนบนตัวพวออกซิเจนหลังการทำปฏิกิริยารีดักชันเกิดการพอกของไค้กบนพื้นผิวตัวพวออกซิเจนทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลง และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานตัวพวออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.23

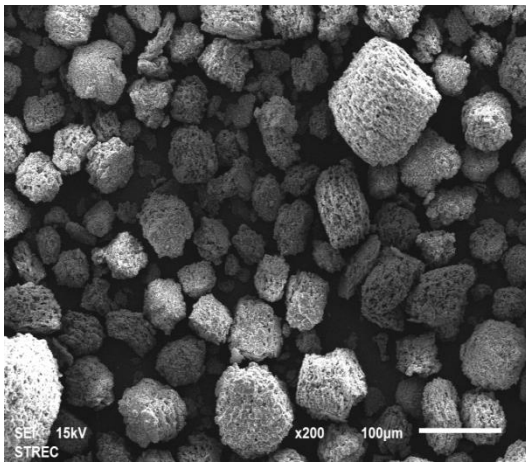


(ก)

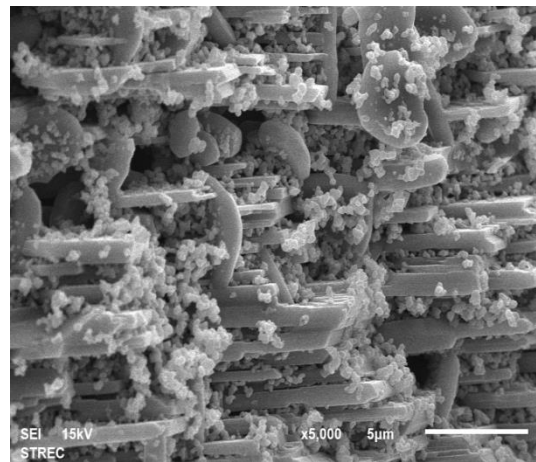


(ข)

รูปที่ 4.15 โครงสร้างสัณฐานอะลูมินา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

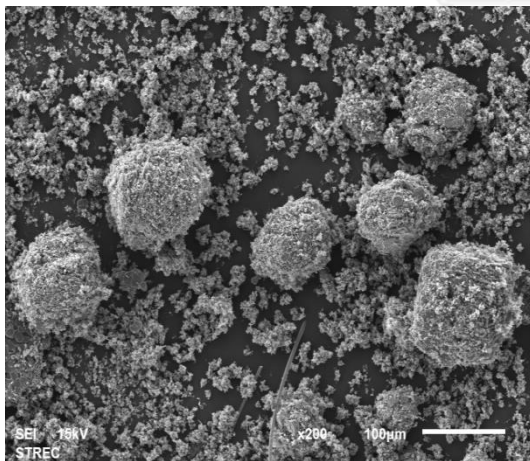


(ก)

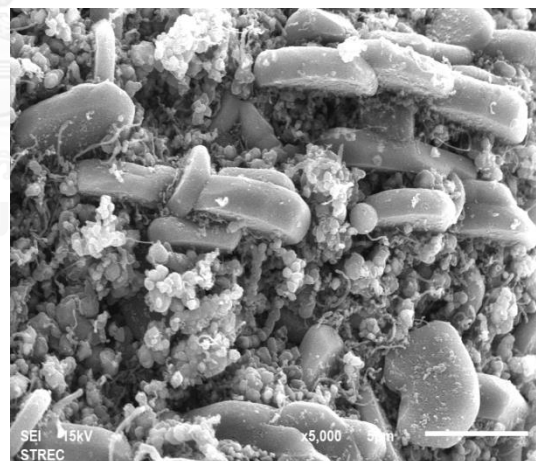


(ข)

รูปที่ 4.16 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20/80) ก่อนทำปฏิกิริยา
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

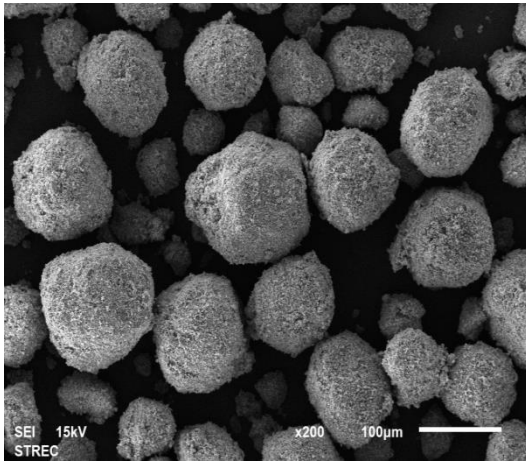


(ค)

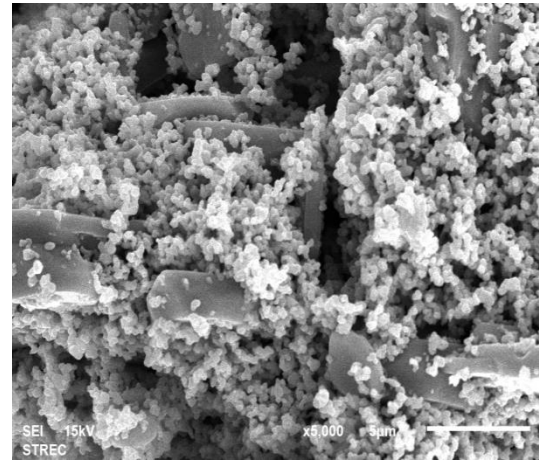


(ง)

รูปที่ 4.17 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20/80) หลังทำปฏิกิริยา
(ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

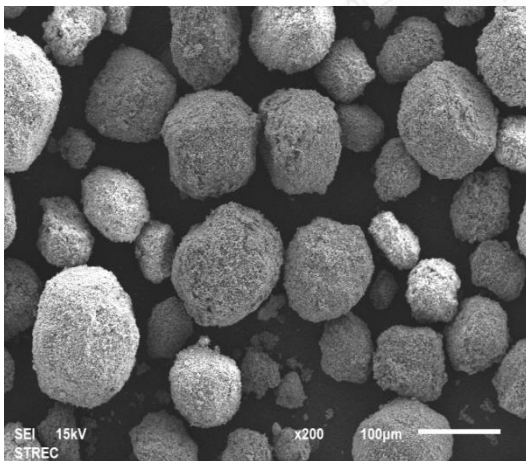


(ก)

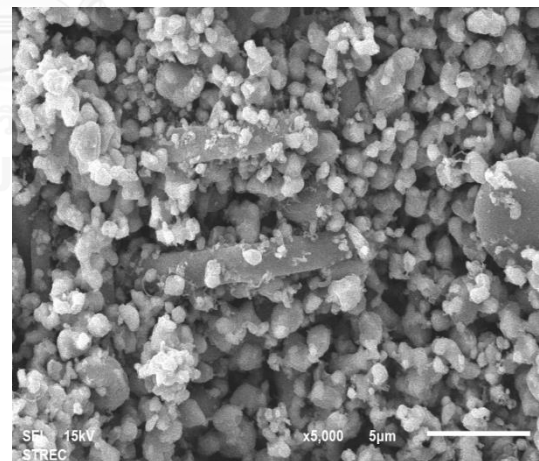


(ข)

รูปที่ 4.18 โครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/60) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

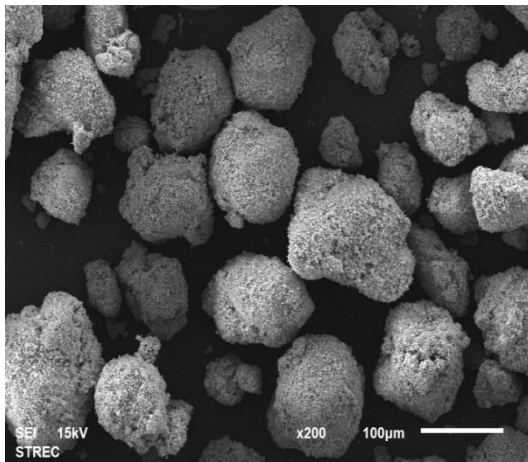


(ค)

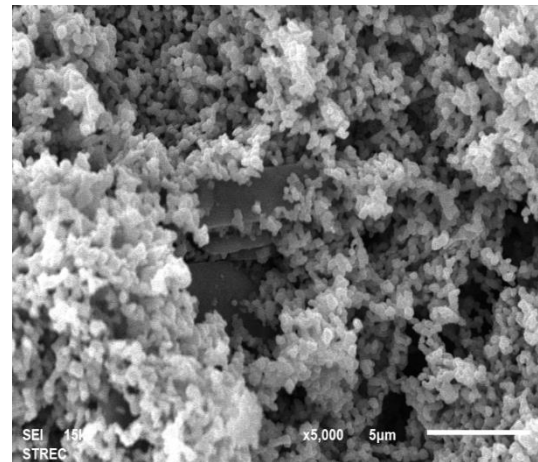


(ง)

รูปที่ 4.19 โครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/60) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

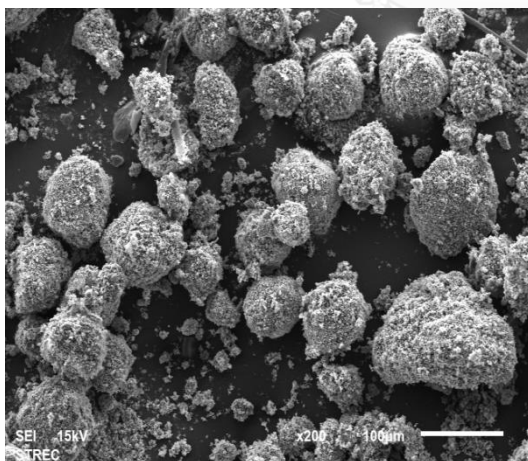


(ก)

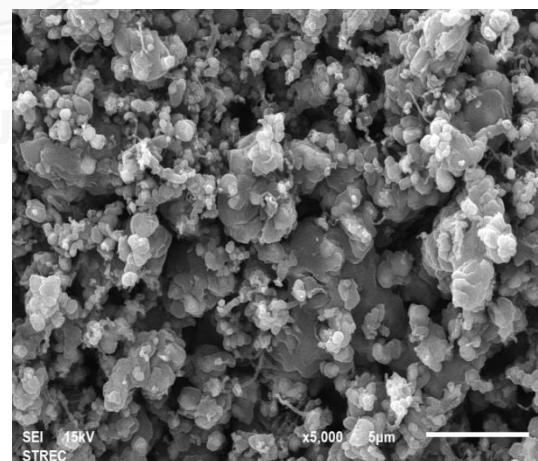


(ข)

รูปที่ 4.20 โครงสร้างสัณฐานตัวพออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60/40) ก่อนทำปฏิกิริยา
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

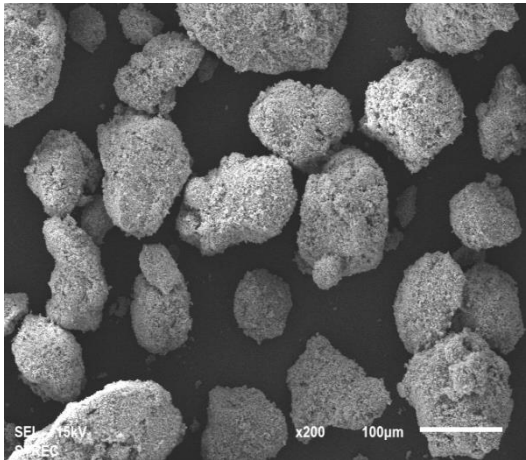


(ค)

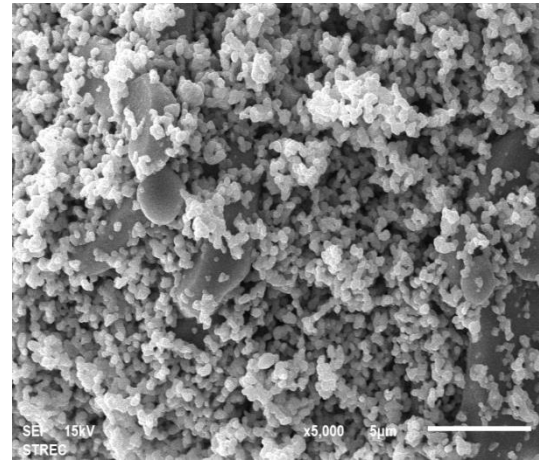


(ง)

รูปที่ 4.21 โครงสร้างสัณฐานตัวพออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60/40) หลังทำปฏิกิริยา
(ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

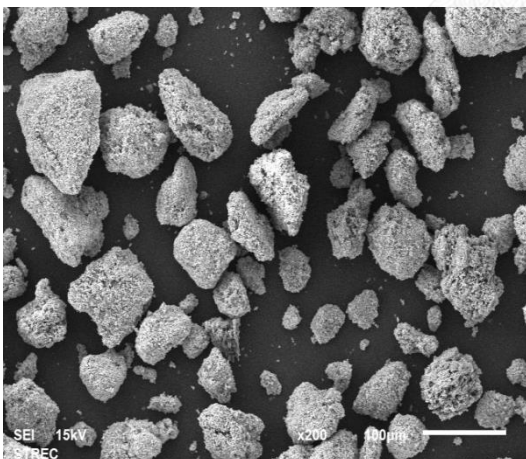


(ก)

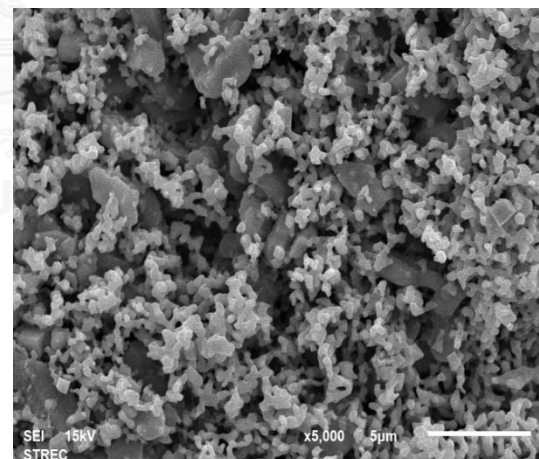


(ข)

รูปที่ 4.22 โครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80/20) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.23 โครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80/20) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

จากการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่ผสมอะลูมินาก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.15 – 4.23 อะลูมินาจะมีรูปทรงคล้ายทรงกลมขนาดเล็กจับตัวกัน มีขนาดที่ใกล้เคียงกันที่กำลังขยาย 200 เท่า เมื่อเพิ่มกำลังขยายขึ้นไป 5000 เท่า จะเห็นว่าอะลูมินามีรูปทรงเป็นแบบแท่งที่พื้นผิวเรียบ (smooth) เหมาะกับการนำมาใช้เป็นตัวรองรับ (support) ให้เหล็กออกไซด์มาเกาะเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา และในกรณีที่ตัวพาทออกซิเจนผสมอะลูมินาที่สัดส่วนร้อยละ 40 ถึง 80 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า โครงสร้างพื้นฐานก่อนการทำปฏิกิริยามีรูปทรงคล้ายทรงกลมขนาดเล็ก ขนาดใกล้เคียงกัน เพราะอะลูมินาเป็นตัวรองรับที่ให้เหล็กมาเกาะ ทำให้เหล็กมีพื้นผิวและมีรูปทรงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่กรณีของการผสมอะลูมินาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า โครงสร้างพื้นฐานมีรูปทรงที่ไม่ค่อยกลมเหมือนกรณีที่มีปริมาณอะลูมินามากๆ แต่ทุกสัดส่วนเมื่อส่องที่กำลังขยาย 5000 เท่า จะเห็นว่าเหล็กไปเกาะอยู่บนอะลูมินา ซึ่งอะลูมินาจะช่วยในเรื่องของเสถียรภาพการใช้งานของเหล็กได้ โดยดูจากหลังการทำปฏิกิริยา ตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่มีการผสมอะลูมินาร้อยละ 40, 60 และ 80 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าจะไม่เกิดการรวมตัวเกาะติดกัน (sintering) ของเหล็กออกไซด์ เพราะว่าอะลูมินาทำหน้าที่ช่วยยับยั้งการรวมตัวกันของเหล็กออกไซด์ ทำให้มีพื้นผิวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันจึงดีตามด้วย และอะลูมินาไม่เกิดการเสื่อมสภาพ แต่ยังคงสภาพเดิมได้ แต่สำหรับตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่มีการผสมอะลูมินาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าเกิดการรวมตัวกันของเหล็กออกไซด์ เนื่องจากปริมาณเหล็กออกไซด์มากทำให้มีโอกาสในการเกิดการรวมตัวกันได้มากกว่า ผลคือทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันลดลง จึงเป็นเหตุผลที่ตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 ที่มีสัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนักผสมกับอะลูมินาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยกว่า สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ดังนั้นหลังจากที่ทำการทดลองปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมของเหล็กออกไซด์และอะลูมินาแล้ว ผลที่ได้คือตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3 ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดคือที่ สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ขั้นตอนต่อไปคือนำสัดส่วนที่เหมาะสมนี้ที่มี อะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ไปศึกษาโดยทำการผสมกับซิงค์ออกไซด์เพื่อดูความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาต่อไป

4.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์

จากหัวข้อที่ 4.2 ที่ได้ทำการศึกษาตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ได้ทราบถึงสัดส่วนของการผสมที่เหมาะสมของเหล็กออกไซด์กับอะลูมินาเป็นร้อยละ 60 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการนำโลหะออกไซด์มาผสมกันจะทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของตัวพาออกซิเจนดีขึ้น ที่ผ่านมายังไม่เคยมีงานวิจัยใดทำการผสม เหล็กออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์เข้าด้วยกันเพื่อนำมาใช้เป็นตัวพาออกซิเจนในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง สาเหตุที่เลือกใช้ซิงค์ออกไซด์มาผสม เพราะซิงค์ (Zn) หรือสังกะสี เป็นธาตุทรานซิชันที่อยู่ในคาบเดียวกับ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) และแมงกานีส (Mn) ซิงค์มีราคาถูก หาได้โดยทั่วไป มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อีกทั้งซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีจุดเดือดที่สูง มีเสถียรภาพทางความร้อน จึงเลือกซิงค์ออกไซด์ มาเป็นโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการผสม ซึ่งในการเตรียมตัวพาออกซิเจนยังคงใช้วิธีการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ตัวพาออกซิเจนที่เตรียมมาได้ทำการตรวจสอบองค์ประกอบและปริมาณของธาตุ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของสารเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) ผลที่ได้แสดงดังในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบธาตุและปริมาณของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตัวพาทออกซิเจน	โครงสร้างผลึก	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55 : 5 : 40)	Fe_2O_3	52.2
	ZnO	5.07
	Al_2O_3	39.9
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50 : 10 : 40)	Fe_2O_3	50.5
	ZnO	10.6
	Al_2O_3	36.3
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40)	Fe_2O_3	42.8
	ZnO	14.7
	Al_2O_3	40.4
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40 : 20 : 40)	Fe_2O_3	39.7
	ZnO	20.8
	Al_2O_3	37.4

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์) และอะลูมินาในตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นไปตามที่ ต้องการ ดังนั้นการเตรียมตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ด้วยวิธีทางกายภาพ(physical mixing) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการเตรียมตัวพาทออกซิเจน

เมื่อเตรียมโลหะผสมสำหรับตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ได้สัดส่วนตามที่กำหนด แล้ว ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทออกซิเจนด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (BET) รุ่น ASAP 2020 ผลที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

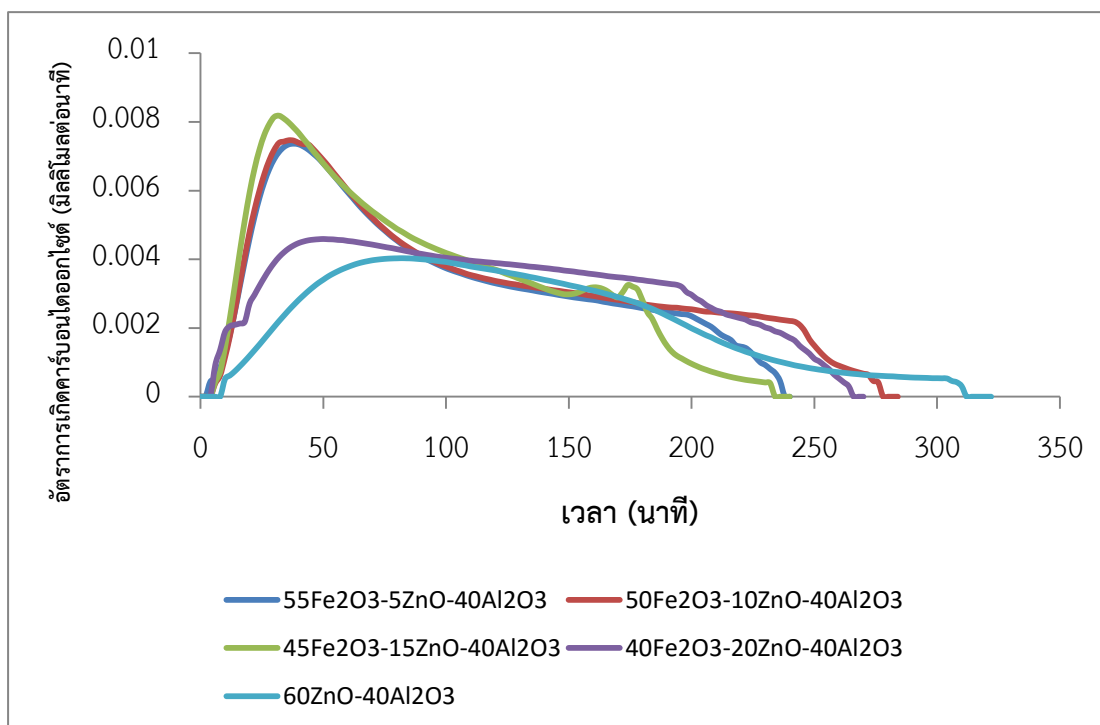
ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตัวพาทออกซิเจน	BET Surface Area (m^2/g)
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55 : 5 : 40)	4.3090
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50 : 10 : 40)	2.3469
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40)	8.2973
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40 : 20 : 40)	5.4046

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ จะมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่มากกว่าเหล็กออกไซด์ และจากตารางจะเห็นว่า $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผสมอยู่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาสัดส่วนในการผสม $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อ 4.3.1

4.3.1 การวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

จากหัวข้อที่ 4.2 สัดส่วนที่เหมาะสมของการผสมระหว่างเหล็กออกไซด์กับอะลูมินา $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพื่อใช้เป็นตัวพาทออกซิเจนคือร้อยละ 60 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ขั้นตอนต่อไปคือนำซิงค์ออกไซด์มาผสมตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการผสมมีร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ ดังนี้ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และนำตัวพาทออกซิเจนไปทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวพาทออกซิเจนปริมาณ 1 กรัม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยป้อนแก๊สเชื้อเพลิงในอัตราการใช้ 50 มิลลิลิตรต่ออนาที เป็นไนโตรเจนและมีเทน 40 และ 10 มิลลิลิตรต่ออนาที ตามลำดับ จากนั้นทำการเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ผลเป็นตัวแทนปริมาณออกซิเจนในตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผลวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.24

