

ผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของมีเทนด้วยตัวพาออกซิเจน
ชนิดแคลเซียมซัลเฟต

นางสาวอรณี พุนศรีธนากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

EFFECT OF MgO ADDITION ON CHEMICAL-LOOPING COMBUSTION OF METHANE
WITH CaSO₄ OXYGEN CARRIER

Miss Oranee Poonsritanakul



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ต่อการเผาไหม้แบบเค
มีคอลลูบิงของมีเทนด้วยตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียม
ซิลเฟต

โดย

นางสาวอรณี พุนศรีธนากุล

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

อรณี พูนศรีธนากุล : ผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของมีเทนด้วยตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต. (EFFECT OF MgO ADDITION ON CHEMICAL-LOOPING COMBUSTION OF METHANE WITH CaSO₄ OXYGEN CARRIER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ประพันธ์ คูชลธารา , 82 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงที่ใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง จากการทดลองพบว่า ในการทำปฏิกิริยารีดักชันการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและปริมาณผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการนำแคลเซียมซัลเฟตมาใช้เป็นตัวพาออกซิเจนมีข้อเสียคือการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดของแข็งแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งส่งผลเสียต่อการนำมาใช้ในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เกิดการออกซิเดชันกลับมาเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้ยาก การศึกษาผลของการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมต่อประสิทธิภาพของแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงพบว่า เมื่อมีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนและตัวพาออกซิเจนเกิดได้เร็วขึ้น และพบว่าการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงไปเป็นแคลเซียมออกไซด์เกิดได้น้อยลง ในงานวิจัยนี้นอกจากจะศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวพาออกซิเจนในการทำปฏิกิริยารีดักชันแล้ว ยังได้มีการนำตัวพาออกซิเจนมาทดสอบในระบบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง (ปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน) โดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ พบว่าเมื่อเพิ่มร้อยละการผสมของแมกนีเซียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวพาออกซิเจนได้ดียิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5472153023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CHEMICAL-LOOPING COMBUSTION / CASO₄ / OXYGEN CARRIER / MGO

ORANEE POONSRITANAKUL: EFFECT OF MgO ADDITION ON CHEMICAL-LOOPING COMBUSTION OF METHANE WITH CaSO₄ OXYGEN CARRIER.
ADVISOR: ASST. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 82 pp.

In this research, effects of temperature and reaction time on chemical-looping combustion using calcium sulfate as an oxygen carrier were studied. Experiments were carried out in a fixed bed reactor. In the reduction reaction, the results showed that an increase in temperature gave more CH₄ conversion and CO₂ production. At higher reaction time, CH₄ conversion and CO₂ production were increased. However, it was observed the formation of CaO via the side reaction, which is a major problem of using CaSO₄ as an oxygen carrier. This CaO is hard to be converted back to CaSO₄, resulting in a significant drop in regeneration of the oxygen carrier. This work examined an effect of adding magnesium oxide on performance of calcium sulfate in the reduction reaction. It was found that, in case of 5 wt.% and 10 wt.% of MgO mixed with CaSO₄, the main reaction between CaSO₄ and CH₄ was moved forward. Moreover, the side reaction, forming CaO, was decreased. In addition, cyclic experiments of reaction – oxidation reactions (the chemical-looping combustion) were investigated using 10, 30 and 50 wt.% of MgO mixed with CaSO₄. Results were compared to that obtained in case of using pure CaSO₄. An increase in MgO in CaSO₄ exhibited the amelioration of carrier recyclability.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เก่งวลี พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงกำลังใจ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปัญหาภาวะโลกร้อน.....	4
2.2 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์.....	5
2.3 เทคนิคการแยกคาร์บอนไดออกไซด์.....	10
2.4 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง.....	13
2.5 ตัวพาออกซิเจน.....	15
2.6 ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต.....	16
2.7 การใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง.....	18
2.8 ปัญหาของการใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจน.....	19
2.9 แมกนีเซียมออกไซด์.....	19
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	22
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	23
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	26

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	29
4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซัลเฟต.....	30
4.2 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน	31
4.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาออกซิเจน.....	37
4.4 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต.....	39
4.5 ผลของการนำตัวพาออกซิเจนมาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีง.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
รายการอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์.....	54
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	57
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	82

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการที่ใช้ในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์	9
ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี	25
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของตัวพวออกซิเจนที่ใช้และเวลาในการทำปฏิกิริยา	37
ตารางที่ ข1 แสดงพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สมาตรฐาน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี	60
ตารางที่ ข2 แสดงน้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ซั่งได้จริง และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต	63
ตารางที่ ข3 แสดงน้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่ซั่งได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต	64
ตารางที่ ค1 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม	65
ตารางที่ ค2 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม	68
ตารางที่ ค3 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม	70
ตารางที่ ค4 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.6 กรัม	71
ตารางที่ ค5 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 1.0 กรัม	73
ตารางที่ ค6 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวพวออกซิเจนที่ถูผสมแล้ว 0.8 กรัม	75
ตารางที่ ค7 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวพวออกซิเจนที่ถูผสมแล้ว 0.8 กรัม	76

ตารางที่ ค8 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ที่ชั่งได้จริง และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต..... 78

ตารางที่ ค9 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่ชั่งได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต..... 79

ตารางที่ ค10 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักที่ชั่งได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต..... 80

ตารางที่ ค11 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่ชั่งได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต..... 81

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังของกระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์	5
รูปที่ 2.2 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้.....	6
รูปที่ 2.3 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์	8
รูปที่ 2.5 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีง	14
รูปที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) แร่ยิปซัม, (ข) แคลเซียมซัลเฟต.....	16
รูปที่ 2.7 แสดงความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของตัวพาออกซิเจนชนิดต่างๆ	17
รูปที่ 2.8 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีงโดยใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตและใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง.....	18
รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของแมกนีเซียมออกไซด์	20
รูปที่ 3.1 เครื่อง Thermogravimetric Analysis.....	23
รูปที่ 3.2 เครื่อง Micro GC	24
รูปที่ 3.3 เครื่อง X-ray diffraction.....	26
รูปที่ 3.4 แบบจำลองของการทดลองการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีง	28
รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	30
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนตามเวลาที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส	31
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลา ที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	32
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยารีดักชันต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนตามเวลา ที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส	33
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยารีดักชันต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ตามเวลา ที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส.....	34
รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชัน..	35
รูปที่ 4.7 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชัน..	35
รูปที่ 4.8 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชัน..	36
รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนตามเวลา ที่ปริมาณ 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม	38

รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลา ที่ปริมาณ 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม 38

รูปที่ 4.11 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก 39

รูปที่ 4.12 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก..... 40

รูปที่ 4.13 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน 41

รูปที่ 4.14 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน 41

รูปที่ 4.15 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก..... 42

รูปที่ 4.16 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก 43

รูปที่ 4.17 ร้อยละโดยน้ำหนักของเบตในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยาส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต 45

รูปที่ 4.18 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 1 47

รูปที่ 4.19 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 4 47

รูปที่ 4.20 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 1 48

รูปที่ 4.21 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 4 48

รูปที่ g1 แสดงหลักการของ Bragg's law 56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันเศรษฐกิจโลกใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานหลักเพื่อผลิตพลังงาน โดยในกระบวนการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิลจะมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมากเป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน ที่ผ่านมามีความพยายามที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้แบบต่างๆ เช่น การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ การกักเก็บระหว่างการเผาไหม้ และการกักเก็บหลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ แต่เทคนิคเหล่านี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและมีการสูญเสียพลังงานเพิ่มเติมทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำลง เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิงสามารถกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยไม่ต้องสูญเสียพลังงานเพิ่มเติมจึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความน่าสนใจ โดยจะใช้ตัวพาออกซิเจนเป็นตัวส่งผ่านออกซิเจนไปยังเชื้อเพลิง เมื่อตัวพาออกซิเจนสูญเสียออกซิเจนออกจากโครงสร้างสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศ ถึงแม้ว่าการใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนจะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง แต่พบว่ามันมีข้อเสียหลายอย่าง ได้แก่ มีอัตราส่วนของออกซิเจนน้อย ราคาแพง และเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงมีความสนใจนำแคลเซียมซัลเฟตมาใช้เป็นตัวพาออกซิเจน เนื่องจากมีอัตราส่วนของออกซิเจนสูงกว่าโลหะออกไซด์ ราคาถูก และไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาการนำแคลเซียมซัลเฟตมาทำปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันสลับกันหลายรอบพบว่าความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากการสูญเสียซัลเฟอร์และการเกิดของแข็งแคลเซียมออกไซด์ซึ่งจะเกิดการออกซิเดชันกลับมาเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้ยาก ทำให้ปริมาณของตัวพาออกซิเจนลดลงเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาไปหลายครั้ง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาในส่วนนี้จึงมีความสนใจเติมแมกนีเซียมออกไซด์ลงไปผสมกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต เพื่อช่วยให้ตัวพาออกซิเจนสามารถใช้งานได้หลายรอบ และยังคงมีความสามารถในการเป็นตัวพาออกซิเจนที่ดีอยู่

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาออกซิเจน ในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิงโดยใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง และศึกษาความสามารถในการทำปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันสลับกันอย่างต่อเนื่องของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตเมื่อมีการเติมแมกนีเซียมออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมต่อประสิทธิภาพของแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง

1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาของปฏิกิริยาต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิงที่ใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาของปฏิกิริยาต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิงที่ใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจน และศึกษาผลของการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมต่อประสิทธิภาพของแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เตรียมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง

1.4.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ของมีเทนแบบเคมีคอลลูบปิงโดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต

- ผลของอุณหภูมิ (900-1000 องศาเซลเซียส)

- ผลของเวลาของปฏิกิริยา โดยปรับความสูงของเบตตัวพาออกซิเจน (3-5 เซนติเมตร)

1.4.4 วิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph, GC)

1.4.5 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง โดยการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ

1.4.6 วิเคราะห์สมบัติของแคลเซียมซัลเฟตก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ทั้งกรณีที่มีการเติมแมกนีเซียมออกไซด์และไม่เติมแมกนีเซียมออกไซด์

- ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซัลเฟตด้วยเทคนิค Thermogravimetric /Differential Thermal Analysis (TG/DTA)

- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

1.4.7 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงได้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาภาวะโลกร้อน

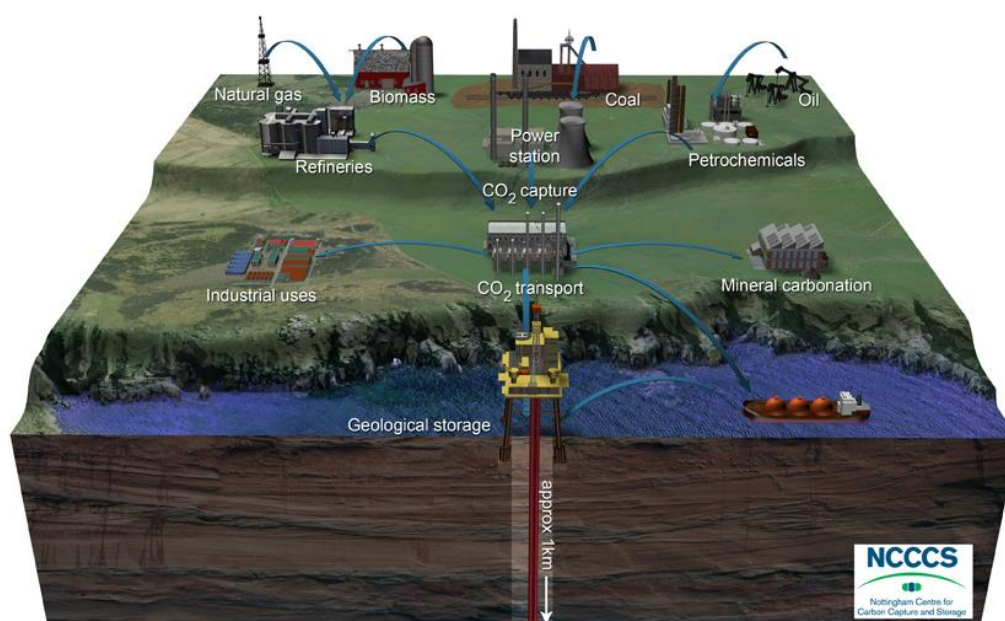
ปัญหาภาวะโลกร้อนที่มีสาเหตุเนื่องมาจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นสถานการณ์ที่น่าวิตกกังวลอย่างมากในปัจจุบัน กิจกรรมในการดำรงชีวิตของมนุษย์มีการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) และมีเทน (CH₄) เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่ของปริมาณที่ถูกปลดปล่อยและเวลาชั่วชีวิตที่คงอยู่ในชั้นบรรยากาศ (life time) พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อนมากที่สุดและเป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีปริมาณมากที่สุดในชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้พบว่าร้อยละ 75 ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตพลังงานและกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการพิจารณาทางเลือกใหม่ในการผลิตพลังงานหรือการลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ

จากปัญหาภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นทำให้มีความพยายามหาแนวทางในการลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแนวทางสำหรับการแก้ปัญหานี้จะเห็นได้ว่ามีอยู่ 5 วิธี ได้แก่

- (1) การลดจำนวนประชากร
- (2) การลดผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ
- (3) การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและใช้พลังงาน
- (4) การเปลี่ยนไปใช้พลังงานที่ไม่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (non-carbon fuels) เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานจากลม
- (5) การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับการลดจำนวนประชากรและการลดผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศเป็นเรื่องที่ควบคุมได้ยาก ทำให้การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและใช้พลังงานเป็นเรื่องเร่งด่วนที่ทุกคนควรช่วยกัน แต่จากการทำนายจำนวนของประชากรโลกพบว่า ประชากรโลกมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 6,600 ล้านคนในปี ค.ศ. 2007 เป็น 8,200 ล้านคนในปี ค.ศ. 2030 ดังนั้นถึงแม้จะมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานก็ไม่อาจลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาได้ เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทุกวัน ส่วนการพัฒนาพลังงานทางเลือกใหม่ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ ที่ไม่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบยังคงมีต้นทุนสูง และเชื้อเพลิงฟอสซิลยังมีอยู่อย่างมากมาย ทำให้เชื้อเพลิง

ฟอสซิลจะถูกใช้ต่อไปอย่างน้อยอีก 20 ปีข้างหน้า ดังนั้นการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจึงเป็นเทคโนโลยีที่จำเป็นที่ทำให้มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลต่อไปได้ ในขณะที่ไม่ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น โดยรูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างแผนผังของกระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่เริ่มกระบวนการผลิตจนถึงขั้นตอนการกักเก็บใต้พื้นดิน



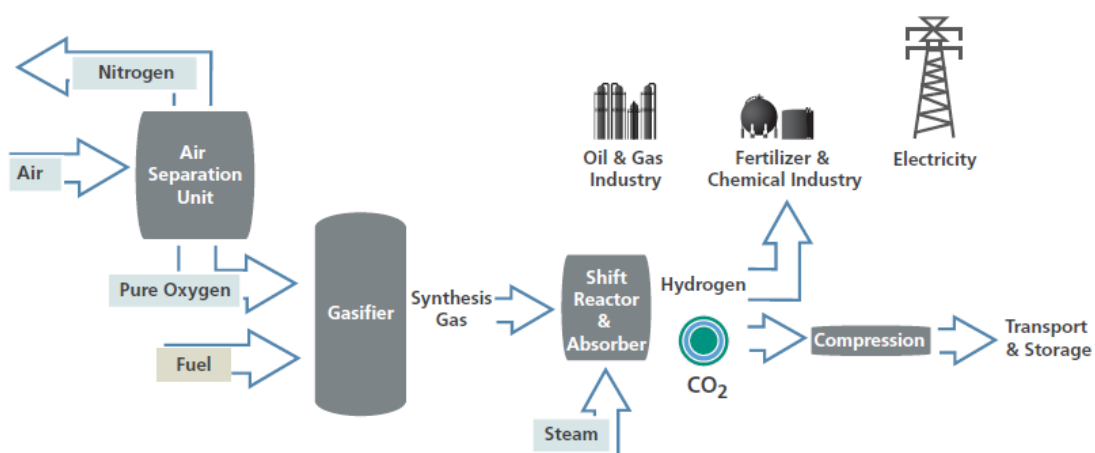
รูปที่ 2.1 แผนผังของกระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ [1]

2.2 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

ในการกักเก็บ กำจัด หรือแยกคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแบ่งออกตามแนวคิดที่แตกต่างกันได้ 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการกักเก็บก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture) กระบวนการกักเก็บหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture) และกระบวนการกักเก็บหลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (oxy-fuel combustion capture) [2, 3]

2.2.1 กระบวนการกักเก็บก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture)

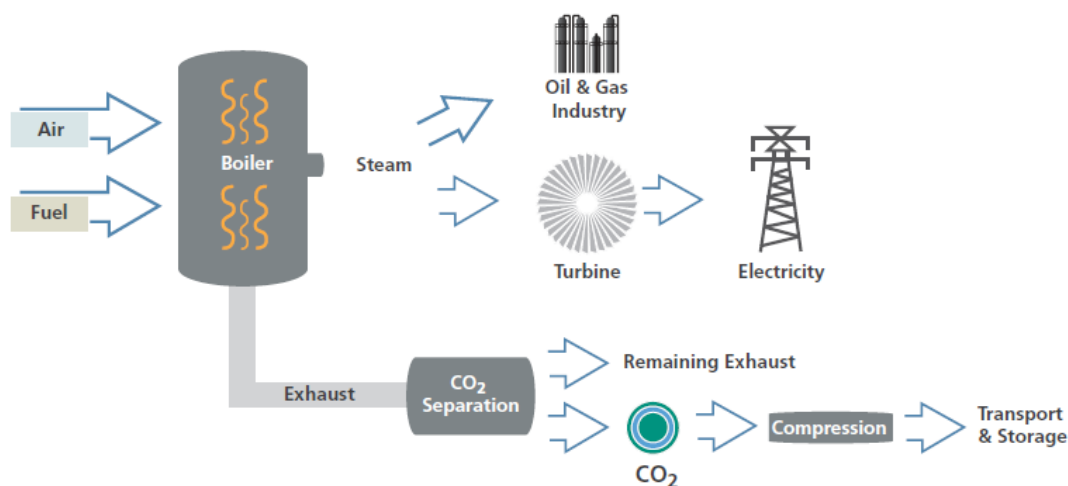
ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยในกระบวนการเชื้อเพลิงที่ใช้จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์โดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและ/หรือไอน้ำผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation reaction) หรือปฏิกิริยารีฟอร์มด้วยไอน้ำ (steam reforming reaction) ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำผ่านปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (water-gas shift reaction) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่มากขึ้น จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกจากไฮโดรเจนซึ่งไฮโดรเจนที่เหลือจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น การนำไปผลิตพลังงาน หรือใช้ในกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไฮโดรเจนสามารถทำได้โดยใช้วิธีการดูดซึม การดูดซับ หรือการใช้เมมเบรน ทั้งชีวมวลและแก๊สธรรมชาติสามารถนำมาใช้กับกระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้ได้ โดยจุดประสงค์ของกระบวนการนี้คือการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนไปเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีคาร์บอน โดยพลังงานทางเคมีของคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปพลังงานทางเคมีของไฮโดรเจน เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการนี้กับกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้จะมีข้อดีคือได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า แต่ข้อเสียของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้คือมีการลงทุนสูง



รูปที่ 2.2 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ [4]

2.2.2 กระบวนการกักเก็บหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture)