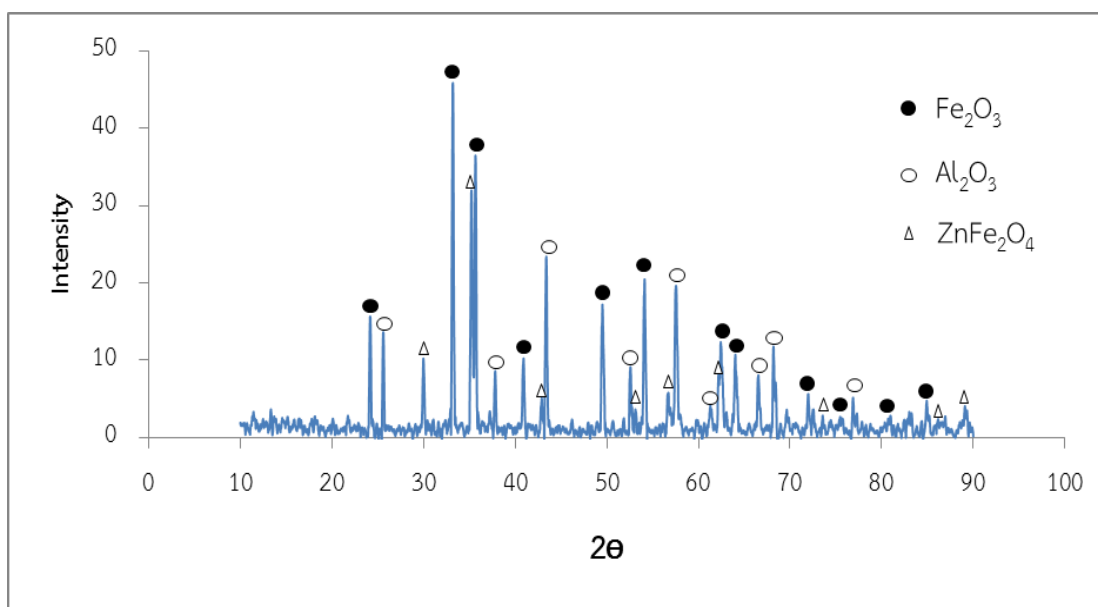


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สัดส่วนน้ำหนักแตกต่างกัน

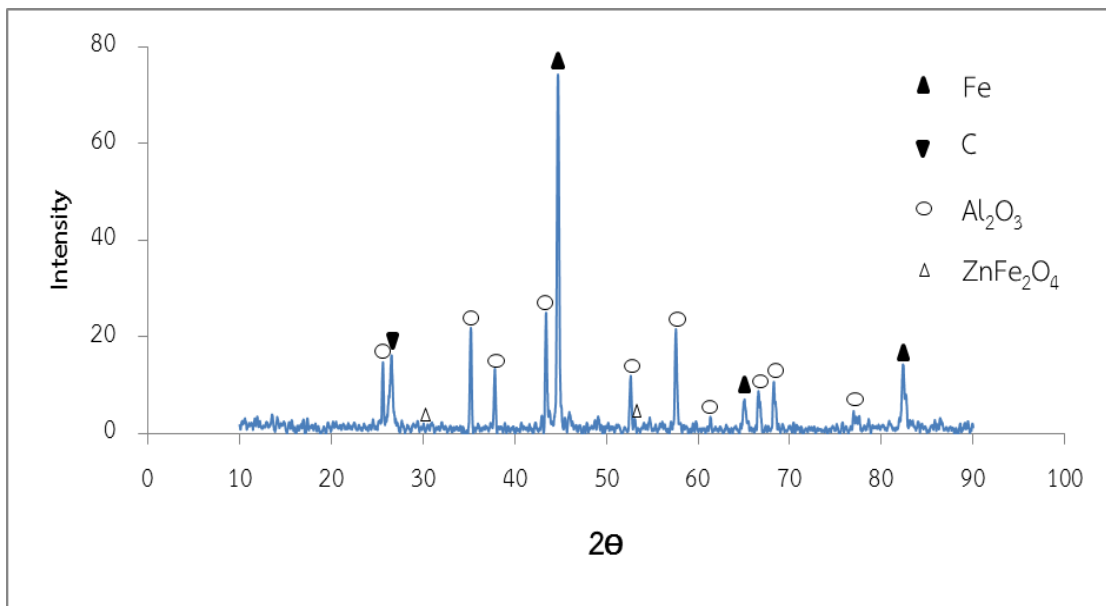
จากรูปที่ 4.24 พบว่าตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ระหว่างร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนักจะให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แต่ตัวพาออกซิเจนซึ่งผสมซิงค์ออกไซด์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าได้ปริมาณและอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบผลกับตัวพาออกซิเจนซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนักพบว่าตัวพาออกซิเจนชนิดหลังนี้ให้ปริมาณและอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์น้อย แสดงว่าซิงค์ออกไซด์ไม่ได้มีความสามารถในการรีดักชันเหมือนกับเหล็กออกไซด์ แต่ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีสัดส่วนการผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนัก แสดงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ แสดงว่าซิงค์ออกไซด์มีส่วนช่วยเสริมความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกไซด์ของโลหะ โดยที่ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มี

สัดส่วนการผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักจากรูปที่ 4.24 เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุด ซึ่งแสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงที่สุด

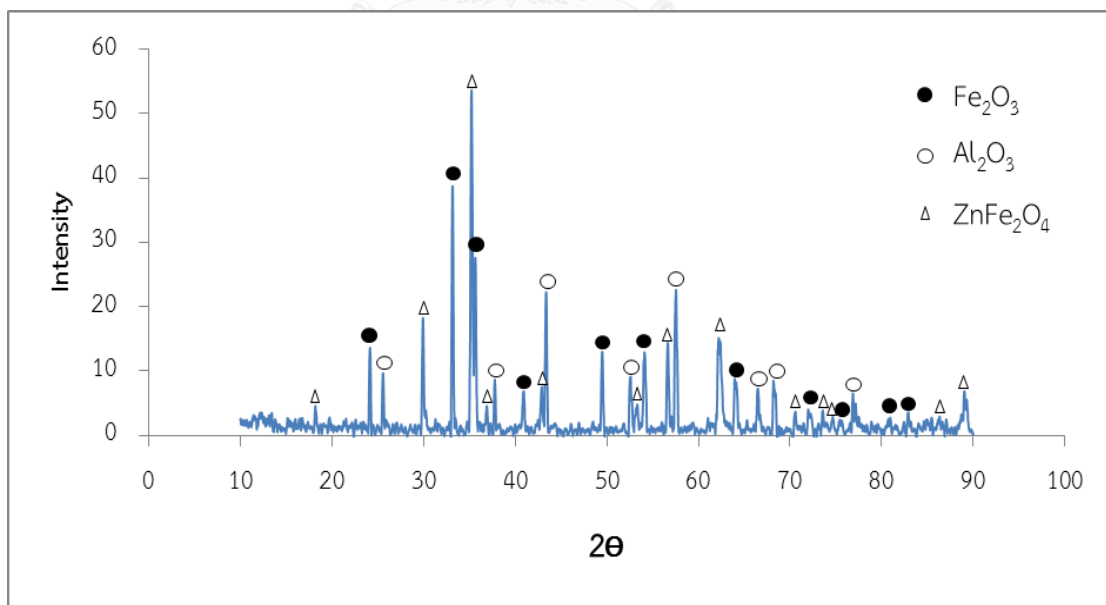
เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเสร็จแล้ว นำตัวพาทออกซิเจนก่อนและหลังผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกในตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ก่อนและหลังการเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 4.25 - 4.32



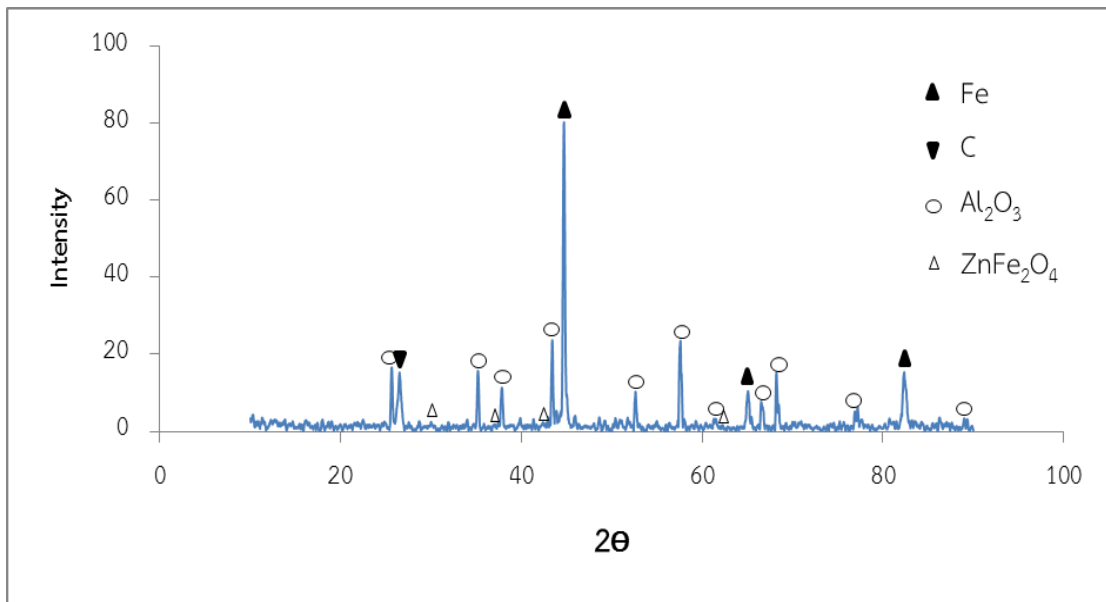
รูปที่ 4.25 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40)



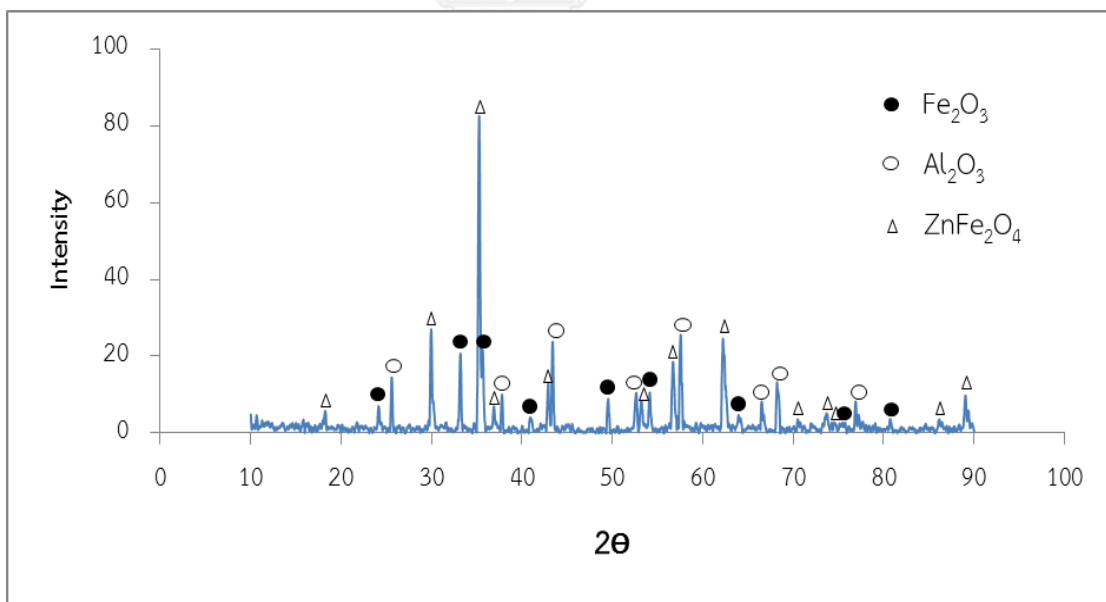
รูปที่ 4.26 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40)



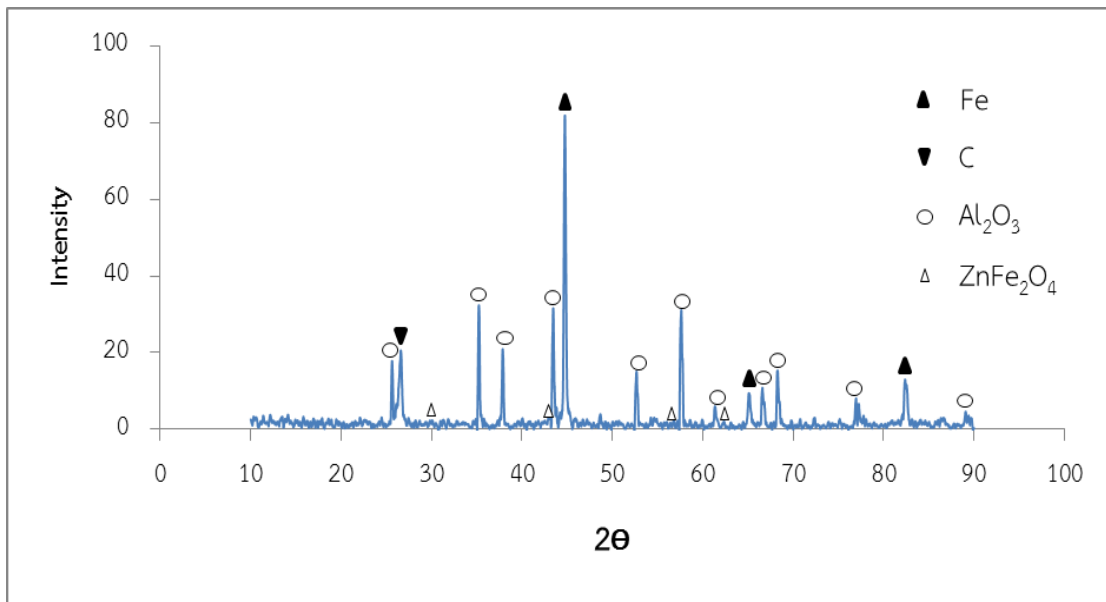
รูปที่ 4.27 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40)



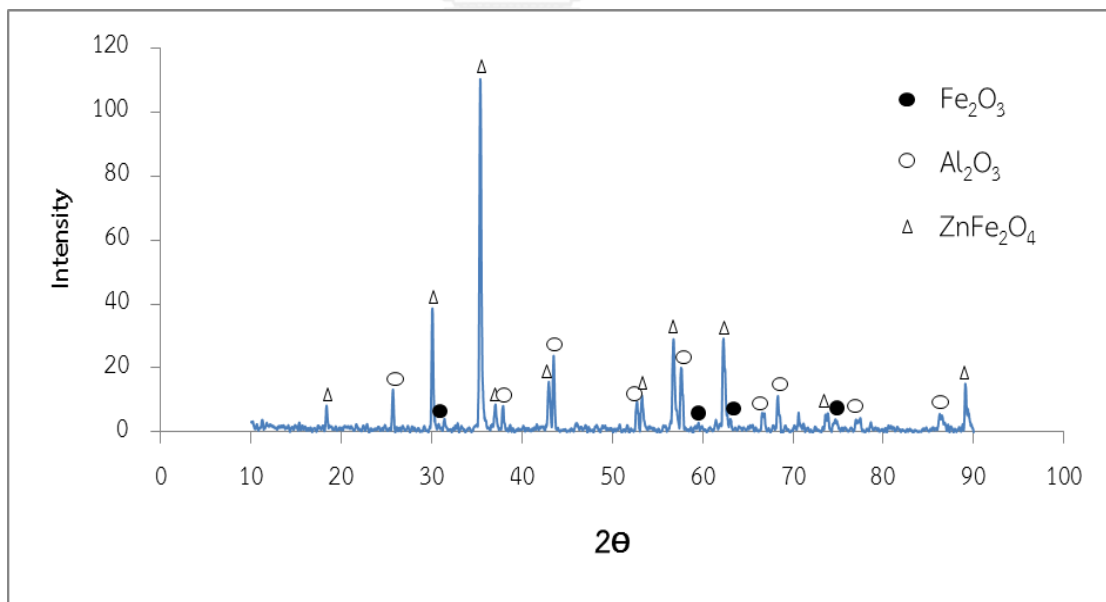
รูปที่ 4.28 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40)



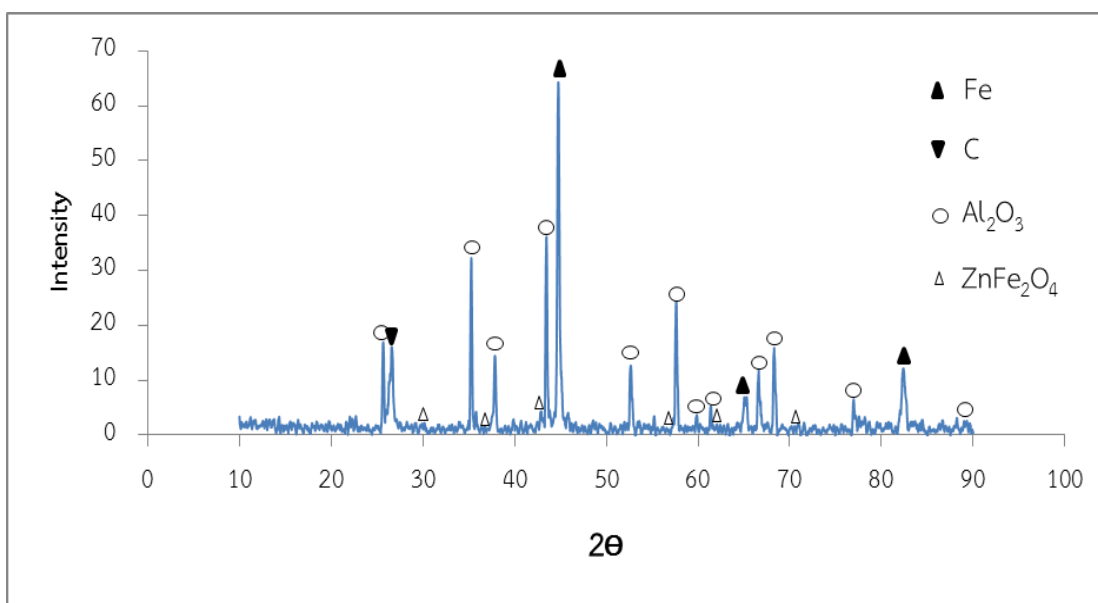
รูปที่ 4.29 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40)



รูปที่ 4.30 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังปฏิบัติการรีดักชันของตัวพาทอกซีเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ (45/15/40)



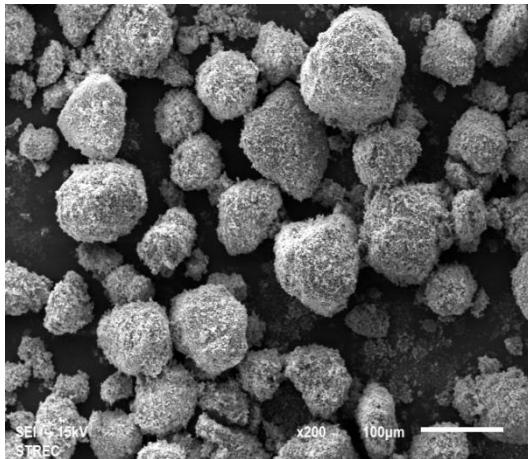
รูปที่ 4.31 รูปแบบโครงสร้างผลึกก่อนทำปฏิบัติการรีดักชันของตัวพาทอกซีเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ (40/20/40)



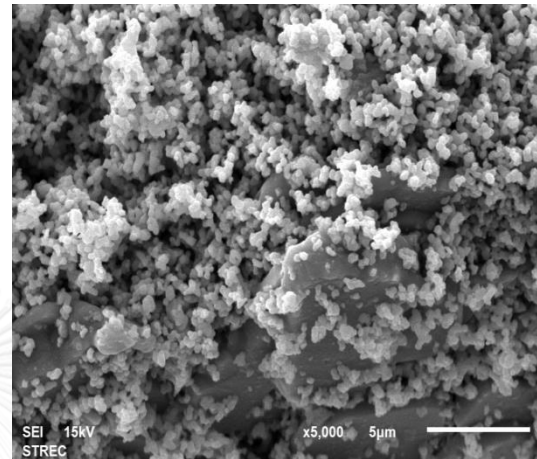
รูปที่ 4.32 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40)

จากผลของ XRD พบว่า สิ่งที่แตกต่างกันไปจากตัวพาออกซิเจนที่ไม่มีซิงค์ออกไซด์ผสมคือ จะเห็นการเกิดผลึกของ ZnFe_2O_4 ขึ้นในขั้นตอนการเตรียมตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเหล็กออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ และหลังการทำปฏิกิริยารีดักชันกับ มีเทนพบว่า พีคแสดงผลึกของเหล็กมีค่า Intensity มากขึ้น ซึ่งเกิดจากการรีดิวซ์เหล็กออกไซด์ และ พีคของ ZnFe_2O_4 มีค่า Intensity ลดลงอย่างมาก แสดงมีการใช้ผลึกสารประกอบนี้ไปทำปฏิกิริยารีดักชัน โดยที่สัดส่วนการผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีพีคของเหล็กที่มีค่า Intensity มากกว่าสัดส่วนอื่นแสดงว่าเกิดผลึกเหล็กได้มาก หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนได้ดี ซึ่งตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีซิงค์ออกไซด์ เหตุผลน่าจะมาจากการเกิดผลึก ZnFe_2O_4 จากการผสมซิงค์ออกไซด์เข้ากับเหล็กออกไซด์แล้วจะช่วยส่งเสริมการรีดักชันของเหล็กออกไซด์ให้ดีขึ้น ซิงค์ออกไซด์ทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวสนับสนุน (promoter)[22] ดังนั้น ZnFe_2O_4 สามารถรีดักชันได้ง่ายกว่าเหล็กออกไซด์จึงทำให้ตัวพาออกซิเจนที่มีซิงค์ออกไซด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าตัวพาออกซิเจนที่ไม่มีซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ ผลวิเคราะห์พบการเกิดผลึกแกรไฟต์ (คาร์บอน) เช่นเดียวกับกรณีไม่มี

ซิงค์ออกไซด์ อีกทั้งยังมีการตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.33 – 4.40