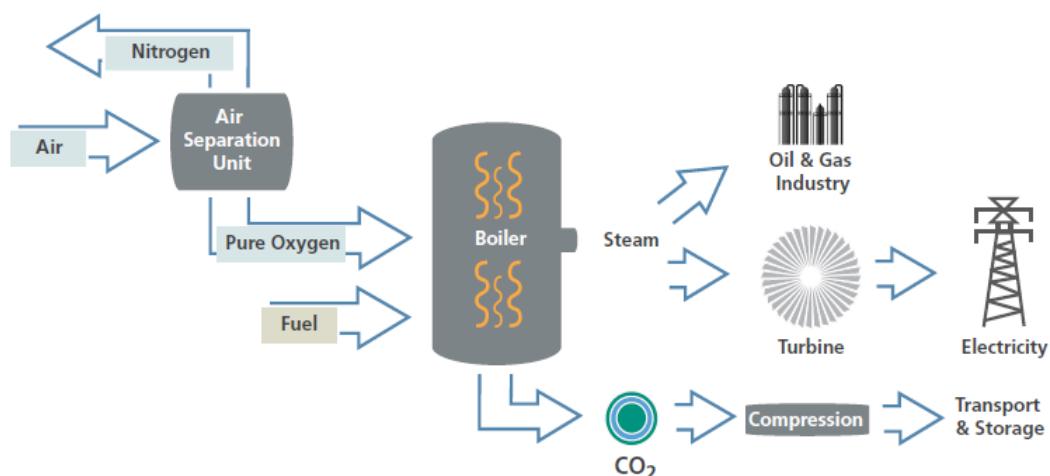
สำหรับกระบวนการกำจัดหรือแยกคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้แสดงดังรูปที่ 2.3 ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 4-14) โดยส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ขาออกจะเป็นไนโตรเจนถึงร้อยละ 70 แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการนี้ เนื่องจากต้องมีการออกแบบเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่ เพื่อที่จะรองรับปริมาณของแก๊สผสมที่มาก ส่งผลให้ต้นทุนในกระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์สูง นอกจากนี้การที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ขาออกน้อยทำให้ต้องใช้กระบวนการแยกที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วกระบวนการที่ใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้การดูดซับโดยใช้เอมีนเป็นตัวดูดซับ โดยเมื่อนำไปใช้แล้วจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่อีก กระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการขุดเจาะน้ำมัน การผลิตยูเรีย และในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม ส่วนกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีอื่นๆก็ถูกนำมาใช้เช่นกัน เช่น การแยกด้วยเมมเบรน หรือการกลั่นที่อุณหภูมิต่ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [4]

2.2.3 กระบวนการกักเก็บหลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (oxy-fuel combustion capture)

กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาต่อมาจากกระบวนการกักเก็บหลังการเผาไหม้ แผนผังกระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยให้เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ (ไม่มีไนโตรเจนอยู่ในระบบ) ซึ่งสามารถผลิตออกซิเจนบริสุทธิ์จากการแยกอากาศแบบโครโอเจนิคหรือใช้เมมเบรนในการแยก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้จะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งต่อมาน้ำจะถูกแยกออกจากคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการควบแน่น กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูงจะทำให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศ โดยปกติแล้วไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศจะทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน แต่ในกระบวนการนี้จะใช้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ซึ่งก็คือคาร์บอนไดออกไซด์ เวียนกลับมาเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อนแทนไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศทำให้อุณหภูมิในเตาไม่สูงเกินไป โดยทั่วไปแล้วกระบวนการนี้จะมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกมากกว่าร้อยละ 80 โดยปริมาตร ทำให้สามารถเลือกใช้เทคนิคการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ได้หลากหลาย นอกจากนี้การใช้กระบวนการนี้จะไม่ทำให้เกิดสารประกอบไนตรัสออกไซด์อีกด้วย ค่าใช้จ่ายหลักที่ต้องลงทุนของกระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์จะเกี่ยวข้องกับส่วนที่ทำการแยกออกซิเจนออกจากไนโตรเจน ซึ่งเป็นส่วนที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงและใช้พลังงานมาก



รูปที่ 2.4 กระบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ [4]

การเลือกใช้กระบวนการต่างๆที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์แก๊สผสม ปริมาณ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแต่ละกระบวนการจะมีข้อดี และข้อเสียแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการที่ใช้ในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การกักเก็บก่อนการเผาไหม้	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกสูง จึงสามารถเลือกเทคโนโลยีการแยกได้หลากหลาย - ลดค่าใช้จ่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นเรื่องใหม่ จึงต้องมีการปรับปรุงโรงงานเพื่อจะใช้เทคโนโลยีนี้ ซึ่งจะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากการปรับเปลี่ยน
การกักเก็บหลังการเผาไหม้	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถใช้กับกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่มีอยู่แล้วในปัจจุบันได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ผลผลิตแก๊สผสมขาออกมี ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์น้อย ทำให้ต้องใช้เทคนิคการแยกที่มีประสิทธิภาพสูง
การกักเก็บหลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกสูง จึงสามารถเลือกเทคโนโลยีการแยกได้หลากหลาย 	<ul style="list-style-type: none"> - สูญเสียพลังงานในการแยกออกซิเจนด้วยเทคนิคโครโอเจนิค ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงอาจเป็นข้อจำกัด - สูญเสียพลังงานในการลดอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ด้วยสายรีไซเคิลของคาร์บอนไดออกไซด์

2.3 เทคนิคการแยกคาร์บอนไดออกไซด์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการกำจัด หรือดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ให้ปล่อยออกสู่บรรยากาศมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งเทคนิคการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการใช้งานส่วนมาก ได้แก่ เทคนิคการดูดซึม (absorption) เทคนิคการดูดซับ (adsorption) เทคนิคไครโอเจนิค (cryogenics) และเทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน (membrane) ซึ่งการเลือกเทคโนโลยีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้ไปใช้ให้เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ผสมจากการเผาไหม้ที่ปลดปล่อยออกมา

2.3.1 เทคนิคการดูดซึม (absorption)

การดูดซึมคือกระบวนการทางเคมีหรือฟิสิกส์ ที่อะตอม โมเลกุล หรือไอออน เข้าไปในส่วนที่เป็นเนื้อในของวัสดุที่เป็นแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง การดูดซึมนั้นเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากการดูดซับ (adsorption) เพราะในการดูดซึมโมเลกุลที่ถูกดูดซึมจะไปในปริมาตรของวัสดุ ส่วนการดูดซับโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของวัสดุ เทคนิคการดูดซึมจะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption) และการดูดซึมทางเคมี (chemical absorption)

2.3.1.1 การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption)

คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมทางกายภาพในตัวทำละลายโดยใช้กฎของเฮนรี (Henry's Law) ทำให้การดูดซึมทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมได้ดีในภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ตัวดูดซึมที่นำมาใช้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน ซึ่งการที่อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และตัวดูดซึมต่ำ ทำให้กระบวนการที่จะนำตัวดูดซึมกลับมาใช้ใหม่ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูงมาก ตัวดูดซึมที่ใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์ พอลิเอทิลีนไกลคอล และไพโรพิสคาร์บอนเนต เป็นต้น ในเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้จะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 40 ที่ความดันประมาณ 20 บาร์ ในกรณีนี้ใช้เทคนิคการดูดซึมแบบกายภาพ (physical absorption) ก็เพียงพอแล้วที่จะสามารถแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้ เมื่อดูดซึมมาได้แล้วก็ทำการลดความดันทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมไว้ถูกปล่อยออกมา

2.3.1.2 การดูดซึมทางเคมี (chemical absorption)

ในกรณีที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่ในแก๊สผสมในระดับต่ำจำเป็นที่จะต้องใช้ตัวดูดซึมที่มีแรงทางเคมี เพื่อให้เกิดการเลือกดูดซึมเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สกรด ตัวดูดซึมทางเคมีที่ใช้จึงมีคุณสมบัติเป็นเบส โดยตัวดูดซึมทางเคมีสามารถที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้เช่นเดียวกับตัวดูดซึมทางกายภาพคือการใช้ความร้อน แต่จะใช้พลังงานสูงกว่าเพื่อเป็นการทำลายพันธะทางเคมี ซึ่งตัวดูดซึมทางเคมีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้แก่ สารละลายที่มีอนุพันธ์ของหมู่เอมีน และสารละลายแอมโมเนีย

อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคการดูดซึมในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์มีข้อเสียคือ

- สารละลายที่ถูกนำมาใช้จะมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณที่จะสามารถแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปได้ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมอยู่ในสารละลาย
- สารละลายที่ใช้จะทำให้เกิดการกัดกร่อนกับอุปกรณ์
- ในการนำสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซึมทางเคมีกลับมาใช้ใหม่จะต้องใช้พลังงานสูง
- ปริมาณสารละลายจะสูญหายไปเนื่องจากเกิดการระเหย
- สารละลายจะเสื่อมคุณภาพเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนในบรรยากาศสูง

2.3.2 เทคนิคการดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 ภาวะใดๆ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวนั้นทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับแล้ว สารที่ใช้ดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการลดความดันเรียกว่า Pressure Swing Adsorption หรือการเพิ่มอุณหภูมิเรียกว่า Temperature Swing Adsorption

2.3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

คาร์บอนไดออกไซด์สามารถที่จะถูกดูดซับบนของแข็งที่มีรูพรุนได้ด้วยแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการดูดซับเคมีเพราะจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการนำกลับมาใช้ใหม่ ตัวดูดซับที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ มีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยเฉพาะ และมีความต้องการใช้พลังงานในการนำกลับมาใช้ใหม่ที่ต่ำ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของแก๊สต่างๆกับขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับพื้นผิวของตัวดูดซับ และความเร็วในการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส ปัจจุบันมีวัสดุที่มีรูพรุนหลายชนิด เช่น อะลูมินา ซีโอไลต์ ถ่านกัมมันต์ และ ซิลิกา วัสดุเหล่านี้ถูกนำมาทดสอบในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีขนาดรูพรุนจำเพาะเจาะจงในช่วงไมโครพอร์ และเมโซพอร์ การดูดซับทางกายภาพจะมีประสิทธิภาพดีในกรณีที่แก๊สผสมมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มาก (มากกว่าร้อยละ 40) เพราะค่าการเลือกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สชนิดอื่นๆไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งเหมาะกับเทคโนโลยีการกักเก็บก่อนการเผาไหม้

2.3.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับเกิดพันธะทางเคมีต่อกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 - 400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible)

2.3.3 เทคนิคไครโอเจนิค (Cryogenic)

การใช้ไครโอเจนิคในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม สามารถทำได้โดยทำการลดอุณหภูมิเพื่อควบแน่นคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นของเหลว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 73.3 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สามารถแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากแก๊สอื่นๆได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สธรรมชาติ โดยพบว่าเทคนิคนี้สามารถแยกคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างดี จึงมีการตรวจสอบค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบกับ การดูดซับด้วยสารละลายเอมีน เพื่อจะประยุกต์ใช้ในกระบวนการจริงต่อไป

2.3.4 เทคนิคเมมเบรน (Membrane)

กระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เยื่อเลือกผ่านเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาถูก ซึ่งเยื่อเลือกผ่านสามารถแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมจากการกักเก็บหลังการเผาไหม้ การแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สธรรมชาติ และการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากไฮโดรเจนในกระบวนการกักเก็บก่อนการเผาไหม้ เทคนิคการใช้เยื่อเลือกผ่านมีข้อดีหลายอย่างคือ

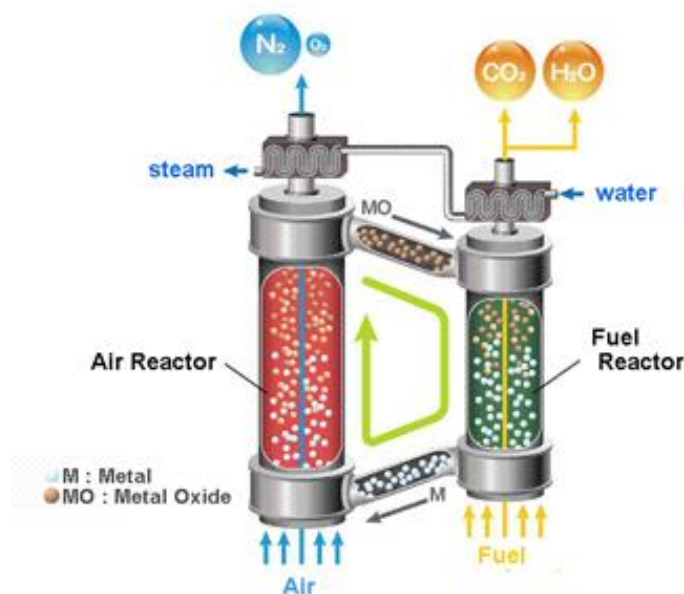
- มีประสิทธิภาพในการแยกสูง
- สามารถนำไปใช้ได้ในอุตสาหกรรม เช่น การแยกอากาศ การนำไฮโดรเจนกลับมาใช้ใหม่ และการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น
- ความหนาแน่นของการบรรจุสูง ซึ่งจะต้องมีการติดตั้งขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตามการกำจัดแก๊สไอเสียจากโรงงานที่มีอัตราการไหลสูงๆ จะต้องใช้เยื่อเลือกผ่านที่มีพื้นที่ใหญ่ขึ้น ทำให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้น ข้อเสียเปรียบของเทคโนโลยีนี้คือต้องการพื้นที่เยื่อเลือกผ่านมาก ราคาแพง และต้องการใช้พลังงานมากจากเครื่องอัดที่มีขนาดใหญ่

2.4 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง

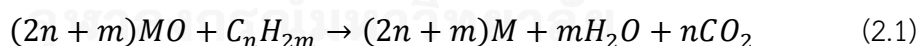
เทคนิคในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์มีหลากหลายวิธีดังที่ได้กล่าวในข้างต้น แต่ข้อเสียหลักของเทคนิคเหล่านี้คือ ใช้พลังงานมากในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานโดยรวมของอุตสาหกรรมนั้นๆ ลดลงถึงร้อยละ 15 - 20 โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 75 ของการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (รวมทั้งการขนส่งและการฝังเก็บ) การนำกระบวนการเหล่านี้ไปติดตั้งในอุตสาหกรรมจริงจึงต้องลงทุนและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ดังนั้นการลดต้นทุนในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้โรงงานต่างๆ สามารถติดตั้งหน่วยแยกคาร์บอนไดออกไซด์ได้จริง

การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (chemical looping combustion, CLC) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการกักเก็บ กำจัด หรือแยกคาร์บอนไดออกไซด์ การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิงเป็นการเผาไหม้ที่ไม่เกิดเปลวไฟ ไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน แต่จะอาศัยตัวพาออกซิเจน (oxygen carrier) ในการส่งผ่านออกซิเจนจากอากาศไปยังเชื้อเพลิง การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิงแตกต่างจากการเผาไหม้ทั่วไปคือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำสามารถถูกแยกออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เช่น ไนโตรเจนและออกซิเจนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงไม่ต้องการพลังงานเพิ่มเติมในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.5 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีง [5]

หลักการของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีงประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์อากาศและเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนจากตัวพาออกซิเจน (oxygen carrier) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นออกไซด์ของโลหะหรือสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (MO) เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ 2.1



ผลิตภัณฑ์ขากออกจากเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เมื่อน้ำเกิดการควบแน่นแยกออกมา ทำให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแยกออกโดยใช้กลไกภายในของกระบวนการเอง ทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติมในการแยก ส่วนตัวพาออกซิเจนที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาแล้วจะกลายเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนลดลง (M) ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องปฏิกรณ์อากาศเพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศได้ตัวพาออกซิเจนกลับมาใช้ใหม่ เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 2.2



โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยารีดักชันจะเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ส่วนปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนรวมที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากทั้ง 2 ปฏิกิริยาจะเท่ากับพลังงานความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้ทั่วไป [6, 7]

กระบวนการเคมีคอลลูบปีงอยู่ระหว่างการพัฒนาขยายขนาดกระบวนการให้มีระดับที่ใหญ่ขึ้น ได้เริ่มมีการทดลองใช้กระบวนการนี้ในอุตสาหกรรมที่ประเทศสหรัฐอเมริกา เยอรมัน จีน และเกาหลี กระบวนการเคมีคอลลูบปีงได้สะท้อนถึงทางเลือกใหม่ที่ยั่งยืนที่สามารถนำไปใช้ทดแทนกระบวนการดั้งเดิมในการผลิตพลังงานจำพวกหม้อไอน้ำหรืออุปกรณ์ทำความร้อน อีกทั้งยังสามารถนำหลักการของกระบวนการนี้ไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ เช่น การลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน [8]

2.5 ตัวพาออกซิเจน

ตัวพาออกซิเจน (oxygen carrier) ในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงเป็นวัสดุของแข็งที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่เป็นพวกออกไซด์ของโลหะหรือสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ตัวพาออกซิเจนจะทำหน้าที่ในการส่งผ่านออกซิเจนจากอากาศสู่เชื้อเพลิง ทำให้ไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

การเลือกใช้ตัวพาออกซิเจนเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบที่สำคัญในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีง สมบัติของตัวพาออกซิเจนที่สำคัญมีดังนี้

- มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศสูง
- ทนต่อการเสียดสี การแตกหัก และเกิดการจับเป็นก้อนได้ยาก
- มีความเสถียรภายใต้การทำปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง
- ราคาถูก หาได้ง่าย
- มีผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมต่ำ

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาตัวพาออกซิเจนมาอย่างต่อเนื่อง โดยตัวพาออกซิเจนที่มีการศึกษาและใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือตัวพาออกซิเจนประเภทออกไซด์ของโลหะ เช่น นิกเกิลออกไซด์ เหล็กออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งพบว่าสามารถเป็นตัวพาออกซิเจนที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูงและมีความเสถียร [9] อย่างไรก็ตามการใช้ตัวพาออกซิเจนประเภทออกไซด์ของโลหะก็มีข้อเสีย เนื่องจากมีราคาแพง มีปริมาณของออกซิเจนในโครงสร้างน้อย และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นโลหะหนัก ทำให้เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งในการนำกระบวนการเคมีคอลลูบปีงไปใช้งานในอุตสาหกรรมจริง [6]

2.6 ตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต



รูปที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) แร่ยิปซัม [10], (ข) แคลเซียมซัลเฟต [11]

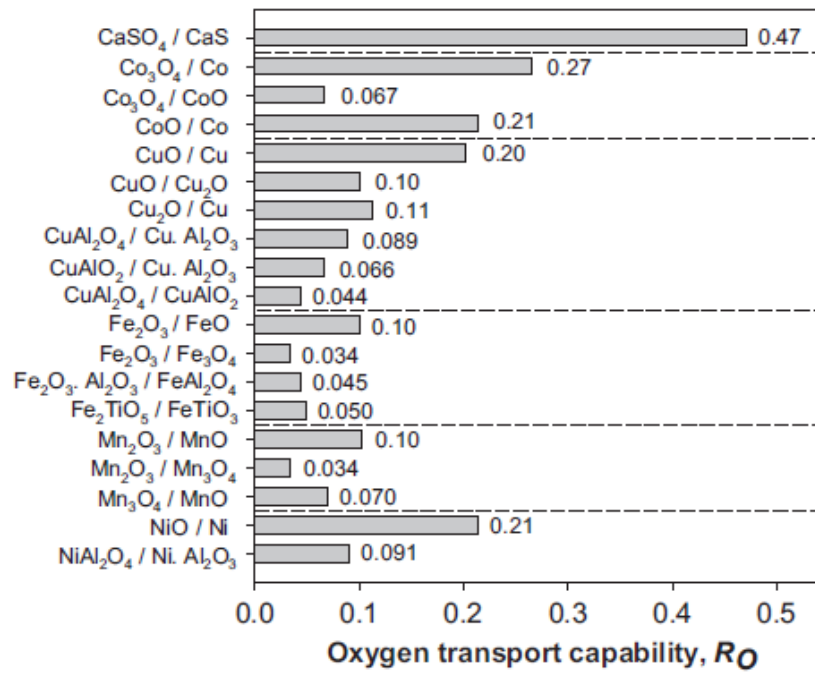
แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นตัวพาทออกซิเจนอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเตรียมได้จากแร่ธรรมชาติที่เรียกว่ายิปซัม (gypsum) ซึ่งเป็นแร่ที่มีมากมายในธรรมชาติ หาได้ง่าย ราคาถูก และการใช้แคลเซียมซัลเฟตจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าการใช้ออกไซด์ของโลหะชนิดอื่น เนื่องจากไม่เสี่ยงต่อการปนเปื้อนของโลหะหนักที่จะรั่วไหลออกสู่ธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจน (Oxygen transport capability, R_o) ของตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต โดยพิจารณาในรูปของอัตราส่วนโดยน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นผลต่างระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถูกละลายออกไซด์กับตัวถูกรีดิวซ์ส่วนด้วยน้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถูกละลายออกไซด์ พบว่าแคลเซียมซัลเฟตมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 0.47 ซึ่งสูงกว่าออกไซด์ของโลหะชนิดอื่นๆมาก โดยความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$R_o = \frac{m_{ox} - m_{red}}{m_{ox}} \quad (2.3)$$