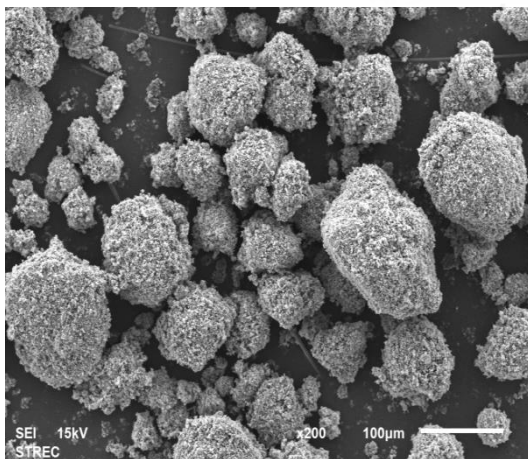


(ก)

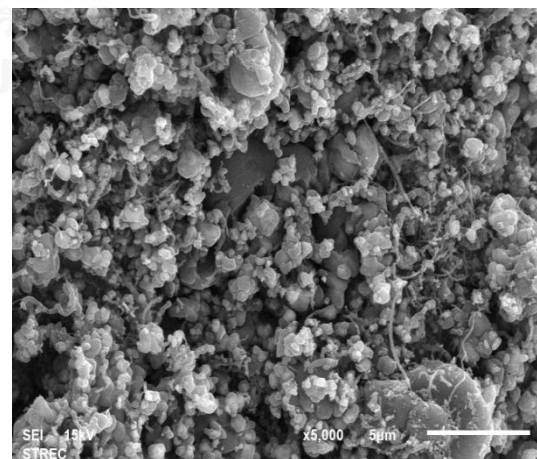


(ข)

รูปที่ 4.33 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

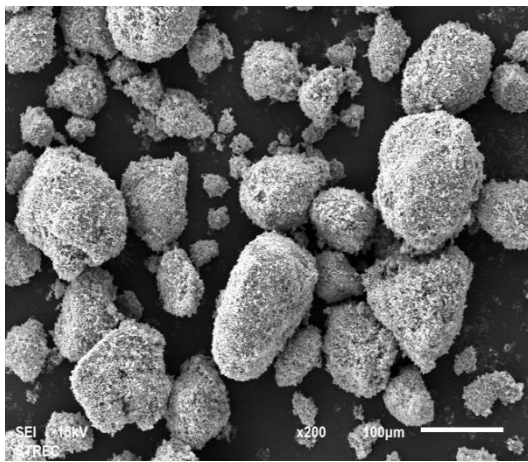


(ค)

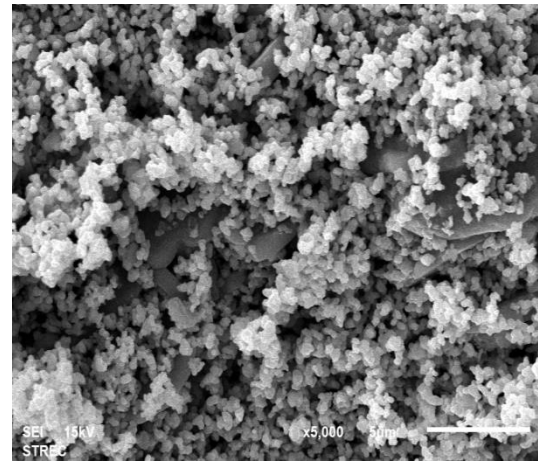


(ง)

รูปที่ 4.34 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

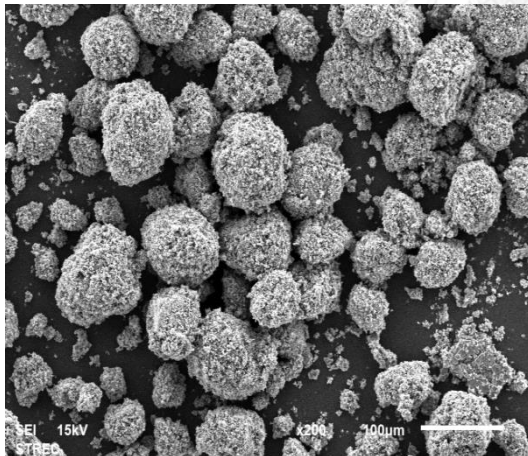


(ก)

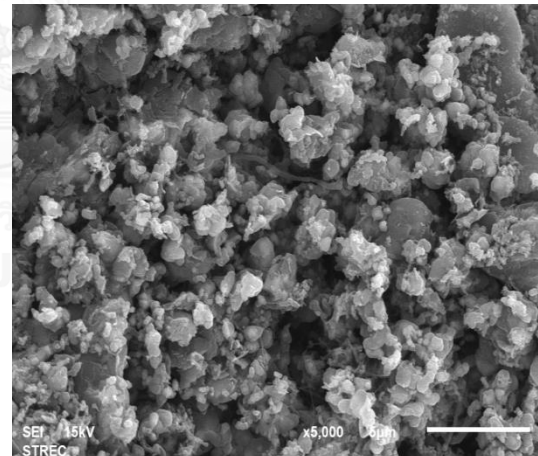


(ข)

รูปที่ 4.35 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

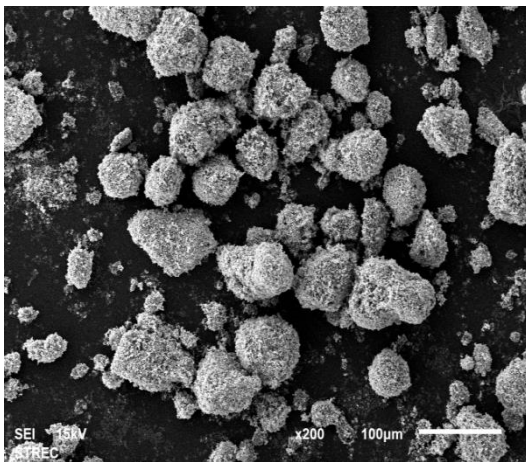


(ค)

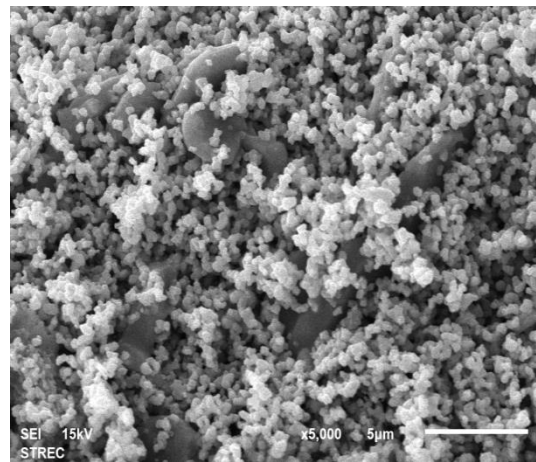


(ง)

รูปที่ 4.36 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

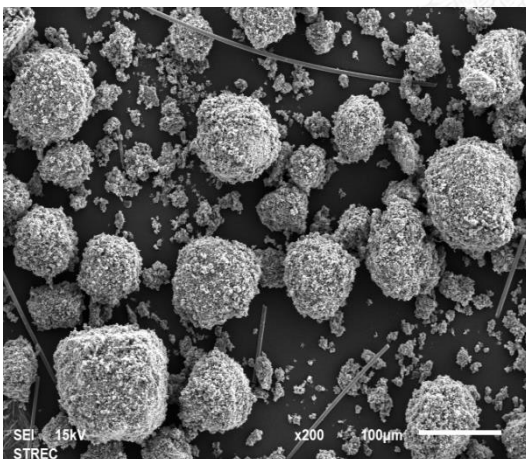


(ก)

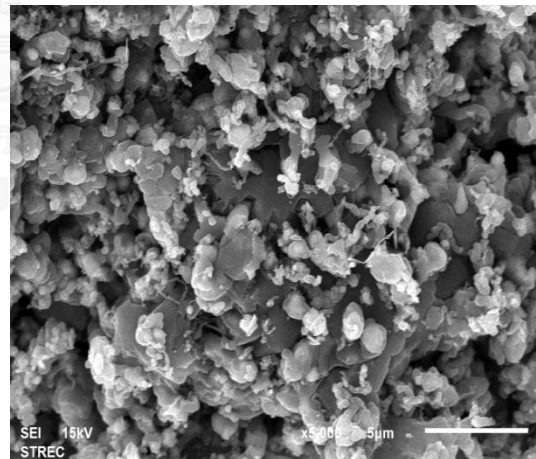


(ข)

รูปที่ 4.37 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

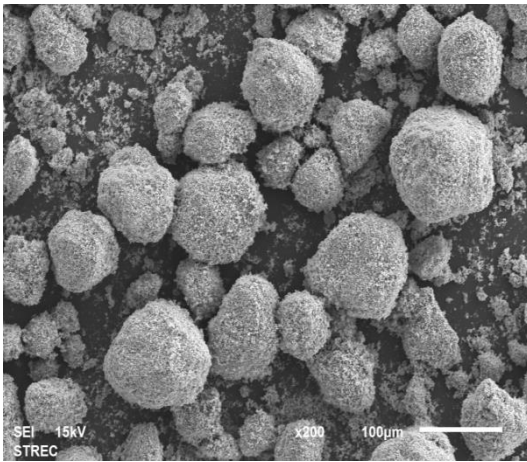


(ค)

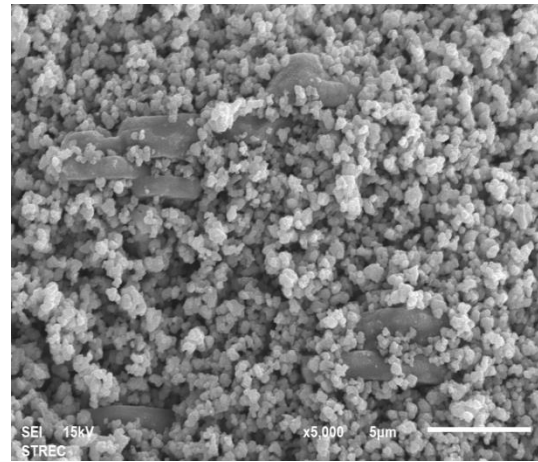


(ง)

รูปที่ 4.38 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

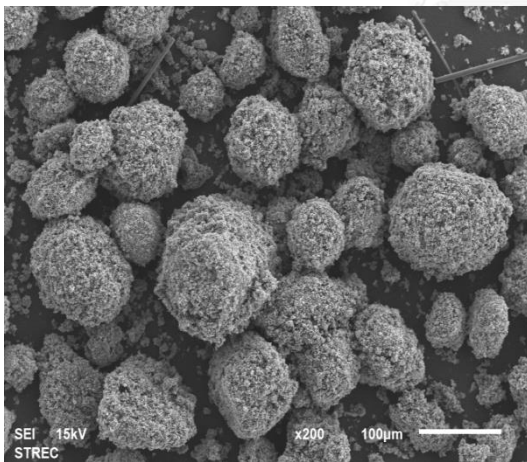


(ก)

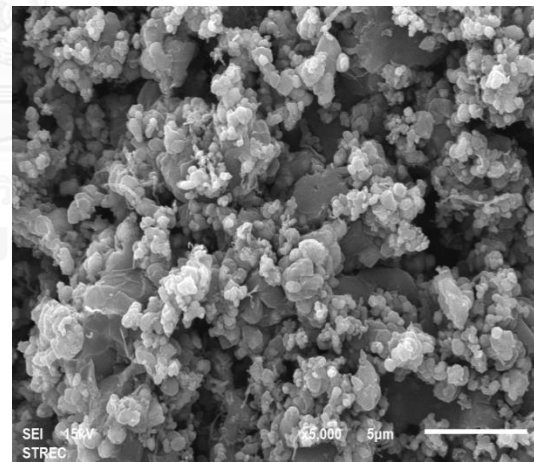


(ข)

รูปที่ 4.39 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40) ก่อนทำปฏิกิริยา (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ค)



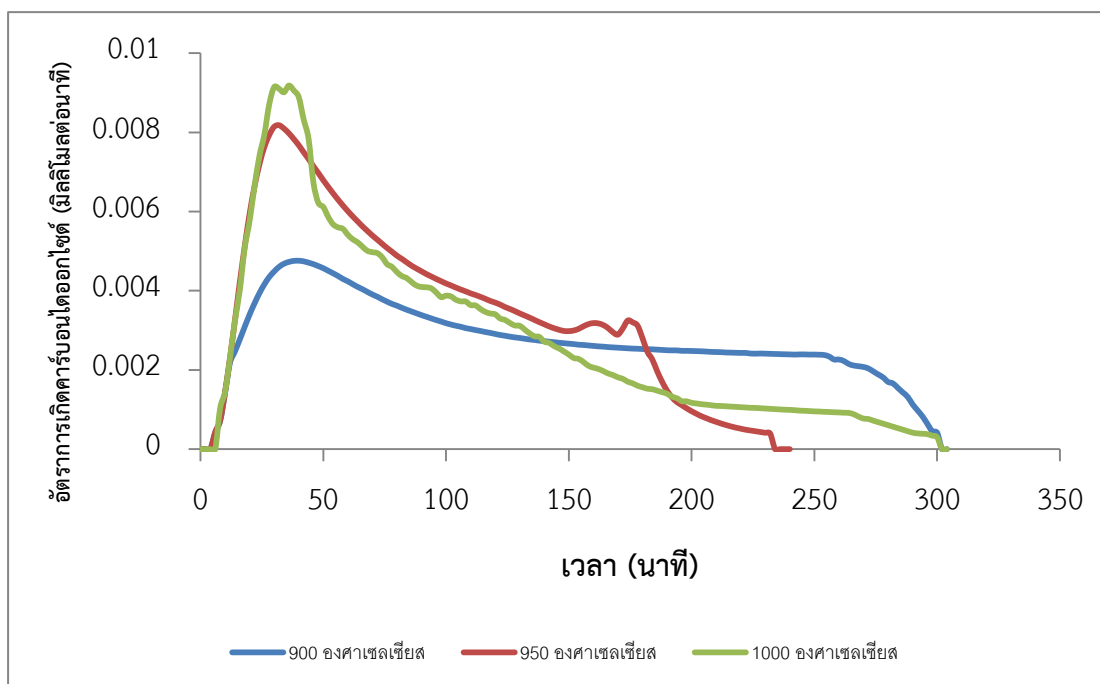
(ง)

รูปที่ 4.40 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40) หลังทำปฏิกิริยา (ค) กำลังขยาย 200 เท่า (ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

จากการตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทุกสัดส่วนเมื่อขยายไปที่กำลังขยาย 5000 เท่า จะเห็นว่าเหล็กที่ผสมซึ่งค้อออกไซด์ไปเกาะอยู่บนอะลูมินา ซึ่งอะลูมินาจะช่วยในเรื่องของเสถียรภาพการใช้งานของเหล็กได้ โดยดูจากหลังการทำปฏิกิริยา ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ จะเห็นว่าจะไม่เกิดการรวมตัวเกาะติดกันของโลหะออกไซด์ เพราะว่าอะลูมินาทำหน้าที่ช่วยยับยั้งการรวมตัวกันของเหล็กออกไซด์ ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันจึงดีตามด้วย และอะลูมินาไม่เกิดการเสื่อมสภาพยังคงสภาพเดิมได้ ดังนั้นหลังจากที่ทำการทดลองปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมของซึ่งค้อออกไซด์ในเหล็กออกไซด์และอะลูมินาแล้ว ผลที่ได้คือตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดคือที่ สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซึ่งค้อออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก นำสัดส่วนนี้มาศึกษาต่อ ในเรื่องของผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน ผลของปริมาณของตัวพาออกซิเจน และผลของการนำตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปีง

4.4 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 4.3.1 ซึ่งก็คือ ที่เหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซึ่งค้อออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณ 1 กรัม ทำปฏิกิริยากับมีเทนโดยใช้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ผล และการดำเนินไปของปฏิกิริยาในตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.41



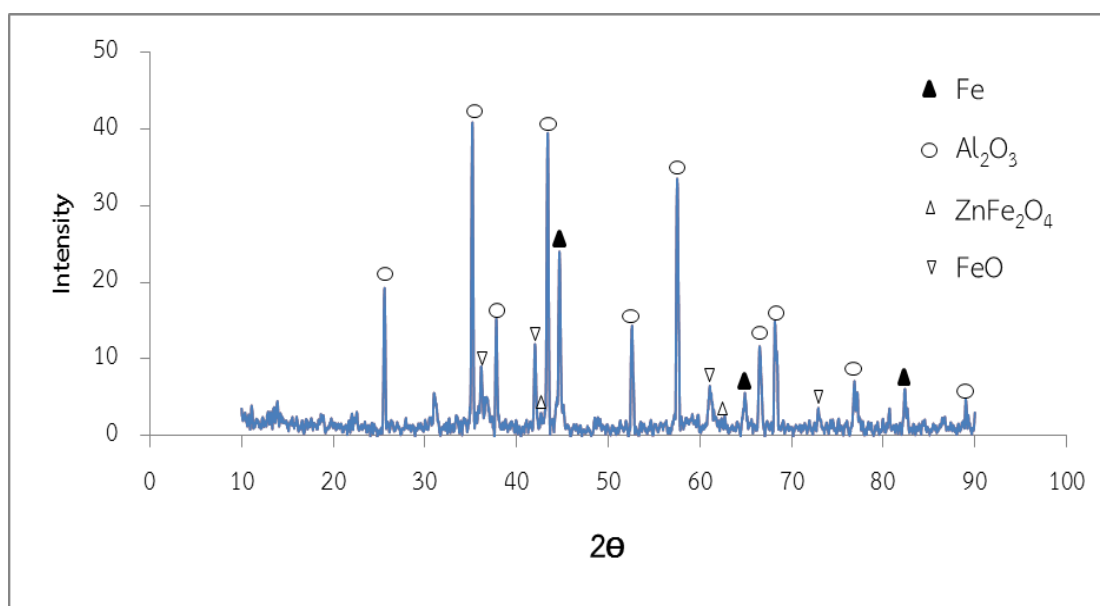
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.50 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 900 เป็น 950 และ 1000 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น แสดงว่าความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพราะว่าปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับเหล็กออกไซด์เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 4.2

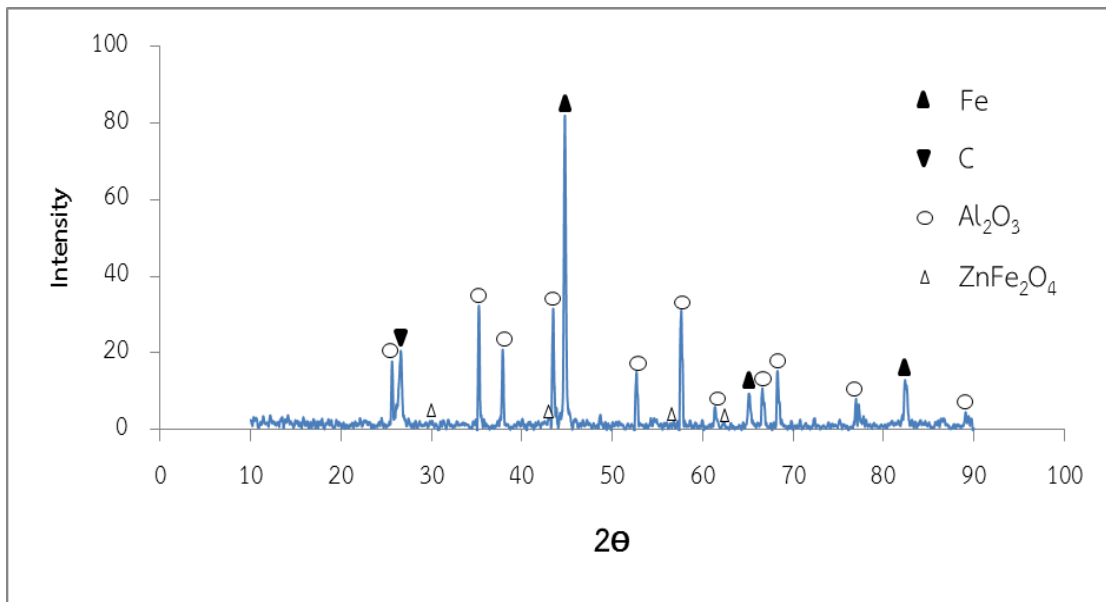


เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิยังเป็นการช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ให้เกิดได้เร็วยิ่งขึ้น เพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอนุภาคทำให้มีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น

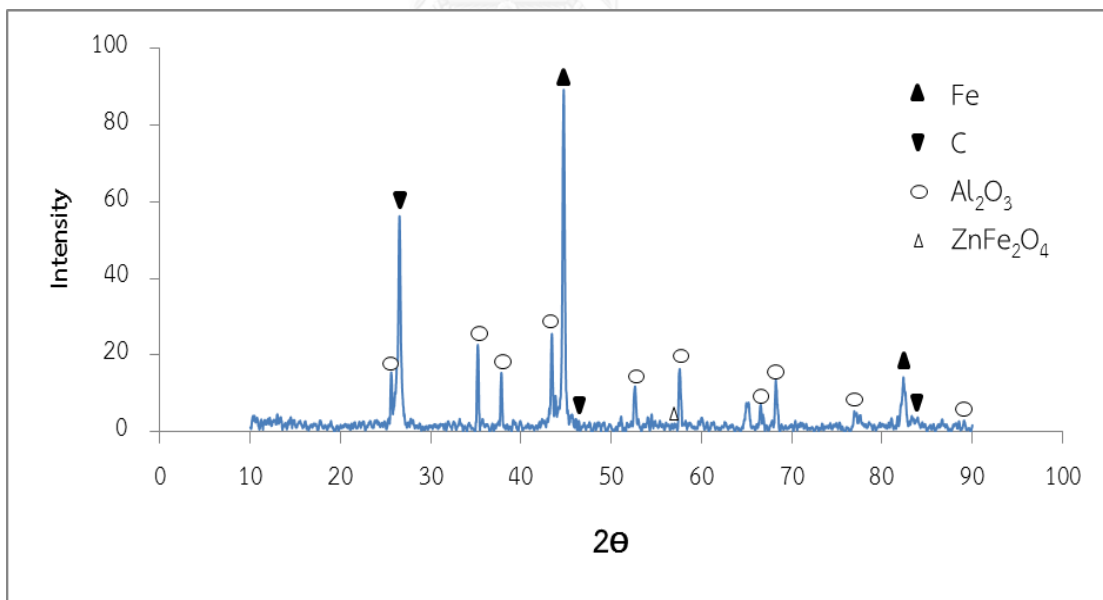
เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเสร็จแล้วก็นำตัวพาทออกซิเจน หลังผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทดสอบด้วย เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้าง ผลึกในตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ หลังการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.42 - 4.44



รูปที่ 4.42 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO} /\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

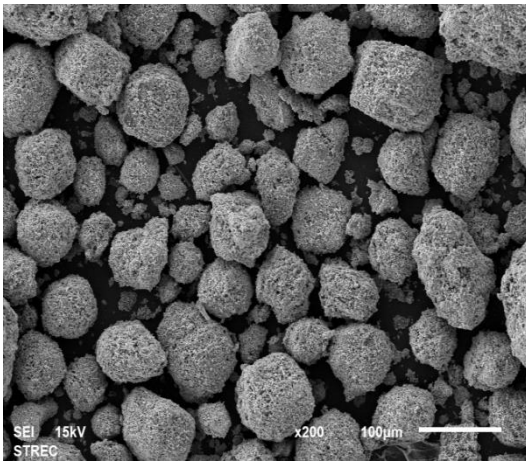


รูปที่ 4.43 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

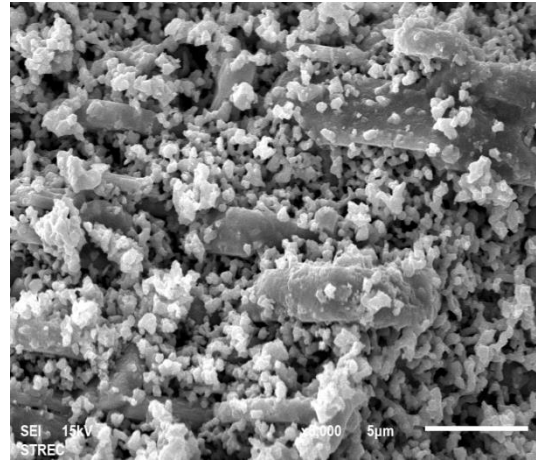


รูปที่ 4.44 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.42 - 4.44 แสดงรูปแบบของ XRD ของตัวพาทออกไซด์ชั้น $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน ที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียสพบว่าที่ อุณหภูมิ 950 และ 1000 องศาเซลเซียสพบผลึกของเหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นมากจาก ZnFe_2O_4 และเหล็กออกไซด์สูญเสียออกซิเจนไปในการทำปฏิกิริยา และพบการเกิดผลึกแกรไฟต์ (คาร์บอน) แสดงให้เห็นว่ามีการเกาะของคาร์บอนอยู่บนตัวพาทออกไซด์หลังการทำปฏิกิริยารีดักชัน เกิดการพอกของไค้กบนพื้นผิวตัวพาทออกไซด์ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลง แต่ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นอกจากพบผลึกของเหล็กแล้วยังพบผลึกของ FeO แสดงว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ยังไม่เกิดปฏิกิริยารีดักชันสมบูรณ์ จึงทำตัวพาทออกไซด์ไม่รีดักชันไปเป็นเหล็กหมด และพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำปฏิกิริยาค่า Intensity ของผลึกเหล็กมีค่าที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวพาทออกไซด์กับมีเทนเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้มากขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิ 950 และ 1000 องศาเซลเซียส เหมาะที่จะเป็นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีดักชัน แต่ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส แต่ก็มีผลกระทบในเรื่องการเกิดการรวมตัวกันของตัวพาทออกไซด์และทำให้ตัวพาทออกไซด์เสื่อมสภาพการใช้งานได้เร็วด้วย ดังแสดงในการตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกไซด์หลังการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.45 - 4.47

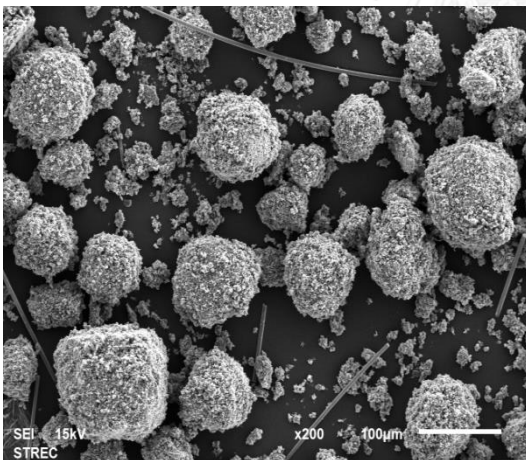


(ก)

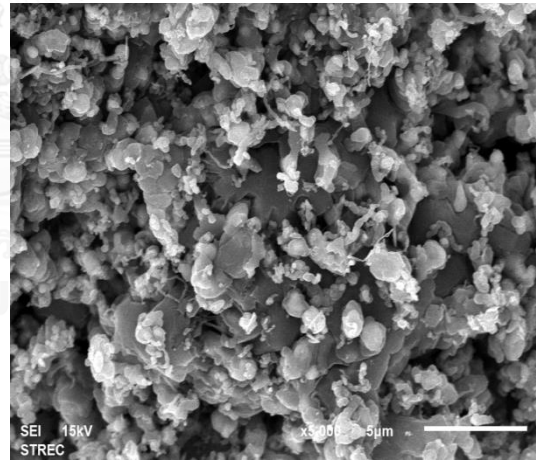


(ข)

รูปที่ 4.45 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

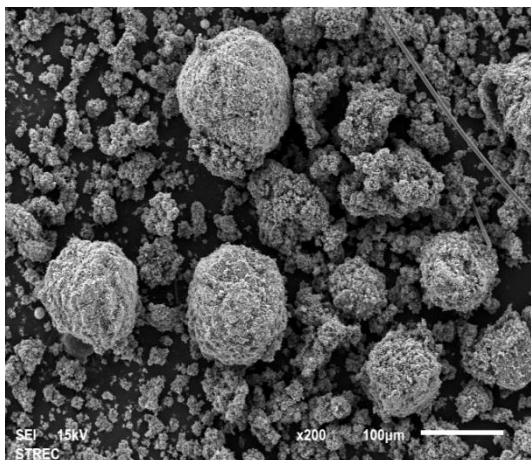


(ก)

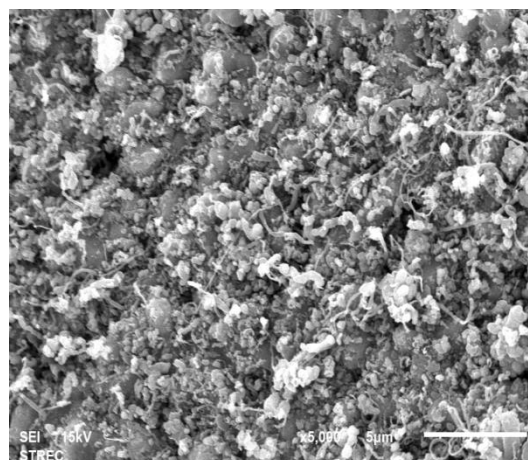


(ข)

รูปที่ 4.46 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ก)



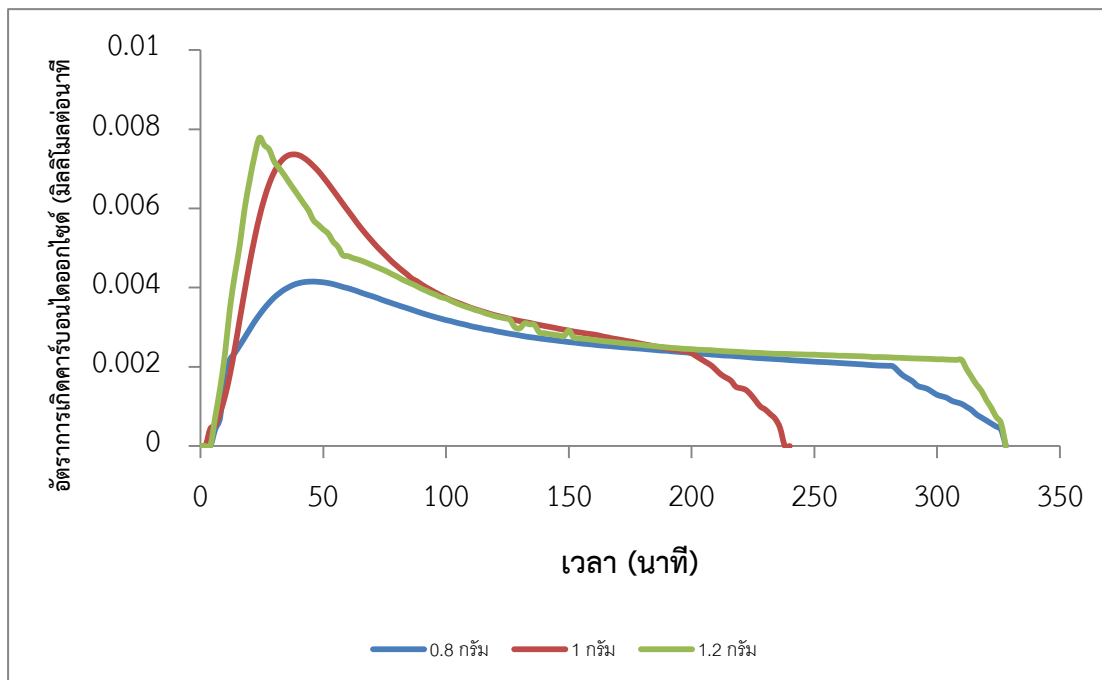
(ข)

รูปที่ 4.47 โครงสร้างสัณฐานตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40) หลังทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

จากรูป 4.45 - 4.47 พบว่าที่อุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นจะเห็นการเสื่อมสภาพของตัวพาออกซิเจน โดยที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เกิดผลึกที่ขรุขระ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ดังนั้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสเหมาะที่จะเป็นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีดักชัน เพราะที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีผลกระทบในเรื่องการเกิดการรวมตัวกันของตัวพาออกซิเจน และทำให้ตัวพาออกซิเจนเสื่อมสภาพการใช้งาน

4.5 ปริมาณตัวพาออกซิเจน

ในการศึกษาผลของปริมาณตัวพาออกซิเจนโดยใช้ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนที่ดีที่สุดที่สกัดจากหัวข้อที่ 4.3.1 ซึ่งก็คือ ที่เหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินา ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณ 0.8 1 และ 1.2 กรัม ตามลำดับ ทำปฏิกิริยากับมีเทนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ผล และการดำเนินไปของปฏิกิริยาในตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.48

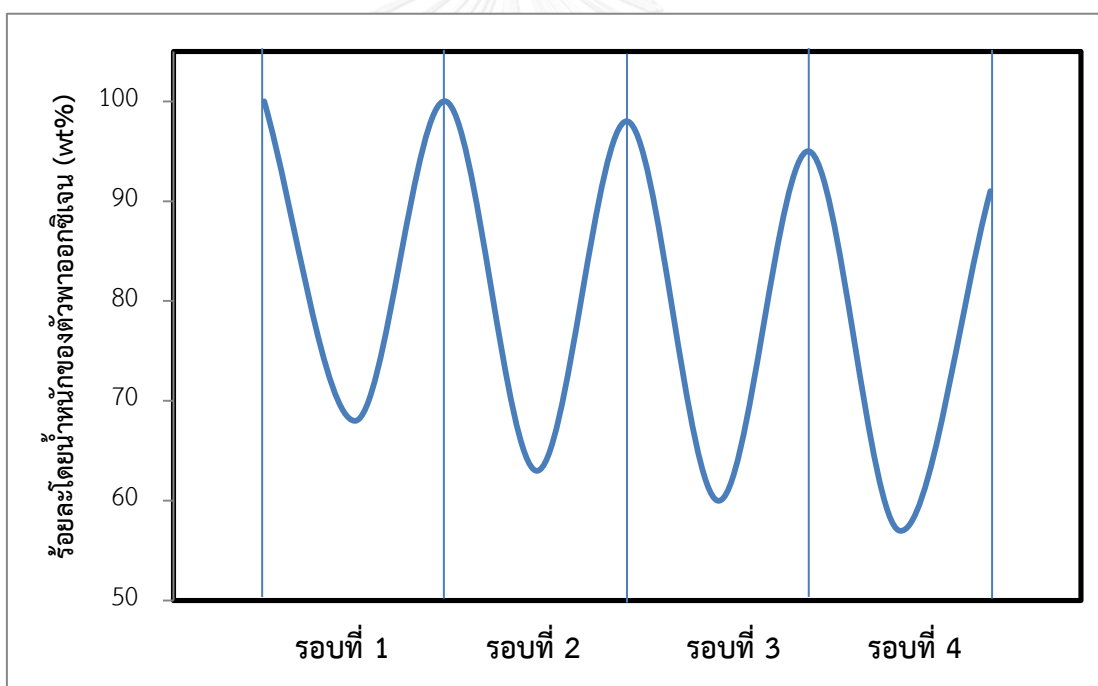


รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ปริมาณตัวพาออกซิเจนแตกต่างกัน

ผลของปริมาณตัวพาออกซิเจนต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.48 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวพาออกซิเจนทำให้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้น เพราะว่าการเพิ่มปริมาณตัวพาออกซิเจนจะเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น ทำให้มีออกซิเจนในการทำปฏิกิริยากับมีเทนที่มากขึ้น จึงทำให้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้น

4.6 ผลของการนำตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง

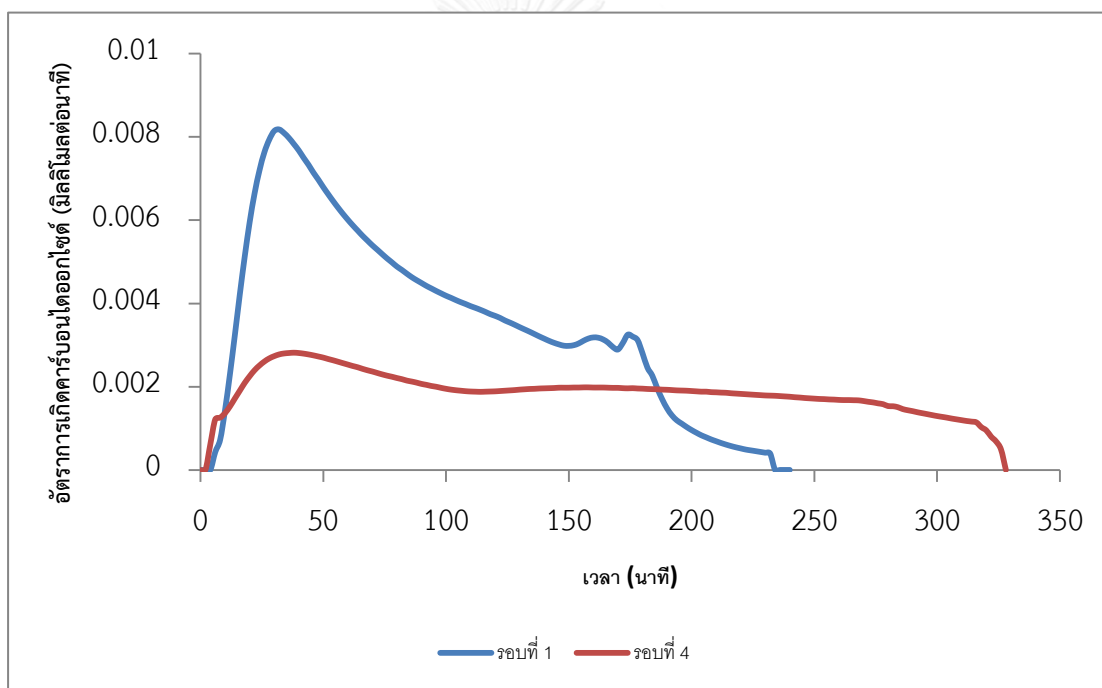
ในการศึกษาการนำตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มาใช้ในการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง ในการทดลองจะใช้ตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ สัดส่วนที่ดีที่สุดจากหัวข้อที่ 4.3.1 ซึ่งก็คือ ที่เหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณ 1 กรัม ทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จากนั้นตัวพาทออกซิเจนที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จัดว่าเป็น 1 รอบ โดยจะทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันเป็นจำนวนครบ 4 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.58



รูปที่ 4.49 ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยาเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

จากรูปที่ 4.49 แสดงร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจนในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยา จากกราฟจะเห็นว่าทั้งช่วงที่เพิ่มขึ้นและลดลงของร้อยละโดยน้ำหนักสลับกันไป จากการสังเกตพบว่า

ช่วงแรกน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจนมีร้อยละโดยน้ำหนักที่ลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ กับมีเทน ทำให้เกิดการสูญเสียออกซิเจนไปในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นช่วงที่มีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันร้อยละโดยน้ำหนักจึงลดลง ในช่วงต่อมาร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจนเพิ่มกลับขึ้นมา เพราะว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างอากาศกับตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ตัวพาทออกซิเจนที่ผ่านการใช้งานแล้วรับออกซิเจนจากอากาศเดิมกลับเข้าสู่โครงสร้างได้ตัวพาทออกซิเจนนำกลับมาใช้ใหม่ในรอบต่อไปได้ ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงของร้อยละโดยน้ำหนักจะเกิดขึ้นสลับกันตามการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันจนครบ 4 รอบ และดูความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจนแสดงในรูปที่ 4.50

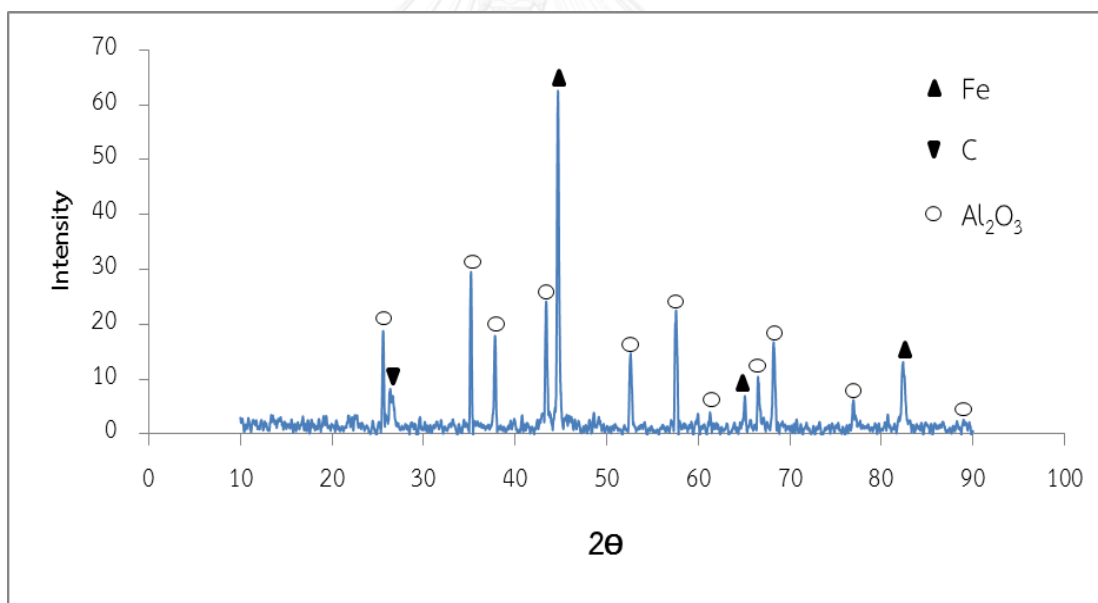


รูปที่ 4.50 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นรอบที่ 1 และรอบที่ 4 ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง

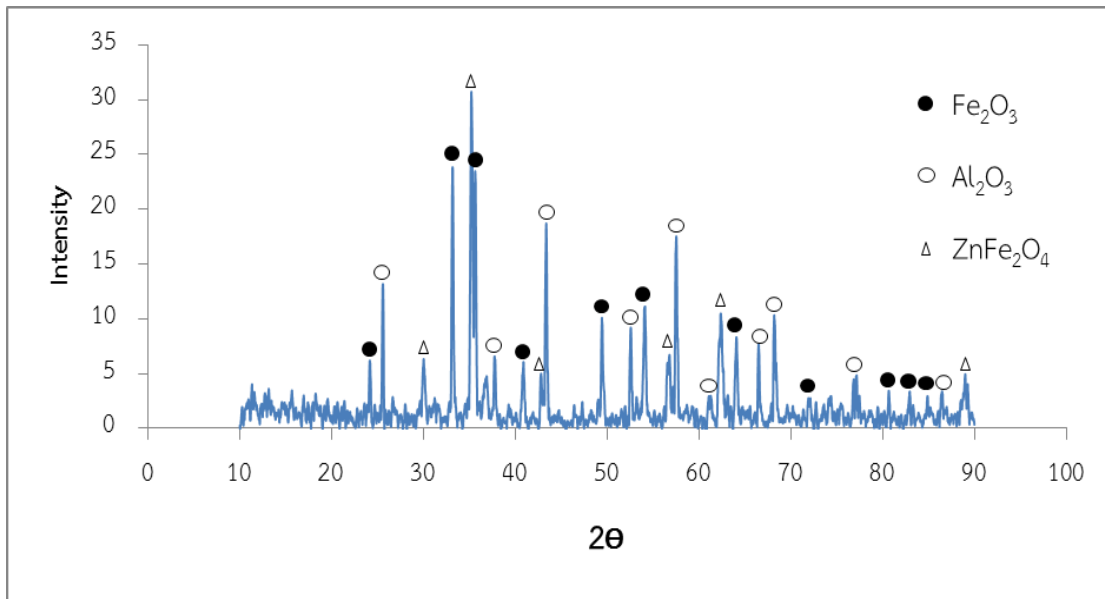
ในส่วนของปฏิกิริยารีดักชันนั้นแสดงผลในรูปที่ 4.50 ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ พบว่าเมื่อนำไปทำปฏิกิริยาหลายรอบ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนของตัวพาทออกซิเจน และการเกิดการสะสมคาร์บอนไปเกาะอยู่บนตัวพาทออกซิเจนทำให้สูญเสียความสามารถในการ

เกิดปฏิกิริยาของตัวพาทออกซิเจน เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาหลายๆ ครั้ง ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้จึง ลดน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4.50

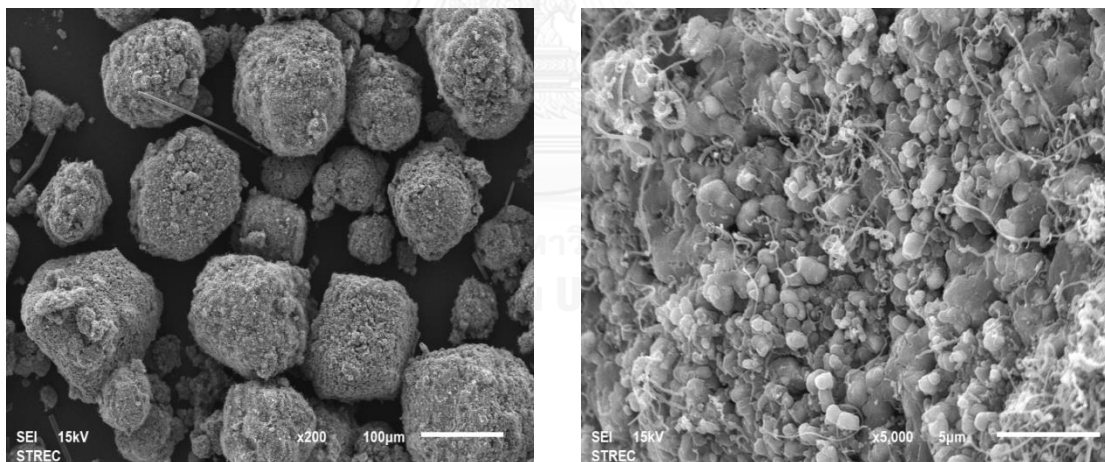
ดังนั้นจากผลการทดลองการนำตัวพาทออกซิเจนมาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชัน แสดงให้เห็นว่าตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และนำตัวพาทออกซิเจนที่ผ่านการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกในตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ดังแสดงในรูปที่ 4.51 - 4.52 และตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.51 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนรอบที่ 4