R_o = ความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของตัวพาทออกซิเจน

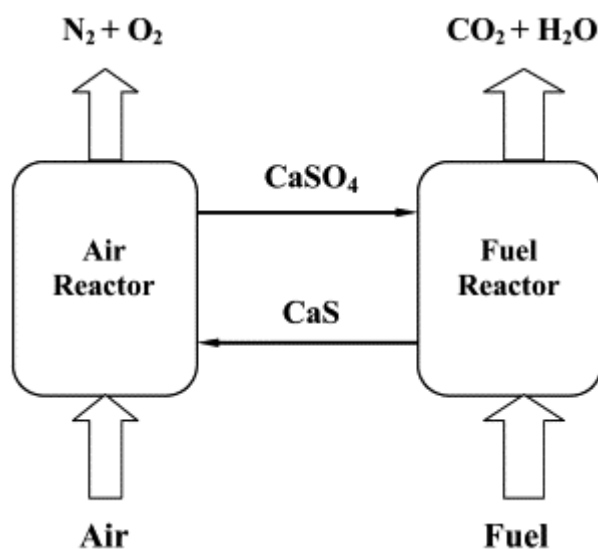
m_{ox} = น้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถูกละลายออกไซด์

m_{red} = น้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถูกรีดิวซ์



รูปที่ 2.7 แสดงความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของตัวพาออกซิเจนชนิดต่างๆ [7]

2.7 การใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง

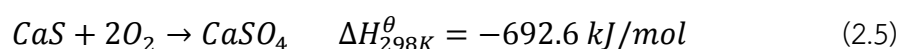


รูปที่ 2.8 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิงโดยใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตและใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง [12]

การใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิงโดยใช้มีเทน (CH_4) เป็นเชื้อเพลิง แสดงแผนผังกระบวนการดังรูปที่ 2.8 เริ่มแรกแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นแคลเซียมซัลไซด์ (CaS) โดยมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงได้ผลิตผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2.4



แคลเซียมซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซัลเฟตและมีเทนจะถูกส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์อากาศเพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศได้แคลเซียมซัลเฟตกลับมาใช้ใหม่ ดังสมการที่ 2.5



การเกิดปฏิกิริยาหมุนเวียนเป็นวัฏจักรระหว่างปฏิกิริยารีดักชันในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะเป็นการส่งผ่านออกซิเจนจากอากาศสู่เชื้อเพลิง จากกระบวนการเคมีคอลลูบิ๊งสามารถได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติมในการแยก และไม่ต้องเสียพลังงานแยกออกซิเจนออกจากอากาศเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงอีกด้วย

2.8 ปัญหาของการใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจน

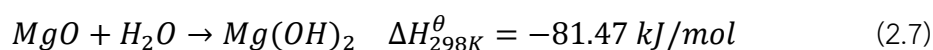
ปัญหาของการนำแคลเซียมซัลเฟตมาใช้เป็นตัวพาออกซิเจนคือการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งทำให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ดังสมการที่ 2.6



ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงส่งผลเสียต่อเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจากเป็นแก๊สกรด ทำให้เกิดการกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ อีกทั้งยังส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมอีกด้วย นอกจากนี้ในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงยังทำให้เกิดของแข็งแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งจะส่งผลเสียต่อการนำตัวพาออกซิเจนกลับไปใช้ใหม่ เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศกลับไปเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้ยาก ทำให้ปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาออกซิเจนในรอบต่อไปของการทำปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นเมื่อมีการใช้งานตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตเป็น cycle โดยทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของตัวพาออกซิเจนที่จะทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงจะลดลงไปเรื่อยๆ ในแต่ละรอบของการใช้งาน [13]

2.9 แมกนีเซียมออกไซด์

แมกนีเซียมออกไซด์เป็นแร่สีขาวที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีสูตรเคมีทั่วไปคือ MgO ส่วนใหญ่แล้วในธรรมชาติจะพบในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์เป็นแร่ที่ขอบูดความชื้นดังสมการที่ 2.7 โดยสามารถทำให้กลับมาเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ได้โดยอาศัยการให้ความร้อนเพื่อกำจัดความชื้นออก



ในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงแมกนีเซียมออกไซด์ไม่ได้มีหน้าที่ในการเป็นตัวพาออกซิเจน โดยในระบบการเผาไหม้แมกนีเซียมออกไซด์จะเป็นตัวพาเฉื่อยหรือ inert carrier ซึ่งออกซิเจนในโครงสร้างของแมกนีเซียมออกไซด์จะไม่หลุดออกไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของแมกนีเซียมออกไซด์ [14]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

He และคณะ [15] ได้ทดลองใช้ออกไซด์ของเหล็กบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ พบว่าออกไซด์ของเหล็กบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนที่ดี มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ทั้งในปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันอย่างไรก็ตาม Ding และคณะ [16] ได้กล่าวถึงการใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจน ว่าโลหะออกไซด์มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีราคาแพง มีอัตราส่วนของออกซิเจนในโครงสร้างน้อย อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นโลหะหนัก

Wang และ Anthony [17] ได้จำลองการใช้แคลเซียมซิลิเกตเป็นตัวพาออกซิเจนในการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงแข็งโดยใช้โปรแกรม ASPEN Plus โดยเชื้อเพลิงแข็งจะผ่านกระบวนการแกซีฟิเคชันก่อน จากนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สจะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ในการศึกษาสถานะที่ใช้ในการทดลอง พบว่าที่อุณหภูมิสูงสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งทำให้ร้อยละการเปลี่ยนสูงขึ้น แต่การใช้อุณหภูมิสูงจะมีผลกระทบในด้านลบเช่นกัน เพราะที่อุณหภูมิสูงจะทำให้แคลเซียมซิลิเกตเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้สูญเสียความสามารถในการทำปฏิกิริยาไปอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดได้มากขึ้น ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นซิลิเฟอไรต์ออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์

Song และคณะ [18] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ (850 – 950 องศาเซลเซียส) ปริมาณของตัวพาออกซิเจนที่ใช้ (30 – 90 กรัม) และอัตราการไหลของมีเทน (50 – 200 มิลลิลิตรต่อนาที) ที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งทำการทดลองโดยใช้แคลเซียมซิลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ความดันบรรยากาศ พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยารีดักชันสูงขึ้นจะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น สำหรับผลของปริมาณตัวพาออกซิเจนที่ใช้ พบว่าเมื่อใช้ตัวพาออกซิเจนมากขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักของตัวพาออกซิเจนทำให้ความสูงของเบดมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มเวลาในการสัมผัสกันระหว่างตัวพาออกซิเจนและมีเทน สำหรับผลของอัตราการไหลของมีเทนที่ใช้ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของมีเทนลดลงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อลดอัตราการไหลของมีเทนลง จะเป็นการเพิ่มเวลาในการสัมผัสกันระหว่างตัวพาออกซิเจนและมีเทน

Song และคณะ [13] ได้ศึกษาการใช้แคลเซียมซิลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ความดันบรรยากาศ โดยทำปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันสลับกันอย่างต่อเนื่อง เป็นจำนวน 6 รอบ ในหนึ่งรอบของการทดลองจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาสองขั้นตอนคือปฏิกิริยารีดักชันและปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซิลเฟตและมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในการทำปฏิกิริยา 4 รอบแรก เนื่องจากพื้นผิวของแคลเซียมซิลเฟตมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น แต่หลังจากการทำปฏิกิริยาผ่านไป 4 รอบ พบว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซิลเฟตและมีเทนลดลง เนื่องจากเกิดซิลเฟอร์ไดออกไซด์หลุดออกจากโครงสร้างของแคลเซียมซิลเฟต เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวพาออกซิเจนได้

Tian และคณะ [19] ได้ศึกษาการใช้แคลเซียมซิลเฟตผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวพาออกซิเจนสำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบิง ที่ความดันบรรยากาศ โดยทำปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันสลับกันอย่างต่อเนื่องในเครื่อง TGA พบว่าการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยจับซิลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นกลายเป็นแคลเซียมซิลเฟต ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียตัวพาออกซิเจน ดังนั้นการใช้แคลเซียมซิลเฟตผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวพาออกซิเจน จะมีประสิทธิภาพในการนำมาทำปฏิกิริยาได้หลายรอบมากกว่าการใช้แคลเซียมซิลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การผสมแคลเซียมคาร์บอเนตยังช่วยยับยั้งการจับกลุ่มเป็นก้อนของแคลเซียมซิลเฟต ซึ่งจะเกิดการจับกลุ่มเป็นก้อนอย่างมากที่อุณหภูมิสูง

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาของปฏิกิริยา (ปริมาณของตัวพาทออกซิเจน) ต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงที่ใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาทออกซิเจนและศึกษาผลของการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมต่อประสิทธิภาพของแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ซึ่งจะทำการศึกษาทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ

3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.1.1 แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Ajax Finechem
- 3.1.2 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) จากบริษัท Panreac
- 3.1.3 ไนโตรเจน (N_2) 99.99% จากบริษัทแพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.4 ออกซิเจน (O_2) 99.99% จากบริษัทแพรกแอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 3.1.5 มีเทน (CH_4) 99.995% จากบริษัทไทยอินดัสเตรียล แก๊ส จำกัด (มหาชน)
- 3.1.6 อะลูมินาบอลชนิดไม่ว่องไว (inactive alumina) ขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร
- 3.1.7 ซิลิกาเจล จากบริษัทวิทยาศาสตร์ จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ทำจากแก้วควอทซ์ (quartz) ทนความร้อน มีความยาวประมาณ 40 เซนติเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.2 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 เครื่องให้ความร้อน (tube furnace)
- 3.2.6 อุปกรณ์ดักจับของเหลวที่ควบแน่นได้ (condensable liquid)

3.2.7 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก (bubble flow)

3.2.8 อุปกรณ์วัดความชื้น

3.2.9 ไยแก้ว (quartz wool)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของตัวพอลิเมอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวและความละเอียดสูง ในงานวิจัยนี้ใช้ TG/DTA ยี่ห้อ mettler toledo รุ่น 851e ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทำการทดสอบภายใต้ภาวะบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 30 - 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.1 เครื่อง Thermogravimetric Analysis

3.3.2 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (Micro - Gas Chromatography, Micro GC)

ใช้ในการหาค่าประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Micro Gas Chromatography โมเดล 490 ยี่ห้อ Agilent ดังแสดงในรูป 3.2 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สแสดงดังตารางที่ 3.1 ประกอบไปด้วย 2 คอลัมน์คือ คอลัมน์ชนิด Molecular Sieve 5A (MS5A) ใช้ในการวิเคราะห์ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน และคอลัมน์ชนิด PoraPLOT Q (PPQ) ใช้ในการวิเคราะห์ คาร์บอนไดออกไซด์



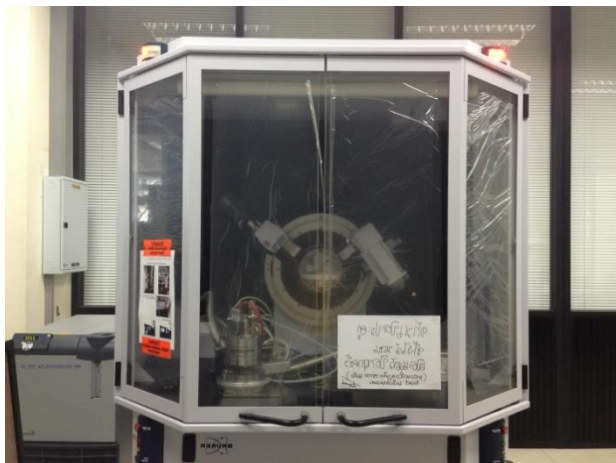
รูปที่ 3.2 เครื่อง Micro GC

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

Chanel 1	
ชนิดคอลัมน์	Molecular Sieve 5A (MS5A)
แก๊สพา (carrier gas)	อาร์กอน
อุณหภูมิการฉีด (injection temperature)	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (oven column temperature)	100 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (detector)	TCD
Chanel 2	
ชนิดคอลัมน์	PoraPLOT Q (PPQ)
แก๊สพา (carrier gas)	ฮีเลียม
อุณหภูมิการฉีด (injection temperature)	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (oven column temperature)	100 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (detector)	TCD

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

ใช้ในการวิเคราะห์หาสารประกอบของของแข็งในตัวอย่างออกซิเจนแคลเซียมซิลเฟตก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาทั้งกรณีที่มีการผสมและไม่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ โดยทดสอบผ่านเครื่อง X-ray diffraction ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูป 3.3 ทำการทดสอบโดยใช้อัตราการสแกน (scan speed) 0.1 องศาต่อนาที มุมที่ใช้ในการทดสอบ 10 - 80 องศา



รูปที่ 3.3 เครื่อง X-ray diffraction

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมตัวพาทอกซิเจน

ตัวพาทอกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแคลเซียมซิลเฟต โดยก่อนนำมาใช้เป็นตัวพาทอกซิเจนจะมีการนำไปเผาไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในกรณีที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซิลเฟตจะเป็นการผสมทางกายภาพ (physical mixing) โดยมีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 5, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก

3.4.2 การศึกษาการใช้ตัวพาทอกซิเจนในการทำปฏิกิริยารีดักชัน

3.4.2.1 ชั่งน้ำหนักตัวพาทอกซิเจนเพื่อบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ โดยก่อนบรรจุตัวพาทอกซิเจน ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีการรองรับด้วยใยแก้ว (quartz wool) และอะลูมินาบอลความสูง 2 เซนติเมตร

3.4.2.2 นำเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการบรรจุตัวพาทอกซิเจนใส่ในเตาให้ความร้อน

3.4.2.3 เปิดไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 45 มิลลิลิตรต่อนาทีและเปิดมีเทนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที รวมอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที รอให้ความเข้มข้นของมีเทนขาออกคงที่ที่ร้อยละ 5 โดยปริมาตร

3.4.2.4 เปิดสวิตช์เตาให้ความร้อนเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดจึงเริ่มทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Micro GC โดยจะมีการนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ทุก 5 นาที

3.4.2.5 ดำเนินการทดลองจนปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองหมดโดยดูจากเครื่อง Micro GC

3.4.2.6 ปิดสวิตช์เตาให้ความร้อนและปิดมีเทน

3.4.2.7 เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสจึงปิดไนโตรเจน

3.4.2.8 ชั่งน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจนที่ผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันแล้ว

3.4.3 การศึกษาการใช้ตัวพาทออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมิคอลสลับปิง โดยทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง

3.4.3.1 ดำเนินการทดลองในส่วนปฏิกิริยารีดักชันตามการทดลองในข้อ 3.4.2

3.4.3.2 เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันเสร็จแล้วจะเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยนำเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวพาทออกซิเจนที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใส่ในเตาให้ความร้อน

3.4.3.3 เปิดไนโตรเจนเข้าระบบด้วยอัตราการไหล 79 มิลลิลิตรต่อนาทีและเปิดออกซิเจนเข้าระบบด้วยอัตราการไหล 21 มิลลิลิตรต่อนาที รวมอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที รอให้ความเข้มข้นของแก๊สออกคองที่

3.4.3.4 เปิดสวิตช์เตาให้ความร้อน เมื่อถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสจึงเริ่มทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Micro GC โดยจะมีการนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ทุก 5 นาที

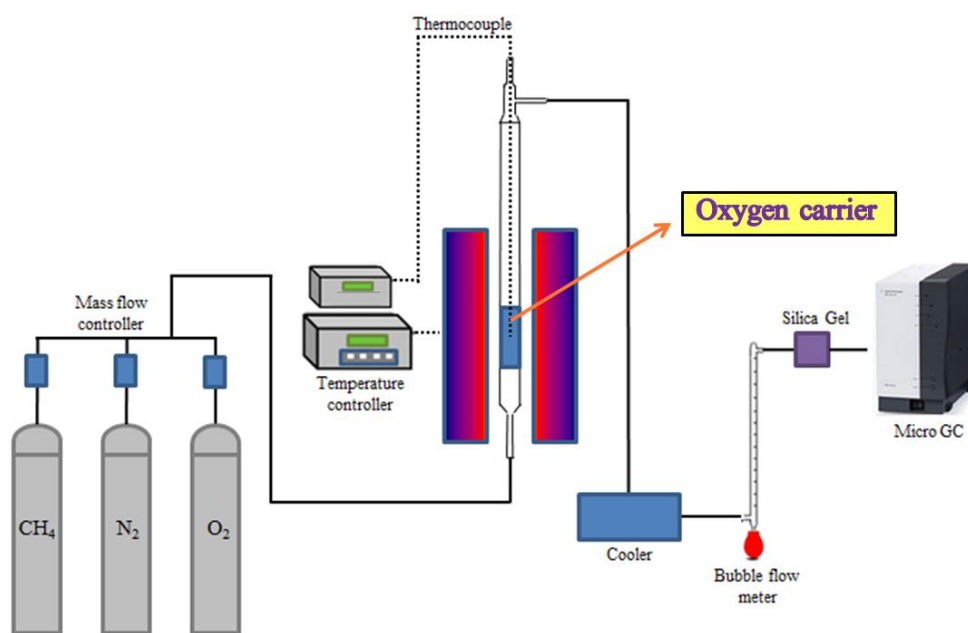
3.4.3.5 ดำเนินการทดลองจนความเข้มข้นของออกซิเจนขาออกคองที่เท่ากับตอนก่อนให้ความร้อน

3.4.3.6 ปิดสวิตช์เตาให้ความร้อนและปิดออกซิเจน

3.4.3.7 เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสจึงปิดไนโตรเจน

3.4.3.8 ชั่งน้ำหนักของตัวพาทออกซิเจนเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

3.4.3.9 เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันต่อด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงครบหนึ่งรอบการทดลอง ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.4.3.1 – 3.4.3.8 อีก 3 รอบ จนครบ 4 รอบการทดลอง



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของการทดลองการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง

การทดลองการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงโดยใช้ตัวพาออกซิเจนเป็นแคลเซียมซัลเฟต มีตัวแปรที่จะทำการศึกษาดังนี้

- ก. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยารีดักชัน (900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส)
- ข. เวลาของปฏิกิริยาหรือปริมาณตัวพาออกซิเจน (0.4, 0.6 และ 0.8 กรัม)
- ค. ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตในปฏิกิริยารีดักชัน (ร้อยละ 0, 5 และ 10)
- ง. ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตในการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่อง (ร้อยละ 0, 10, 30 และ 50)