รูปที่ 4.52 รูปแบบโครงสร้างผลึกหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศรอบที่ 4



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.53 โครงสร้างสัณฐานตัวพาทออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ (45 : 15 : 40) หลังทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันเป็นจำนวนครบ 4 รอบ (ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า

จากผลของ XRD พบว่าตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ แม้ผ่านการทำปฏิกิริยาไปครบ 4 รอบแล้วก็ยังมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยมีผลของเหล็กเกิดขึ้นแสดงว่าเกิดการรีดักชันได้สมบูรณ์กับมีเทน และผลจาก SEM จะเห็นว่าหลังการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันเป็นจำนวนครบ 4 รอบ จะเกิดการรวมตัวเกาะติดกัน (sintering) ของตัวพาออกซิเจนแต่ไม่มาก เพราะมีอะลูมินาคอยยับยั้งการเกิดการรวมตัวอยู่ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงในรอบที่ 4 เพราะเกิดการรวมตัวเกาะติดกันของตัวพาออกซิเจน และเกิดการเกาะของโค้ก จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลงแต่ก็ยังสามารถนำมาใช้ได้ และหลังออกซิเดชันในรอบที่ 4 จะเห็นว่า ZnFe_2O_4 และ Fe_2O_3 กลับมาจากการเติมออกซิเจนไปในการทำปฏิกิริยากับอากาศ

4.7 เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สัดส่วนการผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 20 40 60 และ 80 โดยน้ำหนัก โดยพิจารณา ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อกรัมของ Fe_2O_3 ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงพื้นที่ใต้กราฟความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน แต่ละชนิดของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของ Fe_2O_3 และ ร้อยละการใช้ออกซิเจน

ตัวพาทออกซิเจน	Peak Area (mmol)	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มิลลิโมลต่อกรัมของ Fe_2O_3	ร้อยละการใช้ ออกซิเจน
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80 : 20)	0.6023	0.7822	16.7
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60 : 40)	0.7778	1.2813	27.4
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40 : 60)	0.4452	1.2472	26.6
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20 : 80)	0.6804	5.0032	36.3

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ใต้กราฟหรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยารีดักชันที่ตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด มีร้อยละการใช้ออกซิเจนที่สูง และจากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าที่สัดส่วนนี้มีอัตราในการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดด้วยแต่เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของเหล็กออกไซด์จะแสดงให้เห็นว่าเหล็กเป็นตัวพาทออกซิเจนที่ดีเพราะแค่ว่าปริมาณเหล็กร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของเหล็กออกไซด์ที่ดีแล้ว อาจเป็นเพราะที่สัดส่วนนี้เหล็กออกไซด์มีปริมาณน้อยทำให้มีการกระจายตัวที่ดีบนอะลูมินาเลยทำให้เหล็กมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยามากดังตารางที่ 4.1 จึงทำให้มีการใช้ออกซิเจนได้ดี แต่ในตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวให้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา และอะลูมินาเป็นแค่ตัวรองรับเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา ถ้ามีปริมาณอะลูมินามากไปจะไปลดปริมาณออกซิเจนจากเหล็ก

ในการทำปฏิกิริยาลดลงทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตัวพาทออกซิเจนที่ได้ลดลง ดังนั้นตัวพาทออกซิเจนจึงต้องมีปริมาณเหล็กออกไซด์ที่มากกว่าอะลูมินา ดังนั้นตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดคือที่ สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สัดส่วนการผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงพื้นที่ใต้กราฟความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจนแต่ละชนิดของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของ Fe_2O_3 และร้อยละการใช้พาทออกซิเจน

ตัวพาทออกซิเจน	Peak Area (mmol)	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ มิลลิโมลต่อกรัมของ Fe_2O_3	ร้อยละการใช้พาทออกซิเจน
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55 : 5 : 40)	0.8363	1.6021	34.2
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50 : 10 : 40)	0.9354	1.8522	39.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40)	0.8514	1.9892	42.4
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40 : 20 : 40)	0.8464	2.1320	37.3
$\text{ZnO} / \text{Al}_2\text{O}_3$ (60 : 40)	0.6936	-	-

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าตัวพาทออกซิเจนที่มีการผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 10 และ 15 มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมากจากการทำปฏิกิริยารีดักชัน แต่จากรูปที่ 4.24 จะพบว่าตัวพาทออกซิเจนที่มีซิงค์ออกไซด์ผสมอยู่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก นอกจากจะมีปริมาณการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่เยอะแล้วยังมีอัตราในการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และร้อยละการใช้พาทออกซิเจนที่สูงกว่าสัดส่วนอื่นด้วย แสดงว่าที่สัดส่วนนี้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เร็วกว่าสัดส่วนอื่น และเมื่อพิจารณาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของ Fe_2O_3 จะเห็นว่าตัวพาทออกซิเจนที่มีเหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 และซิงค์ออกไซด์ผสมอยู่ร้อยละ 15 ให้ค่าที่มากกว่าของเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก กับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แสดงว่าซิงค์ออกไซด์มีส่วนช่วยเสริมความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกไซด์ของโลหะ โดยที่ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีสัดส่วนการผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุด

กล่าวโดยสรุป ตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ เหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักและอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เป็นตัวพาทออกซิเจนที่สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สมีเทนได้ดี และมีเสถียรภาพสูง สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้ เหมาะสำหรับเป็นตัวพาทออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้แบบเคมีคลูปีง

จากการศึกษางานวิจัยที่ใกล้เคียงกันที่ศึกษาถึงประสิทธิภาพของตัวพาทออกซิเจนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูปีง ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของตัวพาทออกซิเจนสำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิงจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	Chiu, P.C et al (2014)	Ku, Y. et al (2014)	Hu, Y. et al (2014)	He, F. et al (2007)	งานวิจัยนี้
เครื่องปฏิกรณ์	แบบเบตนิ่ง	แบบต่อเนื่อง	แบบเบตนิ่ง	แบบเบตนิ่ง	แบบเบตนิ่ง
ตัวพาทออกซิเจน	Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃
วิธีการเตรียม	Physical mixing	Physical mixing	Wet and dry mixing	Impregnation	Physical mixing
ขนาดของอนุภาค (มิลลิเมตร)	1.2 - 1.4	0.3 - 2.0	1.5 - 2	0.45 - 0.9	น้อยกว่า 0.42
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	500 - 900	500 - 900	900	900	900 950 และ 1000
สัดส่วนของเหล็กออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวพาทออกซิเจน (wt%)	20 40 60 และ 80	40 60	70	80	20 40 60 80และ100
สัดส่วนของซิงค์ออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวพาทออกซิเจน (wt%)	n/a	n/a	n/a	n/a	5 10 15 และ 20
สัดส่วนของตัวพาทออกซิเจนที่เหมาะสม (wt%)	60/40 (Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃)	60/40 (Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃)	n/a	n/a	45/15/40 (Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃)

การทดลอง	Chiu, P.C et al (2014)	Ku, Y. et al (2014)	Hu, Y. et al (2014)	He, F. et al (2007)	งานวิจัยนี้
เสถียรภาพการนำมาใช้งาน โดยทำการทดสอบใน TGA	50 รอบ	n/a	10 รอบ	10 รอบ	n/a
เสถียรภาพการนำมาใช้งาน โดยทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง	n/a	n/a	n/a	n/a	มากกว่า 4 รอบ
อ้างอิง	[11]	[3]	[15]	[21]	-

หมายเหตุ : n/a คือ ไม่ได้ระบุไว้ในงานวิจัย (Not Available)

จากตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบตัวพวออกซิเจนที่เตรียมในงานวิจัยนี้กับผลงานวิจัยของผู้อื่นพบว่า พบว่าเหล็กออกไซด์เป็นตัวพวออกซิเจนที่ดีและนิยมใช้เป็นตัวพวออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิงซึ่งในงานวิจัยนี้จะเหมือนกับงานวิจัยที่ผ่านมาตรงที่เลือกใช้โลหะเหล็กออกไซด์เป็นตัวหลัก ส่วนใหญ่จะนิยมเตรียมตัวพวออกซิเจนด้วยวิธีการผสมทางกายภาพ (physical mixing) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้วิธีนี้ในการเตรียมตัวพวออกซิเจน เพราะว่าเป็นวิธีการที่นิยมในการเตรียมตัวพวออกซิเจน อีกทั้งยังได้สัดส่วนของตัวพวออกซิเจนเป็นไปตามทฤษฎีที่ต้องการอีกด้วย และจากตารางที่ 4.7 พบว่าปัจจัยแรกที่สำคัญงานวิจัยเลือกที่จะศึกษาคือสัดส่วนที่เหมาะสมของตัวพวออกซิเจน ซึ่งงานวิจัยนี้มีข้อดีกว่างานวิจัยอื่นคือเป็นการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของตัวพวออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่ครอบคลุมทุกสัดส่วนคือที่ เหล็กออกไซด์ร้อยละ 20 40 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มียงานวิจัยใดที่ทำการศึกษาครอบคลุมทุกสัดส่วน

มากเท่างานวิจัยนี้ และจากการทดลองการผสมซิงค์ออกไซด์เพิ่มเข้าไปใน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ พบว่ามีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ดีขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัยไหนที่ทำการศึกษาการผสมซิงค์ออกไซด์เข้าไปใน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้มีข้อดีในเรื่องของประสิทธิภาพของตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ดีกว่าตัวพาออกซิเจนจากงานวิจัยที่ผ่านมา และปัจจัยเรื่องอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาจะเห็นว่างานวิจัยที่ผ่านมาเลือกที่จะศึกษาอุณหภูมิสูงสุดแค่ที่ 900 องศาเซลเซียส แต่ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ข้อสรุปว่า ผลของอุณหภูมิจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยารีดักชัน เพราะว่าปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเพราะฉะนั้นที่อุณหภูมิสูงการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลกระทบต่อในเรื่องการเกิดการรวมตัวกันของตัวพาออกซิเจน และทำให้ตัวพาออกซิเจนเสื่อมสภาพการใช้งาน ทำให้งานวิจัยนี้มองเห็นผลของอุณหภูมิที่นำมาใช้มากกว่างานวิจัยอื่นที่ผ่านมา และการศึกษาในเรื่องเสถียรภาพการนำมาใช้งานโดยทำการทดสอบใน TGA โดยที่การทดลองของ He, F. และคณะที่มีการใช้เหล็กออกไซด์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก หลังจากการทำการทดลองใน TGA จำลองการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงจะพบว่าการเกาะรวมตัวกันของเหล็กออกไซด์ ดังนั้นการมีอะลูมินาจึงไปช่วยยับยั้งการเกิดการเกาะรวมตัวกันของโลหะออกไซด์ได้ ทำให้ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่มีอะลูมินาผสมอยู่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีเสถียรภาพการใช้งานที่นานขึ้น โดยจากงานวิจัยของ Chiu, P.C และคณะ จะเห็นว่าการทดลองใน TGA จำลองการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง 50 รอบ จะเห็นว่าการเกิดการเกาะรวมตัวกันของโลหะออกไซด์น้อย และน้ำหนักของตัวพาออกซิเจนหลังทำปฏิกิริยาครบ 50 รอบยังอยู่ที่มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น เนื่องจากมีอะลูมินาไปช่วยในเรื่องเสถียรภาพให้ใช้ได้ยาวนานขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องมือ TGA ที่ไม่สามารถจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงได้ จึงเลือกที่จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งในการทำปฏิกิริยาปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง ซึ่งข้อดีอย่างของการเลือกใช้วิธีนี้คือสามารถจำลองการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงได้จำนวนรอบน้อยกว่างานวิจัยที่เลือกใช้ TGA เนื่องจากการทำปฏิกิริยาใช้เวลาที่ยาวนานกว่าในแต่ละรอบ แต่ก็มีข้อดีที่ตรงที่เป็นการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงได้เห็นภาพกว่าเพราะว่าใช้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นมีเทน ซึ่งเป็นเชื้อแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง ในขณะที่ TGA ใช้ไฮโดรเจนอีกทั้งยังสามารถวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ด้วยจากเครื่องมือโครมาโทกราฟี ซึ่งจากการทดลองพบว่า

ตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีเสถียรภาพในการใช้งานได้ดีเพราะน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจนหลังทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องจำนวน 4 รอบ ยังอยู่ที่มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น

ดังนั้นจากงานวิจัยนี้พบว่า ตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ เหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักและอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จึงเหมาะสำหรับเป็นตัวพาทออกซิเจน ที่เหมาะสำหรับเป็นตัวพาทออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูปิง เพราะว่ามีเสถียรภาพการใช้งานที่เหมาะสม และมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดี



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการผสมโลหะมากกว่า 1 ชนิดในการเตรียมตัวพาทออกซิเจน โดยมีโลหะหลักคือเหล็ก โลหะรองคือสังกะสี และมีอะลูมินาเป็นตัวรองรับเพื่อใช้เป็นตัวพาทออกซิเจนต่อประสิทธิภาพกับการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง และนำสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของปริมาณตัวพาทออกซิเจน และอุณหภูมิต่อการเผาไหม้ในกระบวนการเคมีคัลลูบิง โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยเครื่องมือโครมาโทกราฟี (Micro - Gas Chromatography, Micro GC) และมีการวิเคราะห์ลักษณะของตัวพาทออกซิเจนด้วยเครื่องมือต่างๆ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน Fe_2O_3/Al_2O_3

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการผสมเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) กับอะลูมินา (Al_2O_3) พบว่าสัดส่วนที่ดีที่สุดที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือที่สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าอะลูมินาทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยับยั้งการเกิดการรวมตัวเกาะติดกัน (sintering) ของตัวพาทออกซิเจนได้

5.1.2 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการผสมเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อะลูมินา (Al_2O_3) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ได้ตัวพาทออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ พบว่าสัดส่วนที่ดีที่สุดที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้ปริมาณและอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ ที่สัดส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก ผสมกับอะลูมินาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าซิงค์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุน (promoter) ช่วย

ส่งเสริมการรีดักชันให้กับเหล็กออกไซด์ โดยที่สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเหล็กออกไซด์กับซิงค์ออกไซด์ คือ $ZnFe_2O_4$ ซึ่งสามารถเกิดการรีดักชันได้ง่ายกว่าเหล็กออกไซด์

5.1.3 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน

เมื่อทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยศึกษาที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผลของอุณหภูมิจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยารีดักชัน เพราะว่าปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมิสูงการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลกระทบต่อในเรื่องการเกิดการรวมตัวกันของตัวพาวเวอร์ออกซิเจน และทำให้ตัวพาวเวอร์ออกซิเจนเสื่อมสภาพการใช้งาน

5.1.4 ผลของปริมาณตัวพาวเวอร์ออกซิเจน

เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวพาวเวอร์ออกซิเจนจะเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น ทำให้มีออกซิเจนในการทำปฏิกิริยากับมีเทนที่มากขึ้น จึงทำให้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้นตามปริมาณตัวพาวเวอร์ออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น

5.1.5 ผลของการนำตัวพาวเวอร์ออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ มาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง

ในการทดลองทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง พบว่าตัวพาวเวอร์ออกซิเจน $Fe_2O_3/ZnO/Al_2O_3$ มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ข้อเสนอแนะ

การที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ และความสามารถในการทำปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาวเวอร์ออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคัลลูบิง มีข้อเสนอแนะว่าทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดเซชัน เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกันระหว่างเชื้อเพลิงกับตัวพาวเวอร์ออกซิเจนได้มากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความเร็วในการทำปฏิกิริยาด้วย และการใช้ปริมาณตัวพาวเวอร์ออกซิเจนยิ่งมากยิ่งขึ้นส่งผลให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยารีดักชันได้ดี ดังนั้นการเพิ่มขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะช่วยให้บรรจุกตัวพาวเวอร์ออกซิเจนได้มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณตัวพาวเวอร์ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นเช่นกัน

รายการอ้างอิง

1. Stolten, D.a.V.S., *Efficient carbon capture for coal power plants*, ed. e. Edition. 2011, Weinheim: John Wiley & Sons.
2. Fan, L.S., *Chemical looping systems for fossil energy conversions*. 2010, New Jersey: John Wiley & Sons.
3. Ku, Y., et al., *Methane combustion by moving bed fuel reactor with Fe_2O_3/Al_2O_3 oxygen carriers*. *Applied Energy*, 2014. 113: p. 1909-1915.
4. Agency, U.S.E.P. *Climate Change: Basic Information (online)*. 2016; Available from: <https://www3.epa.gov> (April 20, 2016).
5. Center, C. *สภาวะโลกร้อน*. 2016; Available from: <http://climate.tmd.go.th> (April 20, 2016).
6. Li, B., et al., *Advances in CO_2 capture technology: A patent review*. *Applied Energy*, 2013. 102: p. 1439-1447.
7. Wikipedia. *Carbon Capture and Storage (CCS)*. 2013; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage (April 25, 2016).
8. Association, C.C.S. *Capture*. 2016; Available from: <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/capture> (April 25, 2016).
9. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, พลังงาน วัฒนาการ กระบวนการผลิต การวิเคราะห์และความยั่งยืน, พิมพ์ครั้งที่ 1. 2556, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. GAS, T. *Chemical looping combustion*. 2012; Available from: <http://www.tokyo-gas.co.jp> (May 1, 2016).
11. Chiu, P.-C., *Characterization and Evaluation of Prepared Fe_2O_3/Al_2O_3 Oxygen Carriers for Chemical Looping Process*. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014.
12. Wikipedia. *Aluminium oxide*. 2016; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide (May 3, 2016).
13. Moezzi, A., A.M. McDonagh, and M.B. Cortie, *Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications*. *Chemical Engineering Journal*, 2012. 185-186: p. 1-22.

14. Wikipedia. *Zinc oxide*. 2016; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide (May 5, 2016).
15. Hu, Y., W. Wang, and X. Hua, *Reactivity of Iron-based Oxygen Carriers Prepared by Wet and Dry Mixing Methods for Hydrogen Production Via Biomass Derived Syngas Chemical Looping*. Energy Procedia, 2014. 61: p. 1650-1654.
16. Pans, M.A., et al., *Performance of a low-cost iron ore as an oxygen carrier for Chemical Looping Combustion of gaseous fuels*. Chemical Engineering Research and Design, 2015. 93: p. 736-746.
17. Cho, P., T. Mattisson, and A. Lyngfelt, *Comparison of iron-, nickel-, copper- and manganese-based oxygen carriers for chemical-looping combustion*. Fuel, 2004. 83(9): p. 1215-1225.
18. Forutan, H.R., et al., *Expert representation chemical looping reforming: A comparative study of Fe, Mn, Co and Cu as oxygen carriers supported on Al₂O₃*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. 21: p. 900-911.
19. Wei, G., et al., *Chemical-Looping Reforming of Methane Using Iron Based Oxygen Carrier Modified with Low Content Nickel*. Chinese Journal of Chemistry, 2014. 32(12): p. 1271-1280.
20. Yang, W., et al., *Synergistic effects of mixtures of iron ores and copper ores as oxygen carriers in chemical-looping combustion*. Proceedings of the Combustion Institute, 2015. 35(3): p. 2811-2818.
21. He, F., H. Wang, and Y. Dai, *Application of Fe₂O₃/Al₂O₃ Composite Particles as Oxygen Carrier of Chemical Looping Combustion*. Journal of Natural Gas Chemistry, 2007. 16(2): p. 155-161.
22. Liang, M., W. Kang, and K. Xie, *Comparison of reduction behavior of Fe₂O₃, ZnO and ZnFe₂O₄ by TPR technique*. Journal of Natural Gas Chemistry, 2009. 18(1): p. 110-113.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. คำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาผลิตผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกจะถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (Micro – Gas Chromatography, Micro GC) โดยจะมีการนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ทุกๆ 120 วินาที ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟีจะแสดงผลออกมาในรูปแบบที่ได้กราฟของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยสามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากพื้นที่ใต้กราฟได้

ก่อนทำการทดลองทุกครั้งจะมีการฉีดแก๊สมาตรฐาน (standard gas) กับเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี โดยในแก๊สมาตรฐาน แก๊สแต่ละชนิดจะมีความเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ดังนั้นสามารถคิดความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนไดออกไซด์หารด้วยพื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สมาตรฐาน ดังสมการ

$$\%vol = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลา}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สมาตรฐาน}}$$

ตารางที่ ก1 แสดงพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สมาตรฐาน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

ชนิดแก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ	%balance in N ₂
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	539.7	1.00

เช่นจากผลการทดลองได้พื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 95.6 สามารถคำนวณเพื่อแปลงมาเป็นความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรได้โดยการนำพื้นที่ใต้กราฟของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สมาตรฐานมาหาร ดังนั้นความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.177506

เมื่อได้ความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาแล้วสามารถคำนวณต่อเป็นจำนวนมิลลิโมลต่อนาทีได้โดยใช้สมการ

$$PV = nRT$$

เช่น เมื่อทราบความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.177506 มีอัตราการไหลของแก๊สออกเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถคำนวณเป็นจำนวนมิลลิโมลต่อนาที ได้โดย

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{1 \text{ atm} \times 0.177506 \times 50 \frac{\text{ml}}{\text{min}}}{0.0826 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \times 298\text{K} \times 100}$$

$$n = 0.00361 \frac{\text{mmol}}{\text{min}}$$

ดังนั้นที่เข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.177506 โดยปริมาตรคำนวณเป็นจำนวนมิลลิโมลต่อนาทีของคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับ 0.00361 มิลลิโมลต่อนาที

2. คำนวณอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยาสวนด้วยน้ำหนักเริ่มต้น

ในการทดลองปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิงเป็นจำนวน 4 รอบการทดลอง ใช้น้ำหนักของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็น 1.00 กรัม

ตารางที่ ก2 แสดงน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งได้จริง และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบ ส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้น

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	น้ำหนักที่ชั่งได้จริง(กรัม)	อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	1.00	100%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.68	68%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	1.00	100%
2	เริ่มต้น	1.00	100%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.63	63%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.98	98%
3	เริ่มต้น	0.98	98%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.60	60%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.95	95%
4	เริ่มต้น	0.95	95%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.57	57%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.91	91%