บทที่ 4

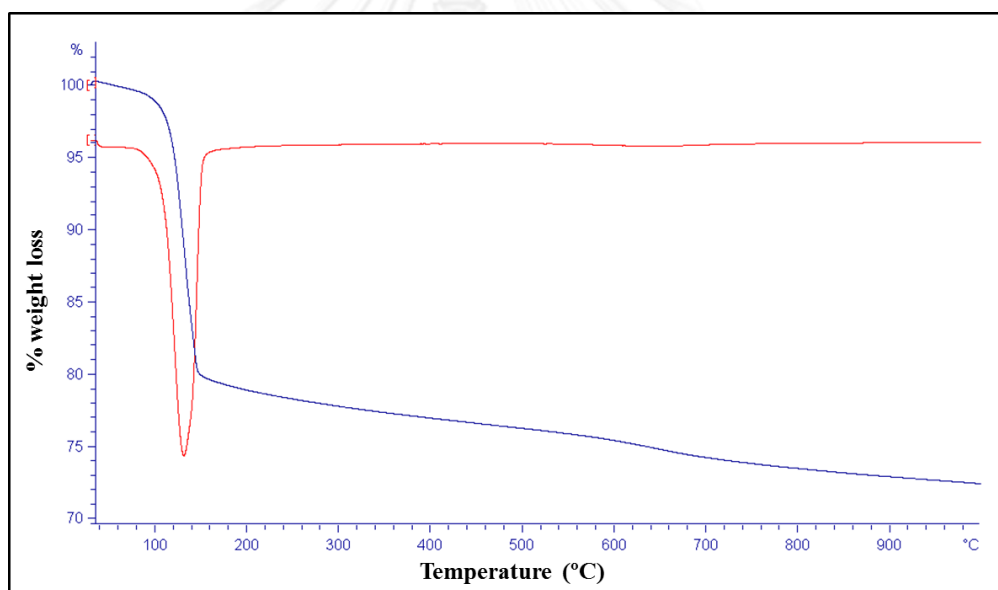
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจนต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงที่ใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาทออกซิเจนโดยใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง และศึกษาผลของการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมต่อประสิทธิภาพของแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ด้วยเครื่องมือโครมาโทกราฟี (Micro Gas Chromatography) และทำการวิเคราะห์หาชนิดของของแข็งในตัวพาทออกซิเจนที่ผ่านการทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองได้เป็น 5 ส่วนดังนี้

- พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซัลเฟตด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA)
- ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน
- ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจน
- ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต
- ผลของการนำตัวพาทออกซิเจนมาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง

4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซัลเฟต

สารที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA) แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตได้รับความร้อนภายใต้ภาวะบรรยากาศไนโตรเจนในช่วงอุณหภูมิ 30 – 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จากการวิเคราะห์พบว่ามีตำแหน่งการสลายตัว 1 ตำแหน่งคือในช่วงอุณหภูมิประมาณ 110 - 140 องศาเซลเซียส และมีการสูญเสียน้ำหนักไปประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียองค์ประกอบของน้ำออกจากโครงสร้าง ดังนั้นก่อนจะนำแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตมาใช้เป็นตัวพอกซีเมนต์ชนิดแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) จะมีการนำมาเผา (calcine) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสก่อนเพื่อไล่น้ำและความชื้นออก

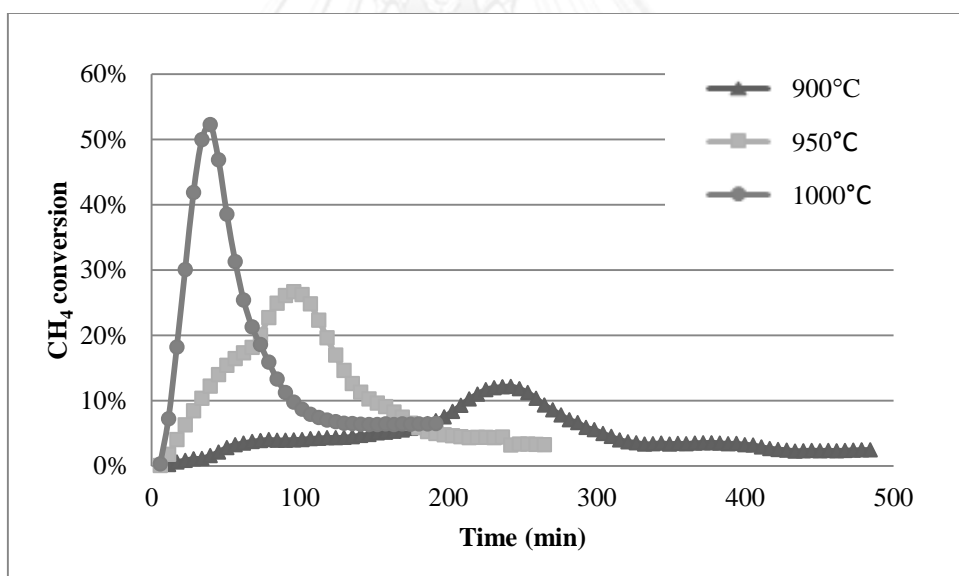


รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

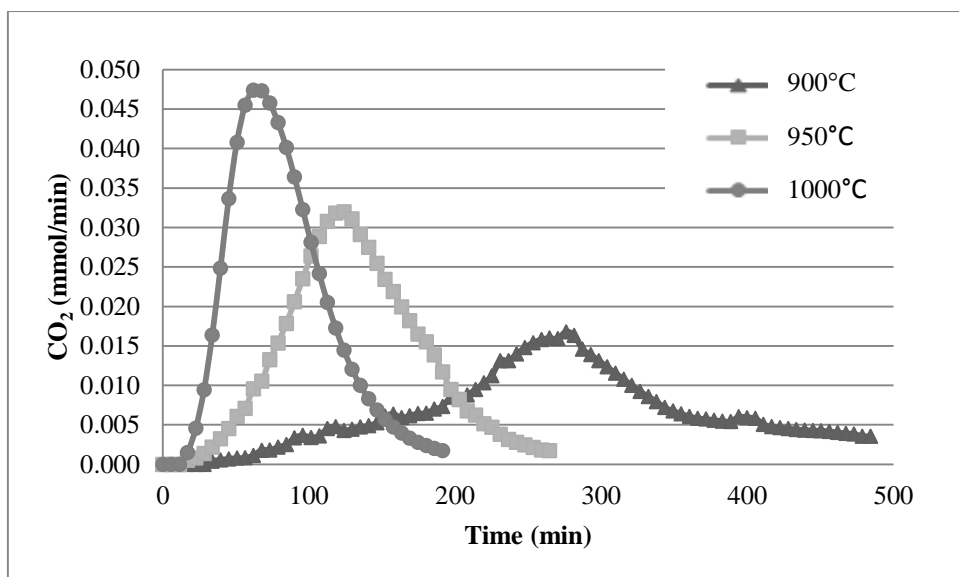
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA

4.2 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต 0.8 กรัมทำปฏิกิริยากับมีเทน ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามเวลาแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยารีดักชันจาก 900 เป็น 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างมีเทนและตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตดังปฏิกิริยาที่ 4.1 เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมีเทนและตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตให้เกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอนุภาคทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น [18, 20, 21]

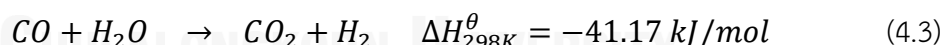
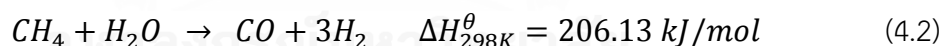


รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนตามเวลาที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชันต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลา ที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส

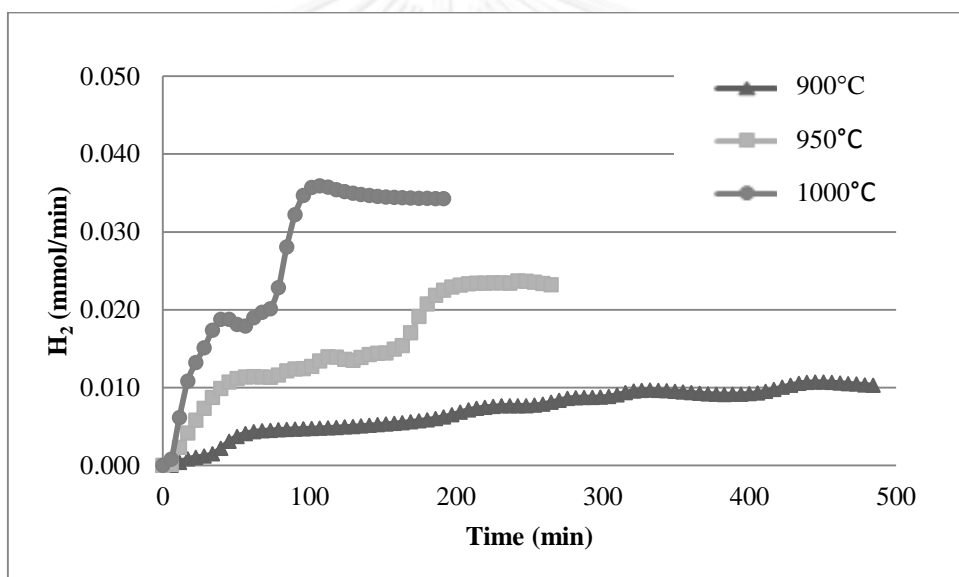
การทำปฏิกิริยารีดักชันนอกจากจะเกิดปฏิกิริยาหลักดังสมการที่ 4.1 ซึ่งจะให้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ แต่ในการทดลองพบว่าจะเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบอีกด้วย ซึ่งไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากในระบบเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทน (CH_4 reforming reaction) และปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (water-gas shift reaction) ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



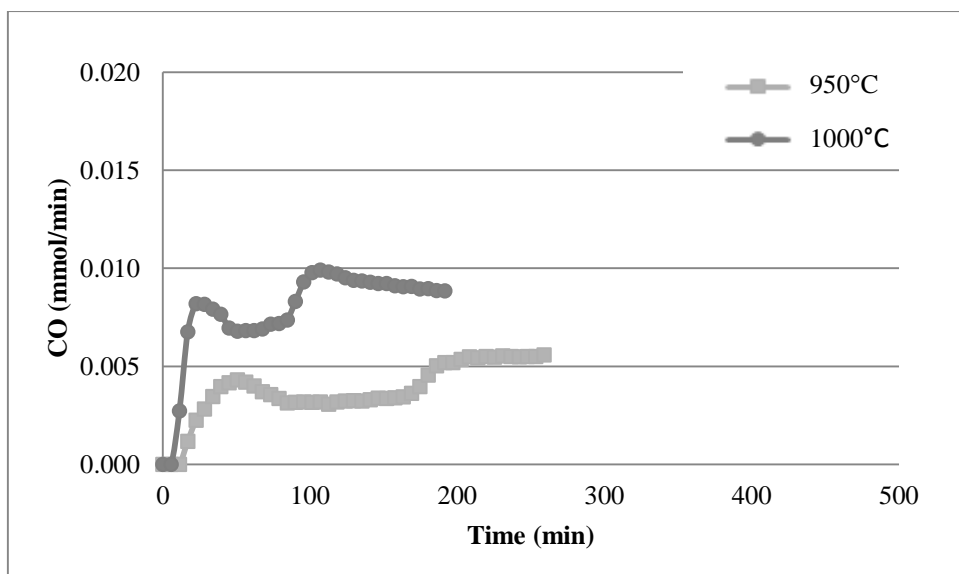
รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยารีดักชันต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ตามเวลา พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยารีดักชันสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สได้มากขึ้นเช่นกัน โดยสังเกตจากการเกิดของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ดังนั้นในระบบที่ทำการทดลองปฏิกิริยารีดักชันนอกจากจะเกิดปฏิกิริยาหลักที่เป็นการเผาไหม้มีเทนแล้ว ยังเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส ซึ่งหากสังเกตจากร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนจากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนมีหลายความชัน

แสดงว่าในแต่ละช่วงมีลักษณะการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิ 950°C ในช่วง 0-75 นาทีแรก ช่วงนี้ในเบตมีปริมาณของออกซิเจนอยู่มากดังนั้นมีเทนจะทำปฏิกิริยากับตัวพาออกซิเจน แคลเซียมซัลเฟตดังสมการที่ 4.1 ซึ่งการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยน้ำที่เกิดขึ้นบางส่วนจะทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สต่อซึ่งสอดคล้องกับการเกิดไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ตามเวลาดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ส่วนในช่วงต่อมาที่ 75-100 นาที ยังคงมีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างมีเทนและออกซิเจนที่อยู่ในเบตและมีการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สจากน้ำที่เกิดในระบบมากขึ้น โดยหลังจากช่วง 100 นาทีไปแล้วพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนเริ่มลดลง เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนในเบตเริ่มหมด ดังนั้นเชื้อเพลิงมีเทนที่ถูกป้อนเข้ามาจะทำปฏิกิริยากับน้ำที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในระบบตามปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส

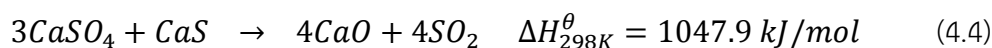


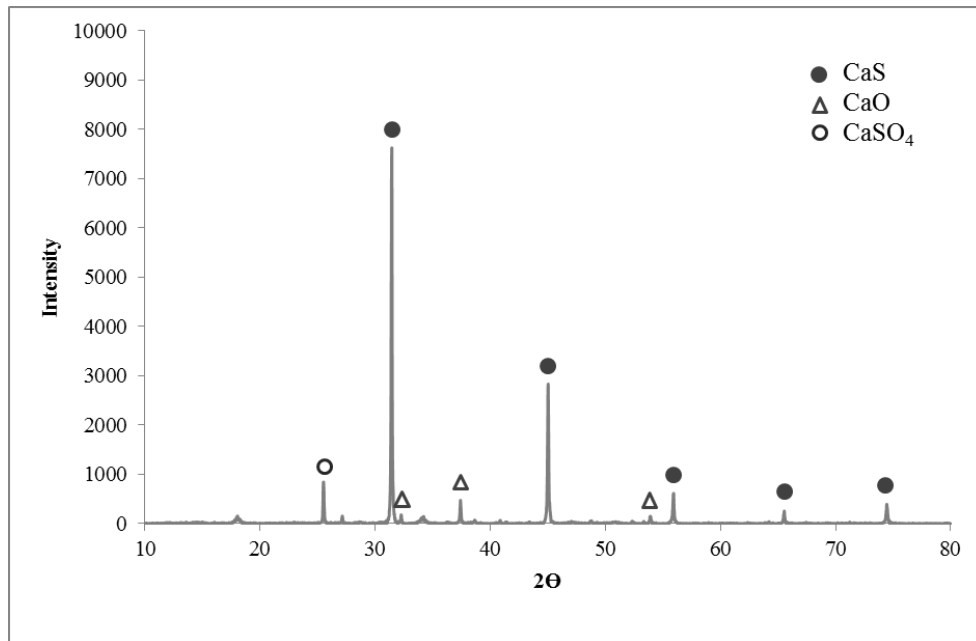
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยารีดักชันต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนตามเวลา ที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส



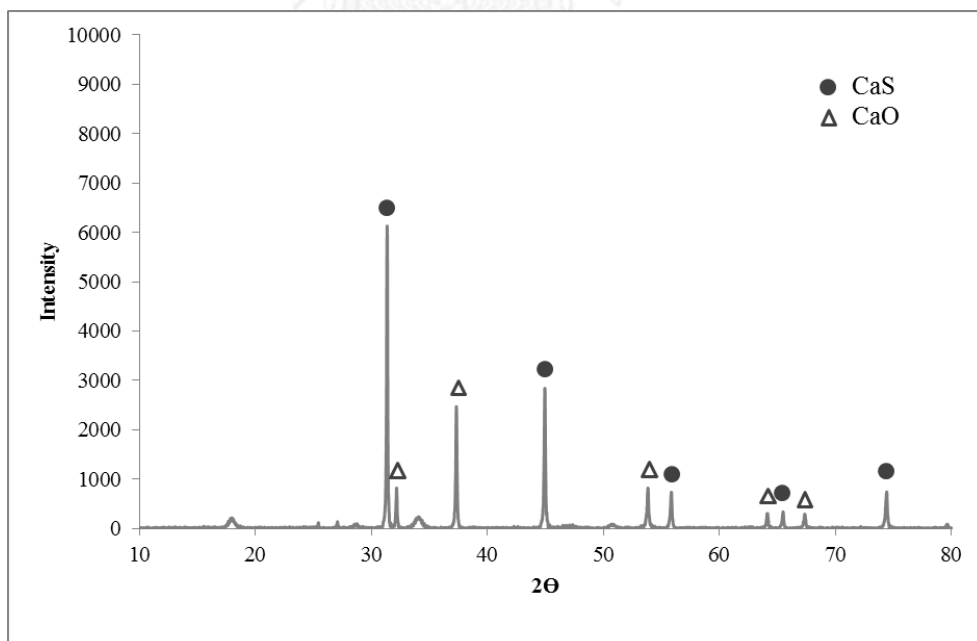
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยารีดักชันต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ตามเวลา ที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการทดลองผ่านปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตกับมีเทนที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ได้นำของแข็งที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบของของแข็งที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.6 – 4.8 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนที่ผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส พบว่าชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นมีสองชนิด ได้แก่ แคลเซียมซัลไฟด์และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งแคลเซียมซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาหลักระหว่างตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตกับมีเทนตามสมการที่ 4.1 ส่วนแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ของแข็งแคลเซียมออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการที่ 4.4

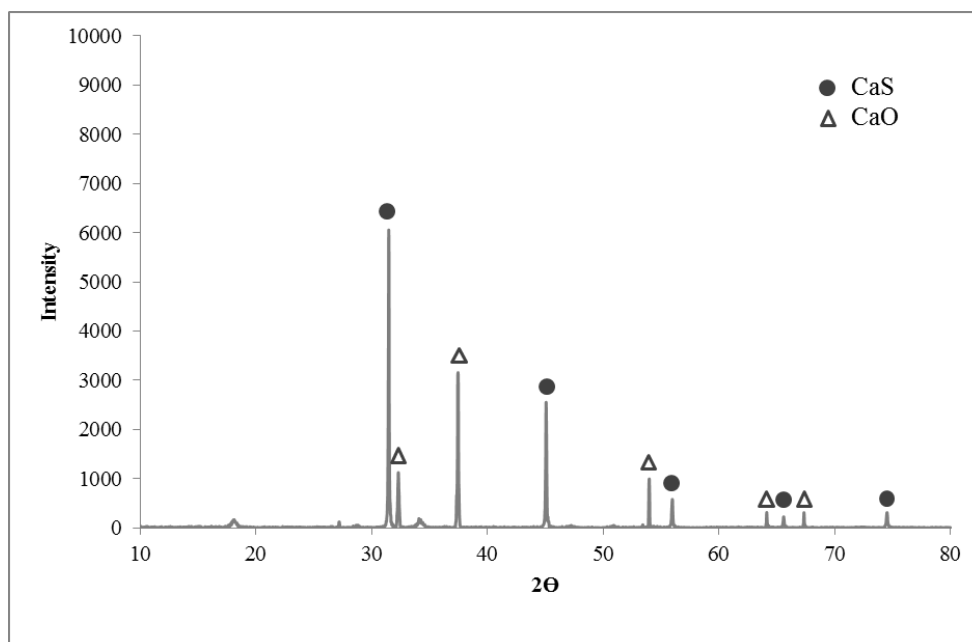




รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของตัวพอกซีเจนชนิดแคลเซียมซิลิเกตเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชัน
กับมีเทนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 รูปแบบ XRD ของตัวพอกซีเจนชนิดแคลเซียมซิลิเกตเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชัน
กับมีเทนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 รูปแบบ XRD ของตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชัน
กับมีเทนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ค่า Intensity ของแคลเซียมออกไซด์เมื่อเทียบกับค่า Intensity ของแคลเซียมซัลไฟด์เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้มากขึ้นเช่นกัน [16, 20]

ดังนั้นในการทำปฏิกิริยารีดักชัน ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะให้คาร์บอนไดออกไซด์สูงที่อุณหภูมิ 950 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงก็ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาข้างเคียงที่มากขึ้นเช่นกัน

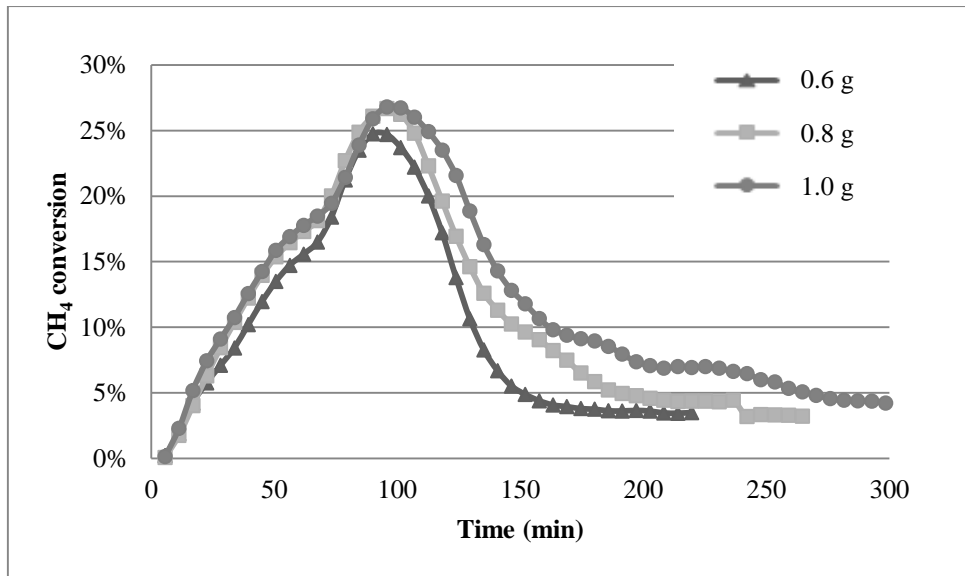
4.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจน

ในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจน ใช้ตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตปริมาณ 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม ทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยแต่ละปริมาณของตัวพาทออกซิเจนสามารถคำนวณมาเป็นเวลาในการทำปฏิกิริยา (Gas Hourly Space Velocity, GHSV) ได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของตัวพาทออกซิเจนมากขึ้น จะทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาหรือเวลาในการสัมผัสกันระหว่างตัวพาทออกซิเจนกับเชื้อเพลิงมากขึ้นเช่นกัน

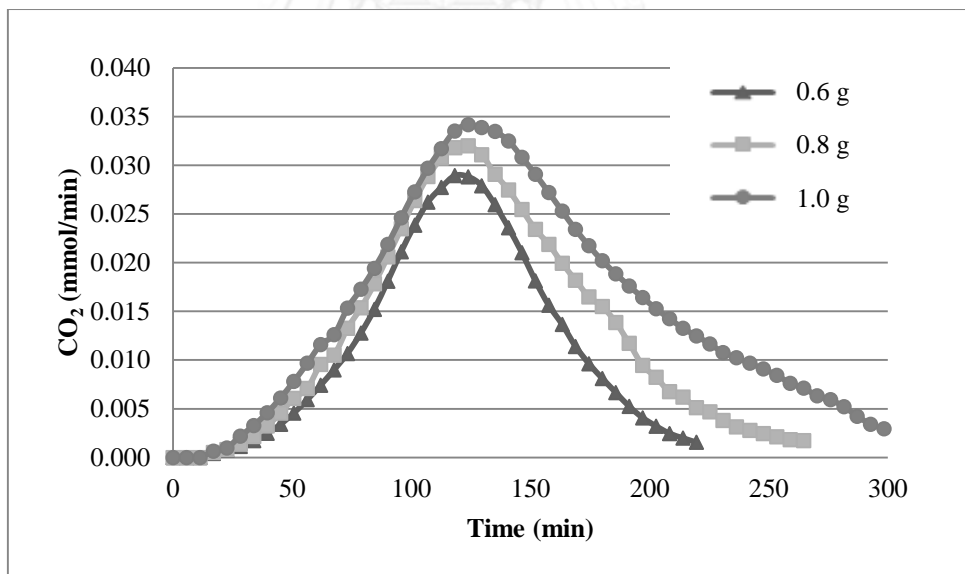
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของตัวพาทออกซิเจนที่ใช้และเวลาในการทำปฏิกิริยา

ปริมาณของตัวพาทออกซิเจน (กรัม)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ต่อชั่วโมง)
0.6	809.92
0.8	606.49
1.0	517.78

ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจนต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามเวลา แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวพาทออกซิเจนจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของตัวพาทออกซิเจนจะเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้กับเบด ทำให้มีปริมาณออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มเวลาในการสัมผัสกันระหว่างมีเทนและตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตให้มีเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นอีกด้วย [16, 18]



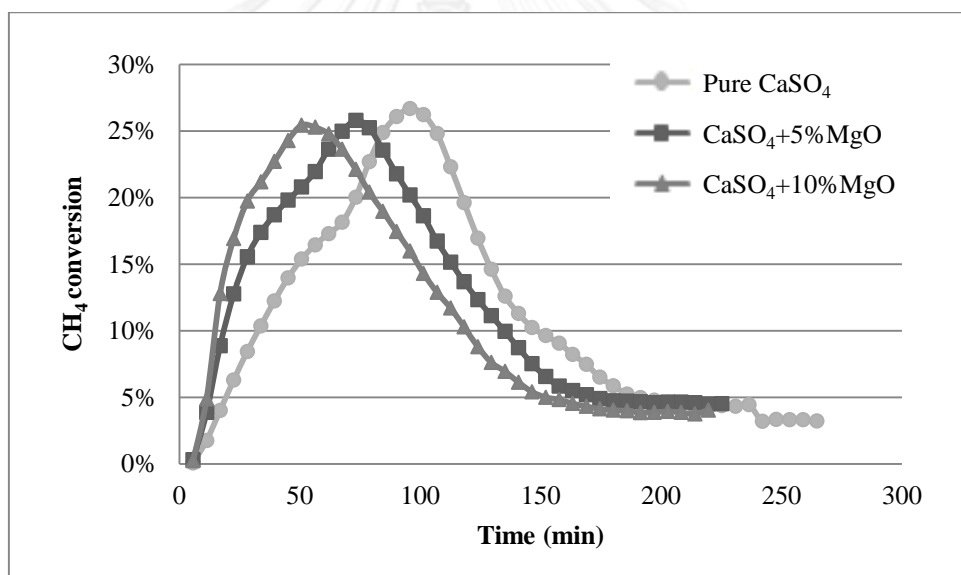
รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซิลเฟตต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนตามเวลา ที่ ปริมาณ 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม



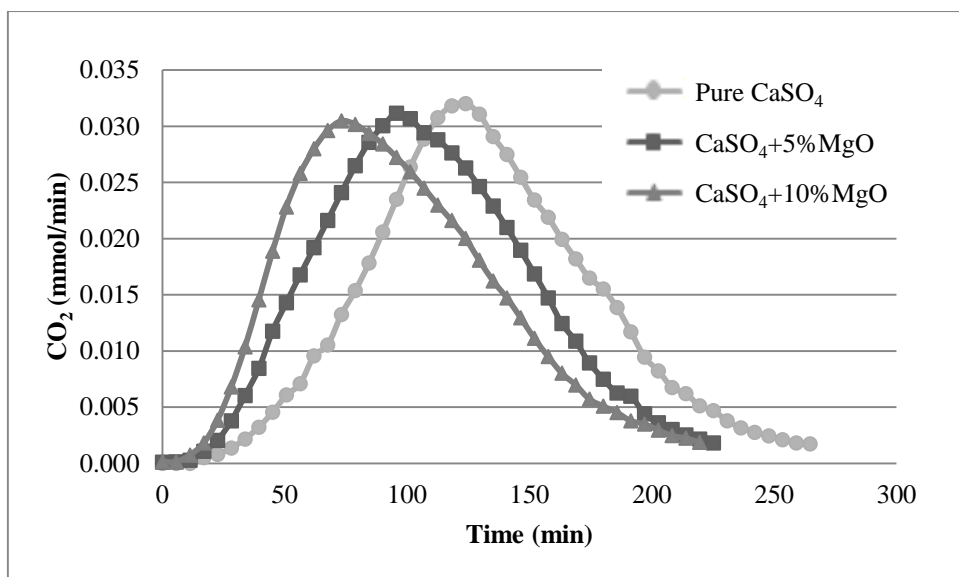
รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซิลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ ตามเวลา ที่ปริมาณ 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม

4.4 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต

ในการศึกษาผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต จะทำการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับแคลเซียมซัลเฟตที่ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ในทุกการทดลองจะใช้ตัวพาออกซิเจนที่ถูกผสมแล้ว 0.8 กรัม เพื่อรักษาความสูงของเบดให้คงที่ ทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามเวลา แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พบว่าเมื่อทำการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์เกิดได้เร็วกว่าการใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์

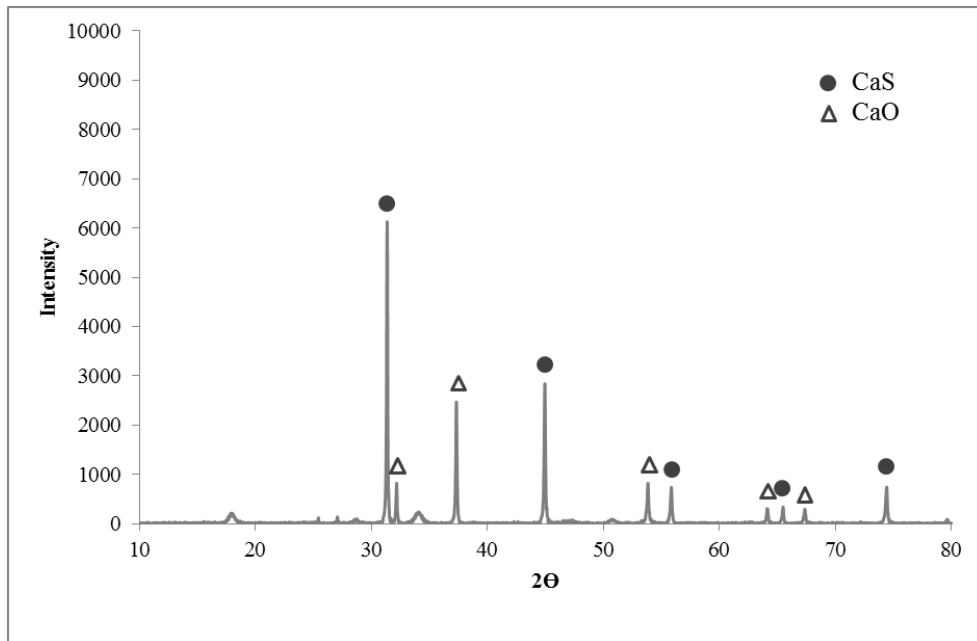


รูปที่ 4.11 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

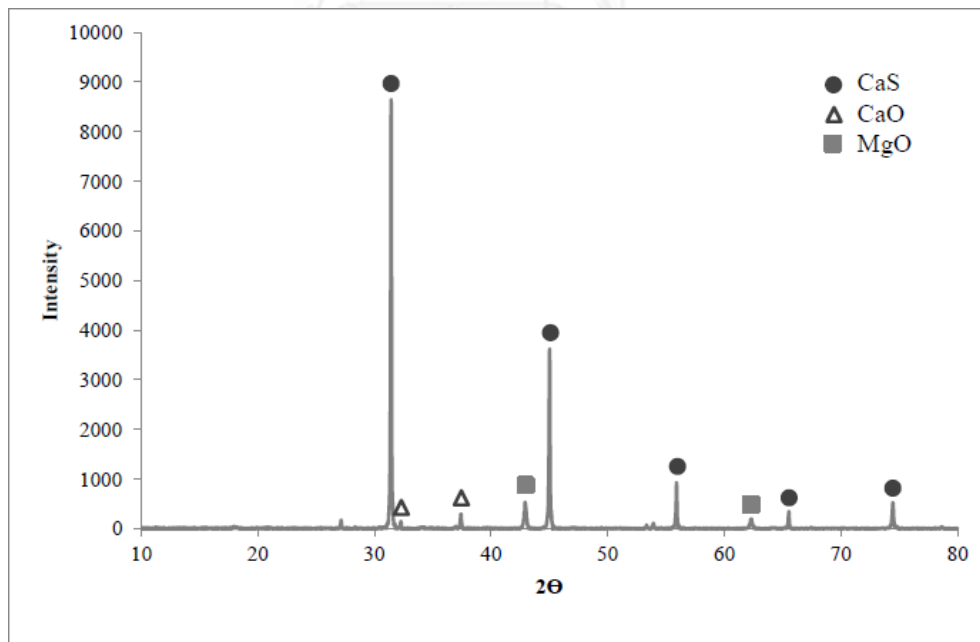


รูปที่ 4.12 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2 ว่า ภายใต้ภาวะที่ดำเนินการทดลองนอกจากปฏิกิริยาหลักระหว่างตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตกับมีเทนที่ทำให้เกิดของแข็งแคลเซียมซัลไฟด์ ดังสมการที่ 4.1 ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์ ดังสมการที่ 4.4 โดยเมื่อทำการทดลองผ่านปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตชนิดที่ผสมและไม่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ ได้นำของแข็งที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบของของแข็งที่เกิดขึ้น รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์และตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนตามลำดับ จากรูปแบบ XRD พบว่า ในกรณีที่ใช้ตัวพวออกซิเจนเป็นแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ชนิดของสารประกอบที่พบคือ แคลเซียมซัลไฟด์และแคลเซียมออกไซด์ ส่วนกรณีที่ใช้ตัวพวออกซิเจนเป็นแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ชนิดของสารประกอบที่พบคือ แคลเซียมซัลไฟด์ แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าในกรณีที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต ค่า Intensity ของแคลเซียมออกไซด์เมื่อเทียบกับแคลเซียมซัลไฟด์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตมีผลต่อการลดลงของการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์

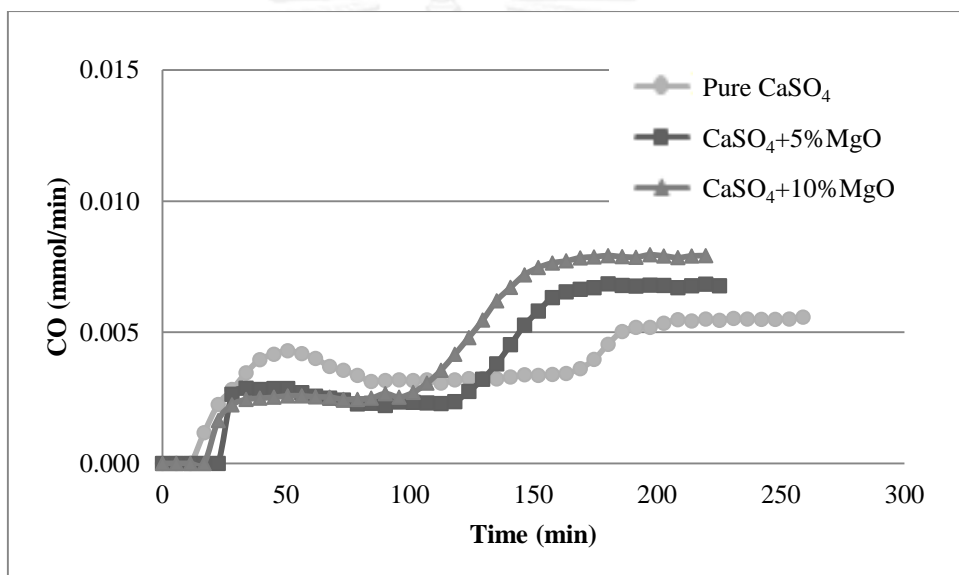


รูปที่ 4.13 รูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน

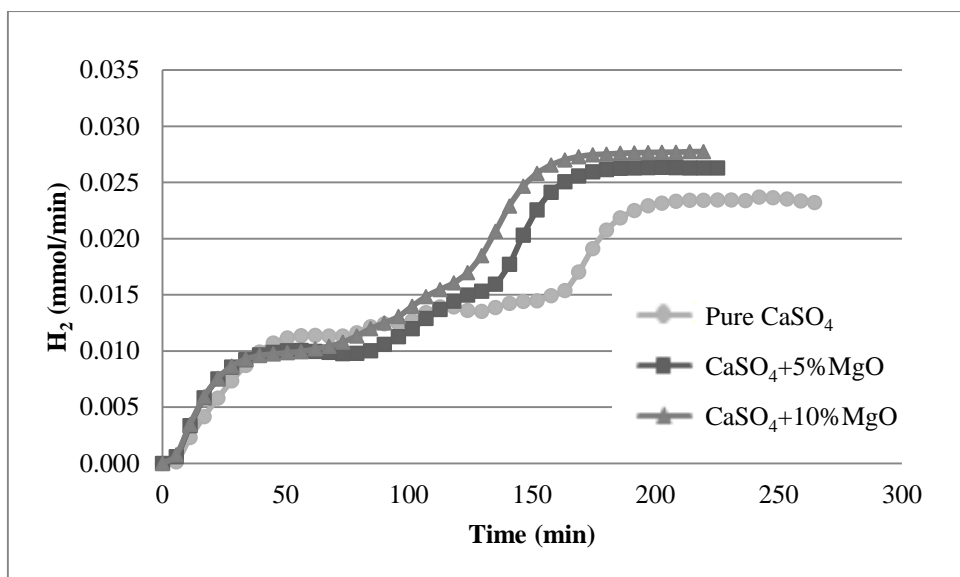


รูปที่ 4.14 รูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน

นอกจากปฏิกิริยาหลักและปฏิกิริยาข้างเคียงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ในระบบยังเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่าแมกนีเซียมออกไซด์สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส [22, 23] ซึ่งสองปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาใช้น้ำ โดยตั้งน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาหลักระหว่างตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตและมีเทนมาใช้ ทำให้ปฏิกิริยาหลักเกิดการเลื่อนไปทางขวามากขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์จึงเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อแคลเซียมซัลเฟตเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นแคลเซียมซัลไฟด์ได้เร็วขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้น้อยลง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังแสดงก่อนหน้าในรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.15 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์ตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.16 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตต่อการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนตามเวลา โดยผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ ภายใต้ภาวะที่ดำเนินการทดลองโดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ พบว่าในระบบมีไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของมีเทนและปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส และเมื่อมีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเช่นกัน สำหรับการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ตามเวลาเมื่อมีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตจะมีการเกิดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ในปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สต่อ ส่วนการเกิดไฮโดรเจนตามเวลาในกรณีที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับกรณีที่ไม่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์จะยังไม่เห็นความแตกต่างมากนัก เนื่องจากไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบางส่วนจะไปเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟตได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลไฟด์ดังสมการที่ 4.5 [18, 19, 24] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่า ค่า Intensity ของแคลเซียมออกไซด์เมื่อเทียบกับแคลเซียมซัลไฟด์ลดลงเมื่อมีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์



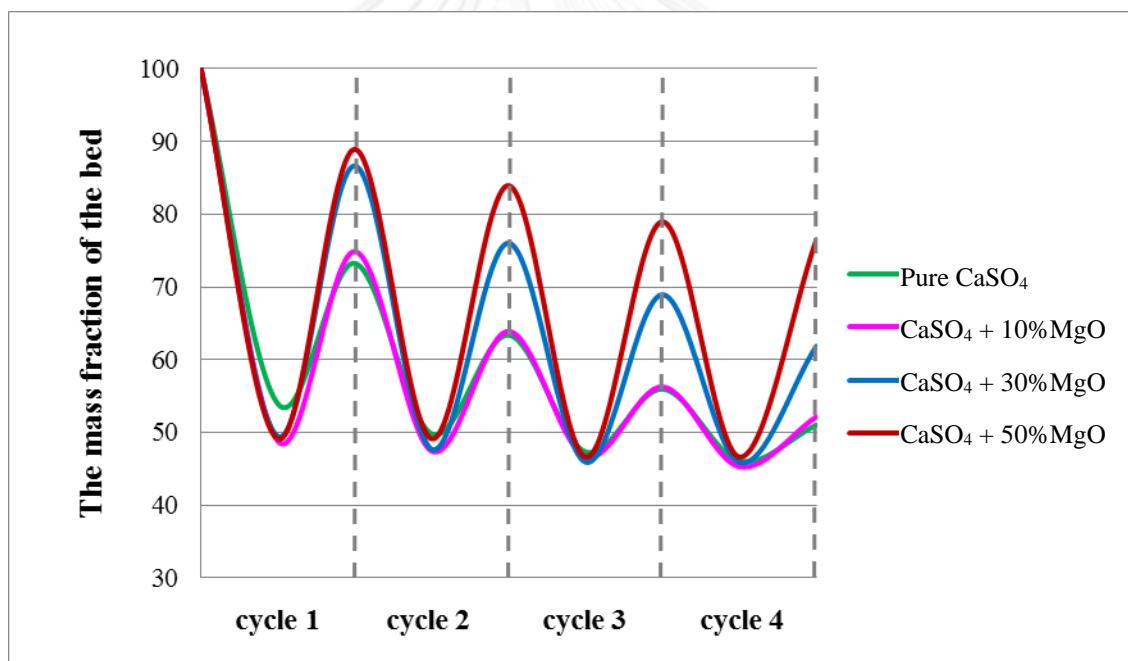
การทดลองผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตพบว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ของแข็งแคลเซียมออกไซด์ที่น้อยลง ซึ่งการเกิดแคลเซียมออกไซด์ที่น้อยลงน่าจะส่งผลดีต่อการนำแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ไปใช้เป็นตัวพาออกซิเจนในการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องเป็น cycle ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่น้อยลงจะช่วยลดการสูญเสียตัวพาออกซิเจนเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบ ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวพาออกซิเจนได้