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและปริมาณของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ตารางที่ ข1 องค์ประกอบธาตุและปริมาณของตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตัวพาทออกซิเจน	โครงสร้างผลึก	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (100 : 0)	Fe_2O_3	95.800
	SiO_2	2.360
	BaO	0.631
	CuO	0.152
	Cr_2O_3	0.140
	SO_3	0.111
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (80 : 20)	Fe_2O_3	77.000
	Al_2O_3	19.600
	SiO_2	2.220
	BaO	0.502
	CuO	0.129
	Cr_2O_3	0.113
	SO_3	0.106
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60 : 40)	Fe_2O_3	60.700
	Al_2O_3	36.300
	SiO_2	2.040
	BaO	0.396
	CuO	0.104

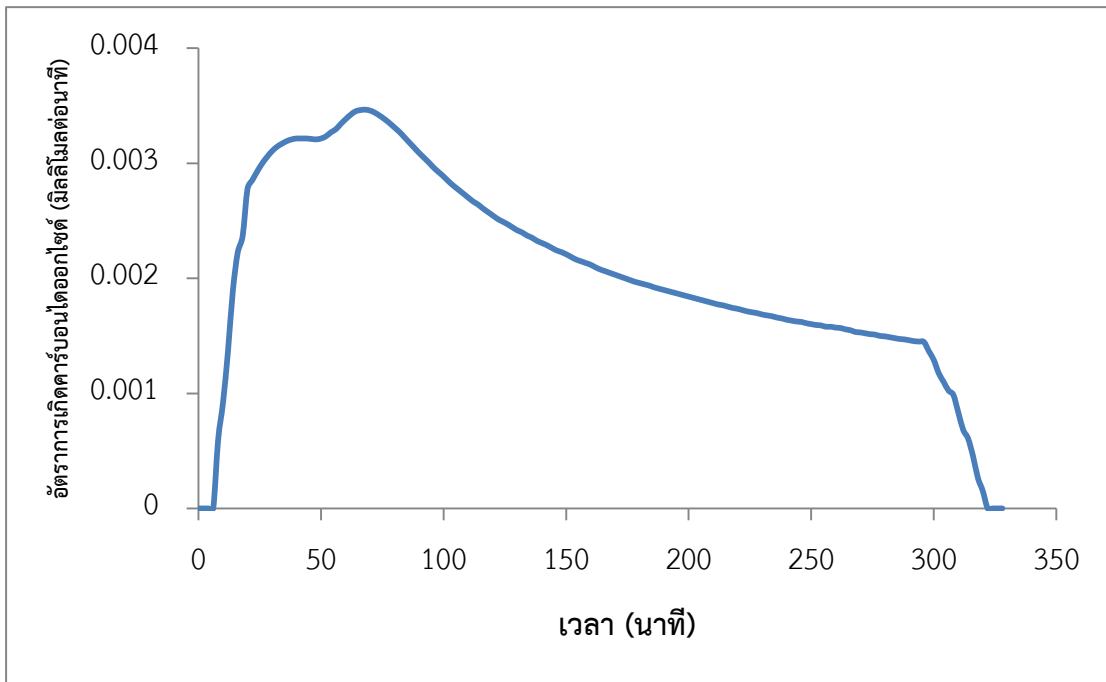
ตัวพาทออกซิเจน	โครงสร้างผลึก	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ (40 : 60)	Fe ₂ O ₃	35.700
	Al ₂ O ₃	62.100
	SiO ₂	1.430
	BaO	0.235
	Na ₂ O	0.175
Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ (20 : 80)	Fe ₂ O ₃	13.600
	Al ₂ O ₃	85.300
	SiO ₂	0.597
	Na ₂ O	0.211

2.ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและปริมาณของตัวพาทออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃
ตารางที่ ข2 องค์ประกอบธาตุและปริมาณของตัวพาทออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃

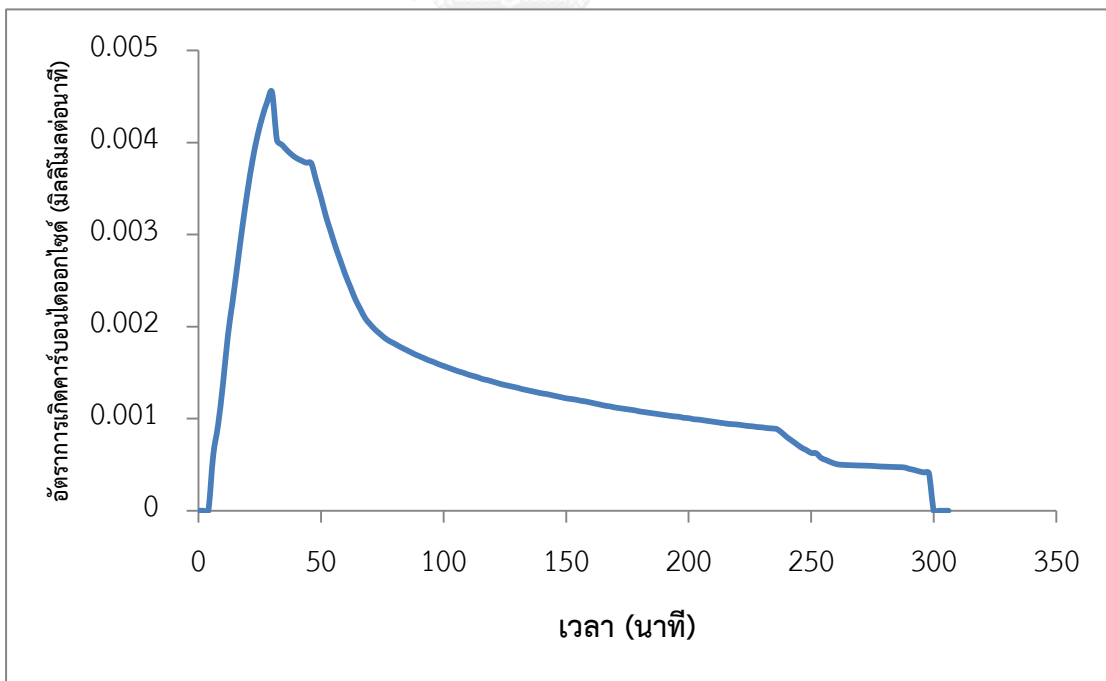
ตัวพาทออกซิเจน	โครงสร้างผลึก	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃ (55 : 5 : 40)	Fe ₂ O ₃	52.200
	ZnO	5.070
	Al ₂ O ₃	39.900
	SiO ₂	1.970
	BaO	0.354
	SO ₃	0.121

ตัวพาทออกซีเจน	โครงสร้างผลึก	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃ (50 : 10 : 40)	Fe ₂ O ₃	50.500
	ZnO	10.600
	Al ₂ O ₃	36.300
	SiO ₂	1.820
	BaO	0.349
	SO ₃	0.107
Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃ (45 : 15 : 40)	Fe ₂ O ₃	42.800
	ZnO	14.700
	Al ₂ O ₃	40.400
	SiO ₂	1.500
	BaO	0.298
Fe ₂ O ₃ /ZnO/Al ₂ O ₃ (40 : 20 : 40)	Fe ₂ O ₃	39.700
	ZnO	37.400
	Al ₂ O ₃	20.800
	SiO ₂	1.490
	BaO	0.269

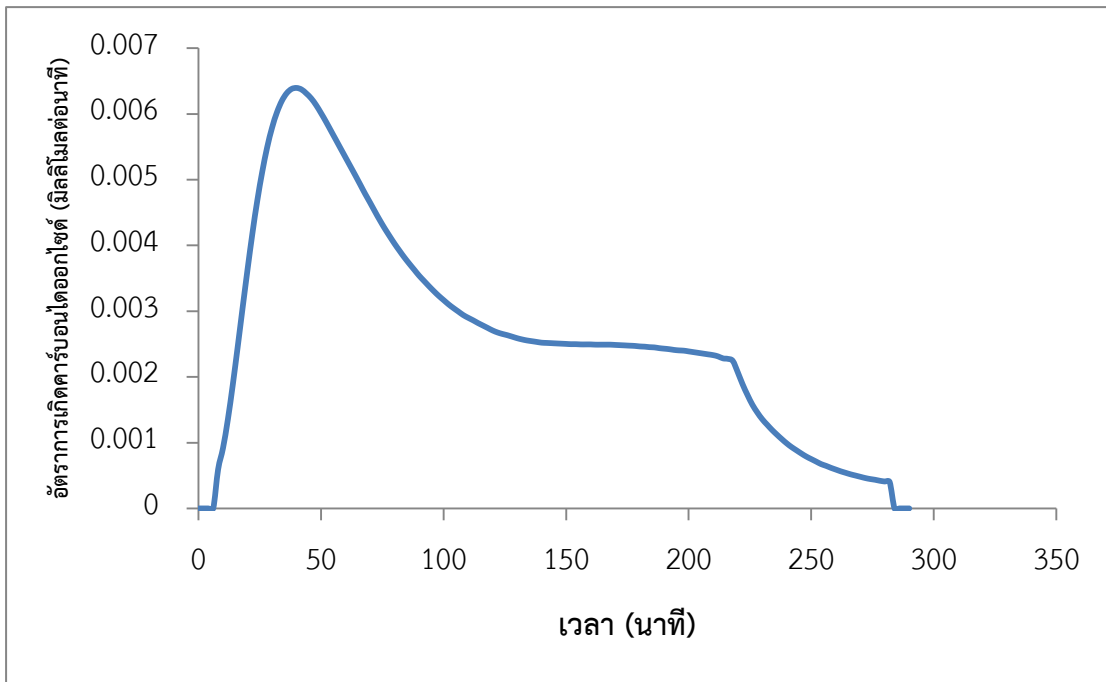
3.กราฟแสดงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$



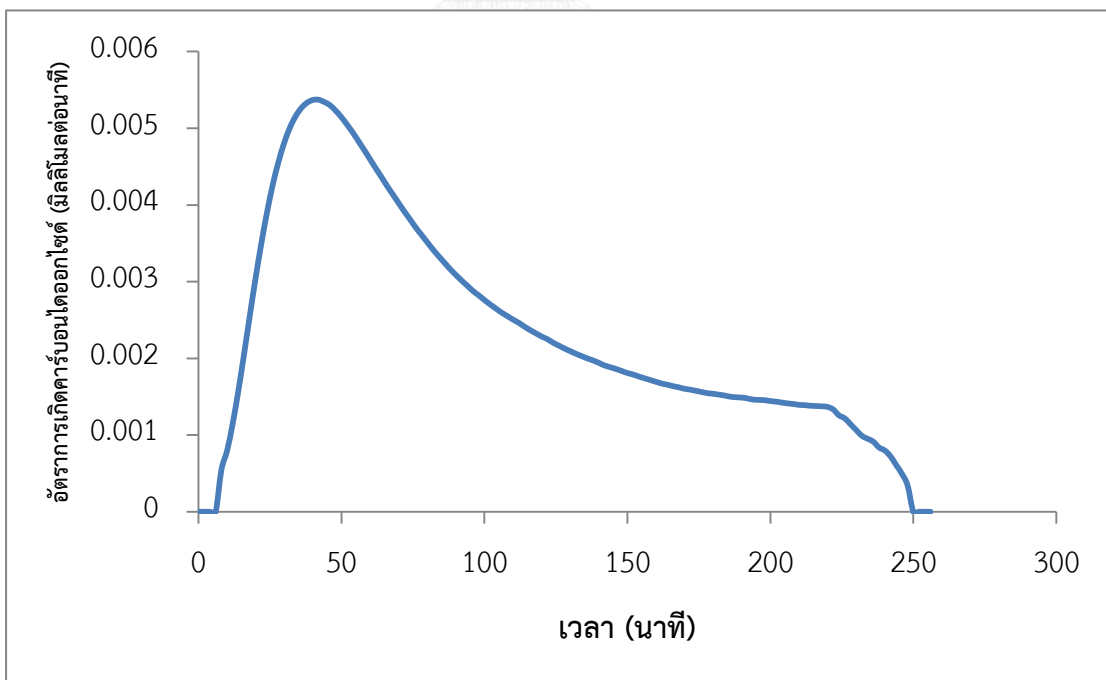
รูปที่ ข1 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20/80)



รูปที่ ข2 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/60)

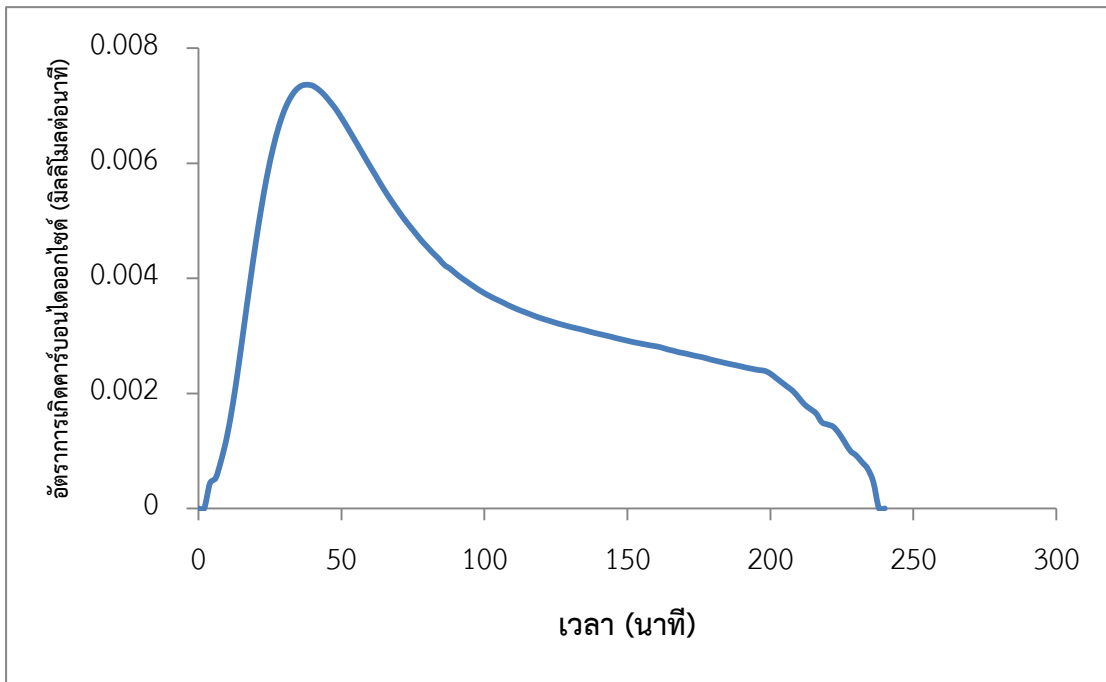


รูปที่ ข3 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน Fe₂O₃/Al₂O₃ (60/40)

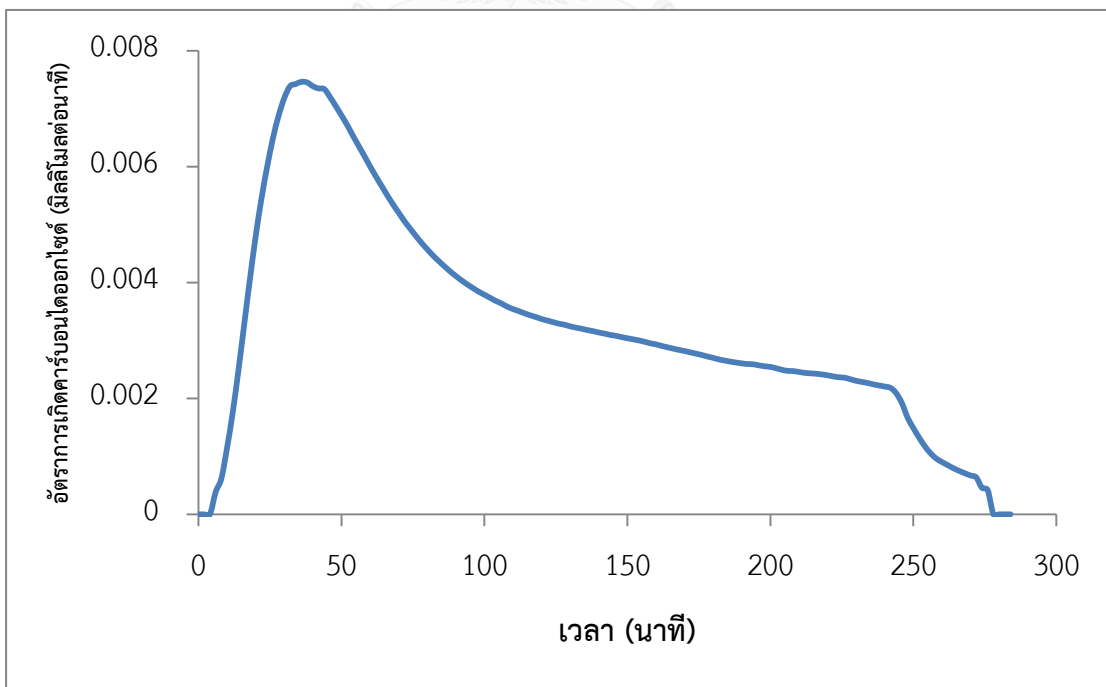


รูปที่ ข4 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาออกซิเจน Fe₂O₃/Al₂O₃ (80/20)

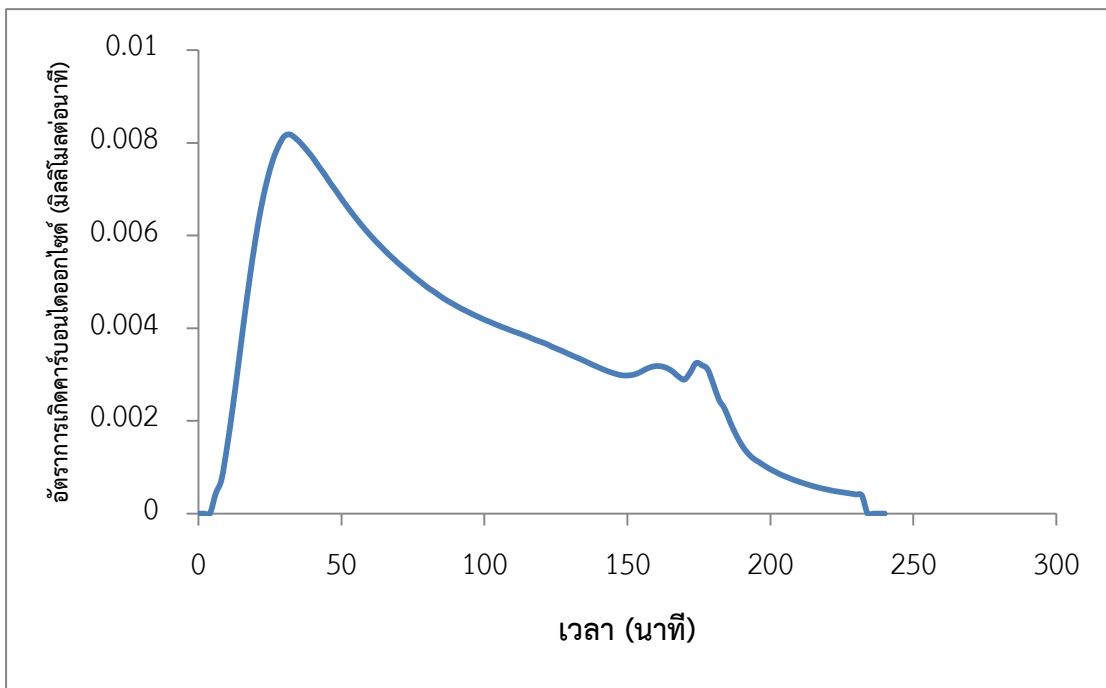
4.กราฟแสดงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$



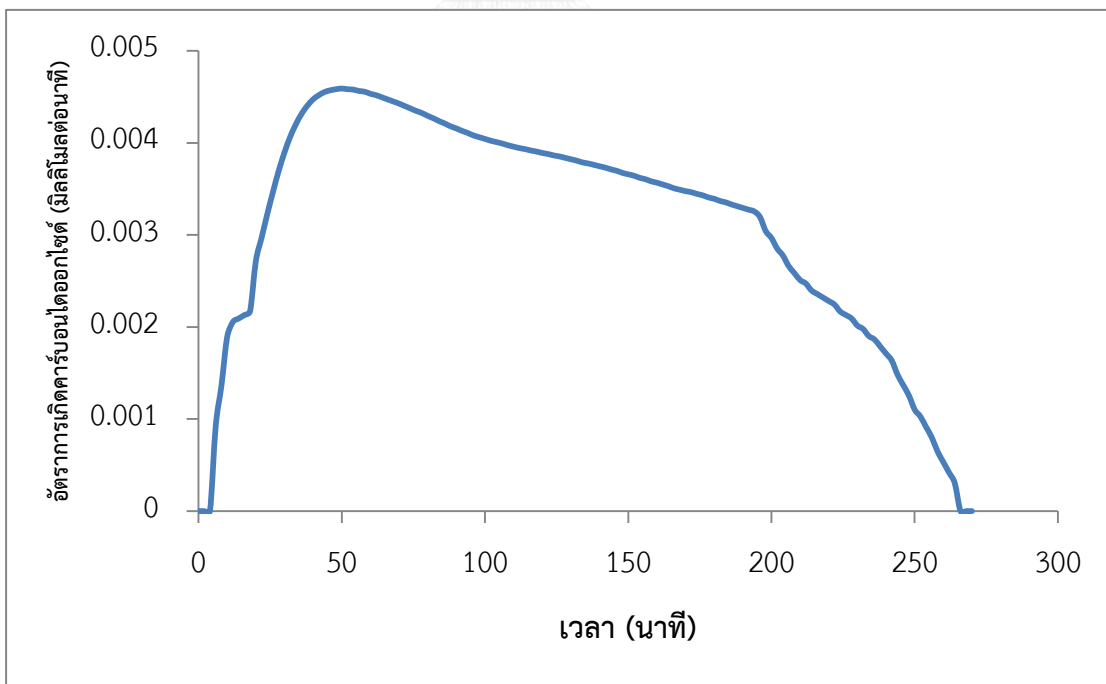
รูปที่ ข5 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (55/5/40)