4.5 ผลของการนำตัวพาออกซิเจนมาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง

ในการศึกษาการนำตัวพาออกซิเจนมาใช้ในการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง จะเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์และตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ โดยจะทำการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ในทุกการทดลองจะใช้ตัวพาออกซิเจนที่ถูกผสมแล้ว 0.8 กรัม ทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จากนั้นตัวพาออกซิเจนที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยจะทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันเป็นจำนวน 4 รอบ รูปที่ 4.17 แสดงร้อยละโดยน้ำหนักของเบดในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยาส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต โดยในการคำนวณอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักจะไม่คือน้ำหนักของแมกนีเซียมออกไซด์ ดังนั้นในกรณีที่ใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์จะต้องทำการหักน้ำหนักของแมกนีเซียมออกไซด์ออกจากน้ำหนักที่ชั่งได้ทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา จากกราฟจะเห็นว่า มีทั้งช่วงที่เพิ่มขึ้นและลดลงของร้อยละโดยน้ำหนักสลับกันไป โดยในช่วงแรกที่น้ำหนักลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับมีเทน ทำให้เกิดการสูญเสียออกซิเจนออกจากโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟตกลายเป็นของแข็งแคลเซียมซัลไฟด์ ช่วงที่มีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักจึงลดลง ในช่วงต่อมาอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักกลับมาเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างอากาศกับแคลเซียมซัลไฟด์ ทำให้ตัวพาออกซิเจนที่ผ่านการใช้งานแล้วรับออกซิเจนจากอากาศกลับเข้าสู่โครงสร้างได้แคลเซียมซัลเฟตกลับมาใช้ใหม่ในรอบต่อไป ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงของร้อยละโดยน้ำหนักจะเกิดขึ้นสลับกันตามการทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันจนครบ 4 รอบ

จากผลการทดลองนำตัวพาออกซิเจนมาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันแสดงให้เห็นว่า ตัวพาออกซิเจนที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีกว่าตัว

พาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ โดยตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีกว่าตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 30 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตจะทำให้ปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตกับมีเทนเกิดการเลื่อนไปทางขวา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลไฟด์ ซึ่งเป็นของแข็งที่สามารถเกิดการออกซิเดชันกลับไปเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้ง่าย นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะไม่กลับไปเท่ากับก่อนการทำปฏิกิริยารีดักชัน และมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในการทำปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งที่จะเกิดการออกซิเดชันกลับไปเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้ยาก จึงเกิดการสูญเสียตัวพาทออกซิเจนเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาไปในแต่ละรอบ [19]

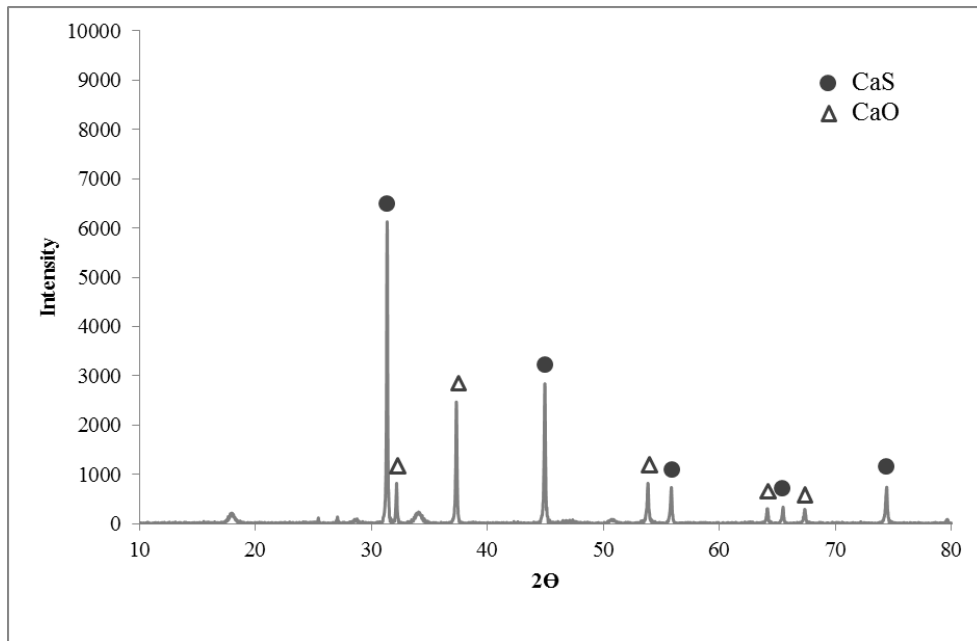


รูปที่ 4.17 ร้อยละโดยน้ำหนักของเบตในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยาส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

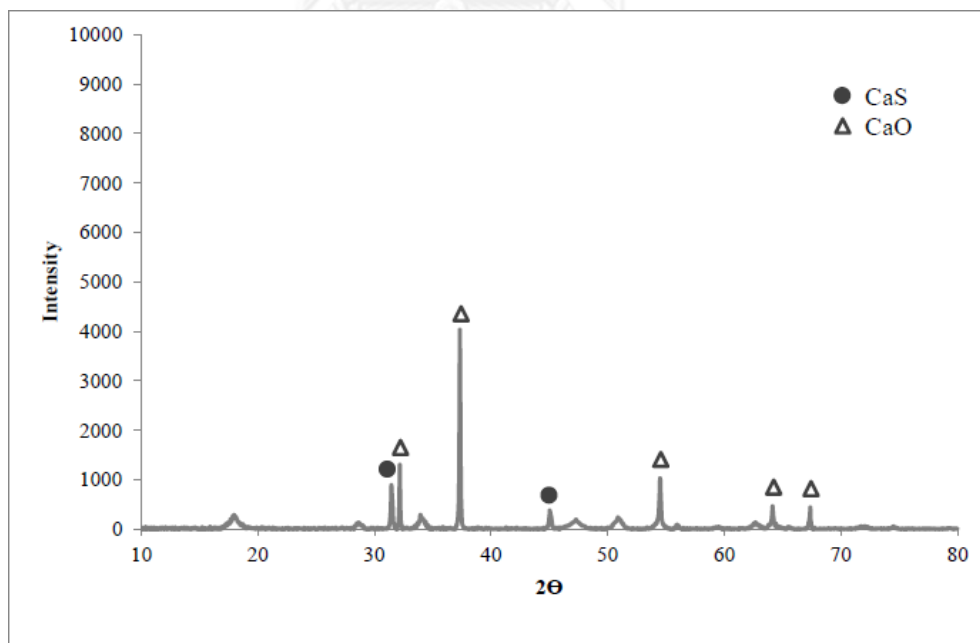
เมื่อใช้ตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมและไม่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง ได้นำของแข็งที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบของของแข็งที่เกิดขึ้น รูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวพาท

ออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 1 และครั้งที่ 4 ตามลำดับ พบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันครั้งที่ 1 และครั้งที่ 4 ยังคงเป็นสารประกอบเดิม ได้แก่ แคลเซียมซัลไฟด์และแคลเซียมออกไซด์ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันไป 4 ครั้งค่า Intensity ของสารประกอบแคลเซียมซัลไฟด์ลดลง ส่วนค่า Intensity ของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ที่ผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันครั้งที่ 1

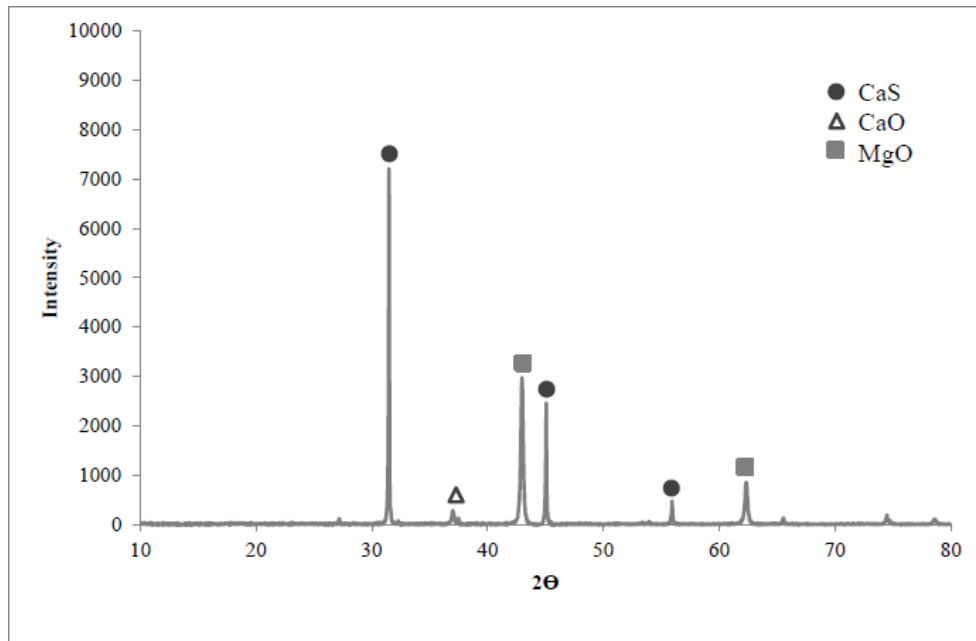
รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 1 และครั้งที่ 4 ตามลำดับ พบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักทำปฏิกิริยารีดักชันครั้งที่ 1 และครั้งที่ 4 ยังคงเป็นสารประกอบเดิม ได้แก่ แคลเซียมซัลไฟด์ แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ อีกทั้งยังพบว่ามีรูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนชนิดนี้เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันครั้งที่ 1 และครั้งที่ 4 ยังคงมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันครั้งที่ 1 พบค่า intensity ของแคลเซียมออกไซด์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตส่วนใหญ่ถูกทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลไฟด์ และมีส่วนน้อยเท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ จากนั้นเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันถึงครั้งที่ 4 ค่า Intensity ของแคลเซียมซัลไฟด์ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยารีดักชันในครั้งแรก ส่วนแคลเซียมออกไซด์มีค่า intensity เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่มีการผสมและไม่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้นคือ ตัวพาทออกซิเจนที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์จะมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ได้ดีกว่าตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์



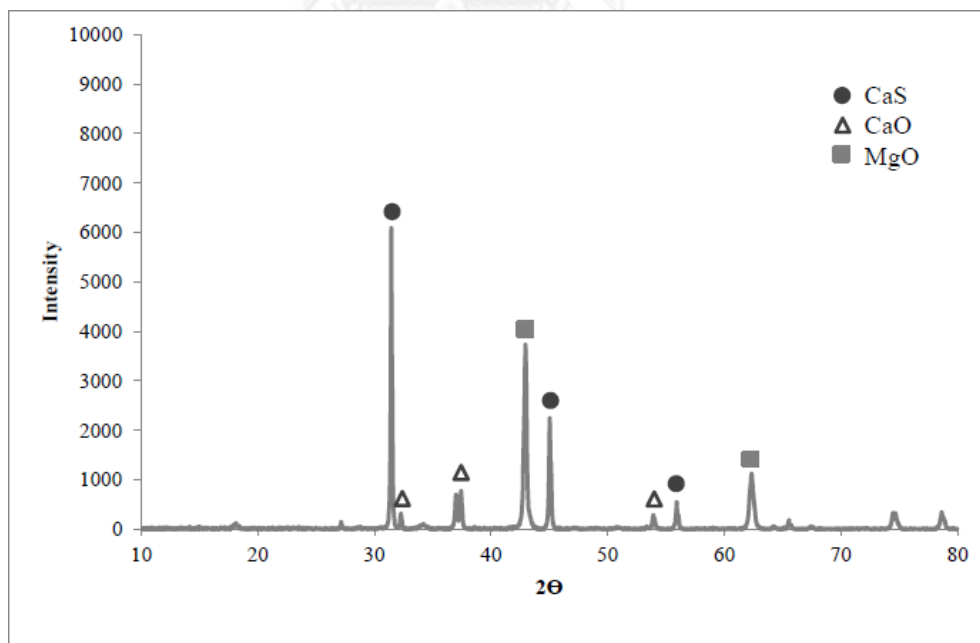
รูปที่ 4.18 รูปแบบ XRD ของตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 1



รูปที่ 4.19 รูปแบบ XRD ของตัวพวออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 4



รูปที่ 4.20 รูปแบบ XRD ของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 1



รูปที่ 4.21 รูปแบบ XRD ของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตที่มีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนครั้งที่ 4

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาของปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจนต่อการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงที่ใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาทออกซิเจนโดยมีมีเทนเป็นเชื้อเพลิง และศึกษาผลของการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมต่อประสิทธิภาพของแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยารีดักชัน

เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 900 เป็น 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลาเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิมิผลต่อการทำปฏิกิริยารีดักชัน เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ดีเช่นกัน

5.1.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจน

เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวพาทออกซิเจนจะเป็นการเพิ่มเวลาในการสัมผัสกันระหว่างมีเทนกับตัวพาทออกซิเจนทำให้มีเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลาจึงเพิ่มขึ้น

5.1.3 ผลของการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต

เมื่อมีการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนและการเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลาเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า

การผสมแมงกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตทำให้สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดได้น้อยลงอีกด้วย

5.1.4 ผลของการนำตัวพาทอกซิเจนมาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง

ในการทดสอบทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง ตัวพาทอกซิเจนที่มีการผสมแมงกนีเซียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงกับตัวพาทอกซิเจนให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจึงมีข้อเสนอแนะดังนี้

- ขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทดสอบการทำงานของตัวพาทอกซิเจนและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการเคมีคอลลูบปิงในระดับอุตสาหกรรม
- ให้มีการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเซชัน เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสกันระหว่างเชื้อเพลิงกับตัวพาทอกซิเจนให้ทำปฏิกิริยากันได้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

1. The Nottingham Centre for Carbon Capture and Storage. Carbon capture and storage (online). 2012. Available from: <http://www.nottingham.ac.uk> (December 11, 2013)
2. Pires, J.C.M., F.G. Martins, M.C.M. Alvim-Ferraz, and M. Simões. Recent developments on carbon capture and storage: an overview. *Chemical Engineering Research and Design* 89(2011): 1446-1460.
3. ธงไทย วิฑูรย์. เทคโนโลยีการกักเก็บและการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล. *วิศวกรรมสาร มข.* 4(2554): 453 – 467.
4. The integrated CO₂ network. Carbon capture and storage technology (online). 2012. Available from: <http://www.ico2n.com> (December 15, 2013)
5. GAS TOKYO. Chemical looping combustion (online). 2012. Available from: <http://www.tokyo-gas.co.jp> (December 20, 2013)
6. Fang, H., L. Haibin, and Z. Zengli. Advancements in development of chemical-looping combustion: a review. *International Journal of Chemical Engineering* 2009(2009).
7. Adanez, J., A. Abad, F. Garcia-Labiano, P. Gayan, and L.F. de Diego. Progress in chemical-looping combustion and reforming technologies. *Progress in Energy and Combustion Science* 38(2012): 215-282.
8. เบญจพล เณลิมสินสุวรรณ. Chemical looping ทางเลือกใหม่ในการผลิตพลังงานที่ยั่งยืน. *Technology promotion* 38(2555): 49 – 52.
9. Cho, P., T. Mattisson, and A. Lyngfelt. Comparison of iron-, nickel-, copper- and manganese-based oxygen carriers for chemical-looping combustion. *Fuel* 83(2004): 1215-1225.
10. PSKGypsum. Gypsum (online). 2012. Available from: <http://www.pskgypsum.com/> (20 December, 2013)
11. Bhavani Chemicals. Calcium sulfate (online). 2012. Available from: <http://www.indiamart.com/> (20 December, 2013)
12. Shen, L., M. Zheng, J. Xiao, and R. Xiao. A mechanistic investigation of a calcium-based oxygen carrier for chemical looping combustion. *Combustion and Flame* 154(2008): 489-506.
13. Song, Q., R. Xiao, Z. Deng, L. Shen, and M. Zhang. Reactivity of a CaSO₄-oxygen carrier in chemical-looping combustion of methane in a fixed bed reactor. *Korean Journal of Chemical Engineering* 26(2009): 592-602.

14. POG. Magnesium oxide (online). 2012. Available from: <http://p0g.com/what-is-magnesium-oxide> (December 22, 2013)
15. He, F., H. Wang, and Y. Dai. Application of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite particles as oxygen carrier of chemical looping combustion. *Journal of Natural Gas Chemistry* 16(2007): 155-161.
16. Ding, N., Y. Zheng, C. Luo, Q.-l. Wu, P.-f. Fu, and C.-g. Zheng. Investigation into compound CaSO_4 oxygen carrier for chemical-looping combustion. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* 39(2011): 161-168.
17. Wang, J. and E.J. Anthony. Clean combustion of solid fuels. *Applied Energy* 85(2008): 73-79.
18. Song, Q., R. Xiao, Z. Deng, H. Zhang, L. Shen, J. Xiao, and M. Zhang. Chemical-looping combustion of methane with CaSO_4 oxygen carrier in a fixed bed reactor. *Energy Conversion and Management* 49(2008): 3178-3187.
19. Tian, H., Q. Guo, X. Yue, and Y. Liu. Investigation into sulfur release in reductive decomposition of calcium sulfate oxygen carrier by hydrogen and carbon monoxide. *Fuel Processing Technology* 91(2010): 1640-1649.
20. Song, Q., R. Xiao, Z. Deng, L. Shen, J. Xiao, and M. Zhang. Effect of Temperature on Reduction of CaSO_4 Oxygen Carrier in Chemical-Looping Combustion of Simulated Coal Gas in a Fluidized Bed Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 47(2008): 8148-8159.
21. Zheng, M., L. Shen, and J. Xiao. Reduction of CaSO_4 oxygen carrier with coal in chemical-looping combustion: Effects of temperature and gasification intermediate. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4(2010): 716-728.
22. Alarcón, N., X. García, M.A. Centeno, P. Ruiz, and A. Gordon. New effects during steam gasification of naphthalene: the synergy between CaO and MgO during the catalytic reaction. *Applied Catalysis A: General* 267(2004): 251-265.
23. Abu El-Rub, Z., E.A. Bramer, and G. Brem. Review of catalysts for tar elimination in biomass gasification processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43(2004): 6911-6919.
24. Xiao, R. and Q. Song. Characterization and kinetics of reduction of CaSO_4 with carbon monoxide for chemical-looping combustion. *Combustion and Flame* 158(2011): 2524-2539.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

1. การวิเคราะห์โดยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Agilent โมเดล 490 Gas chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

- แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่ แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจายเร็ว มีความบริสุทธิ์สูง ปราศจากความชื้นและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ ไนโตรเจน ฮีเลียม และไฮโดรเจน

- คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสาร เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

- ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือ ส่วนที่สามารถบ่งบอกในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นๆที่แตกต่างไปจากแก๊สพา ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถ

สัมพันธ์กับสารต่างๆในลักษณะเฉพาะ และมีสภาพไวเพียงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงาน ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักทีวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