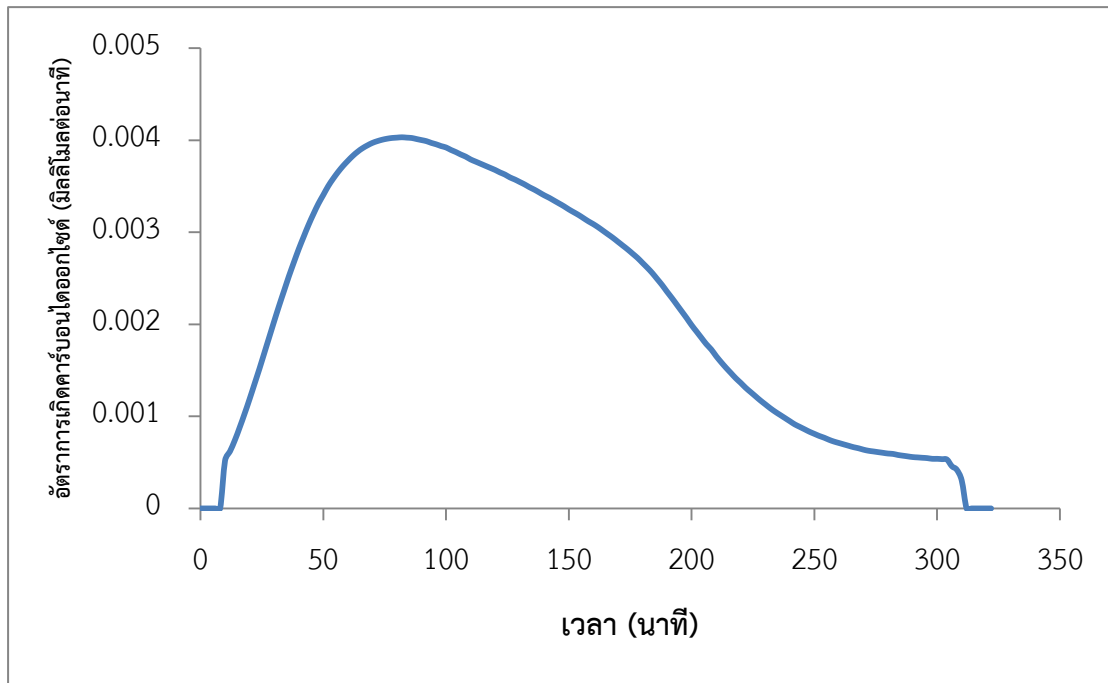
รูปที่ ข6 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทอกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (50/10/40)



รูปที่ ข7 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพลาออกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45/15/40)



รูปที่ ข8 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพลาออกซีเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40/20/40)



รูปที่ ข๑ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพาทออกซิเจน ZnO/Al₂O₃ (60/40)

5.ผลการทดลองการวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพวออกซิเจน

$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

ตารางที่ ข3 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่ออนาที) ตามเวลา โดยใช้ตัวพวออกซิเจนเหล็กออกไซด์

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	40	0.01056
2	0.00000	42	0.01022
4	0.00000	44	0.00991
6	0.00164	46	0.00961
8	0.00265	48	0.00934
10	0.00406	50	0.00908
12	0.00559	52	0.00885
14	0.00709	54	0.00865
16	0.00849	56	0.00846
18	0.00968	58	0.00829
20	0.01064	60	0.00813
22	0.01135	62	0.00797
24	0.01182	64	0.00783
26	0.01206	66	0.00769
28	0.01212	68	0.00756
30	0.01204	70	0.00743
32	0.01184	72	0.00732
34	0.01155	74	0.00721
36	0.01124	76	0.00710
38	0.01091	78	0.00700

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
80	0.00691	138	0.00524
82	0.00682	140	0.00523
84	0.00673	142	0.00522
86	0.00665	144	0.00522
88	0.00656	146	0.00523
90	0.00647	148	0.00523
92	0.00639	150	0.00523
94	0.00631	152	0.00523
96	0.00623	154	0.00524
98	0.00614	156	0.00522
100	0.00607	158	0.00520
102	0.00601	160	0.00519
104	0.00594	162	0.00519
106	0.00587	164	0.00518
108	0.00581	166	0.00517
110	0.00574	168	0.00516
112	0.00569	170	0.00516
114	0.00564	172	0.00515
116	0.00558	174	0.00515
118	0.00554	176	0.00514
120	0.00550	178	0.00514
122	0.00546	180	0.00513
124	0.00541	182	0.00513
126	0.00538	184	0.00512
128	0.00535	186	0.00511
130	0.00532	188	0.00510
132	0.00530	190	0.00510
134	0.00527	192	0.00509
136	0.00525	194	0.00509

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
196	0.00508	254	0.00259
198	0.00508	256	0.00253
200	0.00507	258	0.00247
202	0.00507	260	0.00242
204	0.00507	262	0.00236
206	0.00507	264	0.00231
208	0.00506	266	0.00227
210	0.00506	268	0.00222
212	0.00504	270	0.00217
214	0.00503	272	0.00213
216	0.00503	274	0.00209
218	0.00478	276	0.00205
220	0.00456	278	0.00201
222	0.00436	280	0.00197
224	0.00417	282	0.00193
226	0.00400	284	0.00190
228	0.00384	286	0.00187
230	0.00369	288	0.00183
232	0.00356	290	0.00181
234	0.00344	292	0.00170
236	0.00332	294	0.00162
238	0.00322	296	0.00155
240	0.00312	298	0.00147
242	0.00303	300	0.00139
244	0.00294	302	0.00136
246	0.00286	304	0.00124
248	0.00278	306	0.00113
250	0.00271	308	0.00109
252	0.00265	310	0.00102

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
312	0.00090	322	0.00053
314	0.00083	324	0.00041
316	0.00079	326	0.00000
318	0.00072	328	0.00000
320	0.00064		

ตารางที่ ข4 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้ตัวพาออกซิเจน Fe₂O₃/Al₂O₃ (80 : 20)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	38	0.00533
2	0.00000	40	0.00537
4	0.00000	42	0.00537
6	0.00000	44	0.00534
8	0.00054	46	0.00530
10	0.00080	48	0.00523
12	0.00116	50	0.00514
14	0.00159	52	0.00504
16	0.00207	54	0.00494
18	0.00257	56	0.00483
20	0.00305	58	0.00471
22	0.00350	60	0.00460
24	0.00391	62	0.00448
26	0.00427	64	0.00436
28	0.00457	66	0.00425
30	0.00481	68	0.00413
32	0.00501	70	0.00402
34	0.00516	72	0.00391
36	0.00527	74	0.00381

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
76	0.00370	134	0.00203
78	0.00361	136	0.00200
80	0.00351	138	0.00197
82	0.00342	140	0.00194
84	0.00333	142	0.00191
86	0.00325	144	0.00188
88	0.00316	146	0.00186
90	0.00309	148	0.00184
92	0.00302	150	0.00181
94	0.00295	152	0.00179
96	0.00288	154	0.00176
98	0.00282	156	0.00174
100	0.00276	158	0.00172
102	0.00270	160	0.00169
104	0.00265	162	0.00167
106	0.00260	164	0.00166
108	0.00255	166	0.00164
110	0.00251	168	0.00162
112	0.00246	170	0.00160
114	0.00241	172	0.00159
116	0.00237	174	0.00158
118	0.00233	176	0.00156
120	0.00228	178	0.00155
122	0.00225	180	0.00154
124	0.00220	182	0.00153
126	0.00217	184	0.00152
128	0.00213	186	0.00150
130	0.00209	188	0.00149
132	0.00206	190	0.00149

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
194	0.00146	214	0.00138
196	0.00146	216	0.00138
198	0.00145	218	0.00137
200	0.00144	220	0.00137
202	0.00144	222	0.00133
204	0.00142	224	0.00126
206	0.00141	226	0.00122
208	0.00140	228	0.00114
210	0.00139	230	0.00107
212	0.00139	232	0.00099
214	0.00138	234	0.00095
216	0.00138	236	0.00091
218	0.00137	238	0.00084
220	0.00137	240	0.00080
222	0.00133	242	0.00072
224	0.00126	244	0.00061
226	0.00122	246	0.00049
228	0.00114	248	0.00034
230	0.00107	250	0.00000
194	0.00146	252	0.00000
196	0.00146	254	0.00000
198	0.00145	256	0.00000
200	0.00144		
202	0.00144		
204	0.00142		
206	0.00141		
208	0.00140		
210	0.00139		
212	0.00139		

ตารางที่ ข5 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้
ตัวพวออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (60 : 40)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	52	0.00588
2	0.00000	54	0.00575
4	0.00000	56	0.00561
6	0.00000	58	0.00547
8	0.00059	60	0.00534
10	0.00092	62	0.00520
12	0.00136	64	0.00507
14	0.00188	66	0.00492
16	0.00246	68	0.00478
18	0.00305	70	0.00465
20	0.00363	72	0.00452
22	0.00419	74	0.00438
24	0.00469	76	0.00426
26	0.00512	78	0.00414
28	0.00549	80	0.00403
30	0.00579	82	0.00392
32	0.00602	84	0.00382
34	0.00620	86	0.00372
36	0.00632	88	0.00363
38	0.00638	90	0.00354
40	0.00640	92	0.00346
42	0.00637	94	0.00338
44	0.00631	96	0.00331
46	0.00624	98	0.00323
48	0.00613	100	0.00317
50	0.00601	102	0.00311

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
104	0.00305	162	0.00249
106	0.00300	164	0.00249
108	0.00294	166	0.00249
110	0.00290	168	0.00249
112	0.00286	170	0.00249
114	0.00282	172	0.00248
116	0.00278	174	0.00248
118	0.00274	176	0.00248
120	0.00271	178	0.00247
122	0.00268	180	0.00246
124	0.00265	182	0.00246
126	0.00263	184	0.00245
128	0.00261	186	0.00245
130	0.00259	188	0.00244
132	0.00257	190	0.00243
134	0.00256	192	0.00242
136	0.00254	194	0.00241
138	0.00253	196	0.00240
140	0.00252	198	0.00240
142	0.00252	200	0.00239
144	0.00251	202	0.00238
146	0.00251	204	0.00237
148	0.00251	206	0.00235
150	0.00250	208	0.00234
152	0.00250	210	0.00233
154	0.00250	212	0.00231
156	0.00249	214	0.00228
158	0.00249	216	0.00227
160	0.00249	218	0.00224

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
220	0.00207	278	0.00042
222	0.00189	280	0.00041
224	0.00173	282	0.00040
226	0.00158	284	0.00000
228	0.00146	286	0.00000
230	0.00136	288	0.00000
232	0.00127	290	0.00000
234	0.00119		
236	0.00112		
238	0.00105		
240	0.00099		
242	0.00093		
244	0.00088		
246	0.00083		
248	0.00079		
250	0.00075		
252	0.00071		
254	0.00067		
256	0.00065		
258	0.00062		
260	0.00059		
262	0.00056		
264	0.00054		
266	0.00052		
268	0.00050		
270	0.00048		
272	0.00046		
274	0.00045		
276	0.00044		

ตารางที่ ข6 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้ ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (40 : 60)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	52	0.00320
2	0.00000	54	0.00303
4	0.00000	56	0.00286
6	0.00060	58	0.00271
8	0.00093	60	0.00256
10	0.00138	62	0.00243
12	0.00190	64	0.00230
14	0.00229	66	0.00219
16	0.00270	68	0.00209
18	0.00310	70	0.00203
20	0.00347	72	0.00197
22	0.00380	74	0.00192
24	0.00407	76	0.00188
26	0.00427	78	0.00184
28	0.00444	80	0.00182
30	0.00455	82	0.00178
32	0.00403	84	0.00176
34	0.00398	86	0.00173
36	0.00392	88	0.00170
38	0.00387	90	0.00168
40	0.00383	92	0.00166
42	0.00380	94	0.00163
44	0.00378	96	0.00161
46	0.00378	98	0.00159
48	0.00359	100	0.00157
50	0.00340	102	0.00155

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
104	0.00153	162	0.00116
106	0.00151	164	0.00115
108	0.00150	166	0.00114
110	0.00148	168	0.00113
112	0.00146	170	0.00112
114	0.00145	172	0.00111
116	0.00143	174	0.00111
118	0.00142	176	0.00110
120	0.00140	178	0.00109
122	0.00139	180	0.00108
124	0.00137	182	0.00107
126	0.00136	184	0.00106
128	0.00135	186	0.00106
130	0.00134	188	0.00105
132	0.00132	190	0.00104
134	0.00131	192	0.00103
136	0.00130	194	0.00103
138	0.00129	196	0.00102
140	0.00128	198	0.00101
142	0.00127	200	0.00101
144	0.00126	202	0.00099
146	0.00124	204	0.00099
148	0.00123	206	0.00098
150	0.00122	208	0.00098
152	0.00121	210	0.00097
154	0.00121	212	0.00096
156	0.00119	214	0.00095
158	0.00119	216	0.00094
160	0.00118	218	0.00094

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
220	0.00094	276	0.00049
222	0.00093	278	0.00048
224	0.00092	280	0.00048
226	0.00092	282	0.00048
228	0.00091	284	0.00048
230	0.00091	286	0.00047
232	0.00090	288	0.00047
234	0.00089	290	0.00045
236	0.00089	292	0.00044
238	0.00085	294	0.00043
240	0.00080	296	0.00042
242	0.00076	298	0.00041
244	0.00072	300	0.00000
246	0.00069	302	0.00000
248	0.00066	304	0.00000
250	0.00063	306	0.00000
252	0.00062		
254	0.00057		
256	0.00055		
258	0.00053		
260	0.00051		
262	0.00050		
264	0.00050		
266	0.00050		
268	0.00049		
270	0.00049		
272	0.00049		
274	0.00049		

ตารางที่ ข7 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้
ตัวพวออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (20 : 80)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	52	0.00323
2	0.00000	54	0.00327
4	0.00000	56	0.00330
6	0.00000	58	0.00334
8	0.00059	60	0.00338
10	0.00092	62	0.00342
12	0.00136	64	0.00345
14	0.00189	66	0.00346
16	0.00222	68	0.00347
18	0.00237	70	0.00346
20	0.00278	72	0.00344
22	0.00285	74	0.00341
24	0.00293	76	0.00338
26	0.00300	78	0.00335
28	0.00306	80	0.00331
30	0.00311	82	0.00327
32	0.00314	84	0.00323
34	0.00317	86	0.00318
36	0.00319	88	0.00314
38	0.00321	90	0.00309
40	0.00322	92	0.00305
42	0.00322	94	0.00301
44	0.00322	96	0.00296
46	0.00321	98	0.00292
48	0.00321	100	0.00289
50	0.00322	102	0.00284

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
104	0.00281	162	0.00210
106	0.00277	164	0.00208
108	0.00274	166	0.00206
110	0.00270	168	0.00205
112	0.00267	170	0.00203
114	0.00264	172	0.00202
116	0.00261	174	0.00200
118	0.00258	176	0.00199
120	0.00255	178	0.00197
122	0.00252	180	0.00196
124	0.00249	182	0.00195
126	0.00247	184	0.00194
128	0.00244	186	0.00192
130	0.00242	188	0.00191
132	0.00240	190	0.00190
134	0.00237	192	0.00189
136	0.00235	194	0.00188
138	0.00233	196	0.00186
140	0.00231	198	0.00185
142	0.00229	200	0.00184
144	0.00227	202	0.00183
146	0.00224	204	0.00182
148	0.00223	206	0.00181
150	0.00221	208	0.00180
152	0.00219	210	0.00178
154	0.00216	212	0.00177
156	0.00215	214	0.00177
158	0.00213	216	0.00175
160	0.00212	218	0.00174

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
220	0.00173	266	0.00155
222	0.00172	268	0.00153
224	0.00171	270	0.00153
226	0.00170	272	0.00152
228	0.00170	274	0.00151
230	0.00169	276	0.00151
220	0.00173	278	0.00150
222	0.00172	280	0.00150
224	0.00171	282	0.00149
226	0.00170	284	0.00148
228	0.00170	286	0.00147
230	0.00169	288	0.00147
232	0.00168	290	0.00146
234	0.00167	292	0.00145
236	0.00166	294	0.00145
238	0.00165	296	0.00145
240	0.00164	298	0.00137
242	0.00163	300	0.00129
244	0.00162	302	0.00118
246	0.00162	304	0.00110
248	0.00161	306	0.00102
250	0.00160	308	0.00099
252	0.00159	310	0.00084
254	0.00159	312	0.00068
256	0.00158	314	0.00061
258	0.00158	316	0.00046
260	0.00157	318	0.00027
262	0.00157	320	0.00015
264	0.00156	322	0.00000

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
324	0.00000	328	0.00000
326	0.00000		

6.ผลการทดลองการวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวพวออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃

ตารางที่ ข8 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้ตัวพวออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ (55 : 5 : 40)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	50	0.00679
2	0.00000	52	0.00663
4	0.00044	54	0.00646
6	0.00053	56	0.00629
8	0.00085	58	0.00612
10	0.00126	60	0.00595
12	0.00181	62	0.00578
14	0.00247	64	0.00561
16	0.00320	66	0.00546
18	0.00392	68	0.00531
20	0.00461	70	0.00517
22	0.00523	72	0.00503
24	0.00579	74	0.00490
26	0.00625	76	0.00478
28	0.00662	78	0.00465
30	0.00692	80	0.00455
32	0.00713	82	0.00444
34	0.00727	84	0.00434
36	0.00735	86	0.00423

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
88	0.00417	146	0.00296
90	0.00408	148	0.00294
92	0.00401	150	0.00291
94	0.00394	152	0.00289
96	0.00387	154	0.00287
98	0.00380	156	0.00285
100	0.00374	158	0.00283
102	0.00369	160	0.00282
104	0.00364	162	0.00280
106	0.00359	164	0.00277
108	0.00354	166	0.00274
110	0.00349	168	0.00272
112	0.00345	170	0.00270
114	0.00341	172	0.00267
116	0.00338	174	0.00265
118	0.00334	176	0.00263
120	0.00330	178	0.00260
122	0.00327	180	0.00258
124	0.00324	182	0.00255
126	0.00321	184	0.00253
128	0.00318	186	0.00251
130	0.00316	188	0.00249
132	0.00313	190	0.00247
134	0.00311	192	0.00244
136	0.00308	194	0.00242
138	0.00306	196	0.00240
140	0.00303	198	0.00239
142	0.00301	200	0.00234
144	0.00299	202	0.00227

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
204	0.00219	224	0.00131
206	0.00211	226	0.00115
208	0.00204	228	0.00100
210	0.00192	230	0.00092
212	0.00180	232	0.00081
214	0.00173	234	0.00069
216	0.00165	236	0.00046
218	0.00150	238	0.00000
220	0.00146	240	0.00000
222	0.00142		

ตารางที่ ข9 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้ตัวพวออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ (50 : 10 : 40)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	28	0.00688
2	0.00000	30	0.00718
4	0.00000	32	0.00739
6	0.00038	34	0.00743
8	0.00062	36	0.00747
10	0.00115	38	0.00746
12	0.00177	40	0.00739
14	0.00250	42	0.00735
16	0.00328	44	0.00734
18	0.00406	46	0.00720
20	0.00480	48	0.00705
22	0.00544	50	0.00689
24	0.00600	52	0.00672
26	0.00648	54	0.00654

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
56	0.00636	114	0.00347
58	0.00619	116	0.00344
60	0.00601	118	0.00341
62	0.00584	120	0.00337
64	0.00567	122	0.00334
66	0.00551	124	0.00332
68	0.00535	126	0.00329
70	0.00521	128	0.00327
72	0.00506	130	0.00325
74	0.00493	132	0.00322
76	0.00481	134	0.00320
78	0.00469	136	0.00318
80	0.00458	138	0.00316
82	0.00447	140	0.00314
84	0.00437	142	0.00312
86	0.00428	144	0.00310
88	0.00419	146	0.00308
90	0.00411	148	0.00306
92	0.00404	150	0.00304
94	0.00397	152	0.00302
96	0.00390	154	0.00300
98	0.00384	156	0.00298
100	0.00379	158	0.00295
102	0.00374	160	0.00293
104	0.00368	162	0.00291
106	0.00364	164	0.00288
108	0.00358	166	0.00286
110	0.00354	168	0.00284
112	0.00351	170	0.00282

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
172	0.00280	230	0.00230
174	0.00277	232	0.00229
176	0.00275	234	0.00227
178	0.00272	236	0.00224
180	0.00270	238	0.00222
182	0.00267	240	0.00221
184	0.00266	242	0.00218
186	0.00264	244	0.00209
188	0.00262	246	0.00192
190	0.00261	248	0.00167
192	0.00259	250	0.00149
194	0.00259	252	0.00133
196	0.00257	254	0.00118
198	0.00256	256	0.00106
200	0.00254	258	0.00096
202	0.00252	260	0.00090
204	0.00250	262	0.00085
206	0.00248	264	0.00080
208	0.00247	266	0.00075
210	0.00246	268	0.00071
212	0.00244	270	0.00067
214	0.00243	272	0.00064
216	0.00243	274	0.00046
218	0.00242	276	0.00042
220	0.00240	278	0.00000
222	0.00238	280	0.00000
224	0.00237	282	0.00000
226	0.00236	284	0.00000
228	0.00233		

ตารางที่ ข10 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้
ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	52	0.00663
2	0.00000	54	0.00646
4	0.00000	56	0.00630
6	0.00043	58	0.00615
8	0.00072	60	0.00601
10	0.00144	62	0.00588
12	0.00230	64	0.00575
14	0.00324	66	0.00563
16	0.00421	68	0.00551
18	0.00512	70	0.00540
20	0.00594	72	0.00529
22	0.00664	74	0.00518
24	0.00719	76	0.00508
26	0.00763	78	0.00499
28	0.00794	80	0.00489
30	0.00814	82	0.00481
32	0.00818	84	0.00472
34	0.00810	86	0.00463
36	0.00798	88	0.00456
38	0.00783	90	0.00449
40	0.00768	92	0.00442
42	0.00750	94	0.00436
44	0.00733	96	0.00430
46	0.00714	98	0.00424
48	0.00697	100	0.00418
50	0.00679	102	0.00413

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
104	0.00408	162	0.00318
106	0.00403	164	0.00313
108	0.00399	166	0.00306
110	0.00394	168	0.00295
112	0.00389	170	0.00289
114	0.00385	172	0.00305
116	0.00380	174	0.00325
118	0.00374	176	0.00320
120	0.00370	178	0.00312
122	0.00365	180	0.00280
124	0.00359	182	0.00246
126	0.00354	184	0.00226
128	0.00349	186	0.00197
130	0.00343	188	0.00170
132	0.00338	190	0.00148
134	0.00332	192	0.00131
136	0.00326	194	0.00119
138	0.00321	196	0.00111
140	0.00315	198	0.00103
142	0.00310	200	0.00096
144	0.00305	202	0.00089
146	0.00302	204	0.00083
148	0.00298	206	0.00078
150	0.00298	208	0.00073
152	0.00300	210	0.00069
154	0.00304	212	0.00065
156	0.00310	214	0.00061
158	0.00316	216	0.00057
160	0.00318	218	0.00054

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
220	0.00052	232	0.00039
222	0.00049	234	0.00000
224	0.00047	236	0.00000
226	0.00045	238	0.00000
228	0.00043	240	0.00000
230	0.00041		

ตารางที่ ข11 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้ ตัวพวออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ (40 : 20 : 40)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	36	0.00432
2	0.00000	38	0.00441
4	0.00000	40	0.00447
6	0.00092	42	0.00452
8	0.00136	44	0.00455
10	0.00189	46	0.00457
12	0.00205	48	0.00458
14	0.00209	50	0.00459
16	0.00213	52	0.00458
18	0.00217	54	0.00458
20	0.00271	56	0.00456
22	0.00297	58	0.00456
24	0.00323	60	0.00453
26	0.00347	62	0.00452
28	0.00370	64	0.00450
30	0.00390	66	0.00447
32	0.00407	68	0.00445
34	0.00420	70	0.00443

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
72	0.00440	130	0.00382
74	0.00437	132	0.00381
76	0.00435	134	0.00379
78	0.00433	136	0.00378
80	0.00429	138	0.00376
82	0.00427	140	0.00375
84	0.00424	142	0.00373
86	0.00421	144	0.00371
88	0.00418	146	0.00370
90	0.00416	148	0.00367
92	0.00413	150	0.00366
94	0.00411	152	0.00364
96	0.00408	154	0.00362
98	0.00406	156	0.00361
100	0.00404	158	0.00358
102	0.00402	160	0.00357
104	0.00401	162	0.00355
106	0.00399	164	0.00353
108	0.00398	166	0.00351
110	0.00396	168	0.00349
112	0.00394	170	0.00348
114	0.00393	172	0.00347
116	0.00392	174	0.00345
118	0.00391	176	0.00343
120	0.00389	178	0.00341
122	0.00388	180	0.00339
124	0.00386	182	0.00337
126	0.00385	184	0.00336
128	0.00384	186	0.00333

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
188	0.00331	246	0.00137
190	0.00329	248	0.00126
192	0.00328	250	0.00110
194	0.00326	252	0.00103
196	0.00320	254	0.00091
198	0.00304	256	0.00080
200	0.00297	258	0.00065
202	0.00285	260	0.00053
204	0.00278	262	0.00042
206	0.00266	264	0.00030
208	0.00259	266	0.00000
210	0.00251	268	0.00000
212	0.00247	270	0.00000
214	0.00240		
216	0.00236		
218	0.00232		
220	0.00228		
222	0.00224		
224	0.00217		
226	0.00213		
228	0.00209		
230	0.00202		
232	0.00198		
234	0.00190		
236	0.00186		
238	0.00179		
240	0.00171		
242	0.00164		
244	0.00148		

ตารางที่ ข12 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้
ตัวพวออกซิเจน ZnO/Al₂O₃ (60 : 40)

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	52	0.00350
2	0.00000	54	0.00358
4	0.00000	56	0.00365
6	0.00000	58	0.00372
8	0.00000	60	0.00378
10	0.00052	62	0.00383
12	0.00062	64	0.00388
14	0.00074	66	0.00391
16	0.00088	68	0.00394
18	0.00103	70	0.00397
20	0.00119	72	0.00399
22	0.00135	74	0.00401
24	0.00152	76	0.00402
26	0.00169	78	0.00403
28	0.00186	80	0.00403
30	0.00203	82	0.00403
32	0.00220	84	0.00403
34	0.00236	86	0.00403
36	0.00252	88	0.00401
38	0.00267	90	0.00400
40	0.00282	92	0.00399
42	0.00295	94	0.00397
44	0.00308	96	0.00396
46	0.00320	98	0.00394
48	0.00331	100	0.00392
50	0.00341	102	0.00390

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
104	0.00387	162	0.00305
106	0.00385	164	0.00302
108	0.00382	166	0.00298
110	0.00379	168	0.00294
112	0.00377	170	0.00290
114	0.00375	172	0.00286
116	0.00372	174	0.00281
118	0.00370	176	0.00277
120	0.00368	178	0.00272
122	0.00365	180	0.00267
124	0.00363	182	0.00261
126	0.00360	184	0.00256
128	0.00357	186	0.00249
130	0.00355	188	0.00243
132	0.00352	190	0.00235
134	0.00349	192	0.00229
136	0.00346	194	0.00221
138	0.00343	196	0.00214
140	0.00340	198	0.00207
142	0.00338	200	0.00199
144	0.00334	202	0.00192
146	0.00331	204	0.00185
148	0.00328	206	0.00179
150	0.00325	208	0.00173
152	0.00322	210	0.00166
154	0.00319	212	0.00159
156	0.00315	214	0.00153
158	0.00312	216	0.00147
160	0.00309	218	0.00141

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
220	0.00136	278	0.00060
222	0.00131	280	0.00060
224	0.00127	282	0.00059
226	0.00122	284	0.00058
228	0.00117	286	0.00057
230	0.00113	288	0.00057
232	0.00109	290	0.00056
234	0.00105	292	0.00055
236	0.00102	294	0.00055
238	0.00098	296	0.00055
240	0.00095	298	0.00054
242	0.00091	300	0.00054
244	0.00089	302	0.00054
246	0.00086	304	0.00053
248	0.00083	306	0.00046
250	0.00081	308	0.00042
252	0.00079	310	0.00031
254	0.00077	312	0.00000
256	0.00075	314	0.00000
258	0.00073	316	0.00000
260	0.00071	318	0.00000
262	0.00070	320	0.00000
264	0.00068	322	0.00000
266	0.00067		
268	0.00065		
270	0.00064		
272	0.00063		
274	0.00062		
276	0.00061		

7.ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันที่ต่างกัน

ตารางที่ ข13 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	50	0.00457
2	0.00000	52	0.00451
4	0.00000	54	0.00444
6	0.00042	56	0.00437
8	0.00071	58	0.00430
10	0.00142	60	0.00424
12	0.00218	62	0.00417
14	0.00246	64	0.00410
16	0.00277	66	0.00404
18	0.00309	68	0.00397
20	0.00340	70	0.00391
22	0.00368	72	0.00385
24	0.00394	74	0.00379
26	0.00416	76	0.00372
28	0.00435	78	0.00367
30	0.00449	80	0.00362
32	0.00460	82	0.00357
34	0.00468	84	0.00352
36	0.00473	86	0.00348
38	0.00476	88	0.00343
40	0.00476	90	0.00339
42	0.00474	92	0.00334
44	0.00471	94	0.00330
46	0.00467	96	0.00326
48	0.00462	98	0.00322

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
100	0.00318	158	0.00262
102	0.00315	160	0.00261
104	0.00312	162	0.00260
106	0.00309	164	0.00259
108	0.00306	166	0.00258
110	0.00303	168	0.00257
112	0.00301	170	0.00256
114	0.00299	172	0.00255
116	0.00296	174	0.00255
118	0.00294	176	0.00254
120	0.00291	178	0.00254
122	0.00288	180	0.00253
124	0.00286	182	0.00252
126	0.00284	184	0.00252
128	0.00282	186	0.00251
130	0.00281	188	0.00251
132	0.00279	190	0.00250
134	0.00277	192	0.00249
136	0.00276	194	0.00249
138	0.00274	196	0.00248
140	0.00273	198	0.00248
142	0.00271	200	0.00248
144	0.00270	202	0.00248
146	0.00269	204	0.00247
148	0.00268	206	0.00246
150	0.00266	208	0.00246
152	0.00265	210	0.00245
154	0.00264	212	0.00245
156	0.00263	214	0.00244

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
216	0.00244	274	0.00196
218	0.00243	276	0.00189
220	0.00243	278	0.00181
222	0.00243	280	0.00170
224	0.00242	282	0.00166
226	0.00241	284	0.00155
228	0.00242	286	0.00143
230	0.00241	288	0.00132
232	0.00241	290	0.00113
234	0.00240	292	0.00098
236	0.00240	294	0.00083
238	0.00240	296	0.00064
240	0.00239	298	0.00045
242	0.00239	300	0.00042
244	0.00239	302	0.00000
246	0.00239	304	0.00000
248	0.00239		
250	0.00239		
252	0.00239		
254	0.00238		
256	0.00234		
258	0.00226		
260	0.00226		
262	0.00223		
264	0.00215		
266	0.00211		
268	0.00209		
270	0.00208		
272	0.00204		

ตารางที่ ข14 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้
ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	52	0.00587
2	0.00000	54	0.00568
4	0.00000	56	0.00560
6	0.00000	58	0.00556
8	0.00104	60	0.00541
10	0.00144	62	0.00530
12	0.00229	64	0.00522
14	0.00323	66	0.00511
16	0.00401	68	0.00501
18	0.00508	70	0.00497
20	0.00576	72	0.00495
22	0.00664	74	0.00485
24	0.00740	76	0.00467
26	0.00794	78	0.00460
28	0.00871	80	0.00447
30	0.00915	82	0.00437
32	0.00910	84	0.00432
34	0.00901	86	0.00422
36	0.00918	88	0.00413
38	0.00906	90	0.00410
40	0.00890	92	0.00409
42	0.00833	94	0.00406
44	0.00784	96	0.00396
46	0.00673	98	0.00384
48	0.00622	100	0.00388
50	0.00612	102	0.00386

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
104	0.00377	162	0.00203
106	0.00373	164	0.00197
108	0.00373	166	0.00191
110	0.00364	168	0.00187
112	0.00363	170	0.00181
114	0.00354	172	0.00178
116	0.00347	174	0.00170
118	0.00343	176	0.00166
120	0.00341	178	0.00160
122	0.00330	180	0.00156
124	0.00326	182	0.00153
126	0.00319	184	0.00151
128	0.00312	186	0.00148
130	0.00312	188	0.00144
132	0.00302	190	0.00140
134	0.00293	192	0.00132
136	0.00285	194	0.00129
138	0.00284	196	0.00121
140	0.00271	198	0.00121
142	0.00268	200	0.00117
144	0.00260	202	0.00115
146	0.00254	204	0.00114
148	0.00247	206	0.00112
150	0.00239	208	0.00111
152	0.00230	210	0.00109
154	0.00228	212	0.00109
156	0.00220	214	0.00108
158	0.00210	216	0.00108
160	0.00206	218	0.00107

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
220	0.00106	278	0.00064
222	0.00105	280	0.00061
224	0.00104	282	0.00057
226	0.00104	284	0.00053
228	0.00103	286	0.00049
230	0.00103	288	0.00045
232	0.00102	290	0.00042
234	0.00101	292	0.00040
236	0.00100	294	0.00039
238	0.00100	296	0.00038
240	0.00099	298	0.00034
242	0.00098	300	0.00030
244	0.00097	302	0.00000
246	0.00097	304	0.00000
248	0.00096		
250	0.00095		
252	0.00095		
254	0.00094		
256	0.00094		
258	0.00093		
260	0.00093		
262	0.00092		
264	0.00092		
266	0.00088		
268	0.00082		
270	0.00077		
272	0.00076		
274	0.00072		
276	0.00068		

8.ผลของปริมาณตัวพวออกซิเจนที่แตกต่างกัน

ตารางที่ ข15 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้

ตัวพวออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40) ปริมาณ 0.8 กรัม

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	50	0.00413
2	0.00000	52	0.00412
4	0.00000	54	0.00409
6	0.00043	56	0.00406
8	0.00072	58	0.00402
10	0.00190	60	0.00399
12	0.00219	62	0.00395
14	0.00235	64	0.00391
16	0.00254	66	0.00386
18	0.00274	68	0.00382
20	0.00294	70	0.00378
22	0.00314	72	0.00374
24	0.00331	74	0.00369
26	0.00348	76	0.00365
28	0.00362	78	0.00361
30	0.00375	80	0.00356
32	0.00385	82	0.00352
34	0.00394	84	0.00349
36	0.00401	86	0.00344
38	0.00407	88	0.00340
40	0.00411	90	0.00336
42	0.00414	92	0.00332
44	0.00415	94	0.00328
46	0.00415	96	0.00325
48	0.00415	98	0.00322

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
100	0.00318	158	0.00257
102	0.00315	160	0.00256
104	0.00312	162	0.00255
106	0.00309	164	0.00253
108	0.00306	166	0.00253
110	0.00303	168	0.00252
112	0.00300	170	0.00250
114	0.00298	172	0.00249
116	0.00295	174	0.00249
118	0.00293	176	0.00247
120	0.00290	178	0.00247
122	0.00288	180	0.00246
124	0.00286	182	0.00244
126	0.00284	184	0.00243
128	0.00282	186	0.00242
130	0.00279	188	0.00241
132	0.00277	190	0.00241
134	0.00275	192	0.00239
136	0.00274	194	0.00238
138	0.00272	196	0.00237
140	0.00270	198	0.00236
142	0.00269	200	0.00235
144	0.00267	202	0.00234
146	0.00266	204	0.00233
148	0.00264	206	0.00232
150	0.00263	208	0.00231
152	0.00261	210	0.00230
154	0.00260	212	0.00229
156	0.00258	214	0.00228

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
216	0.00228	274	0.00204
218	0.00227	276	0.00203
220	0.00226	278	0.00203
222	0.00225	280	0.00203
224	0.00224	282	0.00201
226	0.00223	284	0.00190
228	0.00222	286	0.00179
230	0.00221	288	0.00171
232	0.00220	290	0.00163
234	0.00220	292	0.00152
236	0.00219	294	0.00148
238	0.00218	296	0.00144
240	0.00217	298	0.00137
242	0.00216	300	0.00129
244	0.00215	302	0.00125
246	0.00215	304	0.00122
248	0.00214	306	0.00114
250	0.00213	308	0.00110
252	0.00212	310	0.00106
254	0.00212	312	0.00099
256	0.00211	314	0.00091
258	0.00211	316	0.00080
260	0.00210	318	0.00072
262	0.00209	320	0.00065
264	0.00208	322	0.00057
266	0.00208	324	0.00049
268	0.00207	326	0.00042
270	0.00206	328	0.00000
272	0.00205		

ตารางที่ ข16 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้
ตัวพาออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40) ปริมาณ 1.2 กรัม

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	52	0.00537
2	0.00000	54	0.00516
4	0.00000	56	0.00503
6	0.00073	58	0.00482
8	0.00146	60	0.00480
10	0.00235	62	0.00475
12	0.00348	64	0.00471
14	0.00432	66	0.00467
16	0.00508	68	0.00462
18	0.00600	70	0.00456
20	0.00670	72	0.00451
22	0.00733	74	0.00446
24	0.00779	76	0.00441
26	0.00760	78	0.00434
28	0.00749	80	0.00428
30	0.00719	82	0.00421
32	0.00702	84	0.00415
34	0.00685	86	0.00410
36	0.00667	88	0.00404
38	0.00649	90	0.00397
40	0.00631	92	0.00392
42	0.00613	94	0.00386
44	0.00595	96	0.00381
46	0.00570	98	0.00376
48	0.00559	100	0.00373
50	0.00547	102	0.00367

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
104	0.00361	162	0.00267
106	0.00356	164	0.00265
108	0.00352	166	0.00264
110	0.00348	168	0.00263
112	0.00343	170	0.00261
114	0.00340	172	0.00260
116	0.00335	174	0.00259
118	0.00332	176	0.00258
120	0.00328	178	0.00256
122	0.00325	180	0.00255
124	0.00322	182	0.00254
126	0.00319	184	0.00253
128	0.00300	186	0.00251
130	0.00297	188	0.00250
132	0.00310	190	0.00249
134	0.00307	192	0.00248
136	0.00306	194	0.00247
138	0.00287	196	0.00246
140	0.00285	198	0.00245
142	0.00283	200	0.00245
144	0.00281	202	0.00244
146	0.00279	204	0.00243
148	0.00277	206	0.00242
150	0.00292	208	0.00242
152	0.00274	210	0.00241
154	0.00272	212	0.00240
156	0.00271	214	0.00239
158	0.00270	216	0.00239
160	0.00268	218	0.00238

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
220	0.00237	278	0.00225
222	0.00237	280	0.00224
224	0.00236	282	0.00223
226	0.00235	284	0.00223
228	0.00235	286	0.00223
230	0.00234	288	0.00222
232	0.00233	290	0.00221
234	0.00233	292	0.00221
236	0.00233	294	0.00221
238	0.00233	296	0.00220
240	0.00232	298	0.00220
242	0.00232	300	0.00219
244	0.00232	302	0.00219
246	0.00231	304	0.00218
248	0.00231	306	0.00218
250	0.00231	308	0.00218
252	0.00230	310	0.00218
254	0.00230	312	0.00194
256	0.00229	314	0.00175
258	0.00229	316	0.00155
260	0.00228	318	0.00140
262	0.00228	320	0.00117
264	0.00228	322	0.00097
266	0.00227	324	0.00074
268	0.00227	326	0.00058
270	0.00226	328	0.00000
272	0.00226		
274	0.00225		
276	0.00225		

9. ผลของการนำตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชัน
อย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคลูบิง

ตารางที่ ข17 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้
ตัวพาทออกซิเจน $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (45 : 15 : 40) รอบที่ 1

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	48	0.00697
2	0.00000	50	0.00679
4	0.00000	52	0.00663
6	0.00043	54	0.00646
8	0.00072	56	0.00630
10	0.00144	58	0.00615
12	0.00230	60	0.00601
14	0.00324	62	0.00588
16	0.00421	64	0.00575
18	0.00512	66	0.00563
20	0.00594	68	0.00551
22	0.00664	70	0.00540
24	0.00719	72	0.00529
26	0.00763	74	0.00518
28	0.00794	76	0.00508
30	0.00814	78	0.00499
32	0.00818	80	0.00489
34	0.00810	82	0.00481
36	0.00798	84	0.00472
38	0.00783	86	0.00463
40	0.00768	88	0.00456
42	0.00750	90	0.00449
44	0.00733	92	0.00442
46	0.00714	94	0.00436

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
96	0.00430	154	0.00304
98	0.00424	156	0.00310
100	0.00418	158	0.00316
102	0.00413	160	0.00318
104	0.00408	162	0.00318
106	0.00403	164	0.00313
108	0.00399	166	0.00306
110	0.00394	168	0.00295
112	0.00389	170	0.00289
114	0.00385	172	0.00305
116	0.00380	174	0.00325
118	0.00374	176	0.00320
120	0.00370	178	0.00312
122	0.00365	180	0.00280
124	0.00359	182	0.00246
126	0.00354	184	0.00226
128	0.00349	186	0.00197
130	0.00343	188	0.00170
132	0.00338	190	0.00148
134	0.00332	192	0.00131
136	0.00326	194	0.00119
138	0.00321	196	0.00111
140	0.00315	198	0.00103
142	0.00310	200	0.00096
144	0.00305	202	0.00089
146	0.00302	204	0.00083
148	0.00298	206	0.00078
150	0.00298	208	0.00073
152	0.00300	210	0.00069

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
212	0.00065	228	0.00043
214	0.00061	230	0.00041
216	0.00057	232	0.00039
218	0.00054	234	0.00000
220	0.00052	236	0.00000
222	0.00049	238	0.00000
224	0.00047	240	0.00000
226	0.00045		

ตารางที่ ข18 แสดงการเกิดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา โดยใช้ตัวพวออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ (45 : 15 : 40) รอบที่ 4

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
0	0.00000	32	0.00278
2	0.00000	34	0.00280
4	0.00062	36	0.00281
6	0.00121	38	0.00282
8	0.00126	40	0.00281
10	0.00137	42	0.00279
12	0.00153	44	0.00278
14	0.00172	46	0.00275
16	0.00190	48	0.00273
18	0.00209	50	0.00270
20	0.00225	52	0.00266
22	0.00239	54	0.00263
24	0.00251	56	0.00260
26	0.00260	58	0.00257
28	0.00268	60	0.00253
30	0.00273	62	0.00250

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
64	0.00247	122	0.00190
66	0.00243	124	0.00190
68	0.00239	126	0.00191
70	0.00236	128	0.00192
72	0.00233	130	0.00193
74	0.00230	132	0.00194
76	0.00227	134	0.00195
78	0.00224	136	0.00195
80	0.00221	138	0.00196
82	0.00218	140	0.00196
84	0.00215	142	0.00196
86	0.00212	144	0.00197
88	0.00210	146	0.00198
90	0.00207	148	0.00198
92	0.00204	150	0.00198
94	0.00202	152	0.00198
96	0.00200	154	0.00198
98	0.00197	156	0.00198
100	0.00195	158	0.00198
102	0.00193	160	0.00198
104	0.00191	162	0.00198
106	0.00190	164	0.00198
108	0.00189	166	0.00198
110	0.00188	168	0.00197
112	0.00188	170	0.00197
114	0.00188	172	0.00196
116	0.00188	174	0.00196
118	0.00188	176	0.00196
120	0.00189	178	0.00196

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
180	0.00195	238	0.00177
182	0.00195	240	0.00176
184	0.00194	242	0.00175
186	0.00194	244	0.00174
188	0.00193	246	0.00173
190	0.00193	248	0.00172
192	0.00192	250	0.00171
194	0.00191	252	0.00171
196	0.00191	254	0.00170
198	0.00190	256	0.00169
200	0.00190	258	0.00169
202	0.00189	260	0.00168
204	0.00188	262	0.00168
206	0.00188	264	0.00168
208	0.00187	266	0.00167
210	0.00187	268	0.00167
212	0.00186	270	0.00166
214	0.00185	272	0.00164
216	0.00184	274	0.00162
218	0.00183	276	0.00160
220	0.00183	278	0.00158
222	0.00182	280	0.00153
224	0.00181	282	0.00153
226	0.00180	284	0.00151
228	0.00180	286	0.00146
230	0.00179	288	0.00144
232	0.00179	290	0.00141
234	0.00178	292	0.00139
236	0.00177	294	0.00136

Time (min)	CO ₂ (mmol/min)	Time (min)	CO ₂ (mmol/min)
296	0.00134	314	0.00116
298	0.00132	316	0.00114
300	0.00129	318	0.00103
302	0.00128	320	0.00095
304	0.00126	322	0.00080
306	0.00123	324	0.00069
308	0.00121	326	0.00049
310	0.00120	328	0.00000
312	0.00118		

ตารางที่ ข19 แสดงอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจน Fe₂O₃/ZnO/Al₂O₃ ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบ

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	100%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	68%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	100%
2	เริ่มต้น	100%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	63%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	98%
3	เริ่มต้น	98%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	60%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	95%
4	เริ่มต้น	95%
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	57%
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	91%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัย นายสุจินดา ทองเสริมสุข

การศึกษา

มัธยมศึกษา โรงเรียนบางปะอิน “ราชานุเคราะห์ 1” จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปริญญาโท ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานทางวิชาการ ได้เข้าร่วมประชุม “2016 7th International Conference on Material and Manufacturing Technology (ICMMT 2016)” ระหว่างวันที่ 14 - 16 พฤษภาคม 2559 ณ สำนักบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

ประสบการณ์ฝึกงาน บริษัท พีทีทีโกลบอลเคมีคอล จำกัด(มหาชน)

ที่อยู่ติดต่อได้ 44/3 ม.9 ต.บ้านเลน อ.บางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา 13160

โทรศัพท์ 086-1305155

E-mail address mr-su-jinda@hotmail.com