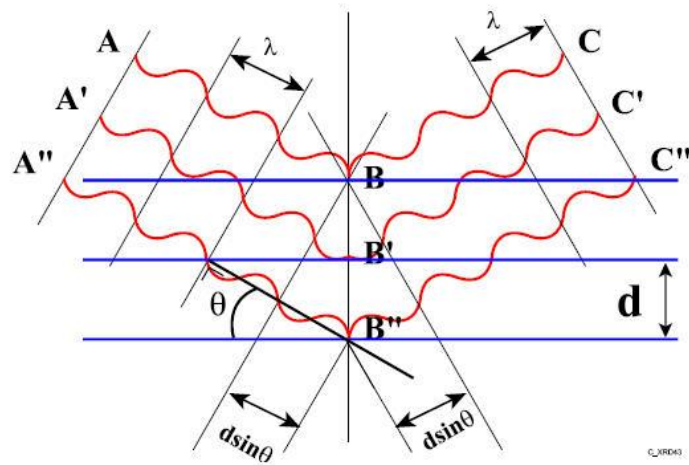
ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)

2. การวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆกับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

เครื่อง XRD จะเป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d\sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยิ่งผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ



รูปที่ ก1 แสดงหลักการของ Bragg's law

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

1. คำนวณความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต

คำนวณจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นผลต่างระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถุกออกซิไดซ์กับตัวถุกรีดิวซ์ส่วนด้วยน้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถุกออกซิไดซ์ ดังสมการ ข1

$$R_o = \frac{m_{ox} - m_{red}}{m_{ox}} \quad (ข1)$$

R_o = ความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของตัวพาทออกซิเจน

m_{ox} = น้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถุกออกซิไดซ์

m_{red} = น้ำหนักโมเลกุลของตัวพาทออกซิเจนที่อยู่ในรูปตัวถุกรีดิวซ์

การคำนวณความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟต

$$R_o = \frac{m_{CaSO_4} - m_{CaS}}{m_{CaSO_4}}$$

$$R_o = \frac{136 - 72}{136}$$

$$R_o = 0.47$$

ดังนั้นความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตเท่ากับ

0.47

2. คำนวณเวลาในการทำปฏิกิริยาจากปริมาณของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต

เวลาในการทำปฏิกิริยา (Gas Hourly Space Velocity, GHSV) มีค่าเท่ากับอัตราการไหลของแก๊ส (ปริมาตรของแก๊สที่ STP ต่อเวลา) หารด้วยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ดังสมการ ข2

$$GHSV = \frac{\text{Gas volumetric flow rate}}{\text{Reactor volume}} \quad (\text{ข}2)$$

กรณีใช้ตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต 0.8 กรัมสามารถคำนวณเป็นเวลาในการทำปฏิกิริยาได้ดังนี้

- ใช้อัตราการไหลของแก๊สผสมเข้า 50 มิลลิลิตรต่อนาที ประกอบด้วยอัตราการไหลของมีเทน 5 มิลลิลิตรต่อนาที และไนโตรเจน 45 มิลลิลิตรต่อนาที
- ความดัน 1 บรรยากาศ
- ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant, R) เท่ากับ $82.06 \text{ cm}^3 \text{ atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- เมื่อนำตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ปริมาณ 0.8 กรัมมาใส่ในเครื่องปฏิกรณ์วัดความสูงของเบดได้ 4 เซนติเมตร
- เครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร

ไนโตรเจน

ที่อุณหภูมิ 25°C จาก $PV = nRT$

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

$$n = \frac{(1 \text{ atm})(45 \text{ ml/min})}{(82.06 \text{ cm}^3 \text{ atm/mol K})(298 \text{ K})}$$

$$n = 1.84 \times 10^{-3} \text{ mol/min}$$

ที่อุณหภูมิ 0°C ;

$$n = 1.84 \times 10^{-3} \text{ mol/min}$$

$$PV = nRT$$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$V = \frac{(1.84 \times 10^{-3} \text{ mol/min})(82.06 \text{ cm}^3 \text{ atm/mol K})(273 \text{ K})}{(1 \text{ atm})}$$

$$V = 41.22 \text{ ml/min}$$

มีเทน

ที่อุณหภูมิ 25°C จาก $PV = nRT$

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

$$n = \frac{(1 \text{ atm})(5 \text{ ml/min})}{(82.06 \text{ cm}^3 \text{ atm/mol K})(298 \text{ K})}$$

$$n = 2.04 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

ที่อุณหภูมิ 0°C ;

$$n = 2.04 \times 10^{-4} \text{ mol/min}$$

$$PV = nRT$$

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$V = \frac{(2.04 \times 10^{-4} \text{ mol/min})(82.06 \text{ cm}^3 \text{ atm/mol K})(273 \text{ K})}{(1 \text{ atm})}$$

$$V = 4.57 \text{ ml/min}$$

ดังนั้นปริมาตรของแก๊สผสมขาเข้าที่ STP = $41.22 + 4.57 = 45.79 \text{ ml/min}$

ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเบดมีความสูง 4 เซนติเมตร

$$= \pi r^2 l$$

$$= \pi \times 0.6^2 \text{ cm}^2 \times 4 \text{ cm}$$

$$= 4.53 \text{ cm}^3$$

เมื่อคำนวณหา GHSV จะได้

$$GHSV = \frac{45.79 \text{ ml/min}}{4.53 \text{ cm}^3} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}}$$

$$GHSV = 606.49 \text{ hr}^{-1}$$

ดังนั้นกรณีใช้ตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต 0.8 กรัมสามารถคำนวณเป็นเวลาในการทำปฏิกิริยาได้เท่ากับ 606.49 ต่อชั่วโมง

3. คำนวณหาปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

เมื่อทำการทดลองผ่านปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์แก๊สออกจะถูกนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี โดยจะมีการนำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ทุก 5 นาที ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟีจะแสดงออกมาเป็นพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สชนิดต่างๆที่เกิดขึ้น โดยจากพื้นที่ใต้กราฟสามารถคำนวณออกมาเป็นปริมาณผลิตภัณฑ์ของแก๊สได้

ก่อนทำการทดลองทุกครั้งจะฉีดแก๊สมาตรฐาน (standard) กับเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี โดยในแก๊สมาตรฐานแก๊สแต่ละชนิดจะมีความเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ดังนั้นสามารถคิดความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดตามเวลาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สแต่ละชนิดหารด้วยพื้นที่ใต้กราฟของแก๊สชนิดนั้นในแก๊สมาตรฐานดังสมการที่ ข3 โดยแก๊สที่จะคำนวณความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรด้วยวิธีนี้ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์

$$\%vol = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของแก๊สตามเวลา}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟของแก๊สในแก๊สมาตรฐาน}} \quad (\text{ข}3)$$

ตารางที่ ข1 แสดงพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดในแก๊สมาตรฐาน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

ชนิดแก๊ส	พื้นที่ใต้กราฟ	%balance in N ₂
H ₂	1579.1	1.00
CO	108.8	1.00
CH ₄	267.7	1.00
CO ₂	499.4	1.00

เช่นเมื่อทำการทดลองได้พื้นที่ใต้กราฟของไฮโดรเจนเท่ากับ 957.4 สามารถคำนวณมาเป็นการคำนวณความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรได้โดยการนำพื้นที่ใต้กราฟของไฮโดรเจนในแก๊สมาตรฐานมาหาร ดังนั้นความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของไฮโดรเจนเท่ากับ 0.61

สำหรับไนโตรเจนและมีเทนการคำนวณความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรจะแตกต่างกับแก๊สที่ได้กล่าวข้างต้น เนื่องจากในการทดลองใช้มีเทนเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ซึ่งมีความเข้มข้นต่างจากความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐานมาก ดังนั้นจึงต้องทำ calibration curve เพื่อหาความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรที่แน่นอน ซึ่งการทำ calibration curve จะทำการฉีดแก๊สที่มีความเข้มข้นต่างๆเพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละความเข้มข้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับพื้นที่ใต้กราฟเป็นสมการ เช่น ทำ calibration curve ของมีเทนได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับพื้นที่ใต้กราฟดังสมการที่ ข4

$$y = 0.0027x + 0.4682 \quad (\text{ข 4})$$

โดย y คือความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตร และ x คือพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี ดังนั้นเมื่อทำการทดลองจะสามารถคำนวณความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของมีเทนได้จาก calibration curve โดยฉีดแก๊สออกที่เวลาต่างๆเข้าเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อให้ได้พื้นที่ใต้กราฟไปแทนในสมการที่ ข4 ทำให้ได้ความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรออกมา

เมื่อได้ความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของแต่ละแก๊สออกมาแล้วสามารถคำนวณต่อเป็นจำนวนโมลต่อนาทีได้โดยใช้สมการ

$$PV = nRT$$

เช่น เมื่อทราบความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของไฮโดรเจนเท่ากับ 0.61 มีอัตราการไหลของแก๊สออกเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถคำนวณเป็นจำนวนโมลต่อนาทีได้โดย

$$PV = nRT$$

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

$$n = \frac{1 \text{ atm} \times 0.61 \times 50 \text{ ml/min}}{0.08206 \text{ L} \cdot \text{atm}/\text{K} \cdot \text{mol} \times 298 \text{ K} \times 100}$$

$$n = 0.0125 \frac{\text{mmol}}{\text{min}}$$

ดังนั้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.61 โดยปริมาตรคำนวณเป็นจำนวนโมลต่ออนาที่ของไฮโดรเจนได้เท่ากับ 0.0125 มิลลิโมลต่ออนาที่

4. คำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน

การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนของมีเทนจะคำนวณจากจำนวนโมลของมีเทนขาออกต่ออนาที่ตามสมการที่ ข5

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของมีเทน} = \frac{\text{จำนวนโมลขาออกเริ่มต้น} - \text{จำนวนโมลขาออกที่เวลาต่างๆ}}{\text{จำนวนโมลขาออกเริ่มต้น}} \quad (\text{ข5})$$

5. คำนวณอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมซัลเฟตในแต่ละรอบของการทำปฏิกิริยา ส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

กรณีใช้ตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์

- ในการทดลองทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องเป็นจำนวน 4 รอบ ใช้ น้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8095 กรัม ดังนั้นตอนเริ่มต้นมีน้ำหนักของ แคลเซียมซัลเฟตอยู่ 0.8095 กรัม

ตารางที่ ข2 แสดงน้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ซั่งได้จริง และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	น้ำหนักที่ซั่งได้จริง (กรัม)	อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	0.8095	100.00
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4367	53.95
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.5932	73.28
2	เริ่มต้น	0.5932	73.28
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4032	49.81
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.5132	63.40
3	เริ่มต้น	0.5132	63.40
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.3832	47.34
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.4532	55.99
4	เริ่มต้น	0.4532	55.99
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.3732	46.10
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.4132	51.04

กรณีใช้ตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

- ในการทดลองทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องเป็นจำนวน 4 รอบ ใช้ น้ำหนักของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ถูกผสมกับแมกนีเซียมออกไซด์แล้ว 0.8035 กรัม ดังนั้นตอนเริ่มต้นมีน้ำหนักของแคลเซียมซัลเฟตอยู่ 0.4018 กรัม และน้ำหนักของแมกนีเซียมออกไซด์ 0.4018 กรัม

- ในการคำนวณจะไม่คิदन้ำหนักของแมกนีเซียมออกไซด์ ดังนั้นเมื่อซั่งน้ำหนักจะหักน้ำหนักของแมกนีเซียมออกไซด์ออกจากน้ำหนักที่ซั่งได้จริงทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ข3 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่ซั่งได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	น้ำหนักที่ซั่งได้จริง (กรัม)	น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์ (กรัม)	อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	0.8035	0.4018	100.00
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5991	0.1974	49.12
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7591	0.3574	88.95
2	เริ่มต้น	0.7591	0.3574	88.95
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5991	0.1974	49.12
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7391	0.3374	83.97
3	เริ่มต้น	0.7391	0.3374	83.97
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5891	0.1874	46.63
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7191	0.3173	78.99
4	เริ่มต้น	0.7191	0.3173	78.99
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5891	0.1874	46.63
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7091	0.3074	76.50

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

1. ผลการทดลองการศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาหรือปริมาณของตัวพาทออกซิเจน และการผสมแมกนีเซียมออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต

ตารางที่ ค1 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาทออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.00	0.0000	1.8402	0.0000	0.1961	0.0000
5.63	0.0000	1.8402	0.0000	0.1961	0.0000
11.26	0.0004	1.8402	0.0000	0.1957	0.0000
16.89	0.0008	1.8402	0.0000	0.1950	0.0000
22.52	0.0010	1.8402	0.0000	0.1945	0.0000
28.15	0.0012	1.8402	0.0000	0.1940	0.0000
33.78	0.0015	1.8402	0.0000	0.1939	0.0004
39.41	0.0022	1.8402	0.0000	0.1931	0.0006
45.04	0.0031	1.8402	0.0000	0.1919	0.0007
50.67	0.0037	1.8402	0.0000	0.1906	0.0008
56.30	0.0041	1.8402	0.0000	0.1898	0.0008
61.93	0.0043	1.8402	0.0000	0.1893	0.0011
67.56	0.0044	1.8402	0.0000	0.1888	0.0018
73.19	0.0045	1.8402	0.0000	0.1885	0.0018
78.82	0.0046	1.8402	0.0000	0.1883	0.0022
84.45	0.0046	1.8402	0.0000	0.1884	0.0025
90.08	0.0047	1.8402	0.0000	0.1884	0.0033
95.71	0.0047	1.8402	0.0000	0.1883	0.0037
101.34	0.0047	1.8402	0.0000	0.1882	0.0034
106.97	0.0048	1.8402	0.0000	0.1880	0.0036
112.60	0.0048	1.8402	0.0000	0.1878	0.0045

ตารางที่ ค1 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
118.23	0.0049	1.8402	0.0000	0.1877	0.0048
123.86	0.0049	1.8402	0.0000	0.1877	0.0043
129.49	0.0050	1.8402	0.0000	0.1876	0.0045
135.12	0.0051	1.8402	0.0000	0.1873	0.0047
140.75	0.0051	1.8402	0.0000	0.1870	0.0049
146.38	0.0052	1.8402	0.0000	0.1867	0.0053
152.01	0.0053	1.8402	0.0000	0.1862	0.0061
157.64	0.0054	1.8402	0.0000	0.1860	0.0064
163.27	0.0055	1.8402	0.0000	0.1857	0.0059
168.90	0.0056	1.8402	0.0000	0.1853	0.0062
174.53	0.0057	1.8402	0.0000	0.1849	0.0064
180.16	0.0059	1.8402	0.0000	0.1844	0.0065
185.79	0.0060	1.8402	0.0000	0.1834	0.0070
191.42	0.0062	1.8402	0.0000	0.1826	0.0073
197.05	0.0065	1.8402	0.0000	0.1814	0.0085
202.68	0.0068	1.8402	0.0000	0.1798	0.0082
208.31	0.0071	1.8402	0.0000	0.1779	0.0088
213.94	0.0073	1.8402	0.0000	0.1760	0.0095
219.57	0.0075	1.8402	0.0000	0.1746	0.0103
225.20	0.0076	1.8402	0.0000	0.1732	0.0112
230.83	0.0076	1.8402	0.0000	0.1726	0.0131
236.46	0.0077	1.8402	0.0000	0.1724	0.0131
242.09	0.0077	1.8402	0.0000	0.1722	0.0140
247.72	0.0077	1.8402	0.0000	0.1729	0.0148
253.35	0.0077	1.8402	0.0000	0.1741	0.0154
258.98	0.0079	1.8402	0.0000	0.1758	0.0158
264.61	0.0081	1.8402	0.0000	0.1778	0.0160
270.24	0.0084	1.8402	0.0000	0.1793	0.0159
275.87	0.0086	1.8402	0.0000	0.1808	0.0168
281.50	0.0087	1.8402	0.0000	0.1823	0.0163

ตารางที่ ค1 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
287.13	0.0087	1.8402	0.0000	0.1832	0.0146
292.76	0.0087	1.8402	0.0000	0.1846	0.0139
298.39	0.0088	1.8402	0.0000	0.1852	0.0131
304.02	0.0089	1.8402	0.0000	0.1864	0.0123
309.65	0.0091	1.8402	0.0000	0.1873	0.0116
315.28	0.0093	1.8402	0.0000	0.1883	0.0108
320.91	0.0095	1.8402	0.0000	0.1888	0.0100
326.54	0.0097	1.8402	0.0000	0.1892	0.0093
332.17	0.0097	1.8402	0.0000	0.1896	0.0086
337.80	0.0096	1.8402	0.0000	0.1895	0.0079
343.43	0.0096	1.8402	0.0000	0.1893	0.0072
349.06	0.0095	1.8402	0.0000	0.1895	0.0068
354.69	0.0094	1.8402	0.0000	0.1894	0.0064
360.32	0.0093	1.8402	0.0000	0.1895	0.0061
365.95	0.0093	1.8402	0.0000	0.1893	0.0058
371.58	0.0092	1.8402	0.0000	0.1892	0.0057
377.21	0.0091	1.8402	0.0000	0.1892	0.0056
382.84	0.0091	1.8402	0.0000	0.1892	0.0055
388.47	0.0091	1.8402	0.0000	0.1895	0.0054
394.10	0.0091	1.8402	0.0000	0.1894	0.0060
399.73	0.0092	1.8402	0.0000	0.1897	0.0059
405.36	0.0093	1.8402	0.0000	0.1899	0.0058
410.99	0.0095	1.8402	0.0000	0.1905	0.0051
416.62	0.0097	1.8402	0.0000	0.1909	0.0048
422.25	0.0100	1.8402	0.0000	0.1912	0.0046
427.88	0.0103	1.8402	0.0000	0.1914	0.0045
433.51	0.0105	1.8402	0.0000	0.1916	0.0044
439.14	0.0107	1.8402	0.0000	0.1916	0.0043
444.77	0.0107	1.8402	0.0000	0.1915	0.0043
450.40	0.0107	1.8402	0.0000	0.1915	0.0043

ตารางที่ ค1 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
456.03	0.0107	1.8402	0.0000	0.1915	0.0041
461.66	0.0106	1.8402	0.0000	0.1916	0.0040
467.29	0.0105	1.8402	0.0000	0.1915	0.0039
472.92	0.0104	1.8402	0.0000	0.1914	0.0038
478.55	0.0103	1.8402	0.0000	0.1913	0.0036
484.18	0.0103	1.8402	0.0000	0.1913	0.0036

ตารางที่ ค2 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.00	0.0000	1.8402	0.0000	0.1958	0.0000
5.63	0.0001	1.8402	0.0000	0.1956	0.0000
11.26	0.0023	1.8402	0.0000	0.1923	0.0000
16.89	0.0042	1.8402	0.0012	0.1879	0.0005
22.52	0.0058	1.8402	0.0022	0.1834	0.0008
28.15	0.0073	1.8402	0.0028	0.1792	0.0014
33.78	0.0087	1.8402	0.0035	0.1755	0.0022
39.41	0.0099	1.8402	0.0040	0.1718	0.0032
45.04	0.0107	1.8402	0.0042	0.1684	0.0045
50.67	0.0112	1.8402	0.0043	0.1656	0.0061
56.30	0.0114	1.8402	0.0042	0.1636	0.0071
61.93	0.0114	1.8402	0.0040	0.1619	0.0096
67.56	0.0113	1.8402	0.0037	0.1602	0.0105
73.19	0.0113	1.8402	0.0035	0.1565	0.0133
78.82	0.0116	1.8402	0.0034	0.1513	0.0154
84.45	0.0122	1.8402	0.0031	0.1471	0.0178
90.08	0.0124	1.8402	0.0032	0.1447	0.0206

ตารางที่ ค2 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
95.71	0.0124	1.8402	0.0032	0.1435	0.0235
101.34	0.0127	1.8402	0.0032	0.1444	0.0264
106.97	0.0134	1.8402	0.0032	0.1472	0.0289
112.60	0.0139	1.8402	0.0031	0.1521	0.0308
118.23	0.0139	1.8402	0.0032	0.1574	0.0318
123.86	0.0136	1.8402	0.0032	0.1626	0.0320
129.49	0.0135	1.8402	0.0032	0.1671	0.0311
135.12	0.0139	1.8402	0.0032	0.1711	0.0291
140.75	0.0142	1.8402	0.0033	0.1736	0.0275
146.38	0.0144	1.8402	0.0034	0.1757	0.0255
152.01	0.0145	1.8402	0.0034	0.1769	0.0234
157.64	0.0149	1.8402	0.0034	0.1780	0.0219
163.27	0.0154	1.8402	0.0034	0.1797	0.0199
168.90	0.0170	1.8402	0.0036	0.1811	0.0182
174.53	0.0191	1.8402	0.0040	0.1830	0.0165
180.16	0.0208	1.8402	0.0045	0.1843	0.0155
185.79	0.0218	1.8402	0.0050	0.1855	0.0139
191.42	0.0225	1.8402	0.0052	0.1860	0.0117
197.05	0.0229	1.8402	0.0052	0.1864	0.0095
202.68	0.0232	1.8402	0.0053	0.1867	0.0082
208.31	0.0233	1.8402	0.0055	0.1870	0.0068
213.94	0.0234	1.8402	0.0054	0.1873	0.0062
219.57	0.0234	1.8402	0.0055	0.1872	0.0051
225.20	0.0234	1.8402	0.0055	0.1872	0.0047
230.83	0.0234	1.8402	0.0055	0.1873	0.0038
236.46	0.0234	1.8402	0.0055	0.1871	0.0032
242.09	0.0237	1.8402	0.0055	0.1895	0.0028
247.72	0.0236	1.8402	0.0055	0.1892	0.0025
253.35	0.0235	1.8402	0.0055	0.1892	0.0021
258.98	0.0234	1.8402	0.0056	0.1893	0.0018

ตารางที่ ค3 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.00	0.0000	1.8402	0.0000	0.1949	0.0000
5.63	0.0008	1.8402	0.0000	0.1944	0.0000
11.26	0.0061	1.8402	0.0027	0.1809	0.0000
16.89	0.0108	1.8402	0.0068	0.1595	0.0015
22.52	0.0132	1.8402	0.0082	0.1364	0.0046
28.15	0.0151	1.8402	0.0082	0.1133	0.0094
33.78	0.0174	1.8402	0.0079	0.0976	0.0164
39.41	0.0188	1.8402	0.0076	0.0931	0.0249
45.04	0.0188	1.8402	0.0069	0.1036	0.0337
50.67	0.0181	1.8402	0.0068	0.1199	0.0408
56.30	0.0179	1.8402	0.0068	0.1340	0.0455
61.93	0.0190	1.8402	0.0068	0.1454	0.0474
67.56	0.0197	1.8402	0.0069	0.1534	0.0473
73.19	0.0201	1.8402	0.0071	0.1587	0.0458
78.82	0.0228	1.8402	0.0072	0.1640	0.0433
84.45	0.0281	1.8402	0.0074	0.1690	0.0401
90.08	0.0322	1.8402	0.0083	0.1730	0.0364
95.71	0.0347	1.8402	0.0093	0.1759	0.0323
101.34	0.0357	1.8402	0.0098	0.1780	0.0281
106.97	0.0359	1.8402	0.0099	0.1796	0.0242
112.60	0.0357	1.8402	0.0098	0.1805	0.0205
118.23	0.0354	1.8402	0.0097	0.1812	0.0173
123.86	0.0352	1.8402	0.0095	0.1817	0.0145
129.49	0.0350	1.8402	0.0094	0.1822	0.0120
135.12	0.0348	1.8402	0.0093	0.1824	0.0100
140.75	0.0347	1.8402	0.0093	0.1825	0.0083
146.38	0.0346	1.8402	0.0092	0.1826	0.0069
152.01	0.0345	1.8402	0.0092	0.1826	0.0057
157.64	0.0344	1.8402	0.0091	0.1824	0.0047

ตารางที่ ค3 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
163.27	0.0344	1.8402	0.0091	0.1827	0.0040
168.90	0.0343	1.8402	0.0091	0.1825	0.0033
174.53	0.0343	1.8402	0.0089	0.1825	0.0028
180.16	0.0343	1.8402	0.0090	0.1824	0.0024
185.79	0.0343	1.8402	0.0089	0.1825	0.0020
191.42	0.0342	1.8402	0.0088	0.1823	0.0017

ตารางที่ ค4 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.6 กรัม

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.00	0.0000	1.8402	0.0000	0.1969	0.0000
5.63	0.0001	1.8402	0.0000	0.1964	0.0000
11.26	0.0022	1.8402	0.0000	0.1931	0.0000
16.89	0.0039	1.8402	0.0006	0.1886	0.0004
22.52	0.0050	1.8402	0.0007	0.1855	0.0007
28.15	0.0060	1.8402	0.0013	0.1829	0.0011
33.78	0.0072	1.8402	0.0028	0.1803	0.0017
39.41	0.0084	1.8402	0.0034	0.1768	0.0025
45.04	0.0095	1.8402	0.0037	0.1733	0.0034
50.67	0.0102	1.8402	0.0038	0.1703	0.0046
56.30	0.0107	1.8402	0.0040	0.1679	0.0059
61.93	0.0109	1.8402	0.0037	0.1662	0.0074
67.56	0.0111	1.8402	0.0034	0.1644	0.0090
73.19	0.0113	1.8402	0.0032	0.1606	0.0107
78.82	0.0121	1.8402	0.0030	0.1551	0.0128
84.45	0.0127	1.8402	0.0030	0.1506	0.0152
90.08	0.0130	1.8402	0.0030	0.1482	0.0181

ตารางที่ ค4 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 0.6 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
95.71	0.0137	1.8402	0.0030	0.1482	0.0211
101.34	0.0148	1.8402	0.0032	0.1502	0.0239
106.97	0.0154	1.8402	0.0033	0.1531	0.0262
112.60	0.0157	1.8402	0.0034	0.1574	0.0277
118.23	0.0158	1.8402	0.0036	0.1630	0.0289
123.86	0.0168	1.8402	0.0037	0.1697	0.0288
129.49	0.0187	1.8402	0.0040	0.1759	0.0279
135.12	0.0202	1.8402	0.0043	0.1805	0.0259
140.75	0.0211	1.8402	0.0045	0.1837	0.0236
146.38	0.0217	1.8402	0.0047	0.1860	0.0210
152.01	0.0221	1.8402	0.0048	0.1872	0.0181
157.64	0.0223	1.8402	0.0048	0.1882	0.0156
163.27	0.0224	1.8402	0.0048	0.1888	0.0137
168.90	0.0225	1.8402	0.0049	0.1891	0.0114
174.53	0.0225	1.8402	0.0049	0.1894	0.0096
180.16	0.0225	1.8402	0.0048	0.1895	0.0081
185.79	0.0225	1.8402	0.0048	0.1897	0.0067
191.42	0.0224	1.8402	0.0048	0.1897	0.0052
197.05	0.0224	1.8402	0.0048	0.1897	0.0041
202.68	0.0224	1.8402	0.0048	0.1897	0.0032
208.31	0.0223	1.8402	0.0048	0.1900	0.0025
213.94	0.0223	1.8402	0.0048	0.1901	0.0020
219.57	0.0222	1.8402	0.0047	0.1900	0.0016

ตารางที่ ค5 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 1.0 กรัม

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.00	0.0000	1.8402	0.0000	0.1949	0.0000
5.63	0.0002	1.8402	0.0000	0.1946	0.0000
11.26	0.0030	1.8402	0.0000	0.1904	0.0000
16.89	0.0055	1.8402	0.0003	0.1848	0.0006
22.52	0.0071	1.8402	0.0020	0.1804	0.0010
28.15	0.0084	1.8402	0.0026	0.1771	0.0022
33.78	0.0096	1.8402	0.0031	0.1739	0.0033
39.41	0.0107	1.8402	0.0034	0.1704	0.0046
45.04	0.0116	1.8402	0.0036	0.1671	0.0061
50.67	0.0120	1.8402	0.0039	0.1639	0.0078
56.30	0.0122	1.8402	0.0038	0.1619	0.0097
61.93	0.0122	1.8402	0.0037	0.1602	0.0116
67.56	0.0121	1.8402	0.0035	0.1589	0.0126
73.19	0.0119	1.8402	0.0034	0.1570	0.0153
78.82	0.0117	1.8402	0.0033	0.1531	0.0173
84.45	0.0117	1.8402	0.0031	0.1483	0.0194
90.08	0.0121	1.8402	0.0030	0.1444	0.0219
95.71	0.0123	1.8402	0.0029	0.1426	0.0246
101.34	0.0125	1.8402	0.0028	0.1428	0.0273
106.97	0.0130	1.8402	0.0027	0.1442	0.0297
112.60	0.0133	1.8402	0.0027	0.1463	0.0317
118.23	0.0135	1.8402	0.0025	0.1490	0.0335
123.86	0.0135	1.8402	0.0025	0.1528	0.0342
129.49	0.0133	1.8402	0.0024	0.1581	0.0339
135.12	0.0131	1.8402	0.0025	0.1631	0.0335
140.75	0.0130	1.8402	0.0025	0.1670	0.0325
146.38	0.0130	1.8402	0.0025	0.1699	0.0308
152.01	0.0133	1.8402	0.0025	0.1719	0.0291
157.64	0.0140	1.8402	0.0025	0.1741	0.0272

ตารางที่ ค5 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ 1.0 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
163.27	0.0145	1.8402	0.0025	0.1758	0.0253
168.90	0.0146	1.8402	0.0025	0.1766	0.0234
174.53	0.0147	1.8402	0.0025	0.1771	0.0217
180.16	0.0147	1.8402	0.0025	0.1774	0.0202
185.79	0.0152	1.8402	0.0025	0.1782	0.0189
191.42	0.0163	1.8402	0.0026	0.1794	0.0176
197.05	0.0173	1.8402	0.0026	0.1805	0.0164
202.68	0.0178	1.8402	0.0026	0.1811	0.0153
208.31	0.0179	1.8402	0.0026	0.1815	0.0143
213.94	0.0178	1.8402	0.0027	0.1812	0.0133
219.57	0.0177	1.8402	0.0028	0.1814	0.0125
225.20	0.0176	1.8402	0.0030	0.1812	0.0117
230.83	0.0176	1.8402	0.0031	0.1815	0.0108
236.46	0.0177	1.8402	0.0033	0.1819	0.0103
242.09	0.0180	1.8402	0.0035	0.1823	0.0097
247.72	0.0187	1.8402	0.0038	0.1832	0.0091
253.35	0.0196	1.8402	0.0039	0.1835	0.0084
258.98	0.0207	1.8402	0.0047	0.1845	0.0076
264.61	0.0220	1.8402	0.0051	0.1850	0.0071
270.24	0.0232	1.8402	0.0055	0.1855	0.0063
275.87	0.0242	1.8402	0.0058	0.1860	0.0059
281.50	0.0244	1.8402	0.0058	0.1862	0.0052
287.13	0.0245	1.8402	0.0059	0.1863	0.0042
292.76	0.0246	1.8402	0.0059	0.1864	0.0034
298.39	0.0246	1.8402	0.0059	0.1866	0.0030
304.02	0.0246	1.8402	0.0059	0.1867	0.0024
309.65	0.0247	1.8402	0.0059	0.1866	0.0018

ตารางที่ ค6 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวพาออกซิเจนที่ถูกผสมแล้ว 0.8 กรัม

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.00	0.0000	1.8402	0.0000	0.1953	0.0001
5.63	0.0006	1.8402	0.0000	0.1947	0.0001
11.26	0.0034	1.8402	0.0000	0.1878	0.0003
16.89	0.0058	1.8402	0.0000	0.1780	0.0011
22.52	0.0075	1.8402	0.0000	0.1704	0.0020
28.15	0.0086	1.8402	0.0026	0.1649	0.0038
33.78	0.0092	1.8402	0.0029	0.1614	0.0060
39.41	0.0097	1.8402	0.0028	0.1588	0.0084
45.04	0.0099	1.8402	0.0029	0.1566	0.0118
50.67	0.0100	1.8402	0.0029	0.1547	0.0143
56.30	0.0100	1.8402	0.0027	0.1524	0.0168
61.93	0.0100	1.8402	0.0026	0.1491	0.0192
67.56	0.0099	1.8402	0.0025	0.1465	0.0216
73.19	0.0098	1.8402	0.0024	0.1449	0.0241
78.82	0.0098	1.8402	0.0023	0.1460	0.0265
84.45	0.0100	1.8402	0.0023	0.1493	0.0286
90.08	0.0106	1.8402	0.0022	0.1527	0.0300
95.71	0.0113	1.8402	0.0023	0.1558	0.0312
101.34	0.0120	1.8402	0.0023	0.1589	0.0307
106.97	0.0129	1.8402	0.0023	0.1626	0.0294
112.60	0.0137	1.8402	0.0023	0.1657	0.0288
118.23	0.0144	1.8402	0.0024	0.1686	0.0276
123.86	0.0150	1.8402	0.0027	0.1712	0.0263
129.49	0.0153	1.8402	0.0032	0.1735	0.0246
135.12	0.0160	1.8402	0.0038	0.1759	0.0229
140.75	0.0177	1.8402	0.0045	0.1782	0.0210
146.38	0.0203	1.8402	0.0053	0.1806	0.0190
152.01	0.0226	1.8402	0.0058	0.1825	0.0169

ตารางที่ ค6 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวพาออกซิเจนที่ถูกผสมแล้ว 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
157.64	0.0241	1.8402	0.0063	0.1839	0.0147
163.27	0.0251	1.8402	0.0065	0.1846	0.0124
168.90	0.0256	1.8402	0.0066	0.1852	0.0109
174.53	0.0259	1.8402	0.0067	0.1857	0.0089
180.16	0.0261	1.8402	0.0069	0.1861	0.0075
185.79	0.0263	1.8402	0.0068	0.1861	0.0063
191.42	0.0263	1.8402	0.0068	0.1862	0.0060
197.05	0.0263	1.8402	0.0068	0.1864	0.0044
202.68	0.0263	1.8402	0.0068	0.1862	0.0036
208.31	0.0263	1.8402	0.0067	0.1863	0.0030
213.94	0.0263	1.8402	0.0068	0.1863	0.0025
219.57	0.0263	1.8402	0.0068	0.1865	0.0021
225.20	0.0263	1.8402	0.0068	0.1865	0.0018

ตารางที่ ค7 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวพาออกซิเจนที่ถูกผสมแล้ว 0.8 กรัม

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.00	0.0000	1.8402	0.0000	0.1955	0.0001
5.63	0.0008	1.8402	0.0000	0.1951	0.0002
11.26	0.0035	1.8402	0.0000	0.1860	0.0008
16.89	0.0059	1.8402	0.0000	0.1705	0.0018
22.52	0.0076	1.8402	0.0016	0.1624	0.0038
28.15	0.0086	1.8402	0.0022	0.1569	0.0068
33.78	0.0093	1.8402	0.0024	0.1541	0.0104
39.41	0.0096	1.8402	0.0025	0.1511	0.0146

ตารางที่ ค7 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซิลิเกตผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวพาออกซิเจนที่ถูกผสมแล้ว 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
45.04	0.0097	1.8402	0.0025	0.1480	0.0189
50.67	0.0099	1.8402	0.0026	0.1458	0.0228
56.30	0.0100	1.8402	0.0026	0.1461	0.0258
61.93	0.0102	1.8402	0.0025	0.1471	0.0280
67.56	0.0104	1.8402	0.0025	0.1493	0.0296
73.19	0.0108	1.8402	0.0024	0.1523	0.0305
78.82	0.0113	1.8402	0.0024	0.1556	0.0302
84.45	0.0120	1.8402	0.0025	0.1584	0.0294
90.08	0.0125	1.8402	0.0027	0.1614	0.0284
95.71	0.0131	1.8402	0.0025	0.1643	0.0272
101.34	0.0140	1.8402	0.0027	0.1676	0.0259
106.97	0.0149	1.8402	0.0031	0.1703	0.0245
112.60	0.0155	1.8402	0.0035	0.1726	0.0230
118.23	0.0161	1.8402	0.0042	0.1754	0.0216
123.86	0.0170	1.8402	0.0048	0.1783	0.0200
129.49	0.0185	1.8402	0.0055	0.1806	0.0181
135.12	0.0206	1.8402	0.0062	0.1819	0.0162
140.75	0.0229	1.8402	0.0067	0.1835	0.0147
146.38	0.0247	1.8402	0.0072	0.1849	0.0130
152.01	0.0258	1.8402	0.0075	0.1857	0.0111
157.64	0.0265	1.8402	0.0076	0.1861	0.0095
163.27	0.0270	1.8402	0.0077	0.1867	0.0080
168.90	0.0273	1.8402	0.0078	0.1871	0.0070
174.53	0.0275	1.8402	0.0079	0.1875	0.0057
180.16	0.0275	1.8402	0.0079	0.1876	0.0051
185.79	0.0276	1.8402	0.0079	0.1877	0.0045
191.42	0.0276	1.8402	0.0079	0.1880	0.0038
197.05	0.0277	1.8402	0.0080	0.1880	0.0035
202.68	0.0277	1.8402	0.0079	0.1878	0.0030

ตารางที่ ค7 แสดงการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สชนิดต่างๆ (มิลลิโมลต่อนาที) ตามเวลา เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้ตัวพาออกซิเจนชนิดแคลเซียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวพาออกซิเจนที่ถูกผสมแล้ว 0.8 กรัม (ต่อ)

Time(min)	mmol/min				
	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂
208.31	0.0277	1.8402	0.0078	0.1880	0.0025
213.94	0.0277	1.8402	0.0079	0.1882	0.0022
219.57	0.0277	1.8402	0.0079	0.1876	0.0019

2. ผลของการนำตัวพาออกซิเจนมาทำปฏิกิริยารีดักชันสลับกับออกซิเดชันอย่างต่อเนื่องใน กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิง

ตารางที่ ค8 แสดงน้ำหนักของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตบริสุทธิ์ที่ชั่งได้จริง และอัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วย น้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	น้ำหนักที่ชั่งได้จริง (กรัม)	อัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	0.8095	100.00
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4367	53.95
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.5932	73.28
2	เริ่มต้น	0.5932	73.28
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4032	49.81
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.5132	63.40
3	เริ่มต้น	0.5132	63.40
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.3832	47.34
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.4532	55.99
4	เริ่มต้น	0.4532	55.99
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.3732	46.10
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.4132	51.04

ตารางที่ ค9 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่ซังได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	น้ำหนักที่ซังได้จริง (กรัม)	น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์ (กรัม)	อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	0.8099	0.7289	100.00
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4368	0.3558	48.81
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.6268	0.5458	74.88
2	เริ่มต้น	0.6268	0.5458	74.88
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4268	0.3458	47.44
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.5468	0.4658	63.91
3	เริ่มต้น	0.5468	0.4658	63.91
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4212	0.3402	46.67
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.4912	0.4102	56.28
4	เริ่มต้น	0.4912	0.4102	56.28
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.4112	0.3302	45.30
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.4612	0.3802	52.16

ตารางที่ ค10 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักที่ซึ่งได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	น้ำหนักที่ซึ่งได้จริง (กรัม)	น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์ (กรัม)	อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	0.8063	0.5644	100.00
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5211	0.2792	49.47
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7311	0.4892	86.68
2	เริ่มต้น	0.7311	0.4892	86.68
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5111	0.2692	47.70
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.6711	0.4292	76.05
3	เริ่มต้น	0.6711	0.4292	76.05
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5011	0.2592	45.93
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.6311	0.3892	68.96
4	เริ่มต้น	0.6311	0.3892	68.96
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5011	0.2592	45.93
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.5911	0.3492	61.87

ตารางที่ ค11 แสดงน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่ซึ่งได้จริง น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์และอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบส่วนด้วยน้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมซัลเฟต

รอบการทดลอง	ปฏิกิริยา	น้ำหนักที่ซึ่งได้จริง (กรัม)	น้ำหนักที่หักแมกนีเซียมออกไซด์ (กรัม)	อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก
1	เริ่มต้น	0.8035	0.4018	100.00
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5991	0.1974	49.12
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7591	0.3574	88.95
2	เริ่มต้น	0.7591	0.3574	88.95
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5991	0.1974	49.12
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7391	0.3374	83.97
3	เริ่มต้น	0.7391	0.3374	83.97
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5891	0.1874	46.63
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7191	0.3173	78.99
4	เริ่มต้น	0.7191	0.3173	78.99
	ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	0.5891	0.1874	46.63
	ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	0.7091	0.3074	76.50

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรณี พูนศรีธนากุล เกิดวันที่ 9 มิถุนายน 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2556 และได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ The 3rd Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry International Conference 2013 (TICHE) ในวันที่ 17-18 ตุลาคม 2556 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ.ขอนแก่น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY