

การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของมีเทนหรือถ่านหินโดยใช้ Fe_2O_3 และ CaSO_4
เป็นตัวพาออกซิเจน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHEMICAL LOOPING COMBUSTION OF METHANE OR COAL
USING Fe_2O_3 AND CaSO_4 AS OXYGEN CARRIERS

Mr. Panuwattana Kanokwannakorn



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของมีเทนหรือถ่านหินโดยใช้

Fe_2O_3 และ $CaSO_4$ เป็นตัวพาออกซิเจน

โดย

นายภาณุวัฒน์ กนกวรรณกร

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลฤกษ์ แสนวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ศศิธร สรรพอคำ)

ภาณุวัฒน์ กนกวรรณกร : การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของมีเทนหรือถ่านหินโดยใช้ Fe_2O_3 และ CaSO_4 เป็นตัวพาออกซิเจน (CHEMICAL LOOPING COMBUSTION OF METHANE OR COAL USING Fe_2O_3 AND CaSO_4 AS OXYGEN CARRIERS) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ประพันธ์ คูชลธารา, 152 หน้า.

การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงเป็นกระบวนการที่สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ จากการศึกษาพบว่า ผลของการผสมเหล็กออกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก สามารถให้ปริมาณออกซิเจนสูงและเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับมีเทนและถ่านหินภาวะฟลูอิด์เบดได้ ผลของการเติมตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่ทำการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง พบว่าอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ผสมแคลเซียมซัลเฟตที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ 950 องศาเซลเซียสให้ผลของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูง จากนั้นเมื่อนำสัดส่วนที่ดีที่สุดจากเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งไปใช้ทดสอบการเผาไหม้กับถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบต พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยารีดักชันคือ 950 องศาเซลเซียสและปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 60 นาที นอกจากนั้น ผลของภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างและสัณฐานวิทยาในตัวพาออกซิเจนทั้งก่อนและหลังพบว่าตัวพาออกซิเจนผสมเกิดโครงสร้างของแคลเซียมเฟอร์ไรท์ที่สามารถช่วยเสริมการเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้และสัณฐานที่เกิดการเกาะรวมกันเป็นก้อนที่มีขนาดเล็ก ผลของการทำปฏิกิริยาสลับระหว่างปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง พบว่าหลังจากการฟื้นฟูสภาพโครงสร้างในปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวพาออกซิเจนผสมสามารถคืนสภาพกลับมาได้และมีความเสถียรในแต่ละรอบการเกิดปฏิกิริยาและการเกิดปฏิกิริยารีดักชันในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบตในแต่ละรอบการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาที โดยการเกิดปฏิกิริยาครั้งแรกจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด สรุปได้ว่า อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเหล็กออกไซด์ผสมแคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของเชื้อเพลิงแก๊สและเชื้อเพลิงของแข็ง

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5772246023 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CALCIUM SULFATE OXYGEN CARRIER / FLUIDIZED BED REACTOR / CHEMICAL LOOPING COMBUSTION / COAL / FERRIC OXIDE OXYGEN CARRIER

PANUWATTANA KANOKWANNAKORN: CHEMICAL LOOPING COMBUSTION OF METHANE OR COAL USING Fe_2O_3 AND CaSO_4 AS OXYGEN CARRIERS. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 152 pp.

Chemical looping combustion (CLC) is the promising process which is expected to capture carbon in form of CO_2 and low operating costs. This research studied the effects of Fe_2O_3 addition to CaSO_4 oxygen carrier which are cheap material, provide high amount of oxygen, reacted with methane and coal in combustion reaction and suitable for fixed bed gaseous combustion and fluidized bed coal combustion. The effects of Fe_2O_3 loading was examined by performing CLC of CH_4 using a lab-scale fixed-bed reactor. The result revealed that 20 wt.% $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaSO}_4$ and reaction temperature at 950°C gave the best efficiency result in term of carbon dioxide generation. The 20 wt.% $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaSO}_4$ was selected and then applied to CLC of coal in lab-scale fluidized bed system. For the CLC of coal, the reaction temperature is optimal at 950°C. The reduction reaction was rapidly occur within 60 min. SEM and XRD were used to analyze the solid composition and morphology of spent oxygen carrier showed the morphology and structure of carries oxygen before and after used, found calcium ferrite structure which can promote the combustion reaction by XRD and small particle size agglomeration of oxygen carrier occurred by SEM. The result of recyclability of mixed oxygen carrier in fixed bed reactor, the regeneration reaction weigh lost and gain at the first to fourth are stable and reduction reaction in fluidized bed reactor is rapidly occurred in 30 minutes by the first reduction reaction test give the highest amount and rate of carbon dioxide. Concluding that 20 wt.% $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaSO}_4$ could be used in CLC process of both gaseous and solid fuels.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและกำลังใจที่ดีตลอดมา

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนการวิจัยจาก ภาควิชาเคมีเทคนิค ทุนวิทยบัณฑิตจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขต อุเทนถวายและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ตลอดจนการศึกษา นอกจากนี้ ผลงานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยประจำปีงบประมาณ 2559 (CU-59-053-CC)

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.ศศิธร สรรพอคำ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็น กรรมการสอบตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำ วิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการ ใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ใน ภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และเป็นกำลังกาย กำลังใจในการทำ วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณทุกท่านในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแห่งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้ให้โอกาสกับลูกเพื่อพิสูจน์ตัวเอง รวมถึงผู้มี พระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงกำลังใจ และการสนับสนุนด้าน ต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ถ่านหิน.....	4
2.2 วิกฤตการณ์โลกร้อน	7
2.3 กระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์	10
2.4 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	13
2.5 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง	18
2.6 ตัวพาออกซิเจน	20
2.7 ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต	21
2.8 ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์.....	22
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	27
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	27

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
3.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	33
3.5 ตัวแปรในการทดลอง	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	39
4.1 ผลของการผสมเหล็กออกไซด์กับแคลเซียมซัลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง	39
4.2 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วน องค์ประกอบที่ดีที่สุด	52
4.3 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง ที่ อุณหภูมิกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด	56
4.4 ผลของถ่านหินและการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตกับตัวพา ออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด	59
4.5 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันด้วยถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์ เบตกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด	61
4.7 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยตัวพาออกซิเจนปริมาณเกินพอร้อยละ 20 โดยโมล	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์	78
ภาคผนวก ข การคำนวณ	81
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง	91

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 152



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ถ่านหินพีท.....	4
รูปที่ 2.2 ถ่านหินลิกไนต์.....	5
รูปที่ 2.3 ถ่านหินซับบิทูมินัส.....	5
รูปที่ 2.4 ถ่านหินบิทูมินัส.....	6
รูปที่ 2.5 ถ่านหินแอนทราไซต์.....	7
รูปที่ 2.6 การขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์.....	11
รูปที่ 2.7 การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ในสถานที่ปลอดภัย.....	13
รูปที่ 2.8 กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้.....	14
รูปที่ 2.9 กระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้.....	16
รูปที่ 2.10 กระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์.....	17
รูปที่ 2.11 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิง.....	19
รูปที่ 2.12 ตัวพาออกซิเจน (ก) แคลเซียมซัลเฟต (ข) แร่ยิปซัม.....	21
รูปที่ 2.13 ตัวพาออกซิเจน (ก) เหล็กออกไซด์ (ข) แร่เฮมาไทต์.....	23
รูปที่ 3.1 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี.....	29
รูปที่ 3.2 หลักการการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	30
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	31
รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
รูปที่ 3.5 หลักการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	32
รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน.....	33
รูปที่ 3.7 แบบจำลองการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง.....	35
รูปที่ 3.8 แบบจำลองการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต.....	37

รูปที่ 4.1 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	40
รูปที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	40
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต (ก-ข) ก่อนทำปฏิกิริยารีดักชัน (ค-ง) หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน ด้วยกำลังขยาย 100X และ 550X.....	41
รูปที่ 4.4 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	42
รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	43
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ (ก-ข) ก่อนทำปฏิกิริยารีดักชัน (ค-ง) หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน ด้วยกำลังขยาย 100X และ 550X.....	43
รูปที่ 4.7 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	44
รูปที่ 4.8 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	45
รูปที่ 4.9 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	45
รูปที่ 4.10 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	46
รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (ก-ข) ก่อนทำปฏิกิริยารีดักชัน (ค-ง) หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน	47
รูปที่ 4.12 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 4. 13 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	48

รูปที่ 4.14 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 4.15 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (ก-ข) หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน.....	50
รูปที่ 4.17 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนชนิดต่างที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	51
รูปที่ 4.18 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิต่างๆ	52
รูปที่ 4.19 อัตราการเกิดไฮโดรเจนโดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิต่างๆ	53
รูปที่ 4.20 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิต่างๆ	54
รูปที่ 4.21 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิต่างๆ	55
รูปที่ 4.22 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.23 สัดส่วนน้ำหนักตัวพาออกซิเจนก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.24 รูปแบบ XRD ของการเผาไหม้แบบเคมิคอลลูปีงในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ 950 องศาเซลเซียส (ก) รอบการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และ (ข) รอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	57
รูปที่ 4.25 การจำแนกวัสดุตามเจลดาร์ทของ (ก) ถ่านหิน (ข) ตัวพาออกซิเจน [40].....	59
รูปที่ 4.26 อัตราการเกิด (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) คาร์บอนมอนอกไซด์กับถ่านหินที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	60
รูปที่ 4.27 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์เบด	61

รูปที่ 4.28 รูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดที่ อุณหภูมิต่างๆ	62
รูปที่ 4.29 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพาทออกซิเจนผสมกับ ถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด	63
รูปที่ 4.30 อัตราการเกิดไฮโดรเจนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพาทออกซิเจนผสมกับถ่านหิน ที่ อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด	63
รูปที่ 4.31 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยารีดักชันในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ฟลูอิด์เบด ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	65
รูปที่ 4.32 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์จากปฏิกิริยารีดักชันในการเผาไหม้แบบเคมี คอลลูบิงฟลูอิด์เบด ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	66
รูปที่ 4.33 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยถ่านหินกับตัวพาทออกซิเจนที่มากเกินไป	68

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 สภาวะวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี	29
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของถ่านหินที่ใช้ในการทดสอบ	59
ตารางที่ 4.2 ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิต่างๆ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไธเบด.....	64
ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างแก๊สมาตรฐาน พื้นที่ได้กราฟและความเข้มข้นที่ได้จากโครมาโตแกรม	87
ตารางที่ ค.1 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวพาออกซิเจนชนิดต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์เบ ดนิ่ง.....	91
ตารางที่ ค.2 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ...	99
ตารางที่ ค.3 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	106
ตารางที่ ค.4 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 1,000 องศา เซลเซียส	119
ตารางที่ ค.5 อัตราการใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	126
ตารางที่ ค.6 น้ำหนักของแคลเซียมซัลเฟตก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยา	130
ตารางที่ ค.7 น้ำหนักของเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยา	130
ตารางที่ ค.8 น้ำหนักของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ก่อนและ หลังเกิดปฏิกิริยา.....	131
ตารางที่ ค.9 อัตราการเกิดแก๊สชนิดต่างๆ โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับ ถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธเบด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	132
ตารางที่ ค.10 อัตราการเกิดแก๊สชนิดต่างๆ โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับ ถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธเบด ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	135
ตารางที่ ค.11 อัตราการเกิดแก๊สชนิดต่างๆ โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับ ถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธเบด ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส.....	137
ตารางที่ ค.12 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธ เบด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	139

ตารางที่ ค.13 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ เบด ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	140
ตารางที่ ค.14 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ เบด ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส	142
ตารางที่ ค.15 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างตัวพาออกซิเจนกับถ่านหินในแต่ละรอบ และการแตกสลายตัวของถ่านหินที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	144
ตารางที่ ค.16 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ระหว่างตัวพาออกซิเจนกับถ่านหินในแต่ละรอบ และการแตกสลายตัวของถ่านหินที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	146
ตารางที่ ค.17 อัตราการใช้ออกซิเจนในการฟื้นฟูโครงสร้างของตัวพาออกซิเจนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส	148



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน เชื้อเพลิงจากแหล่งกำเนิดที่ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ดังเช่นน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาตินั้นมีปริมาณลดลงเป็นอย่างมากตามปริมาณความต้องการการใช้พลังงานของมนุษย์ ในขณะที่เชื้อเพลิงของแข็งเช่นถ่านหินนั้นนั้นยังคงมีปริมาณมากเพียงพอและสามารถประยุกต์ได้หลากหลายอุตสาหกรรม ซึ่งในกระบวนการผลิตทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ปริมาณมาก ออกสู่บรรยากาศและส่งผลกระทบต่อออกมาในรูปของปัญหาโลกร้อนที่ทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น สำหรับกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์นั้นยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง การพัฒนาเพื่อระบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่มากขึ้นเรียกว่าระบบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิง (Chemical looping combustion system) สามารถทำได้ คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์และง่ายต่อกระบวนการกักเก็บโดยไม่มีการสร้างระบบการแยกเพิ่มเติม นอกจากนี้ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการคือ การเลือกใช้วัสดุตัวพาออกซิเจน (Oxygen carrier) ที่เหมาะสมต่อระบบ โดยแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ซึ่งเป็นตัวพาออกซิเจนที่ภายในโครงสร้างมีปริมาณออกซิเจนสูงจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ยาวนาน ทั้งนี้ยังมีราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อธรรมชาติ แต่ถึงกระนั้น การใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวพาออกซิเจนนั้นยังมีข้อด้อยอยู่ อันเนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ช้า ความสามารถในการฟื้นฟูตัวเองต่ำจึงเสียสภาพการใช้งานได้ง่าย

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงตัวพาออกซิเจนจากแคลเซียมซัลเฟต โดยใช้เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ซึ่งเป็นตัวพาออกซิเจนที่มีความนิยมในการใช้งาน และมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดี โดยเหล็กออกไซด์จะช่วยเพิ่มความสามารถของแคลเซียมซัลเฟตในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงให้มีความสมบูรณ์และได้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น นอกจากนั้นจะทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงในกระบวนการเคมีคอลลูปิง นอกจากนั้นแล้วยังมีผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยตัวพาออกซิเจนชนิดนี้อยู่น้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.1.1 ศึกษาผลของการผสม Fe_2O_3 และ CaSO_4 ต่อประสิทธิภาพการเป็นตัวพาออกซิเจน สำหรับการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง

1.1.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหรือถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้วัสดุผสมระหว่าง Fe_2O_3 และ CaSO_4 เป็นตัวพาออกซิเจน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาผลอัตราส่วนการผสมวัสดุตัวพาออกซิเจนระหว่างแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงทั้งในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่มีมีเทนเป็นเชื้อเพลิงและในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่มีถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุตัวพาออกซิเจนกับเชื้อเพลิงและถ่านหิน

1.4.3 ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งโดยมีมีเทนเป็นเชื้อเพลิง

- ผลของสัดส่วนองค์ประกอบโดยน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ
- ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงที่ 900 – 1,000 องศาเซลเซียส

1.4.4 ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดโดยมีถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

- ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงที่ 900 – 1,000 องศาเซลเซียส

1.4.5 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุก่อนและหลังทำปฏิกิริยาเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง

- การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
- การวิเคราะห์สัณฐานด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

1.4.6 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การผสมระหว่างตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้กับมีเทนและถ่านหิน และมีความสามารถในการฟื้นฟูกลับมาใช้งานได้อีกครั้งในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหิน

ถ่านหิน (coal) [1] เป็นหินตะกอนและแร่เชื้อเพลิงที่สามารถติดไฟได้ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ มีทั้งชนิดผิวมันและด้าน ซึ่งเกิดจากการการสะสมตัวตามธรรมชาติของซากพืชและสัตว์ ประกอบด้วยองค์ประกอบธาตุสำคัญ 3 ชนิด มีปริมาณคาร์บอนไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ไฮโดรเจน ออกซิเจน และธาตุองค์ประกอบเช่นกำมะถัน เหล็กหรือธาตุเจือปนอื่น ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเขตธรรมชาติที่สลายตัวสะสมนับเป็นเวลาหลายร้อยล้านปี เมื่อเกิดแผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิดหรือเกิดการทับถมของซากตะกอนมากขึ้น ส่งผลให้แหล่งสะสมได้รับแรงกดดันและความร้อนพร้อมทั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงจนกลายเป็นถ่านหินชนิดต่างๆซึ่งปริมาณคาร์บอนจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของถ่านหิน ถ่านหินสามารถแยกประเภทตามลำดับชั้นได้เป็น 5 ประเภท คือ

2.1.1 พีท (peat)

พีท [2] เป็นมวลของแห้งที่เกิดจากการสะสมของซากพืช พีทเป็นองค์ประกอบสารอินทรีย์ชั้นแรกของกระบวนการเกิดถ่านหิน โดยส่วนประกอบยังสลายตัวไม่หมด มีความชื้นสูง มีปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก มีปริมาณกำมะถันต่ำ ก่อนใช้งานควรนำมาอบไล่ความชื้นก่อน



รูปที่ 2.1 ถ่านหินพีท [2]

2.1.2 ลิกไนต์ (lignite)

ลิกไนต์ [3] เป็นถ่านหินอันดับต่ำที่สุด เกิดจากการที่พีทเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นถ่านสีน้ำตาลดำ ถ่านหินลิกไนต์เป็นถ่านหินที่มีความสำคัญในการทำอุตสาหกรรม โดยจะให้ค่าความร้อนประมาณ 8,300 บีทียู ปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 60 – 70 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.2 ถ่านหินลิกไนต์ [3]

2.1.3 ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)

ซับบิทูมินัส [4] เป็นถ่านที่มีสีน้ำตาลเข้ม มีสีดำหรือน้ำตาล ผิวด้านมีความแข็ง มีความชื้นร้อยละโดยประมาณ 15 – 30 โดยน้ำหนัก มีพลังงานอยู่ที่ตั้งแต่ประมาณ 8,300 – 11,500 บีทียู มีความหนาแน่นต่ำและถือว่ามีปริมาณความชื้นสูง ในบางชนิดมีรูพรุนสูงและมีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการติดไฟได้ด้วยตัวเองหากมีอากาศจากภายนอกไหลเข้าอย่างเพียงพอในระหว่างพักเก็บถ่านหิน



รูปที่ 2.3 ถ่านหินซับบิทูมินัส [4]

2.1.4 บิทูมินัส (bituminous)

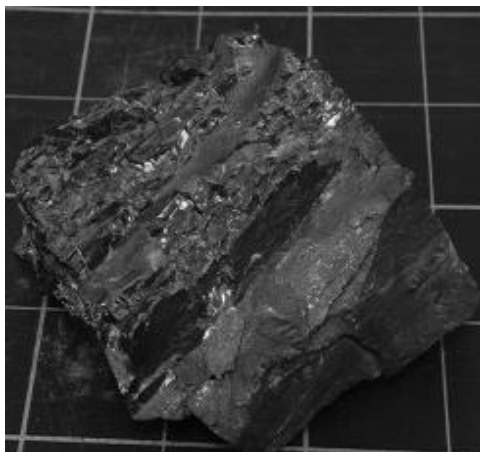
บิทูมินัส [5] เป็นถ่านหินเบาที่มีคุณลักษณะเหมือนน้ำมันดิน มีลักษณะทั้งสว่างใสและดำด้าน มีคุณภาพสูงกว่าถ่านหินลิกไนต์แต่ยังมีคุณภาพด้อยกว่าถ่านหินแอนทราไซต์ ถ่านหินบิทูมินัสเป็นหินตะกอนอินทรีย์ที่เกิดจากพีทได้รับความกดดันและความร้อนจนมีองค์ประกอบหลักนั้นเป็นมาเซอรอล วิทรีไนต์ เอ็กซีไนท์และอื่นๆ ปริมาณคาร์บอนของถ่านหินบิทูมินัสจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60 – 80 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบส่วนที่เหลือคือไฮโดรเจนและกำมะถันซึ่งเป็นส่วนของมาเซอรอลในโครงสร้างที่ยังไม่ได้ถูกขับออกไป ค่าความร้อนจำเพาะของบิทูมินัสอยู่ที่ประมาณ 21 – 30 ล้านบีทียู



รูปที่ 2.4 ถ่านหินบิทูมินัส [5]

2.1.5 แอนทราไซต์ (anthracite)

แอนทราไซต์ [6] เป็นถ่านหินที่มีสีดำจากองค์ประกอบแร่ธาตุของถ่านหินที่มีโครงสร้างเป็นผลึก มักพบได้ในหินตะกอน ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 86 – 98 โดยน้ำหนัก แอนทราไซต์เป็นถ่านหินประเภทแข็ง เกาะตัวกันแน่น มีความมันวาวสูง มีปริมาณของคาร์บอนสูงที่สุด มีแร่ธาตุชนิดอื่นเจือปนต่ำและมีค่าพลังงานความร้อนจำเพาะสูงที่สุดในถ่านหินทุกชนิด แอนทราไซต์เป็นถ่านหินที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในมากที่สุด ซึ่งในแอนทราไซต์คุณภาพสูงจะมีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 92.1 -98 โดยน้ำหนัก ซึ่งคุณภาพมาตรฐานส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และถ่านหินคุณภาพดีและดีมาส่วนใหญ่จะใช้ในการถลุงเหล็ก แอนทราไซต์มีเพียงร้อยละ 1 ของปริมาณทั่วโลก และมีเพียงไม่กี่ประเภทที่สามารถขุดถ่านหินแอนทราไซต์ได้



รูปที่ 2.5 ถ่านหินแอนทราไซต์ [6]

2.2 วิฤตการณ์โลกร้อน

2.2.1 ภาวะโลกร้อน (Global Warming)

ภาวะโลกร้อน (Global Warming) หมายถึง การที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศบนโลกสูงขึ้น ทั้งบนพื้นแผ่นดินและมหาสมุทร ตลอดช่วง 100 ปีที่ผ่านมาอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นถึง 0.74 - 0.18 องศาเซลเซียส และจากแบบจำลองการคาดคะเนภูมิอากาศพบว่าในปี ค.ศ. 2001 - 2100 หรือช่วงระยะเวลาอีก 100 ปีข้างหน้า อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจะเพิ่มขึ้นถึง 1.1 - 6.4 องศาเซลเซียส [7]

2.2.2 สาเหตุการเกิดภาวะโลกร้อน

กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่นการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากถ่านหิน น้ำมันและแก๊สธรรมชาติ รวมทั้งการตัดไม้ทำลายป่า การทำการเกษตรและการปศุสัตว์ ควันจากท่อไอเสียรถยนต์ นอกจากนี้กระบวนการแปรรูปอุตสาหกรรมยังส่งผลให้เกิดแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gas) [8] ซึ่งเป็นแก๊สที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน หรือรังสีอินฟราเรด (Infrared) ได้ดี ซึ่งมีทั้งแก๊สที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ แก๊สเรือนกระจกที่สำคัญคือ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน และไนตรัสออกไซด์ คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เป็นต้น แต่แก๊สเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต มีเพียง 6 ชนิด โดยจะต้องเป็นแก๊สที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (anthropogenic greenhouse gas emission) เท่านั้น ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) ทั้งนี้ยังมีแก๊สเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง คือ สารซี

เอฟซี (CFC) ซึ่งใช้เป็นสารทำความเย็นและใช้ในการผลิตโฟม แต่ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต (Kyoto protocol) เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในพิธีสารมอนทรีออล (Montreal protocol) แล้วการเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจกนั้น ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกนั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งแก๊สเรือนกระจกแต่ละชนิดยังมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Global Warming Potential: GWP) ที่แตกต่างกัน ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุล และขึ้นอยู่กับอายุของแก๊สนั้นๆ ในบรรยากาศ และจะคิดเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น 20 ปี 50 ปี หรือ 100 ปี โดยค่า GWP ของแก๊สเรือนกระจกต่างๆ ในช่วงเวลา 100 ปี ของแก๊สเรือนกระจกต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 2.1 ค่า GWP ของแก๊สเรือนกระจกชนิดต่างๆ [8]

แก๊สเรือนกระจก	อายุในชั้นบรรยากาศ (ปี)	ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	5 - 200	1
มีเทน (CH ₄)	12	25
ไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O)	114	298
ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน	1.4 - 270	124 - 14,800
เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs)	1,000 - 50,000	7,390 - 12,200
ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF ₆)	3,200	22,800
ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF ₃)	740	17,200

2.2.3 ผลกระทบของภาวะโลกร้อน

ในทุกวัน [9] การใช้พลังงานนั้นเพิ่มปริมาณมากขึ้นและอัตราการเกิดประชากรได้เพิ่มขึ้นจาก 7 พันล้านไป 9 พันล้านในปี ค.ศ. 2050 นั้นแสดงให้เห็นถึงอัตราความต้องการพลังงานนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 50 ในอีก 20 ปีข้างหน้า ภาวะโลกร้อนทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆเพื่อเอาตัวรอดจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป บางสายพันธุ์ที่ไม่สามารถปรับตัวได้จึงมีโอกาสรอดสูญพันธุ์ ตัวอย่างเช่น นกเพนกวิน หมิ่ขั้วโลก หรือสัตว์ที่อาศัยอยู่บริเวณน้ำแข็งขั้วโลก เป็นต้น

สำหรับมนุษย์ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนั้นได้รับผลกระทบดังเช่นสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรุนแรงขึ้น เกิดความแห้งแล้งที่รุนแรง ขาดน้ำสะอาดที่ใช้อุปโภคบริโภค ในขณะเดียวกันถึงหน้าฝนเกิดอุทกภัยอย่างหนัก ส่งผลถึงผลผลิตทางการเกษตรเสียหาย พืชผลที่ผลิตได้มีจำนวนน้อยลง ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจภายในประเทศ ดังนั้นภาวะโลกร้อนส่งผลกระทบในหลายด้าน จึงขอแยกออกเป็นหัวข้อดังนี้

ผลกระทบที่มีต่อระบบนิเวศวิทยา [10]

อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้น้ำแข็งขั้วโลกละลาย เมื่อน้ำแข็งจำนวนมากละลายลงก็ทำให้ปริมาณน้ำทะเลในโลกร้อนสูงขึ้น ซึ่งผลกระทบโดยตรงคือการเกิดน้ำท่วม สถานที่หลายๆที่จะจมอยู่ใต้ท้องทะเลเช่น หมู่เกาะมัลดีฟส์ และกรุงเทพมหานคร นอกจากนั้นปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นบวกกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ระบบนิเวศของท้องทะเลเปลี่ยนไป ทำให้สัตว์น้ำจำนวนมากปรับตัวไม่ได้และตายลงไป ปะการังการฟอกขาวของปะการัง (coral bleaching) เกิดจากการที่ปะการังตายเพราะปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมไม่ได้ เหลือไว้แต่ส่วนที่เป็นโครงสร้างสีขาวไร้ชีวิต ไม่ต่างอะไรกับโครงกระดูกของสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว ปะการังเป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำที่สำคัญมาก ถ้าไม่มีปะการังสัตว์น้ำต่างๆก็จะลดจำนวนลง และบางชนิดอาจสูญพันธุ์ไปในที่สุด อีกผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนคือภัยพิบัติจากธรรมชาติที่เกิดบ่อยขึ้นและรุนแรงมากขึ้น เป็นเพราะสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงไป ฤดูหนาวสั้นลง ฤดูร้อนยาวนานขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของโลกสูงขึ้น น้ำจากทะเลจากแหล่งน้ำต่างๆเกิดการระเหยมากขึ้น ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาจะมีปริมาณที่สูงขึ้นจนทำให้เกิดน้ำท่วม ส่งผลอาหารและน้ำสะอาดขาดแคลน เนื่องจากพืชผลปลูกได้ยากขึ้นจากการที่อากาศเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ยังเกิดภัยพิบัติทำลายพื้นที่เพาะปลูกและพืชผลให้เสียหายอีกด้วย

ผลกระทบที่มีต่อเศรษฐกิจ [10]

เมื่อสัตว์น้ำมีจำนวนน้อยลง ทำให้สูญเสียรายได้จากการจับสัตว์น้ำ แหล่งท่องเที่ยวใต้น้ำที่สวยงามเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ส่งผลกระทบต่อธุรกิจการท่องเที่ยว อีกทั้งในภาคการเกษตรยังได้รับผลกระทบไปด้วย ปริมาณพืชผลที่เคยผลิตได้มากมายลดน้อยไป ส่งผลให้เครื่องอุปโภคบริโภคมีมูลค่าสูงขึ้น และสินค้าเกิดการขาดตลาด ภัยพิบัติที่รุนแรงยังส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่ภาคอุตสาหกรรม ดังที่เห็นได้จากน้ำท่วมครั้งใหญ่ในปี 2554 ที่โรงงานและนิคมอุตสาหกรรมหลาย

แห่งได้รับความเสียหาย อีกทั้งยังต้องใช้งบในการป้องกันภัยพิบัติที่อาจจะเกิดขึ้นอีกในอนาคต และยังคงส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผู้ลงทุน

ผลกระทบในด้านของสุขภาพ [10]

อุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียและศัตรูพืช ซึ่งทำให้ในอนาคตจะมีผู้ที่ติดเชื้อรุนแรงและล้มป่วยมากขึ้น ยกตัวอย่างโรคไข้เลือดออก ไข้มาลาเรีย อหิวาตกโรค ภัยพิบัติต่างๆทำให้การดำรงชีวิตนั้นยากลำบากมากขึ้น เช่น การเกิดอุทกภัยทำให้เกิดการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกในน้ำที่ใช้อุปโภคบริโภค อาหารมีราคาแพงขึ้น ทำให้ผู้คนได้รับสารอาหารไม่เพียงพอ และทำให้ร่างกายอ่อนแอ ในอนาคตอีก 20 ปีข้างหน้าโลกจะเกิดการเปลี่ยนแปลง การใช้ชีวิตจะลำบากมากขึ้น เนื่องจากธรรมชาติที่มีถูกทำลายไป

ผลกระทบที่เกิดขึ้นขยายตัวเป็นวงกว้างและทุกภาคส่วนต่างรับทราบถึงวิกฤตการณ์ที่เกิดขึ้น จึงพยายามสร้างมาตรการต่างๆขึ้นเพื่อบรรเทาสภาวะโลกร้อน วิธีการมากมายจึงเกิดขึ้นซึ่งหนึ่งในนั้นคือกระบวนการการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

2.3 กระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon capture and storage : CCS) [11] เป็นเทคโนโลยีที่สามารถดักจับการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 90 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้าในกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยป้องกันคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ นอกจากนั้นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ควบคู่กับชีวมวลนั้นเป็นหนึ่งในไม่กี่เทคโนโลยีที่สามารถใช้ควบคู่ไปในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ การทำงานต่อเนื่องของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นประกอบด้วย 3 ส่วน

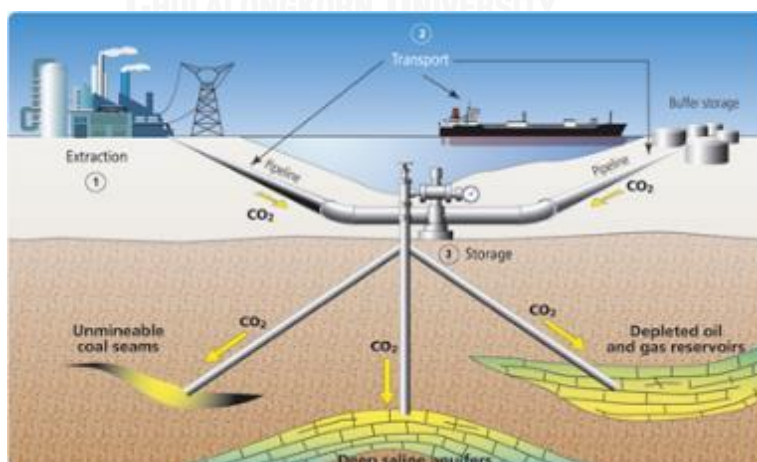
1. การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [11]

กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกระบวนการที่สามารถดักจับการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 90 ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและอุตสาหกรรมต่างๆ หรือแม้กระทั่งกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่มีการใช้งานและปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 5 พันล้านตันในแต่ละปีหรือเทียบเท่าได้กับการใช้งานรถยนต์ถึง 2 พันล้านคันบนถนน เทคโนโลยีการดักจับและแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชนิดอื่นนั้นมี 3 วิธีที่แตกต่างกันคือกระบวนการดักจับก่อนทำการเผาไหม้ กระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้และกระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน

บริษัท โรงผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นสามารถสร้างอุปกรณ์ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และเพื่อเตรียมความพร้อมเพื่อใช้งานในอนาคตข้างหน้า ทุกกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ตั้งแต่การผลิตจนถึงกระบวนการนำไปเก็บในกระบวนการเชิงอุตสาหกรรมนั้นเป็นที่รู้จักว่าเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยเหลือทางด้านสุขภาพและและความปลอดภัย การใช้งานกระบวนการการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงพาณิชย์นั้นเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและได้รับการควบคุมจากทางรัฐบาล

2. การขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์ [12]

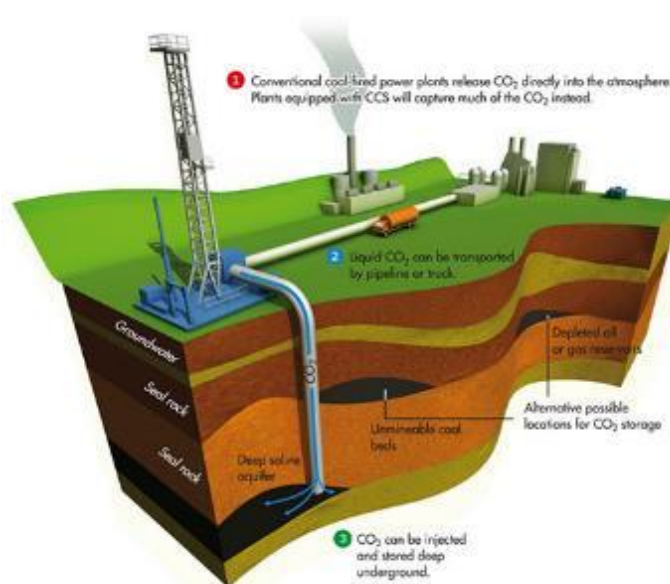
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกผ่านกระบวนการดักจับ จะถูกขนส่งผ่านทางเรือหรือท่อในสถานะที่เหมาะสม โดยเทคโนโลยีการขนส่งทางท่อถูกใช้อย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นขนส่งแก๊สธรรมชาติ น้ำมันและของไหลชนิดต่างๆไปสู่พื้นที่ต่างๆบนโลก ในบางกรณี นอกจากการขนส่งผ่านทางท่อและเรือแล้ว ยังมีการส่งคาร์บอนไดออกไซด์ไปพร้อมกับบรรจรถถังอีกด้วย ในแต่ละโครงการของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะมีการวางแผนเกี่ยวกับความปลอดภัยและสุขอนามัย ในเครือข่ายเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่ๆนั้นจะมีช่วงการดำเนินการยาวนานถึง 30 ปีด้วยความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ มีการปรับปรุงศักยภาพของระบบท่อการขนส่งภายในระบบดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีลักษณะเป็นกลุ่มเพื่อที่จะส่งไปยังส่วนของอุตสาหกรรมต่างๆให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดโดยมีภาระค่าใช้จ่ายต่อโรงงานที่น้อยลง



รูปที่ 2.6 การขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์ [12]

3. การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ในสถานที่ปลอดภัย [13]

เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับการขนส่ง จะถูกเก็บลงไปในชั้นหินที่มีรูพรุนตามหลักธรณีวิทยา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ลึกจากเปลือกโลกไปหลายกิโลเมตรจากในชั้นเปลือกโลกที่มีทั้งอุณหภูมิและความดันจนทำให้คาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสถานะของเหลวหรือสถานะวิกฤตยิ่งยวด สถานที่ที่เหมาะสมต่อการกักเก็บดังกล่าวเช่นแหล่งสะสมแก๊สและแหล่งน้ำมันที่ประกอบด้วยหินเกลือที่เป็นหินที่มีรูพรุนสูงหรือการอัดคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในแหล่งน้ำมันเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันที่มากขึ้น หลุมน้ำมันและแก๊สที่หมดไปแล้วมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ในโครงการมากที่สุดเพราะมีข้อมูลในเชิงธรณีวิทยาและอุทกพลศาสตร์แล้ว ชั้นหินเกลือเป็นตัวบ่งบอกศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีระยะยาวที่สุดซึ่งในปัจจุบันยังเป็นที่รู้จักกันน้อย สิ่งนี้สถานที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์นั้นถูกฉีดลงไปในความดันของโครงสร้างทางธรณีนั้น เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนตัวเข้าสู่ชั้นหินที่ไม่สามารถแทรกตัวทะลุลงผ่านไปได้ ซึ่งชั้นหินนี้จะมีสามารถในการจับคาร์บอนไดออกไซด์และปิดตัวลงได้ด้วยโครงสร้างของชั้นหิน โครงสร้างของชั้นหินมีกลไกการทำงานในลักษณะเดียวกับหลุมน้ำมันและแก๊สธรรมชาติที่ทำการเก็บกักไว้เป็นเวลาหลายล้านปีซึ่งในลักษณะคาร์บอนไดออกไซด์ก็เช่นกัน ในขณะที่ทำการฉีดคาร์บอนไดออกไซด์ลงบนชั้นหินบริเวณส่วนที่ทำการผนึกลงไปซึ่งบริเวณนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกักเก็บไว้จะมีกระบวนการกักเก็บตัวเอง เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกักเก็บไว้ในชั้นธรณีจะเริ่มมีการละลายตัวลงไปในชั้นหินเกลือซึ่งทำให้หินเกลือมีความหนาแน่นมากขึ้นและทำให้จมลงไปที่ก้นและถูกกักเก็บในชั้นกักเก็บสุดท้ายคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดพันธะเคมีกับและไม่สามารถกลับออกมาได้ตามกระบวนการผันกลับไม่ได้กับชั้นแร่ธาตุ กลไกการกักเก็บนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถเคลื่อนตัวออกไปได้ยิ่งกว่าเดิมจึงแสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงในการกักเก็บและการรั่วไหลที่ต่ำ มีโครงการบางโครงการที่ประสบความสำเร็จในการฉีดคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปได้ดินชั้นลึกทั้งในระดับทดลองและในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการกักเก็บได้ถึง 30 ปีในกระบวนการเพิ่มปริมาณน้ำมันในการขุดเจาะดังเช่นในโครงการสเล็ปเนอร์ (Sleipner project) โครงการซาฮาห์ (Salah project) ในแอลจีเรียและโครงการเวย์เบิร์น-ไมเดิล (Weyburn-Midale project) ในแคนาดา ในรายงานพิเศษเกี่ยวกับการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้สรุปผลของการกักเก็บนั้นให้ประสิทธิภาพถึงร้อยละ 99 ในช่วงรอบระยะเวลา 1,000 ปี



รูปที่ 2.7 การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ในสถานที่ปลอดภัย [13]

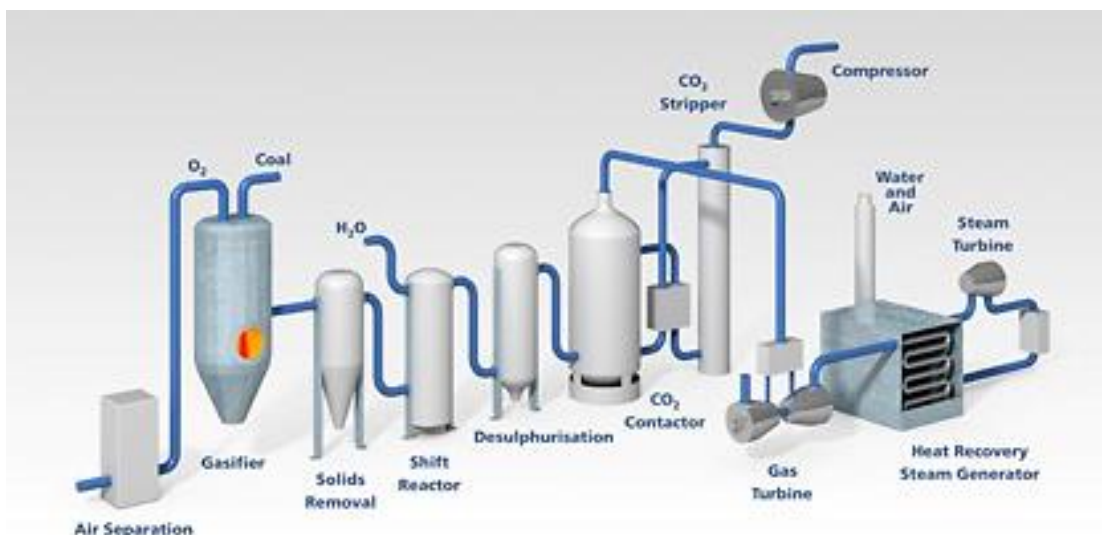
2.4 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon capture process) เป็นกระบวนการหนึ่งในขั้นตอนหลักก่อนการขนส่งและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีกระบวนการย่อยประกอบด้วย กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion) กระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้ (post-combustion) และกระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (oxy-fuel combustion) ซึ่งทั้งสามกระบวนการนี้จะมีการใช้งานตามระบบการทำงานในลักษณะต่างกันไป [14]

1. กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้

กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้ [15] เป็นกระบวนการที่ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงในสถานะของแข็ง ของเหลวหรือแก๊สให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้กระบวนการการแปรสภาพเป็นแก๊ส (gasification) หรือกระบวนการเปลี่ยนสภาพ (reforming) ซึ่งเป็นกระบวนการที่รู้จักกันเป็นอย่างดีในอุตสาหกรรมกระบวนการกลั่นและในอุตสาหกรรมเคมีทั่วโลก โดยไฮโดรเจนนั้นจะถูกแยกออกไปทำเป็นเชื้อเพลิงซึ่งการเผาไหม้นั้นไม่เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะถูกส่งไปทำการอัดและขนส่งไปทำการกักเก็บในพื้นที่กักเก็บ ขั้นตอนที่สำคัญในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงนั้นมีความซับซ้อนและยากในการประยุกต์เข้าร่วมกับกระบวนการเดิมในโรงงาน

กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้ที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแก๊สธรรมชาติที่จะใช้กับระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้ [15]

ข้อดีของกระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้ [16]

- กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้มีการใช้ปฏิกิริยาแก๊สน้ำ (Water-gas shift reaction) และจับคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์ได้ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาแก๊สกรด (Acid gas reaction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย
- กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้มีการใช้พลังงานให้เกิดความดันต่ำกว่าเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินแบบผง (pulverised coal combustion ; PCC) ซึ่งสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 90 เท่ากันแต่ประหยัดพลังงานลงถึงร้อยละ 10
- มีการศึกษาเพื่อพัฒนาให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้นและบริสุทธิ์ขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่น การวิจัยเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ ผลกระทบจากอุณหภูมิ การใช้เยื่อเลือกผ่านในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์
- มีการใช้น้ำในกระบวนการซึ่งเป็นกระบวนการที่ยั่งยืนเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินแบบผง
- มีการพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการกักเก็บแก๊สขนาดใหญ่เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับระบบการเผาไหม้แบบผสมผสานวัฏจักรกำเนิดแก๊ส (Integrated Gasification Combined Cycle ; IGCC) เพื่อใช้ในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ความท้าทายของกระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้ [16]

- กระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้นั้นยังมีอยู่มากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ถ่านหินแบบผงซึ่งการสูญเสียพลังงานในกระบวนการนี้ยังมีมากอย่างเป็นนัยสำคัญ
- ในอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่ ไฮโดรเจนในกระบวนการนั้นยังไม่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบผสานวัฏจักรกำเนิดแก๊ส
- ในกระบวนการระบายคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่จำเป็นต้องใช้ระบบผสานวัฏจักรกำเนิดแก๊สซึ่งยังไม่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมกำเนิดไฟฟ้า
- ค่าใช้จ่ายรวมของกระบวนการผสานวัฏจักรกำเนิดแก๊สโดยไม่มีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีมูลค่าสูงกว่ากระบวนการเผาไหม้ถ่านหินผงแบบใช้หม้อไอน้ำแบบเหนือวิกฤต (supercritical pulverized coal combustion ; SCPC) โดยไม่มีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังจำเป็นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม

2. กระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้

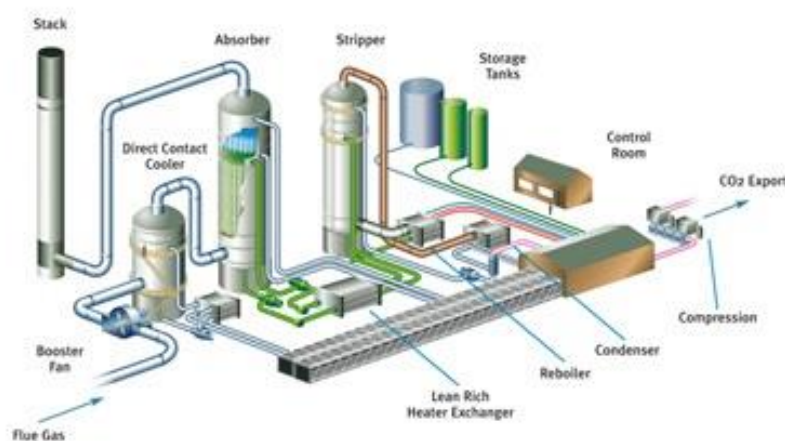
กระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้ [17] เป็นกระบวนการในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้อื่นๆ วิธีการจับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถทำได้ด้วยการใช้ตัวทำละลายของเหลวหรือใช้กระบวนการการแยกอื่นๆ ในกระบวนการการดูดซับด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จะหลุดออกเมื่อได้รับความร้อนจากไอร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีนี้มีการใช้อย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นในกระบวนการอุตสาหกรรมอาหารหรือเครื่องดื่ม นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่นๆที่ใช้ในการดักจับหลังการเผาไหม้ด้วยวิธีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเยื่อเลือกผ่านด้วยความดันสูง กระบวนการดูดซับ/คายซับและกระบวนการแยกโครโอเจนิคส์ (Cryogenic separation)

ข้อดีของกระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้ [18]

- สามารถดัดแปลงกระบวนการให้เข้ากับกระบวนการโรงงานที่กำลังดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างเต็มประสิทธิภาพ
- ในกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใหม่หรือปรับปรุงอุปกรณ์เดิม กระบวนการนั้นยังคงสามารถดำเนินงานการติดตั้งและการผลิตได้อย่างต่อเนื่องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในกันประยุกต์และปรับปรุงวัสดุอุปกรณ์สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพ
- มีการวิจัยและพัฒนาตัวดูดซับและอุปกรณ์ที่จะสามารถลดการใช้พลังงานลง

ความท้าทายของกระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้ [19]

- กระบวนการดักจับด้วยเอมีนที่มีอยู่ในระดับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์นั้นยังอยู่ในระดับค่อนข้างเล็กซึ่งจำเป็นต้องมีการขยายขนาดของกระบวนการ
- ในการติดตั้งส่วนดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคโนโลยีเอมีนส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานถึงร้อยละ 30 ถึงแม้จะมีการลดการใช้พลังงานลงร้อยละ 11 แล้วก็ตาม
- ตัวดูดซับส่วนใหญ่ต้องการแก๊สเผาไหม้ที่มีความบริสุทธิ์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดูดซับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ต้องมีค่าน้อยกว่า 10 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนักหรือโดยปริมาตร
- การสกัดด้วยไอน้ำสำหรับการคืนสภาพตัวทำละลายนั้นไปทำให้การไหลเป็นระดับความดันต่ำซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการและส่งผลให้ประสิทธิภาพพลดลง
- การใช้น้ำการใช้น้ำนั้นจะเพิ่มจมนมียสำคัญกับระบบการเผาไหม้ถ่านหินแบบผง โดยอัตราการใช้น้ำจะเพิ่มขึ้นถึงสองเท่า สำหรับในส่วนของการทำงานให้อากาศที่ไหลเข้าเย็นตัวนั้นใช้เพิ่มขึ้นร้อยละ 35 ต่อพลังงานหนึ่งหน่วยเมกะวัตต์
- ต้องมีการวางแผนในการวางตำแหน่งของงานซึ่งมีความจำเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายเพื่อการอำนวยความสะดวกนั้นก็ขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ใช้ในการปลดปล่อย



รูปที่ 2.9 กระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้ [19]

3. กระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ [20]

กระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ เป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนมากกว่าปริมาณในอากาศเพื่อการเผาไหม้ ในกระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์นั้นจำเป็นต้องแยกออกซิเจนออกจากอากาศก่อนทำการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงกับแก๊สออกที่วนกลับมาทำปฏิกิริยาอีกครั้ง สุดท้ายการเผาไหม้กับอากาศที่ปราศจากไนโตรเจนและมีปริมาณออกซิเจนนั้นจะทำให้แก๊สออกที่ได้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งง่ายต่อการแยกและได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์กว่า



รูปที่ 2.10 กระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ [21]

ข้อดีของกระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ [22]

- กระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์สามารถที่จะปรับใช้ได้ในกระบวนการเดิมและประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดี มีประสิทธิภาพที่สูงโดยไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณไอน้ำจากกระบวนการปกติมาทำการจับคาร์บอนไดออกไซด์
- กระบวนการเพิ่มเติมส่วนใหญ่ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่หมุนได้และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีลักษณะอุปกรณ์คล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและไม่มีการใช้สารเคมีอย่างไร
- เป็นกระบวนการที่ปลดปล่อยมลพิษต่ำมาก นอกจากนั้นยังเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการแยก
- ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสูงถึงร้อยละ 98 เมื่อเทียบกับต่อค่าใช้จ่าย

- มีการพัฒนาในส่วนของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิงที่มีการใช้งานร่วมกับวัฏจักรไอน้ำความดันสูงวิกฤติยิ่งยวด (Ultra-supercritical steam cycles) จะสามารถให้ผลในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงมาก
- ข้อมูลที่ดีที่สุดที่ใช้จริงใจปัจจุบันคือการนำกระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ในการใช้ร่วมกับกระบวนการดักจับก่อนการเผาไหม้และดักจับหลังการเผาไหม้ซึ่งกระบวนการนี้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายลง

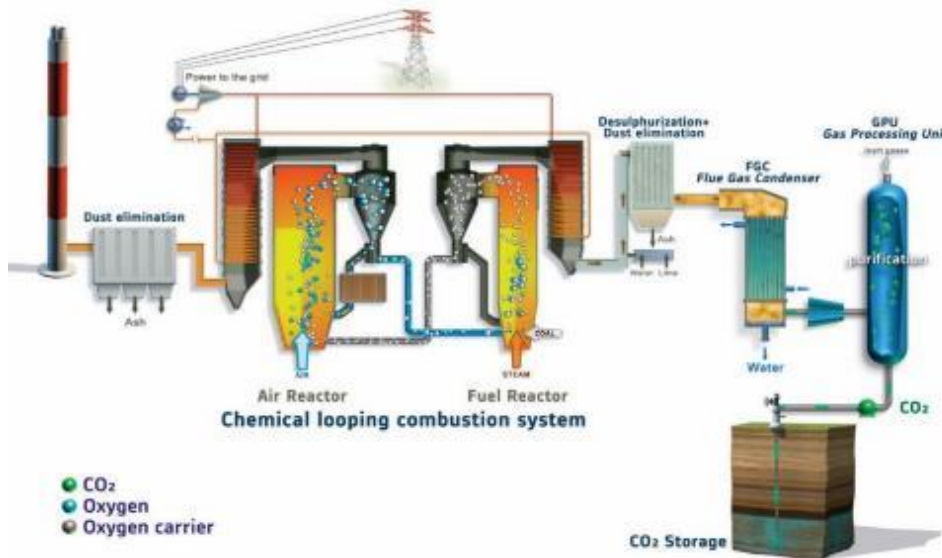
ความท้าทายของกระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ [[19-23]

- ไม่สามารถพัฒนาจากระดับเล็กในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าเดิมได้ โรงไฟฟ้าแบบเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์จำเป็นจะต้องคำนวณมาตั้งแต่ต้น ดังนั้นเส้นทางการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบออกซิเจนบริสุทธิ์ในกระบวนการที่มีอยู่แล้วทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นมากกว่ากระบวนการดักจับก่อนและหลังเผาไหม้
- กระบวนการโครโอเจนิคเป็นกระบวนการที่มีการใช้พลังงานในการก่อกัดและต้องลดอุณหภูมิลงเพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์เหลวซึ่งผลที่ได้จะมีเพียงร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับที่เผาไหม้เข้ามา
- ไม่มีข้อกำหนดตายตัวหรือกฎสำหรับความบริสุทธิ์ในการก่อกัดคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการขนส่งและกักเก็บ ด้วยเหตุนี้กระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ส่วนใหญ่จึงมีส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ควบแน่นออกมาซึ่งทำให้กระบวนการนี้จับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เทียบเท่ากระบวนการดักจับด้วยเอมีน นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายของกระบวนการที่สูงจำเป็นจะต้องได้รับการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆเพื่อลดค่าใช้จ่ายลง
- กระบวนการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์จำเป็นจะต้องเริ่มกระบวนการจากการเผาไหม้ด้วยอากาศก่อนซึ่งในทุกครั้งที่หยุดการเดินเครื่องย่อมทำให้เกิดแก๊สมลพิษขึ้นอย่างแน่นอน

2.5 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิง

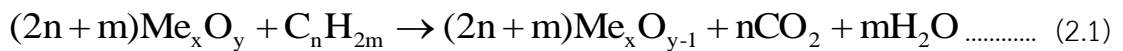
ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา กระบวนการการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิง [24] เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพทั้งในกระบวนการเผาไหม้และการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ความน่าสนใจของกระบวนการเคมีคอลลูปิงนั้นคือเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยไม่ผ่านการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงโดยตรงแต่จะใช้ตัวพาออกซิเจน (oxygen carrier) เป็นตัวขนส่งออกซิเจนจาก

อากาศไปสู่เชื้อเพลิงแทนการสัมผัสอากาศโดยตรง เป็นการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้ ไนโตรเจนและออกซิเจนที่ไม่ได้ใช้งาน ซึ่งหมายความว่าไม่มีการใช้พลังงานหรืออุปกรณ์ใดๆในการแยกแก๊ส เป็นจุดเด่นของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงที่แตกต่างจากกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์อื่นๆ ดังเช่นการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ การดักจับหลังการเผาไหม้หรือการดักจับก่อนการเผาไหม้



รูปที่ 2.11 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง [24]

ในระบบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชนิดคือเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (fuel reactor) และเครื่องปฏิกรณ์อากาศ (air reactor) โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับตัวพาออกซิเจนขั้นตอนดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ 2.1



เมื่อตัวพาออกซิเจนเกิดการออกซิไดซ์กับเชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์แล้วเสื่อมสภาพ ตัวพาออกซิเจนจะถูกส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์อากาศ และเกิดปฏิกิริยารีออกซิไดซ์ (reoxidized) ขึ้นโดยผ่านกระบวนการเผาไหม้กับอากาศดังสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ 2.2



ระบบภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงนั้นจะออกแบบได้หลากหลายซึ่งการออกแบบนั้นมีหลากหลายวิธีซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวพาออกซิเจนซึ่งเป็นเบตภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต หลังจากเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับตัวพาออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ แก๊สเผาไหม้ขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะมีเพียงแคคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเมื่อน้ำเกิดการควบแน่นหลังจากเย็นตัวลงจะได้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ออกมา ในปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นจะเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน (exothermic reaction) ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชันนั้นจะเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานหรือดูดพลังงาน (endothermic reaction) ก็ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวพาออกซิเจนและเชื้อเพลิงที่ใช้งาน อย่างไรก็ตาม ผลรวมของเอนทัลปีจาก 2 ปฏิกิริยานั้นก็ยังคงเป็นระบบการเผาไหม้แบบปกติซึ่งในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงนั้นจะไม่มีค่าใช้จ่ายหรือการใช้พลังงานในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้ ในกรณีตัวอย่าง มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์อากาศแบบฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed reactor) ส่วนเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแบบฟองแก๊ส (bubbling fluidized bed reactor)

2.6 ตัวพาออกซิเจน

ตัวพาออกซิเจนเป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงสร้างขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการที่เชื้อเพลิงจะสัมผัสกับอากาศโดยตรงเพื่อให้สามารถแยกแก๊สเผาไหม้ขาออกที่มีเพียงแค่น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย

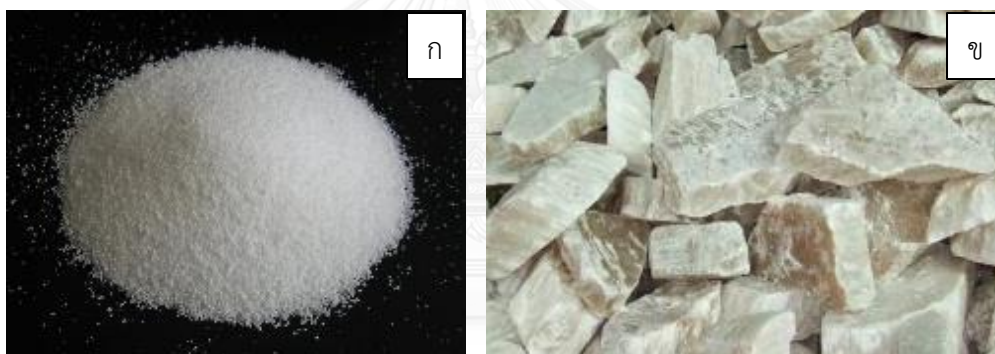
สำหรับคุณสมบัติที่ดีของตัวพาออกซิเจน [25] ในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงคือ

1. การหาตัวพาออกซิเจนที่มีราคาถูกและมีปริมาณมาก สามารถหาได้ง่าย
2. มีความสามารถในการขนส่งออกซิเจน
3. ใช้งานในการเผาไหม้ในปฏิกิริยารีดักชันและฟื้นฟูได้ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน
4. สามารถใช้งานซ้ำได้หลายครั้ง ทนต่อการสูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน
5. ทนต่อแรงเชิงกล แรงกระแทกต่อการชนกันหรือปะทะกับเครื่องปฏิกรณ์[33]
6. ปลอดภัยต่อสุขอนามัยต่อการทำงาน และไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องจักร

สำหรับตัวพาออกซิเจนในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นกระบวนการขึ้นรูปหรือกระบวนการใช้งานให้ได้ครบตามหัวข้อที่กล่าวมาดังเช่นการใช้วัสดุร่วมระหว่างโลหะออกไซด์หลายชนิดเพื่อเสริมศักยภาพหรือการทำให้ออกซิเจนภายในโครงสร้างออกมาได้ด้วยตัวเองเป็นต้น การพัฒนานั้นทำขึ้นเพื่อแก้ไขจุดด้อยและเสริมจุดเด่นในแต่ละส่วน

2.7 ตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต

แคลเซียมซัลเฟต [26] คือสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้างคือ CaSO_4 หรืออยู่ในรูปที่มีโครงสร้างของน้ำประกอบเช่น $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีความสามารถในการดูดซับความชื้น ในธรรมชาติจะถูกเรียกว่าแรยิปซัม มีการใช้งานในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย มีสมบัติความเป็นต่าง ตามเอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (Material safety data sheet ; MSDS) ของแคลเซียมซัลเฟตนั้นพบว่ามีความเป็นพิษต่อสุขภาพเล็กน้อย ไม่ติดไฟ ไม่ไวไฟ ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถหายใจในธรรมชาติและมีราคาถูก สำหรับโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟต มีความหนาแน่น 2.320 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีจุดหลอมเหลวที่ 1,460 องศาเซลเซียส น้ำหนักโมเลกุล 136.14 กรัมต่อโมล นอกจากนั้นภายในโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟตมีองค์ประกอบของออกซิเจน 4 อะตอม มีน้ำหนักถึง 64.00 กรัมต่อโมล ซึ่งมีค่าร้อยละ 47 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.12 ตัวพาทออกซิเจน (ก) แคลเซียมซัลเฟต (ข) แรยิปซัม [26, 27]

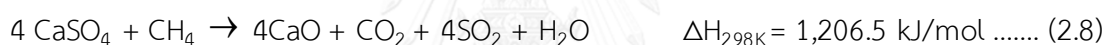
เมื่อเทียบกับคุณสมบัติตามที่กล่าวไปในหัวข้อ 2.6 ในส่วนของข้ออ้างพึงประสงค์ของตัวพาทออกซิเจนพบว่าแคลเซียมซัลเฟตมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในส่วนที่มีออกซิเจนปริมาณมากในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มาก มีราคาถูก มีความเป็นพิษต่ำ นอกจากนั้น ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไม่ว่าจะเป็นทั้งมีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และถ่านหิน ดังสมการที่ 2.1 - 2.4



นอกจากนี้ยังสามารถฟื้นฟูและนำมาใช้งานใหม่ได้อีกครั้งดังสมการที่ 2.5



การเกิดปฏิกิริยารีดักชันในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์อากาศแบบเป็นวัฏจักรนั้นส่งผลให้ตัวพาออกซิเจนมีการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและฟื้นฟูออกซิเจนในโครงสร้างได้อย่างต่อเนื่องแต่ในอีกมุมหนึ่งตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตสามารถเกิดการสลายตัวจากการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงหรือกับออกซิเจน กลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งไม่สามารถเกิดการส่งผ่านออกซิเจนไปสู่เชื้อเพลิงได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง อีกทั้งซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่แตกตัวออกจากโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นหลังทำปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดยังสามารถกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ได้ ดังสมการ [28]

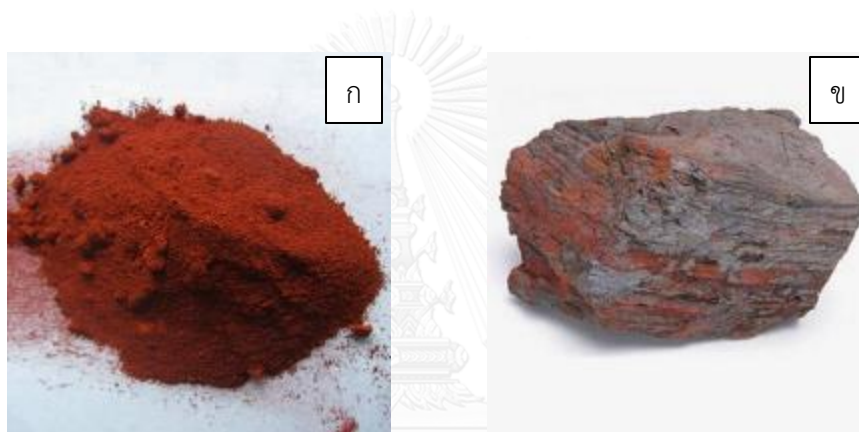


ข้อเสียสำคัญของแคลเซียมซัลเฟตคืออยู่ในรูปที่มีน้ำมาอยู่ในโครงสร้าง (CaSO₄•2H₂O) ซึ่งทำให้สูญเสียพลังงานในการสลายน้ำในโครงสร้าง นอกจากนี้ ลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียดติดกัน ทำให้ความสามารถในการเกิดฟลูอิดไคซ์เบดต่ำจนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย นอกจากนี้ยังสูญเสียซัลเฟอร์ซึ่งเป็นจุดเกิดปฏิกิริยา ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงต่ำ ซึ่งเป็นจุดที่น่าสนใจในการพัฒนาแคลเซียมซัลเฟตให้สามารถใช้งานได้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง

2.8 ตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์

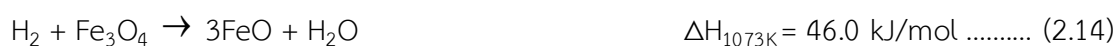
เหล็กออกไซด์ [29] หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide) เป็นสารอนินทรีย์สีแดงที่มีสูตรโครงสร้าง Fe₂O₃ นอกจากนี้องค์ประกอบของเหล็กออกไซด์สามารถเกิดได้เป็นรูปของ FeO หรือ Fe₃O₄ เหล็กออกไซด์เป็นวัสดุตั้งต้นในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก มีความอ่อนแอต่อกรด เกิดสนิมได้ง่าย เหล็กออกไซด์มีลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาที่หลากหลายซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในลักษณะของแอลฟา (α) และแกมมา (γ) ซึ่งในแต่ละเฟสมีการจัดเรียงโครงสร้างที่แตกต่างกันไปในลักษณะของทรงแปดหน้า (Octahedral) ซึ่งมีแกนกลางเป็นอะตอมของเหล็กที่ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน 6

อะตอม นอกจากนั้นยังพบว่ามีเฟสกึ่งเสถียรเบต้า (β -phase metastable cubic body centered) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งในเฟสเป็นช่วงที่กำลังเปลี่ยนไปเป็นเฟสแอลฟาหรือแกมมา ตามตามเอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ของเหล็กออกไซด์พบว่า มีความเป็นพิษต่อสุขภาพต่ำ ไม่ติดไฟ ไม่ไวไฟในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนั้นเหล็กออกไซด์ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถหายใจในธรรมชาติมีราคาไม่แพง มีความหนาแน่น 5.242 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีจุดหลอมเหลวที่ 1,552 องศาเซลเซียส น้ำหนักโมเลกุล 159.69 กรัมต่อโมล นอกจากนั้นภายในโครงสร้างของเหล็กออกไซด์มีองค์ประกอบของออกซิเจน 3 อะตอม มีน้ำหนักถึง 48.00 กรัมต่อโมล เทียบได้แล้วมีค่าถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในกรณีที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.13 ตัวพวออกซิเจน (ก) เหล็กออกไซด์ (ข) แร่เฮมาไทต์ [30]

เมื่อเทียบคุณสมบัติที่พึงประสงค์ของเหล็กออกไซด์ในหัวข้อ 2.6 แล้วพบว่าภายในโครงสร้างมีออกซิเจนมาก มีราคาไม่แพงและมีความเป็นพิษต่ำและนอกจากนั้น ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 2.9 – 2.14



จากสมการทั้งหมดปฏิกิริยาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่หลากหลายของเหล็กออกไซด์ทั้ง 2 สัณฐานวิทยา [31] แต่หนึ่งในจุดด้อยของเหล็กออกไซด์คือไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้เป็นระยะเวลาานาน สำหรับในการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ด้วยสมบัติในตัวสามารถทำให้เกิดสภาพความเป็นฟลูอิดเบตต์ได้ซึ่งจะช่วยให้ความร้อนสะสมในเหล็กออกไซด์ลดลง และสามารถส่งเสริมกระบวนการเผาไหม้ได้มากขึ้นนั่นเอง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Song และคณะ [32] ใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับมีเทนภายในเครื่องปฏิกรณ์เบตต์หนึ่งพบว่าการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ของแคลเซียมซัลเฟตใน 6 รอบการเกิดปฏิกิริยา แคลเซียมซัลเฟตสามารถเกิดปฏิกิริยากับมีเทนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำและสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจนสามารถฟื้นฟูโครงสร้างกลับมาเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้อีกครั้ง แต่หลังจากการเกิดปฏิกิริยาผ่านไปถึงรอบที่ 4 จะพบว่าปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเนื่องจากการฉาบผิวของคาร์บอนในปฏิกิริยารีดักชัน นอกจากนั้นการหลุดออกของซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง

Miller และคณะ [33] ทำการศึกษาการใช้เฮมาไทต์ (hematite) ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ในปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงโดยมีมีเทนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์เบตต์หนึ่งและฟลูอิดเบตต์ พบว่าการใช้แร่เฮมาไทต์ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสามารถช่วยเสริมความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจน (oxygen transfer) จากเฮมาไทต์ไปสู่มีเทนโดยเพิ่มปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเทียบกับเฮมาไทต์บริสุทธิ์ และสำหรับการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตต์ พบว่ามีค่าความต้านทานการขัดสี (attrition resistance) สูงขึ้น มีความเสถียรในการทำปฏิกิริยาได้หลายรอบมากขึ้น นอกจากนั้นแมกนีเซียมออกไซด์ยังช่วยส่งเสริมปฏิกิริยารีดักชันของเหล็กออกไซด์ในเฮมาไทต์อย่างมีนัยสำคัญโดยแมกนีเซียมออกไซด์ช่วยทำให้มีเทนสามารถแตกตัวออกเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนได้มากขึ้นและทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์บริเวณใกล้เคียงให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

Rydén และคณะ [34] ใช้โครงสร้างของอิลมินิต (ilminite) ไพโรฟานิต (pyrophanite) ผสมกับองค์ประกอบผสมเพอโรฟสไกต์ของ $(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{Ti}_2\text{O}_7$ เพื่อศึกษาการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงโดยใช้ระบบการปลดปล่อยออกซิเจนด้วยตัวเอง (oxygen uncoupling) พบว่าศักยภาพในเครื่อง

ปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่อุณหภูมิ 850 – 1,050 องศาเซลเซียส ซึ่งการทำงานของตัวพาออกซิเจนมีลักษณะการทำงานเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูง การเปลี่ยนมีเทนไปเป็นผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้น สำหรับการทำงานภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed reactor) ที่อุณหภูมิ 910 องศาเซลเซียสโดยใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง พบว่า สามารถเปลี่ยนมีเทนไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ถึงร้อยละ 60 – 80 ด้วย $(\text{Fe}_{0.50}\text{Mn}_{0.50})\text{TiO}_3$

Chen และคณะ [35] ทำการศึกษาโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ของวัสดุผสมคอมโพสิตออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยเชื้อเพลิงคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน พบว่าในการศึกษาโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ CTF ในการขึ้นรูปแบบ Solid stage ให้ผลความเสถียรสูงที่สุด และสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ได้สูงมากกว่าในขณะที่มีความสามารถในการเหนี่ยวนำได้น้อยกว่าสารเพอร์อฟสไกต์ชนิดอื่นที่ใช้ในการทดสอบ และเมื่อนำ CTF ไปทำการรองรับลงบนเหล็กออกไซด์พบว่าให้ผลดีในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และการเกิดปฏิกิริยานั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวพาออกซิเจน นอกจากนั้นแล้วตัวพาออกซิเจนผสมนี้ยังช่วยส่งเสริมการถ่ายโอน O^{2-} ภายในอนุภาคของเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นจุดสำคัญในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ สำหรับในปฏิกิริยาการเผาไหม้ในหลายรอบการเกิดปฏิกิริยาก็มีความเสถียรที่สูง

Siriwardane และคณะ [36] ได้ใช้คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ผสมกับเหล็กออกไซด์และอะลูมินาเพื่อศึกษาการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงกับมีเทนและถ่านหิน พบว่าในการเผาไหม้ 25 รอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสกับมีเทนและออกซิเจนให้ผลการเผาไหม้มากกว่าร้อยละ 90 ในทุกรอบการเผาไหม้ มีการเกาะรวมกันเป็นก้อนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอปเปอร์ออกไซด์บริสุทธิ์ นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการทนต่อแรงขัดสีมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยามาตรฐาน หลังจากการทำปฏิกิริยา 50 รอบพบโครงสร้างองค์ประกอบของเหล็ก (Fe) และทองแดง (Cu) นอกจากนั้น การทนต่อแรงขัดสีลดลง เมื่อทดสอบในสภาวะฟลูอิดไชน์เบดกับถ่านหิน สามารถทำปฏิกิริยาเกิดได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนปริมาณมาก

Yang และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาผลปัจจัยส่งเสริมของการผสมแร่เหล็กและทองแดงเพื่อใช้เป็นตัวพาออกซิเจนในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งโดยใช้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการผสมตัวพาออกซิเจนเกิดความสามารถส่งเสริม (Synergist effect) ระหว่างแร่เหล็กกับทองแดง โดยอัตราส่วนของทองแดงที่ร้อยละ 10-20 สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง และสำหรับที่อัตราส่วนร้อยละ 20 นั้นเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงดังกล่าวเนื่องจากแร่เหล็กสามารถช่วยป้องกันทองแดงหลอม

รวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ทองแดงยังคงสภาพการส่งออกซิเจนได้อย่างต่อเนื่องและหากเมื่อแร่เหล็กหลอมรวมตัวกับทองแดงจะทำให้โครงสร้าง CuFe_2O_4 ที่มีความสามารถส่งออกซิเจนได้มากยิ่งขึ้น

Ismail และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงศักยภาพของเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นแคลเซียมเฟอไรต์ในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงและการผลิตไฮโดรเจน พบว่าการผสมเหล็กออกไซด์เข้าร่วมกับแคลเซียมออกไซด์โดยทำให้เกิดเป็นแคลเซียมเฟอไรต์ ทั้ง $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ หรือ CaFe_2O_4 ทุกองค์ประกอบของแคลเซียมเฟอไรต์ให้ความเสถียรในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเหล็กออกไซด์ที่ไม่ได้ผ่านการผสมแคลเซียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังสามารถฟื้นฟูสภาพจากสภาวะรีดักชันไปสู่สภาวะออกซิเดชัน เมื่อทดสอบปฏิกิริยารีดักชัน CaFe_2O_4 สามารถเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ดี และเมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจะทำให้เกิด $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ซึ่งมีความสามารถในการเกิดไฮโดรเจน ดังนั้นในขณะที่ทำการผสมสารขึ้น หากมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์มากเกินไปจะทำให้ตัวพาออกซิเจนส่งผ่านออกซิเจนต่ำลง

Wu และคณะ [39] และคณะได้ทำการศึกษาผลของการใช้แคลบซึ่งเป็นเชื้อเพลิงของแข็งในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบ annular dual-tube moving bed reactor ด้วยการผสมเหล็กออกไซด์กับอะลูมินาในน้ำปราศจากไอออน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่มีความซับซ้อนในการใช้งาน พบว่าสามารถเผาไหม้ให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สมบูรณ์และสามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นผลิตภัณฑ์ได้ร้อยละ 92 แต่ในการใช้งานนั้นจำเป็นต้องทำกระบวนการทำให้เกิดแก๊ส (gasification process) ร่วมด้วย

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น พบว่า แคลเซียมซิลเฟตนั้นเป็นตัวพาออกซิเจนที่ยังมีจุดด้อยในเรื่องของการสูญเสียอะตอมของซิลเฟออร์ที่เป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา อีกทั้งยังมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาช้า ส่วนเหล็กออกไซด์ซึ่งตัวพาออกซิเจนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวพาออกซิเจนชนิดอื่นได้หลากหลายและเสริมความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดี หากนำวัสดุทั้งสองมาทำการผสมเป็นตัวพาออกซิเจนจะทำให้กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงเกิดขึ้นได้ดี

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของการผสมเหล็กออกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พร้อมทั้งศึกษาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดในสภาวะความดันบรรยากาศ

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1. แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.4 จากบริษัท Ajax finechem

3.1.2. เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 จากบริษัท SIGMA-ALDRICH

3.1.3. ไนโตรเจน (N_2) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 จากบริษัท PRAXAIR

3.1.4. ออกซิเจน (O_2) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จากบริษัท PRAXAIR

3.1.5. มีเทน (CH_4) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.995 จากบริษัท Linde

3.1.6. ถ่านหินซบิพุมินัสชนิดสารระเหยสูง ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.7. อะลูมินาบอลชนิดเฉื่อย (inert alumina ball) ขนาดอนุภาคไม่เกิน 150 ไมโครเมตร

3.1.8. ซิลิกาเจล จากบริษัทวิทยาศาสตร์ จำกัด

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 หลอดควอตซ์ควอตซ์ ความยาวช่วงทำปฏิกิริยา 370 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 22 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 16 มิลลิเมตร

3.2.2 ไยควอตซ์ (Quartz wool)

3.2.3 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการไหลของไนโตรเจน (Nitrogen mass flow controller) ขนาด 100 มิลลิลิตรต่อนาที รุ่น DPM-3 SCCM N2 3660 จากบริษัท KOFLOC

3.2.4 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการไหลของมีเทน (Methane mass flow controller) ขนาด 50 มิลลิลิตรต่อนาที รุ่น DPM-3 CR300 CH4 3660 จากบริษัท KOFLOC

3.2.5 เครื่องวัดและควบคุมอัตราการไหลของออกซิเจน (oxygen mass flow controller) ขนาด 100 มิลลิลิตรต่อนาที รุ่น DPM-3 SCCM O2 3660 จากบริษัท KOFLOC

3.2.6 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของอากาศ (air flow controller) ขนาด 1 ลิตรต่อนาที รุ่น FBC-3-G-AIR จากบริษัท NEW FLOW

3.2.7 ชุดอุปกรณ์วัดและควบคุมเตาขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 750 ถึง 1300 องศาเซลเซียส รุ่น MTF เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 มิลลิเมตร จากบริษัท CARBOLITE

3.2.8 ชุดอุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้และควบแน่นสารระเหย (condenser)

3.2.9 ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบฟิล์มฟองอากาศ (bubble flow)

3.2.10 ชุดอุปกรณ์ดักความชื้น (humidity trap)

3.2.11 เครื่องเขย่าผสมสาร (shaker)

3.2.12 เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace)

3.2.13 โถดูดความชื้น (desiccator)

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.1 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี (Micro - Gas Chromatography, Micro GC)

เครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น Agilent 490 Micro GC เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในงานทดสอบคุณภาพของแก๊ส ใช้งานได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง มีความสามารถในการปรับแต่งความเหมาะสมต่อการใช้งาน ชนิดของแก๊สแต่ละชนิดด้วยคอลัมน์ต่างๆเพื่อเสริมประสิทธิภาพการทำงาน สามารถนำไปใช้ในการเฝ้าระวัง ควบคุมในกระบวนการชุดเจาะเพื่อตรวจสอบแก๊สธรรมชาติในท่อและเพื่อวัดคุณภาพตามสถานีควบคุม สำหรับในการวิจัยใช้คอลัมน์ชนิด Molecular Sieve 5A (MS5A) ในการตรวจสอบปริมาณของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน และ PoraPLOT Q (PPQ) ในการวิเคราะห์ คาร์บอนไดออกไซด์ อีเทน (C_2H_6) และเอทิลีน (C_2H_4) และสภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบแก๊ส จะแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี

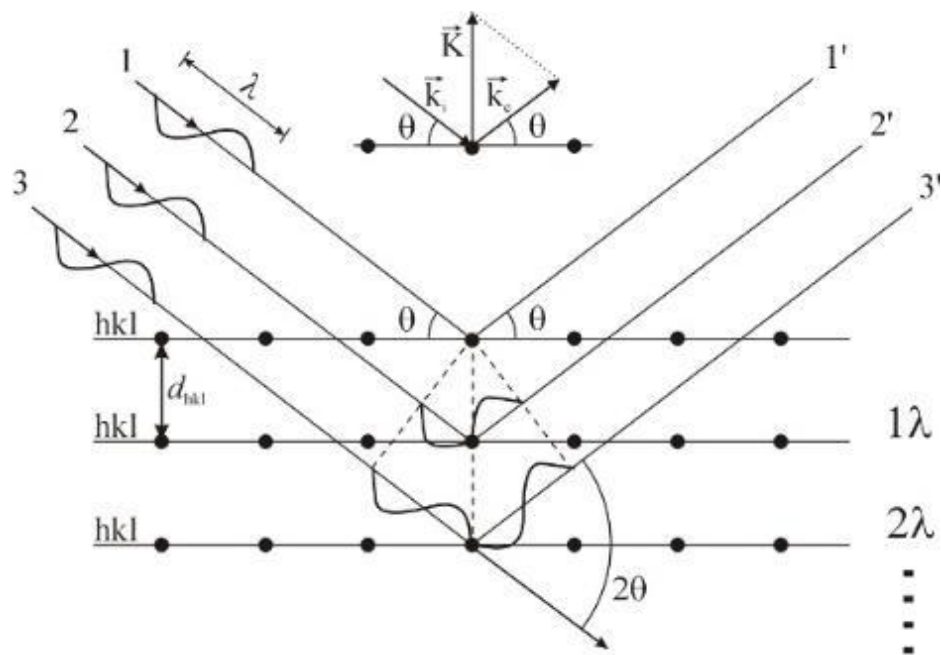
ตารางที่ 3.1 สภาวะวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี

Chanel 1	
ชนิดของคอลัมน์	Molecular Sieve 5A (MS5A)
แก๊สตัวพา (carrier gas)	อาร์กอน (Argon)
อุณหภูมิการฉีด (injector temperature)	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (column temperature)	80 องศาเซลเซียส
ความดันคอลัมน์ (column pressure)	100 กิโลปาสคาล
ชนิดของระบบตรวจวัด	TCD
Chanel 2	
ชนิดของคอลัมน์	PoraPLOT Q (PPQ)
แก๊สตัวพา (carrier gas)	ฮีเลียม (Helium)
อุณหภูมิการฉีด (injector temperature)	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (column temperature)	80 องศาเซลเซียส
ความดันคอลัมน์ (column pressure)	100 กิโลปาสคาล
ชนิดของระบบตรวจวัด	TCD

3.3.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [36] รุ่น D8 advance จากบริษัท BRUKER ซึ่งเป็นใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของสารประกอบ สามารถแยกแยะประเภท และชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติ ว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นธาตุชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่

ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในการตรวจสอบตัวพอลิออกซิเจนทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ทำการทดสอบโดยใช้อัตราการสแกน (scan speed) 0.1 องศาต่อนาที มุมในการทดสอบ 5 – 80 องศา หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หลักการการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [36]

สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg 's Law คือ

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

- โดยที่
- λ แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 - n แทน ลำดับการสะท้อน
 - d_{hkl} แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [36]

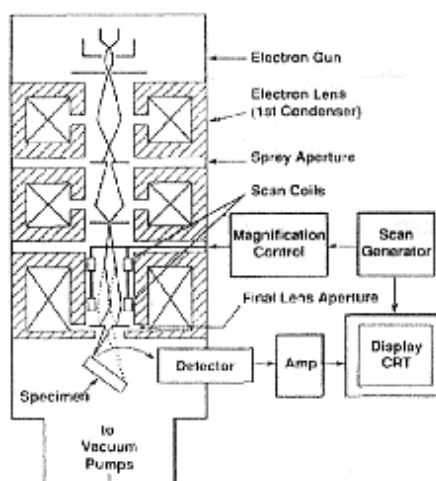
3.3.2 เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [37]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [38] รุ่น JSM 6510LV จากบริษัท JEOL เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุโดยมีระยะชัดลึกและมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (spatial resolution) สูงใช้แหล่งกำเนิดคลื่นที่มีความยาวช่วงคลื่นเป็นตัวสร้างภาพด้วยแสงขาว (visible light) ที่มีความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ทำให้มองเห็นอนุภาคได้ถึง 0.2 นาโนเมตร ด้วยการบีบลำแสงให้ได้เป็นมุมแคบ ซึ่งจะได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ ได้เช่น Energy Dispersive Spectrometer หรือ Wavelength Dispersive Spectrometry เพื่อข้อมูลที่มากขึ้น หลักการในการทำงานจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.4 โดยส่วนด้านบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาในคอลัมน์สุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (accelerating voltage) ในช่วง 0 – 50

กิโลโวลต์ โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lenses) และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) ซึ่งเป็นช่องเปิดที่มีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 3.5 หลักการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [38]

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน (CHN Element analysis)

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน [39] รุ่น CHN628 จากบริษัท LECO Corporation เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยมี 2 ฟังก์ชันวิเคราะห์ คือการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของเหลว และการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยตัวอย่างจะถูกเผาไหม้ในบรรยากาศของออกซิเจนเกิดเป็น CO_2 , H_2O และ N_2 จากนั้นแก๊สฮีเลียมจะทำหน้าที่พาแก๊สที่เกิดขึ้นเข้าสู่เครื่องวัด infrared absorption detector และ thermal conductivity detector แปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยจะใช้ในการตรวจสอบองค์ประกอบของถ่านหินที่ใช้ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน [39]

3.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมตัวพาออกซิเจน (oxygen carrier preparation)

การเตรียมตัวพาออกซิเจนนั้นจะเริ่มจากการนำตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมกับเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยไม่รวมน้ำหนักของน้ำในโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟต ทำการผสมน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ด้วยอัตราส่วน 1 : 5 นำไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยอัตรา 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไประเหยน้ำ 12 ชั่วโมง [39] ทำการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนเพื่อให้ได้ขนาดที่ต่ำกว่า 420 ไมโครเมตร จากนั้น นำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ 550 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้อุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที เมื่อเสร็จสมบูรณ์ นำตัวพาออกซิเจนที่ได้ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้งานในลำดับถัดไป

3.4.2 การศึกษาการใช้ในปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

3.4.2.1 ทำการชั่งหลอดควอตซ์ควอตซ์ และบรรจุเส้นใยควอตซ์ปริมาณ 0.08 กรัม อะลูมินาบอลชนิดเนื้อ 4.00 กรัม ทำการบรรจุลงในหลอดควอตซ์ตามลำดับ จากนั้นชั่งตัวพาออกซิเจนที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 2.00 กรัมลงไปหลอดเป็นลำดับสุดท้าย ทำการผนึกหลอดควอตซ์ด้วยฟิล์มพาราฟินและเทปเทฟลอน

3.4.2.2 นำหลอดควอตซ์สวมลงในเตาขดลวดไฟฟ้า

3.4.2.3 ทำการเปิดระบบไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 45 มิลลิลิตรต่อนาทีและระบบมีเทน 5 มิลลิลิตรต่อนาที รวม 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตรวจสอบจนระบบมีปริมาณของมีเทนร้อยละ 10 โดยปริมาตร

3.4.2.4 เริ่มต้นทำการทดสอบโดยเปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าพร้อมทั้งเริ่มระบบการตรวจสอบองค์ประกอบแก๊สของไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี

3.4.2.5 ทำการทดสอบจนปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์หมด

3.4.2.6 ปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าและปิดระบบควบคุมการไหลของมีเทน

3.4.2.7 เมื่ออุณหภูมิลดต่ำจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการปิดระบบไนโตรเจน

3.4.2.8 ชั่งน้ำหนักสารหลังผ่านปฏิกิริยารีดักชัน

3.4.2.9 เก็บสารที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดสอบลำดับถัดไป

3.4.3 การศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง

3.4.3.1 นำหลอดควอตซ์และสารที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชันในการทดลองที่ 3.4.2 มาสวมลงในเตาขดลวดไฟฟ้าอีกครั้ง

3.4.3.2 ทำการเปิดระบบไนโตรเจนเข้าสู่หลอดควอตซ์ด้วยอัตราการไหล 39.5 มิลลิลิตรต่อนาทีและระบบออกซิเจน 10.5 มิลลิลิตรต่อนาที รวม 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตรวจสอบจนระบบมีปริมาณของออกซิเจนร้อยละ 21 โดยปริมาตร

3.4.3.3 เริ่มต้นทำการทดสอบโดยเปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าพร้อมทั้งเริ่มระบบการตรวจสอบองค์ประกอบแก๊สของไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี

3.4.3.4 ทำการทดสอบจนปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 0.1 โดยปริมาตรและปริมาณของออกซิเจนมีค่าเท่ากับปริมาณเริ่มต้นการทดสอบ

3.4.3.5 ปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าและวาล์วระบบออกซิเจน

3.4.3.6 เมื่ออุณหภูมิลดต่ำจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการปิดวาล์วระบบไนโตรเจน

3.4.3.7 ชั่งน้ำหนักสารหลังผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน

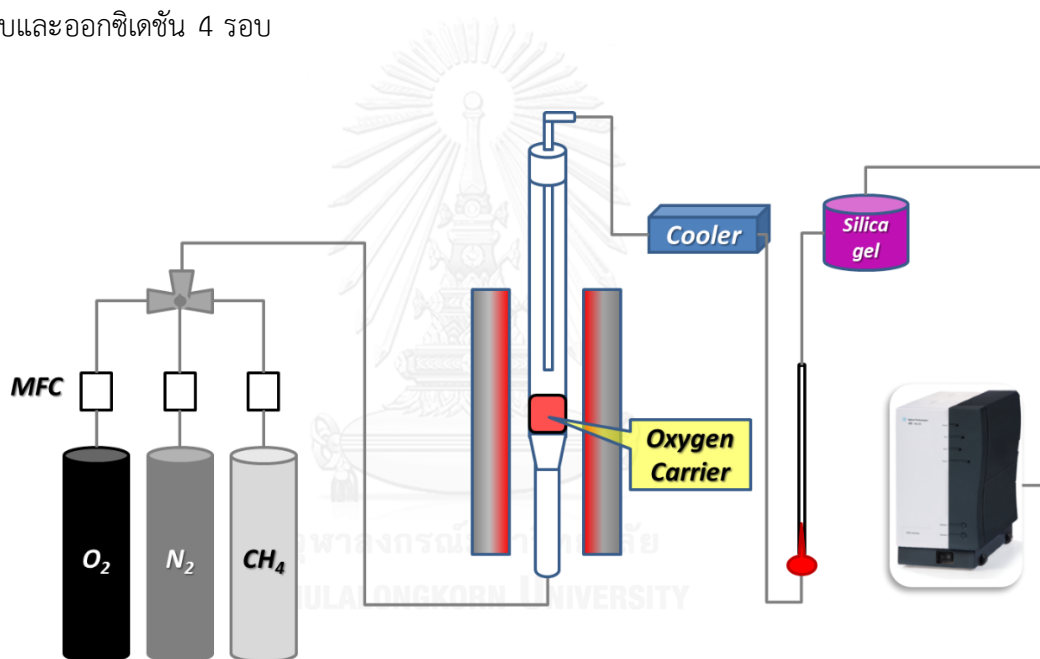
3.4.3.8 เก็บสารที่ได้หลังจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดสอบลำดับถัดไป

3.4.4 การศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง

3.4.4.1 ทำการทดสอบปฏิกิริยารีดักชันตามขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.2 เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้ว ไม่นำสารออกจากหลอดควอตซ์ ทำการชั่งน้ำหนักหลอดควอตซ์พร้อมทั้งตัวพาออกซิเจน

3.4.4.2 ทำการทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันตามขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.3 เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้ว ไม่นำสารออกจากหลอดควอตซ์ ทำการชั่งน้ำหนักหลอดควอตซ์พร้อมทั้งตัวพาออกซิเจนอีกครั้ง

3.4.4.3 ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 3.4.4.1 และ 3.4.4.2 ซ้ำจนครบรอบปฏิกิริยารีดักชัน 4 รอบและออกซิเดชัน 4 รอบ



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง

3.4.5 การศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจนในการทำปฏิกิริยารีดักชันกับถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบต

3.4.5.1 ทำการชั่งหลอดควอตซ์ควอตซ์ บรรจุไฮควอตซ์ 0.08 กรัม อะลูมินาบอลชนิดเฉื่อย 4.00 กรัม ตัวพาออกซิเจนที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 1.00 กรัม และทำการชั่งถ่านหินจำนวน 2.00 กรัมเป็นลำดับสุดท้าย ทำการผนึกหลอดควอตซ์ด้วยฟิล์มพาราฟินและเทปเทฟลอน

3.4.5.2 นำหลอดควอตซ์สวมลงในเตาขดลวดไฟฟ้า

3.4.5.3 ทำการเปิดวาล์วระบบไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที

3.4.5.4 เริ่มต้นทำการทดสอบโดยเปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าพร้อมทั้งเริ่มระบบการตรวจสอบองค์ประกอบแก๊สของไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี

3.4.5.5 ทำการทดสอบจนปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยปริมาตร และไม่สามารถตรวจพบคาร์บอนมอนอกไซด์

3.4.5.6 ปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าและลดความเร็วของไนโตรเจนลงต่ำกว่า 50 มิลลิลิตรต่อ นาที

3.4.5.7 เมื่ออุณหภูมิลดต่ำจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการปิดวาล์วระบบไนโตรเจน

3.4.5.8 ชั่งน้ำหนักสารหลังผ่านปฏิกิริยารีดักชัน

3.4.5.9 เก็บสารที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับถ่านหินในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดสอบ ลำดับถัดไป

3.4.6 การศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนใน อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

3.4.6.1 นำหลอดควอตซ์และสารที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชันในการทดลองที่ 3.4.5 มาสวมลงใน เตาขดลวดไฟฟ้าอีกครั้ง

3.4.6.2 ทำการเปิดระบบไนโตรเจนเข้าสู่หลอดควอตซ์ด้วยอัตราการไหล 237 มิลลิลิตรต่อ นาทีและระบบออกซิเจน 63 มิลลิลิตรต่อนาที รวม 300 มิลลิลิตรต่อนาที ตรวจสอบจนระบบมี ปริมาณของออกซิเจนร้อยละ 21 โดยปริมาตร

3.4.6.3 เริ่มต้นทำการทดสอบโดยเปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าพร้อมทั้งเริ่มระบบการ ตรวจสอบองค์ประกอบแก๊สของไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี

3.4.6.4 ทำการทดสอบจนปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์หมด และปริมาณของออกซิเจนกลับมาเท่ากับปริมาณเริ่มต้นการทดสอบ

3.4.6.5 ปิดสวิตช์เตาขดลวดไฟฟ้าและระบบออกซิเจน พร้อมทั้งลดอัตราการไหลของ ไนโตรเจนให้ต่ำกว่า 50 มิลลิลิตรต่อนาที

3.4.6.6 เมื่ออุณหภูมิลดต่ำจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการปิดระบบไนโตรเจน

3.4.6.7 ชั่งน้ำหนักสารหลังผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน

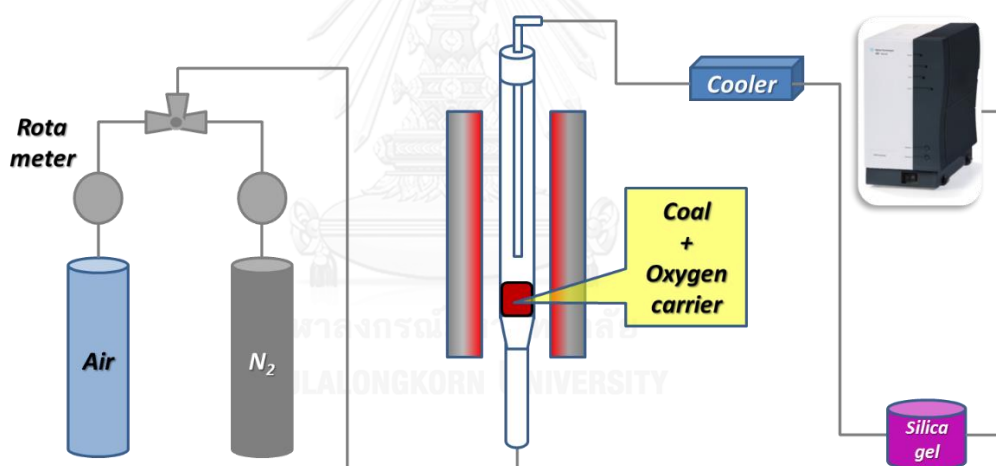
3.4.6.8 เก็บสารที่ได้หลังจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในโถดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดสอบ ลำดับถัดไป

3.4.7 การศึกษาการใช้ตัวพาออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

3.4.7.1 ทำการทดสอบปฏิกิริยารีดักชันตามขั้นตอนที่ 3.4.5 โดยใช้ปริมาณของไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการบันทึกปริมาณองค์ประกอบแก๊สขาออกด้วยไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี และเมื่อทดสอบเสร็จ ไม่นำสารออกจากหลอดควอตซ์พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักหลอดควอตซ์และสาร

3.4.7.2 ทำการทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันตามขั้นตอนที่ 3.4.6 โดยใช้ปริมาณของไนโตรเจน 158 มิลลิลิตรต่อนาทีและออกซิเจน 42 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการบันทึกปริมาณองค์ประกอบแก๊สขาออกด้วยไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี แต่เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วไม่นำสารออกจากหลอดควอตซ์ ทำการชั่งน้ำหนักหลอดควอตซ์

3.4.7.3 ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 3.4.7.1 โดยเริ่มผสมถ่านหินเพิ่มเข้าไป 2.00 กรัมและขั้นตอนที่ 3.4.7.2 ซ้ำจนครบรอบปฏิกิริยารีดักชัน 4 รอบและออกซิเดชัน 4 รอบ



รูปที่ 3.8 แบบจำลองการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

3.5 ตัวแปรในการทดลอง

สำหรับในการทดสอบตัวพาทออกซิเจนกับกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงจะแบ่งส่วนของ การทดสอบตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ในส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.5.1 ผลของตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่ผสมลงในตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆต่อกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงของมีเทนด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง โดยใช้เหล็กออกไซด์ที่ร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

3.5.2 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันกับตัวพาทออกซิเจนในสัดส่วน องค์ประกอบที่ดีที่สุดในตัวข้อที่ 3.5.1 โดยทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งที่ 900 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส

3.5.3 ผลของปฏิกิริยารีดักชันสลับปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการเผาไหม้แบบเคมี คอลลูบิงในการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งในอุณหภูมิกับตัวพาทออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบ ที่ดีที่สุด

3.5.4 ผลของตัวพาทออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุดในตัวข้อ 3.5.1 ทดสอบกับถ่าน หินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต

3.5.5 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันกับตัวพาทออกซิเจนในสัดส่วน องค์ประกอบที่ดีที่สุดในตัวข้อ 3.5.1 โดยทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตที่ 900 950 1,000 องศาเซลเซียส

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

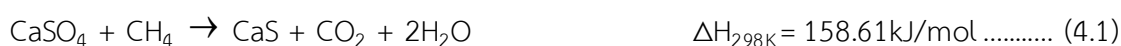
ในส่วนของผลการทดลองจะทำการศึกษาผลของการผสมตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ในตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งโดยใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง และในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบตโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง หัวข้อการศึกษาประกอบด้วย

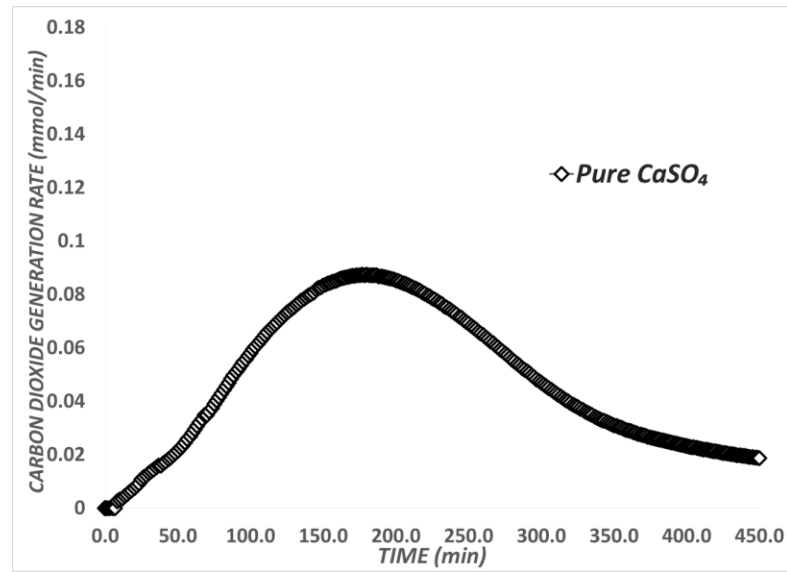
1. ผลของการผสมเหล็กออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง
2. ผลของอุณหภูมิที่ใช้การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง
3. ผลของตัวพาทออกซิเจนในการฟื้นฟูต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (recyclability) ในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง
4. ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบต
5. ผลของตัวพาทออกซิเจนในการใช้งานในกระบวนการเผาไหม้กับถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบต

4.1 ผลของการผสมเหล็กออกไซด์กับแคลเซียมซัลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง

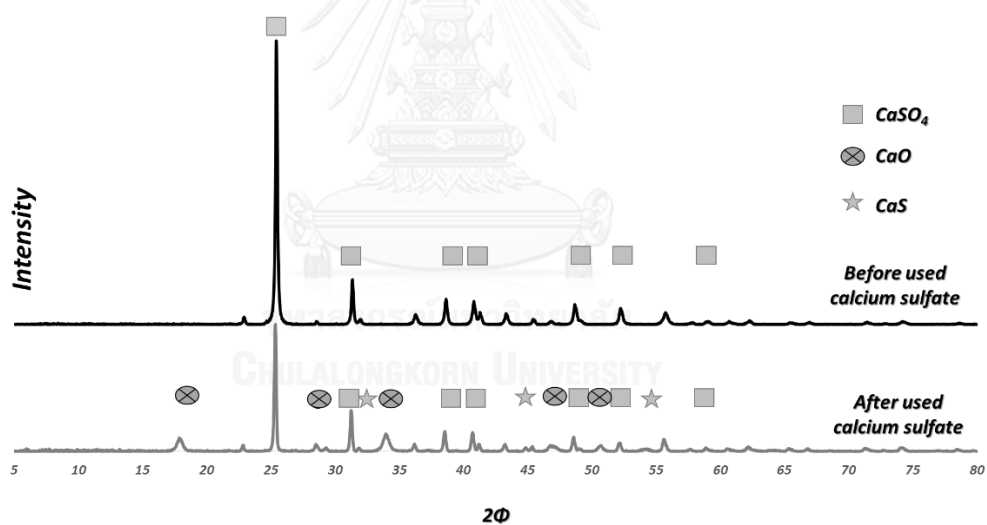
ในการศึกษาผลของการผสมตัวพาทออกซิเจนระหว่างเหล็กออกไซด์และแคลเซียมซัลเฟต ด้วยอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยารีดักชันกับมีเทน ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรกับตัวพาทออกซิเจนปริมาณ 2.00 กรัม ในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวพาทออกซิเจนที่เตรียมได้ในอัตราส่วนต่างๆกับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์บริสุทธิ์

จากรูปที่ 4.1 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตกับมีเทน พบว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับมีเทนสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.1 [32] การทดสอบใช้เวลา 177 นาที จึงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดที่ 0.0873 มิลลิโมลต่ออนาที สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซัลเฟตที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาทออกซิเจนกับมีเทนนั้นเกิดขึ้นช้า นอกจากนั้นยังเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวแทนการเผาไหม้เพียง 0.26 มิลลิโมล ซึ่งมีปริมาณน้อย





รูปที่ 4.1 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

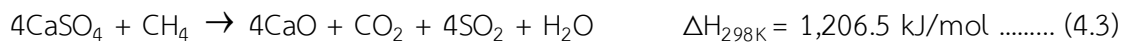


รูปที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

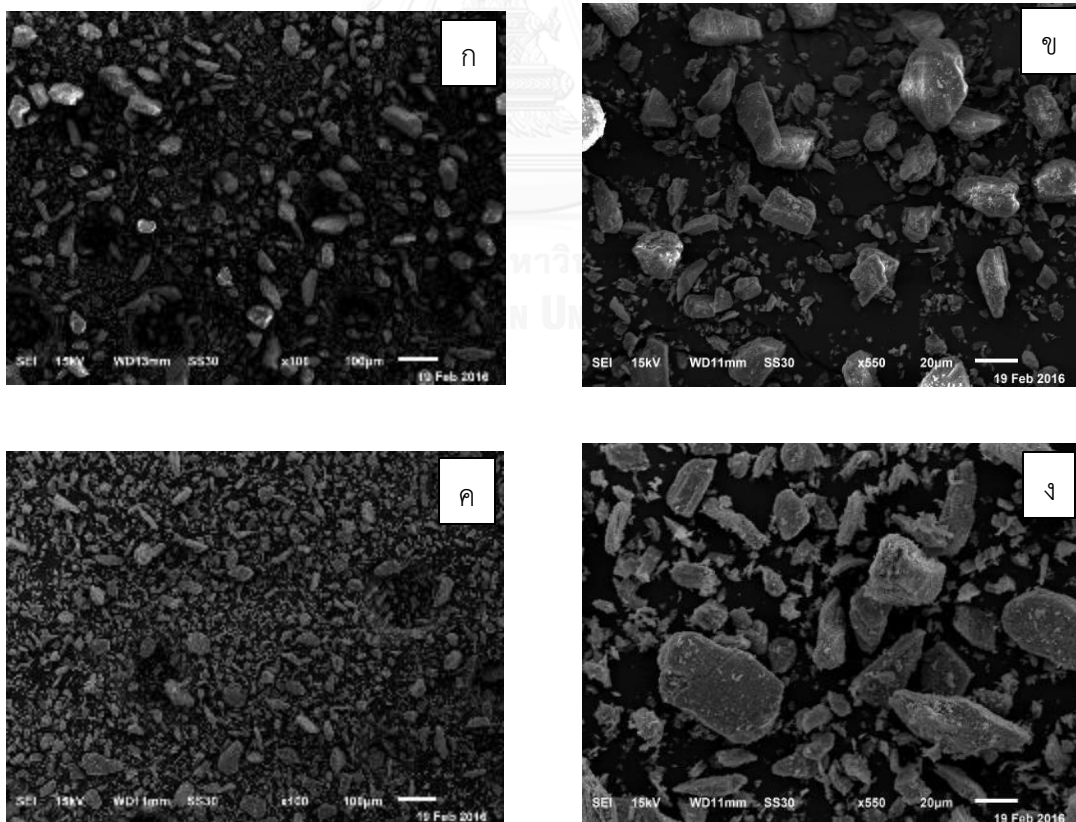
รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของตัวพวออกซิเจนเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแคลเซียมซัลเฟต พบว่าหลังการทำปฏิกิริยารีดักชันพบโครงสร้างของแคลเซียมซัลไฟด์ ซึ่งมีความสามารถในการคืนสภาพกลับมาเป็นแคลเซียมซัลเฟต ดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.2 [32]



นอกจากนั้น รูปแบบของ XRD แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่สามารถคืนสภาพตัวพาทออกซิเจนในการส่งออกซิเจนไปยังเชื้อเพลิงอีกครั้ง ซึ่งการเกิดแคลเซียมออกไซด์เป็นหนึ่งในปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reaction) ที่เกิดขึ้นดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.3 [32]

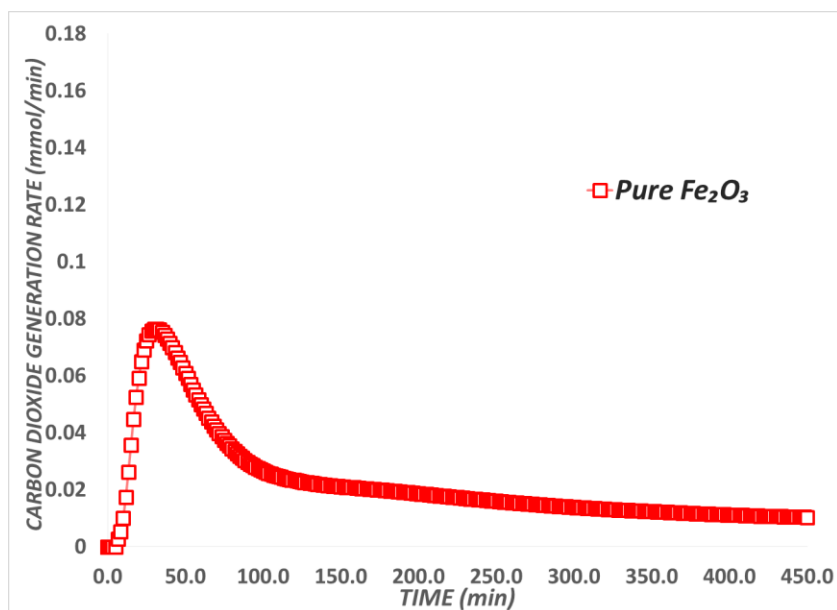


การเสถียรภาพของตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตภายในปฏิกิริยารีดักชันนั้น นอกจากมีเทนจะทำให้เสถียรภาพแล้ว การทำปฏิกิริยาของแคลเซียมซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นก็สามารถทำให้แคลเซียมซัลเฟตสูญเสียอะตอมของซัลเฟอร์ได้ด้วยปฏิกิริยาข้างเคียง ดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.4 [32]



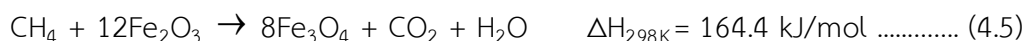
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต (ก-ข) ก่อนทำปฏิกิริยารีดักชัน (ค-ง) หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน ด้วยกำลังขยาย 100X(ก,ค) และ 550X(ข,ง)

รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบสัณฐานวิทยาของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยากับมีเทน พบว่า เมื่อเทียบก่อนทำปฏิกิริยา (รูปที่ 4.3.ก. และ 4.3.ข) และ หลัง (รูปที่ 4.3.ค. และ รูปที่ 4.3.ง.) ขนาดของแคลเซียมซัลเฟตนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นกระจายอยู่ในภาพ เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยารีดักชัน ส่งผลให้ตัวพาออกซิเจนนั้นเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาค (agglomeration)

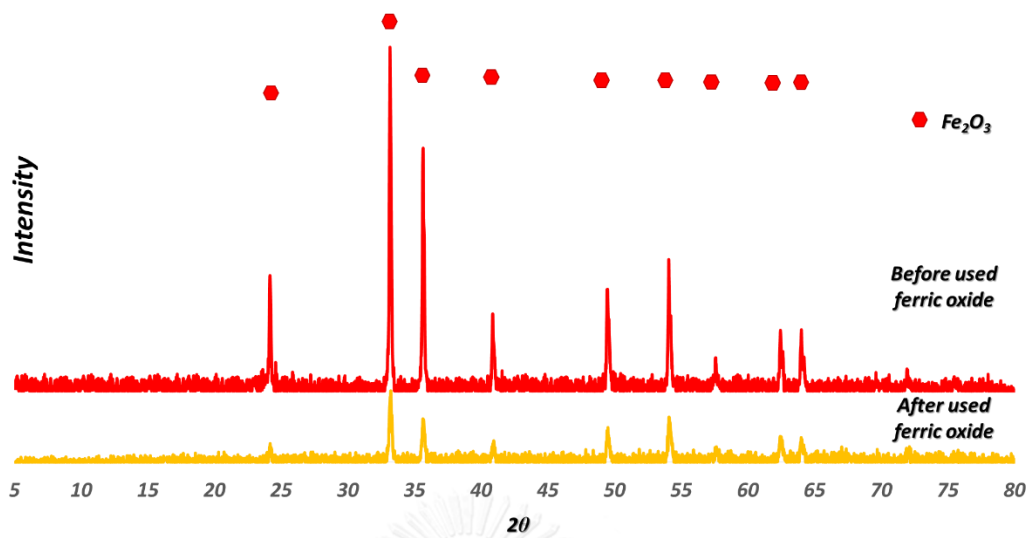


รูปที่ 4.4 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

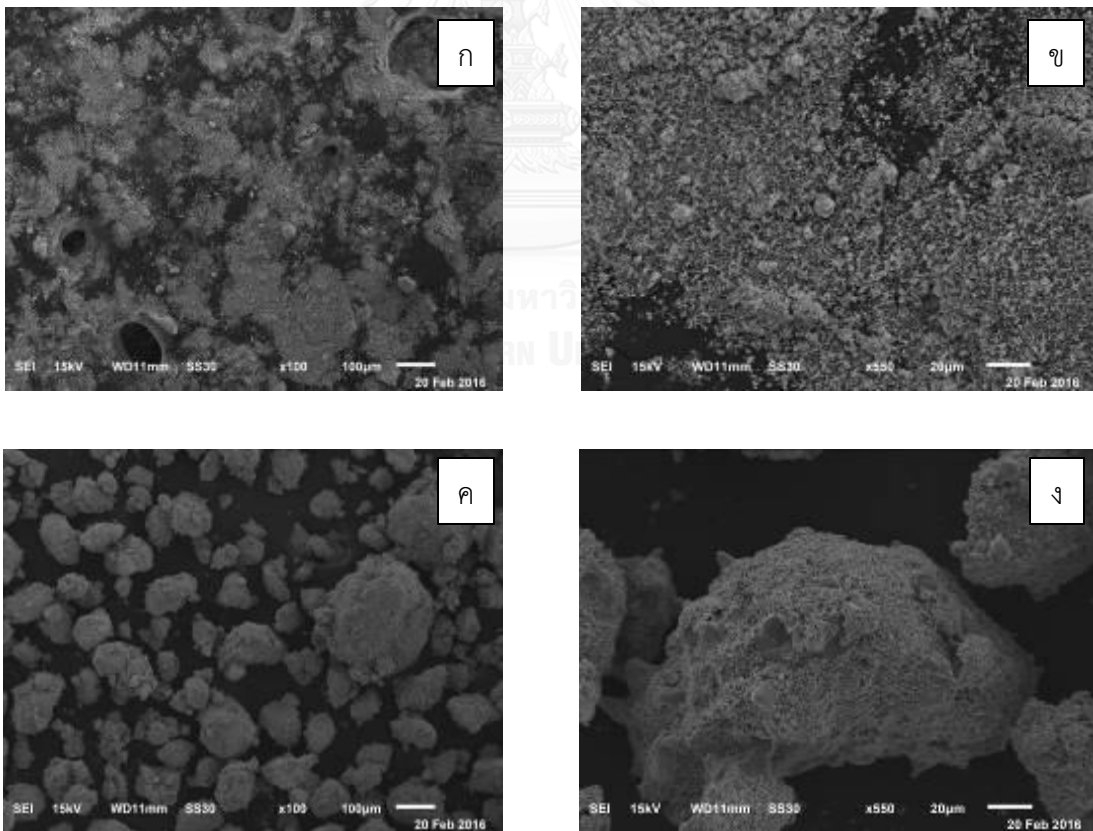
รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวพาออกซิเจนเหล็กออกไซด์กับมีเทน ซึ่งเป็นไปดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.5 [31]



ในการเกิดปฏิกิริยานั้นพบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีค่า 0.0765 มิลลิโมล ต่อ นาที ณ ที่ 32 นาที แม้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อใช้เหล็กออกไซด์นั้นจะมีค่าต่ำกว่าแคลเซียมซัลเฟต และมีปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์รวมเกิดขึ้น 0.24 มิลลิโมล แต่ปฏิกิริยารีดักชันนั้นเกิดขึ้นไวกว่าแคลเซียมซัลเฟต การทดสอบการผสมตัวพาออกซิเจนจะใช้ตัวพาออกซิเจนทั้งสองเป็นตัวเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์



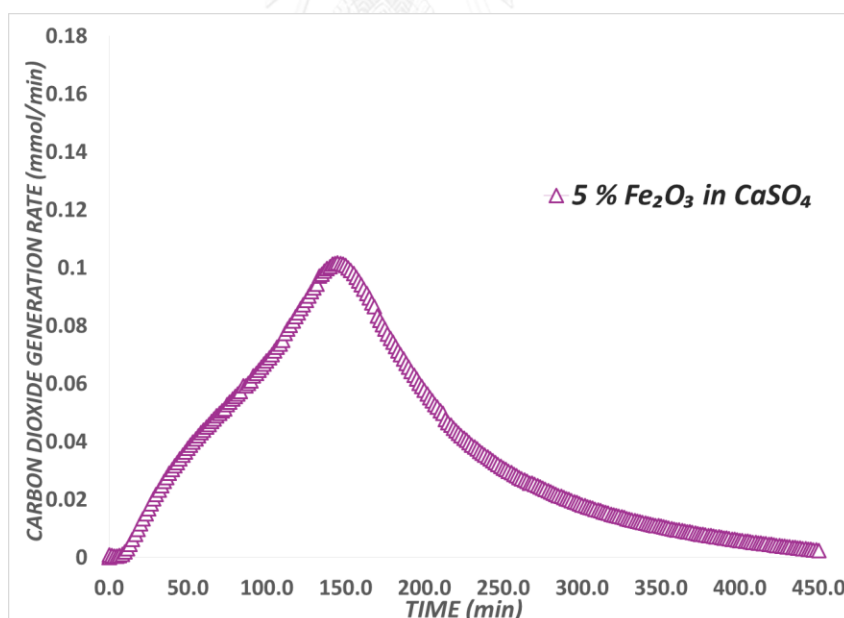
รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังปฏิบัติการรีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ (ก-ข) ก่อนทำปฏิบัติการรีดักชัน (ค-ง) หลังทำปฏิบัติการรีดักชัน ด้วยกำลังขยาย 100X (ก,ค) และ 550X (ข,ง)

รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวพาทอกซิเจนเหล็กออกไซด์เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับมีเทน พบว่ารังสีเอ็กซ์ตรวจสอบพบองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยา และจากรูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาของเหล็กออกไซด์ก่อน (รูป 4.6.ก. และ 4.6.ข.) และหลัง (รูป 4.6.ค. และ 4.6.ง.) พบว่า ขนาดของอนุภาคเหล็กออกไซด์หลังทำปฏิกิริยานั้นมีขนาด 200 ไมโครเมตรจากในตอนแรกซึ่งมีขนาดเล็กมาก ถึงแม้การเกิดปฏิกิริยาของเหล็กออกไซด์ใช้เวลานานไม่เท่ากับแคลเซียมซัลเฟตแต่เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันแล้ว พบการก่อรวมตัวกันของอนุภาคเป็นก้อนขนาดใหญ่และกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าด้วยตัวพาทอกซิเจนเหล็กออกไซด์เพียงชนิดเดียวสามารถนำไปใช้งานได้ แต่ไม่นาน เหล็กออกไซด์นั้นจะเสื่อมสภาพลงจากความไม่เสถียรเชิงความร้อน ตัวพาทอกซิเจนที่ไม่มีวัสดุเสถียรเชิงความร้อน (thermal stability) เมื่อได้รับความร้อนสูงจะเกิดการเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่และทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

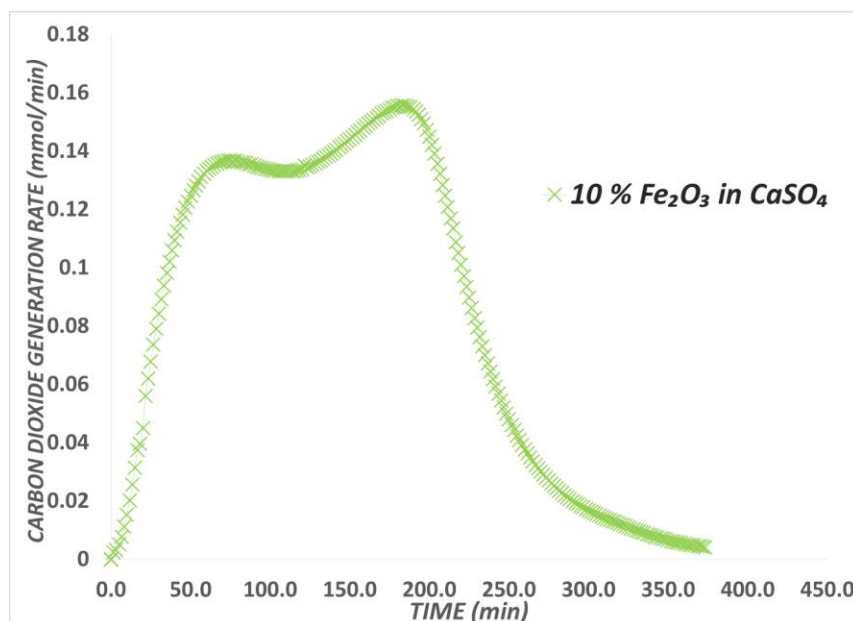
สำหรับในส่วนถัดไป เป็นการศึกษาการใช้เหล็กออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของแคลเซียมซัลเฟต โดยการผสมเหล็กออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละที่แตกต่างกัน



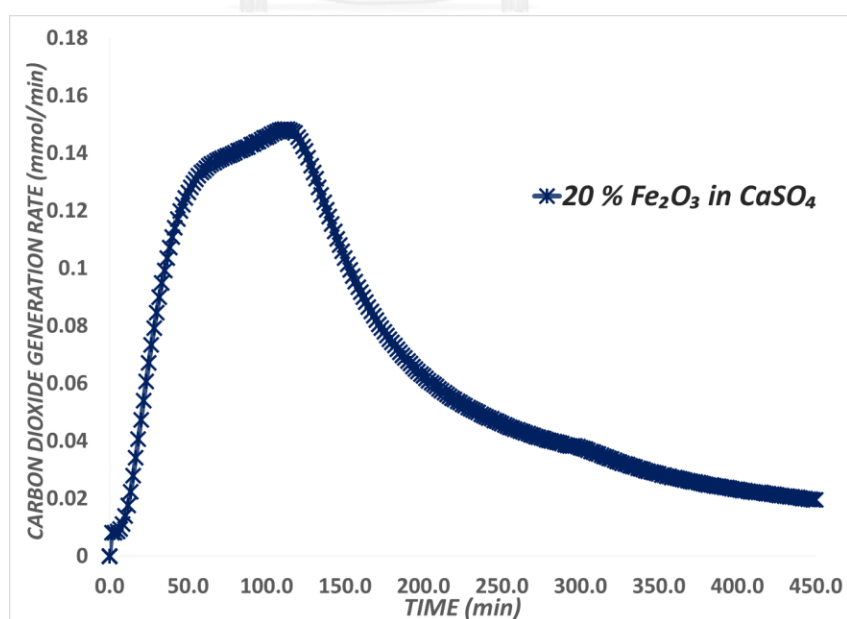
รูปที่ 4.7 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.7 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับตัวพาทอกซิเจนผสมระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการ

เกิดปฏิกิริยาของตัวพาสเมนี้สูงสุดที่ 0.1016 มิลลิโมลต่อนาที โดยใช้เวลา 145 นาทีและมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 0.33 มิลลิโมล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมซัลเฟตแล้วจะพบว่าปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นและเวลาที่เกิดก่อนเพียงเล็กน้อย



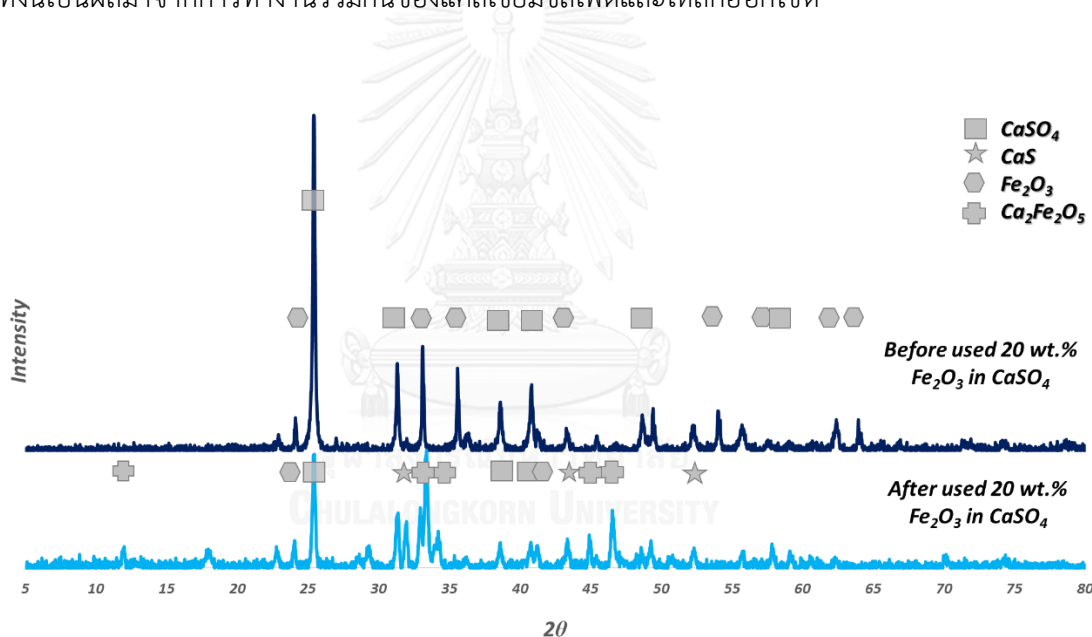
รูปที่ 4.8 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาสเมนี้แคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาสเมนี้แคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

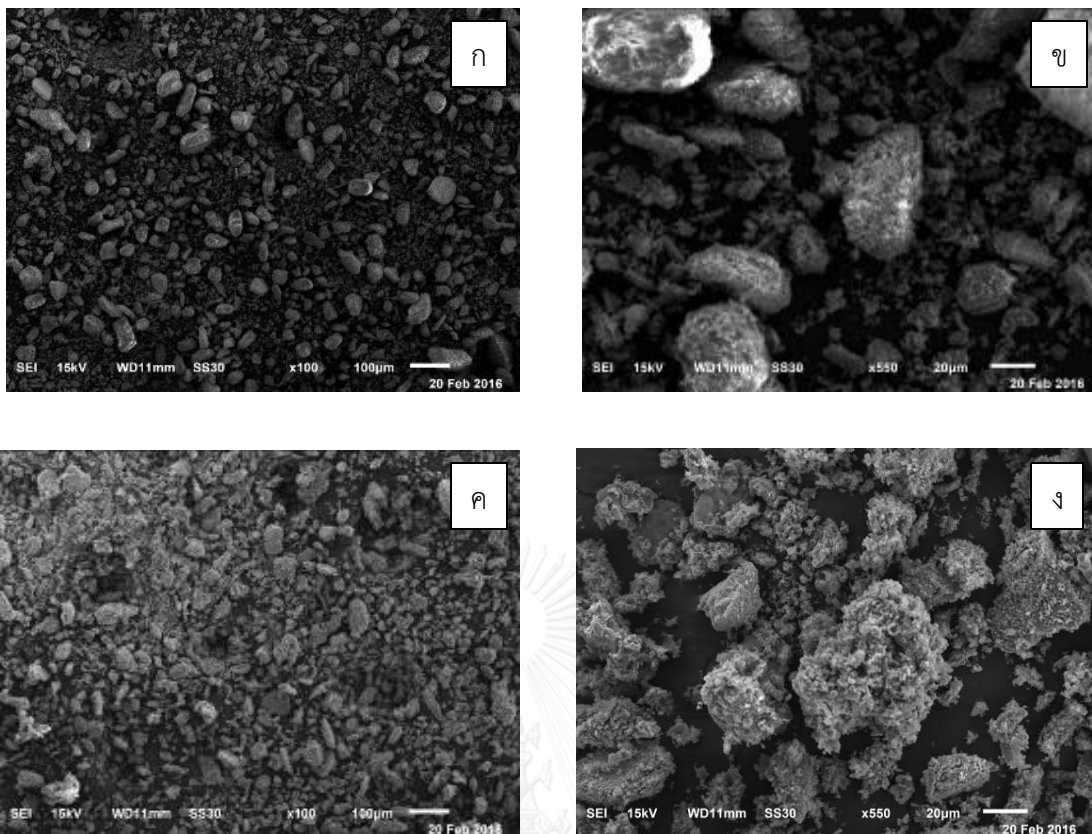
เมื่อผสมเหล็กออกไซด์ลงในแคลเซียมซัลเฟตด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นสูงถึง 0.1557 มิลลิโมลต่อนาที อัตราเร็วสูงสุดเกิดขึ้นที่ 183 นาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 0.53 มิลลิโมล นอกจากนั้นเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าพบอัตราเกิดปฏิกิริยาสูงสุดที่ 2 ช่วงเวลาคือ 0 – 100 นาที และที่ 200-250 นาที เนื่องจากเหล็กออกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยามีเกิดออกเป็น 2 ช่วงคือเหล็กออกไซด์ในช่วง 0 – 100 นาที และช่วงของแคลเซียมซัลเฟตในช่วง 200 – 250 นาที อย่างชัดเจน

สำหรับการผสมเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักลงในแคลเซียมซัลเฟตส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 0.46 มิลลิโมล อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด 0.1484 มิลลิโมลต่อนาที ที่ 113 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะพบว่าการเกิดปฏิกิริยาของตัวพาทออกซิเจนที่ร้อยละ 20 นี้ให้ผลของการเกิดปฏิกิริยาเพียงแค่ว่าหนึ่งจุดยอดกราฟสูงสุด ต่างจากที่ร้อยละ 10 ที่มี 2 จุดยอดกราฟ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันของแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์



รูปที่ 4.10 รูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับมีเทน พบว่าเกิดเฟสผสมระหว่างแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์คือ $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ในงานวิจัยที่ได้ศึกษา [38] (เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก.) พบว่าสามารถการเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมาก นอกจากนั้นปรากฏเฟสของแคลเซียมซัลไฟด์ที่สามารถคืนสภาพเป็นตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตอีกครั้งและไม่พบเฟสของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่สามารถคืนสภาพได้

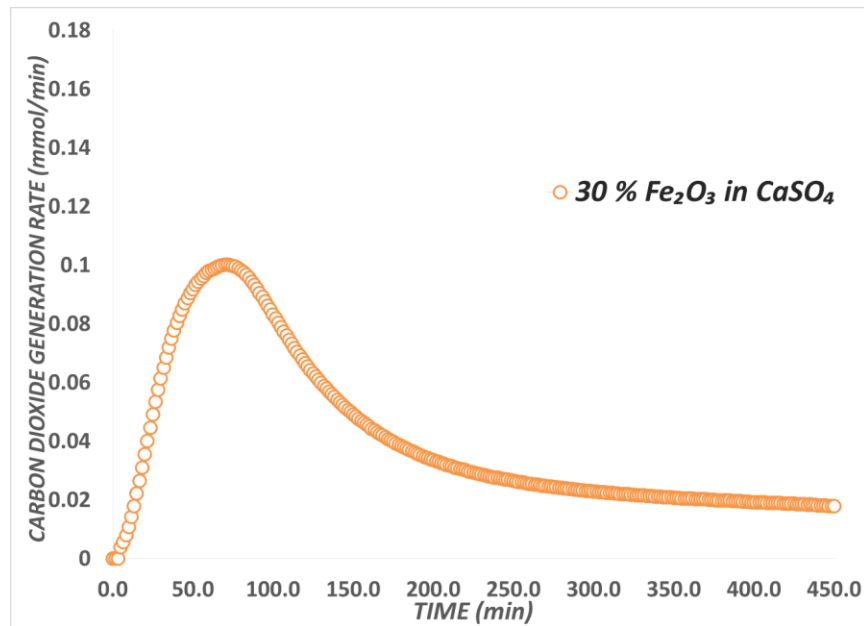


รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของแกนแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (ก-ข) ก่อนทำปฏิกิริยารีดักชัน (ค-ง) หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน ด้วยกำลังขยาย 100X และ 550X

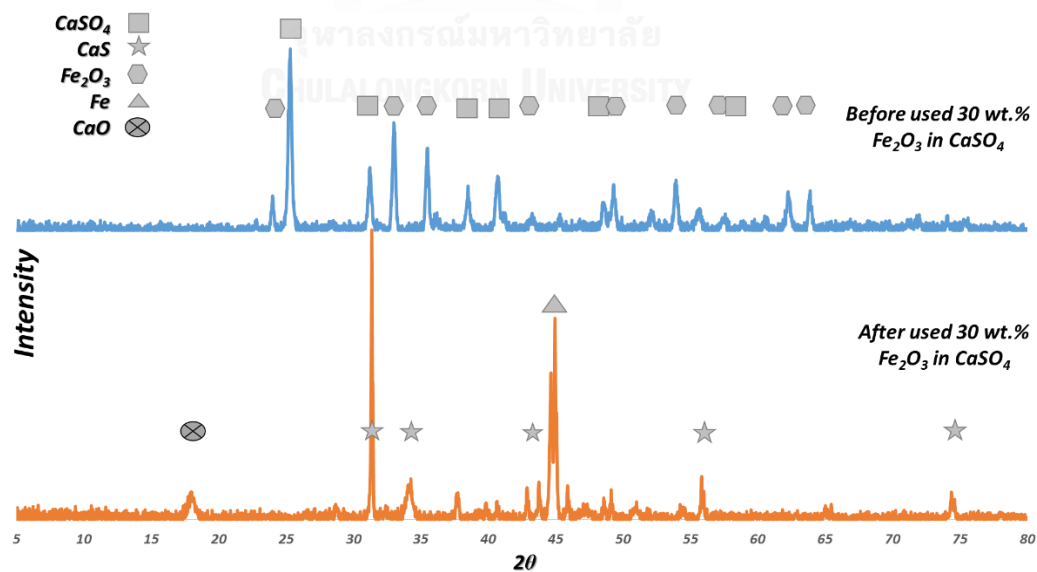
รูปที่ 4.11 แสดงสัณฐานวิทยาของแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวพวออกซิเจนที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชันเกิดการเกาะกลุ่มกันลักษณะเป็นก้อนกระจายอยู่ มีขนาดประมาณ 20 ไมโครเมตร เมื่อเทียบการจับตัวเป็นก้อนของเหล็กออกไซด์บริสุทธิ์พบว่ามีความเล็กกว่า

รูปที่ 4.12 แสดงผลของอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างแคลเซียมซิลเฟตกับเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดมีค่า 0.1001 มิลลิโมลต่อนาที ที่ 70 นาที และเกิดขึ้น 0.31 มิลลิโมล จะพบว่าการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเกิดขึ้นก่อนแต่อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ ผลของรูปแบบ XRD ในรูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับมีเทน แสดงให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของโครงสร้างแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ตัวพวออกซิเจนเกิดปฏิกิริยากับมีเทนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณที่ต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากเกิดปฏิกิริยามี Fe เกิดขึ้นเนื่องมาจากเหล็กออกไซด์

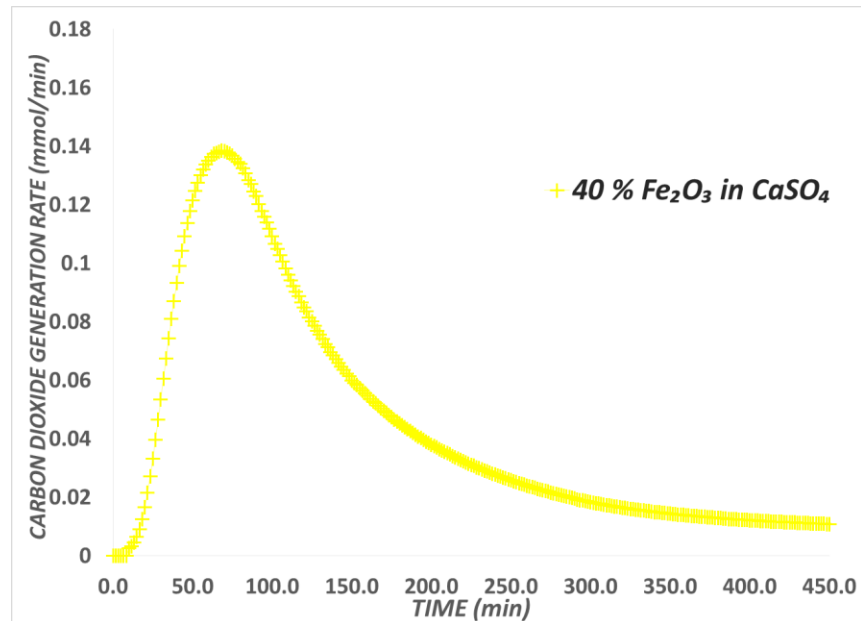
ออกซิไดซ์ทำปฏิกิริยากับมีเทนและอยู่ในรูป FeO หรือ Fe จะทำการออกซิเดชันแคลเซียมซัลเฟตให้เปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลไฟด์ และอาจทำให้สามารถลดอัตราการสูญเสียอะตอมซัลเฟอร์สู่บรรยากาศได้ [40]



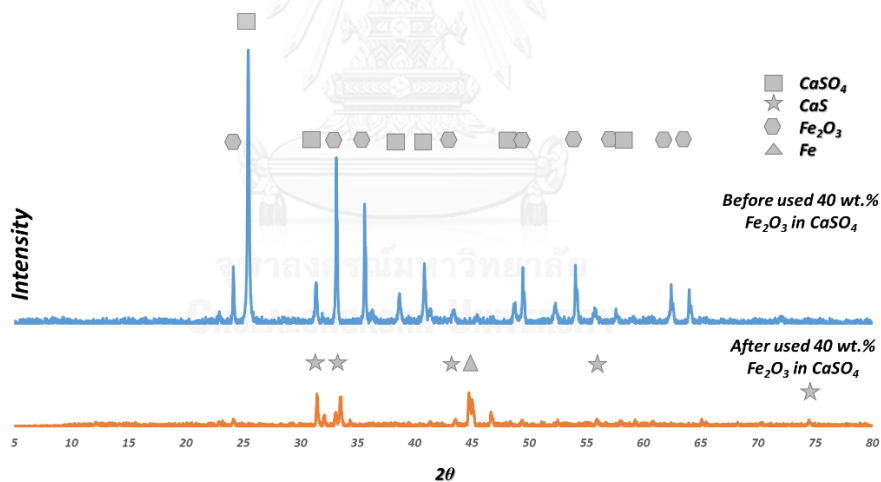
รูปที่ 4.12 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



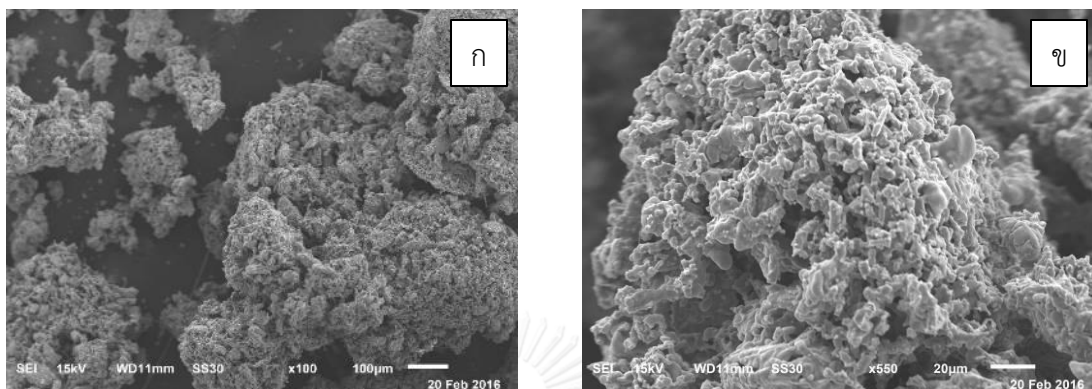
รูปที่ 4.14 การทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 รูปแบบ XRD ของตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

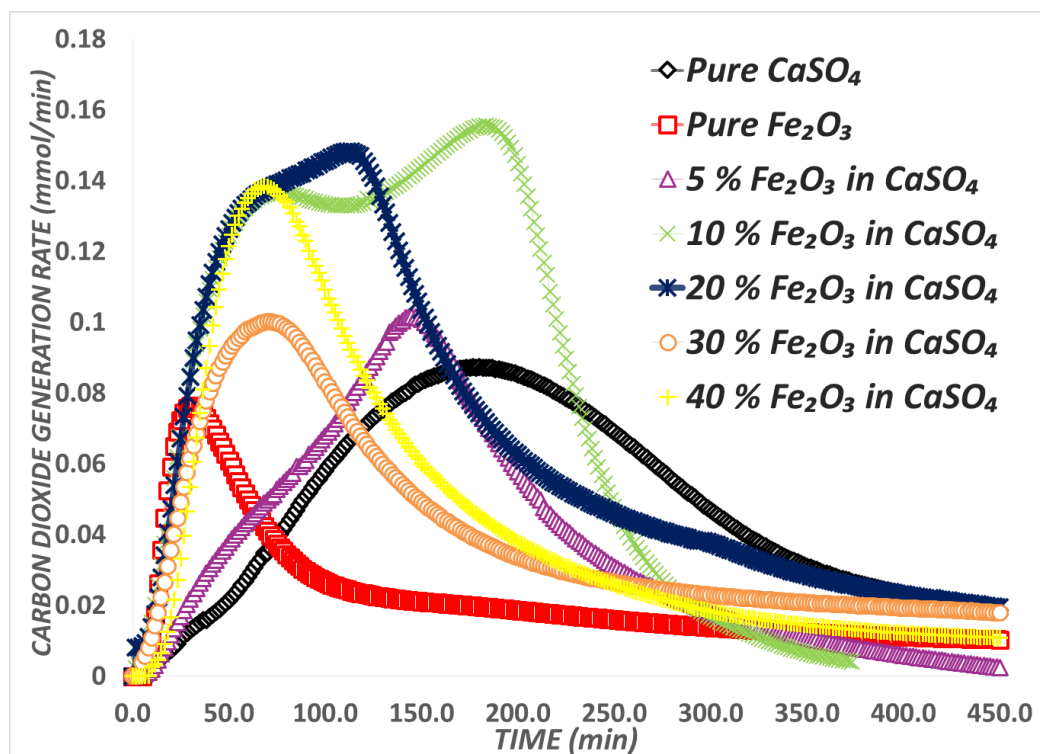
รูปที่ 4.14 แสดงการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นที่ 0.1384 มิลลิโมลต่อนาที ที่ 68 นาที และเกิดขึ้นปริมาณ 0.44 มิลลิโมลซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณการเกิด CO_2 รวมเมื่อใช้อัตราส่วนร้อยละ 30 นั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นแต่ยังคงต่ำกว่าที่ร้อยละ 20 และจากรูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบระหว่าง

ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับมีเทน พบว่า เกิดโครงสร้างของแคลเซียมซิลไฟด์และเหล็กออกไซด์ขึ้น การเกิดโครงสร้างของแคลเซียมซิลไฟด์สามารถแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแคลเซียมซิลไฟด์ให้เป็นแคลเซียมซิลไฟด์ได้ และมีความสามารถในการฟื้นฟูโครงสร้างองค์ประกอบออกซิเจน



รูปที่ 4. 16 สัณฐานวิทยาของแคลเซียมซิลไฟด์ผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (ก-ข) หลังทำปฏิกิริยารีดักชัน ด้วยกำลังขยาย 100X และ 550X

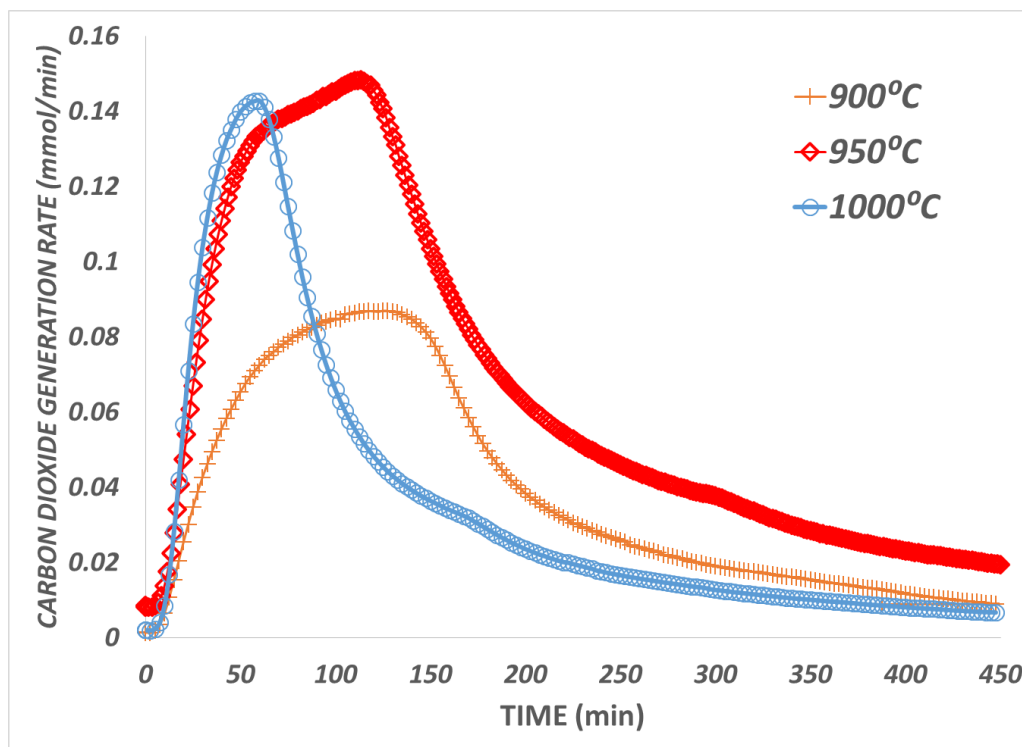
รูปที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของแคลเซียมซิลไฟด์ผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักหลังทำปฏิกิริยา พบว่าตัวพาออกซิเจนเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เนื่องจากปริมาณเหล็กออกไซด์ที่มีปริมาณมาก การกระจายตัวของอนุภาคต่ำลง เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดการเกาะรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่และทำให้มีเทนเข้าไปทำปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยลง



รูปที่ 4.17 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

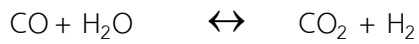
จากการทดลองที่แสดงให้เห็นข้างต้น สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.17 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแต่ละชนิด พบว่าตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักมีอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ เนื่องจากการเกิดโครงสร้างที่รวมตัวกัน กลายเป็นแคลเซียมเฟอร์ไรต์ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ดีขึ้น และการส่งผ่านออกซิเจนจาก แคลเซียมซัลเฟตไปสู่เหล็กออกไซด์ ทำให้เกิดโครงสร้างแคลเซียมซัลไฟด์ยังคงสภาพอยู่ การศึกษาในหัวข้อถัดไปจะใช้แคลเซียมซัลเฟตที่ผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในการทำการทดสอบลำดับถัดไป

4.2 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

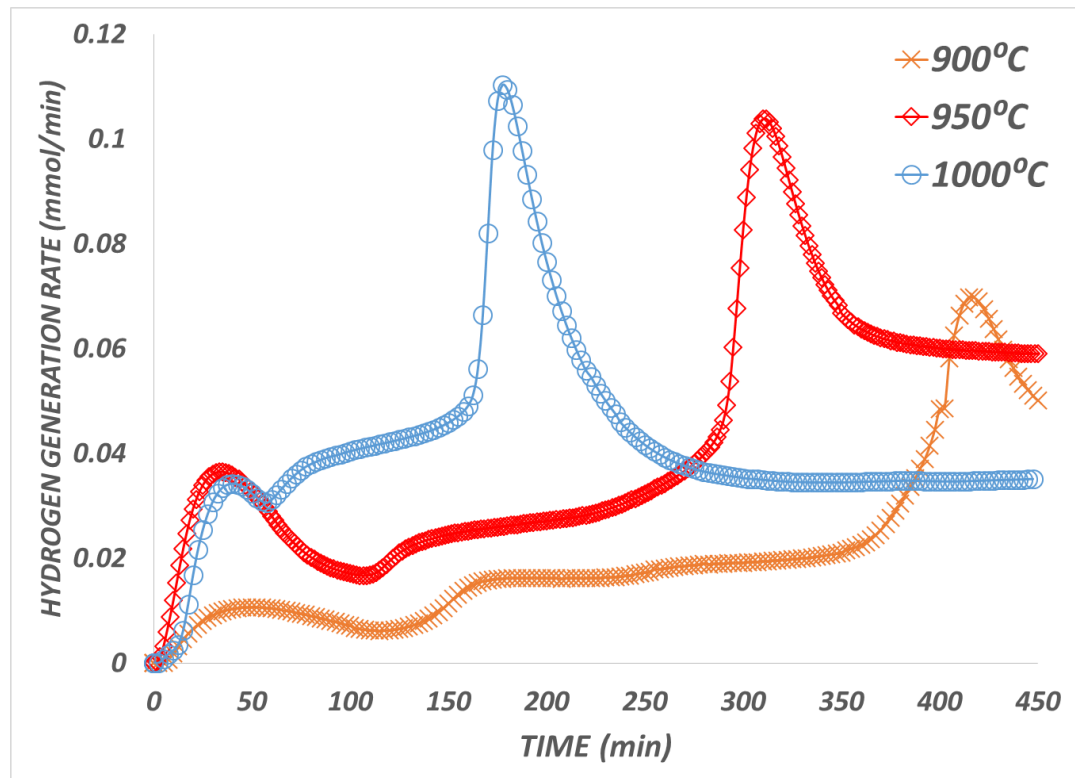


รูปที่ 4.18 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 4.18 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกับมีเทนที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยารีดักชันต่างๆ พบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสให้ผลต่ำที่สุดและที่ 950 องศาเซลเซียส ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบปฏิกิริยาในสมการที่ 4.1 และ 4.5 เป็นสมการของแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์ที่เป็นตัวพาออกซิเจนตั้งต้นของตัวพาออกซิเจนผสม จากค่าเอนทัลปีที่มีค่าเป็นบวก ชี้ให้เห็นถึงปฏิกิริยาคูดพลังงาน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงสูงขึ้นตามและการเกิดปฏิกิริยาจึงเร็วขึ้นตามอุณหภูมิ ในขณะเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสมีค่าอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าที่ 950 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างมีเทนกับเหล็กออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แต่ในอีกมุมหนึ่งปฏิกิริยาผันกลับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนนั้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ก็สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.6 – 4.7 [31,40]



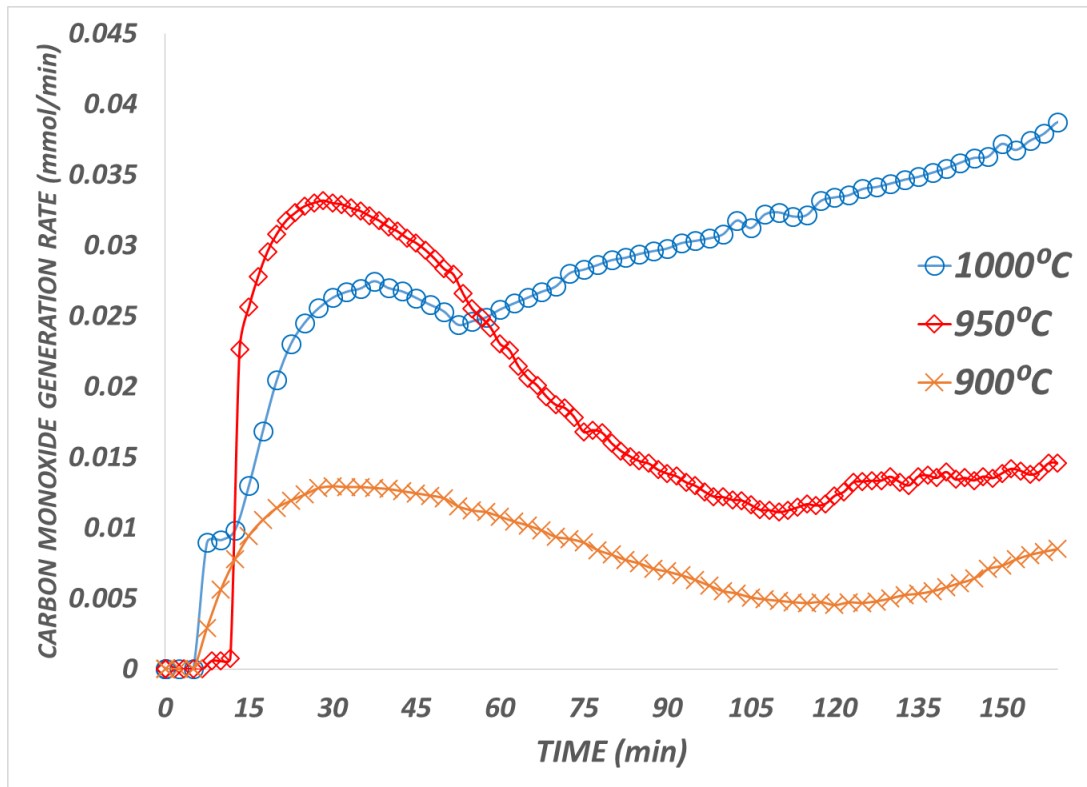
$$\Delta H_{1073\text{K}} = -41.1 \text{ kJ/mol} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.19 อัตราการเกิดไฮโดรเจนโดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิต่างๆ

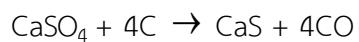
จากรูปที่ 4.19 แสดงอัตราการเกิดไฮโดรเจนในปฏิกิริยารีดักชันระหว่างมีเทนและ แคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [34] ไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นมากดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.7-4.9 มีเทนสามารถแตกตัว (cracking) ได้ที่อุณหภูมิสูง เกิดปฏิกิริยากับน้ำ และปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (water gas shift) ดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.8 – 4.9 [40] และจากที่กล่าวไปข้างต้น [40] สำหรับการเกิด $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ทำให้เกิดไฮโดรเจนขึ้นนั่นเอง



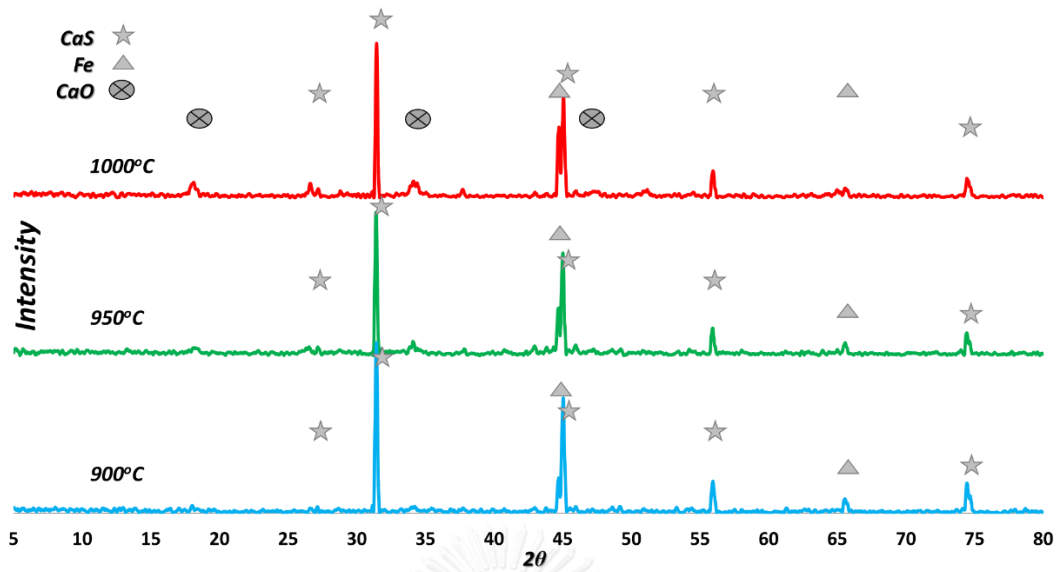


รูปที่ 4.20 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็ก ออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิต่างๆ

ในลักษณะเดียวกัน รูปที่ 4.20 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ระหว่างแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกับมีเทนที่อุณหภูมิต่างๆ ปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นปฏิกิริยาดูดพลังงาน เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ก็จะเกิดขึ้นมาดังแสดงในสมการปฏิกิริยาที่ 4.10 - 4.11

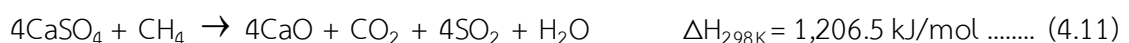


$$\Delta H_{298\text{K}} = 1,518.7 \text{ kJ/mol} \dots (4.9)$$



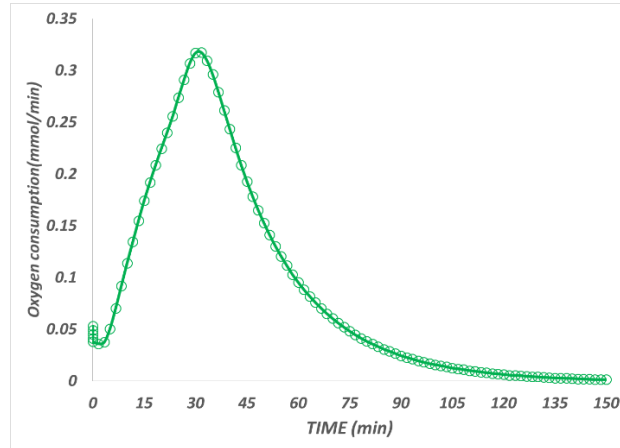
รูปที่ 4.21 รูปแบบ XRD ของตัวพาทอกซิเจนแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในการทำปฏิกิริยารีดักชันในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบนั้นมีความสอดคล้องกันในเชิงจลนพลศาสตร์ [33] เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [31,35] แคลเซียมซิลเฟตที่เกิดปฏิกิริยาเกิดการสลายตัวกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ดังสมการปฏิกิริยาที่ 4.10 และ 4.11 [31]



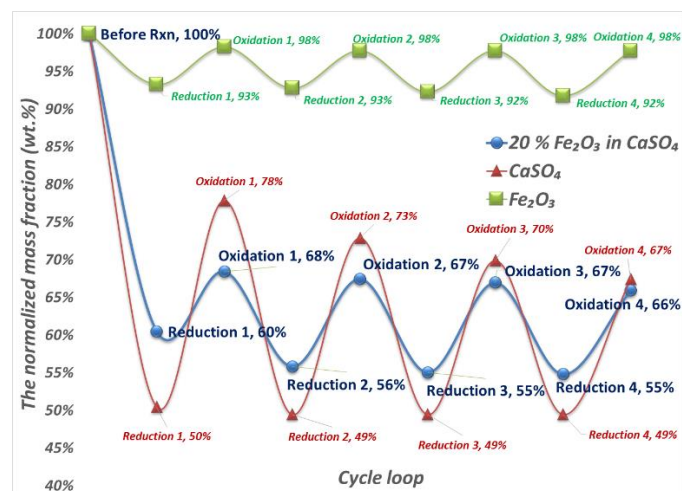
จากการทดลองที่แสดงให้เห็นข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยารีดักชันในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งคือ 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากที่สุดสูง นอกจากนั้น ที่อุณหภูมิดังกล่าว ตัวพาทอกซิเจนผสมไม่เกิดการสลายตัวไปเนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพการใช้งาน

4.3 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง ที่อุณหภูมิกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด



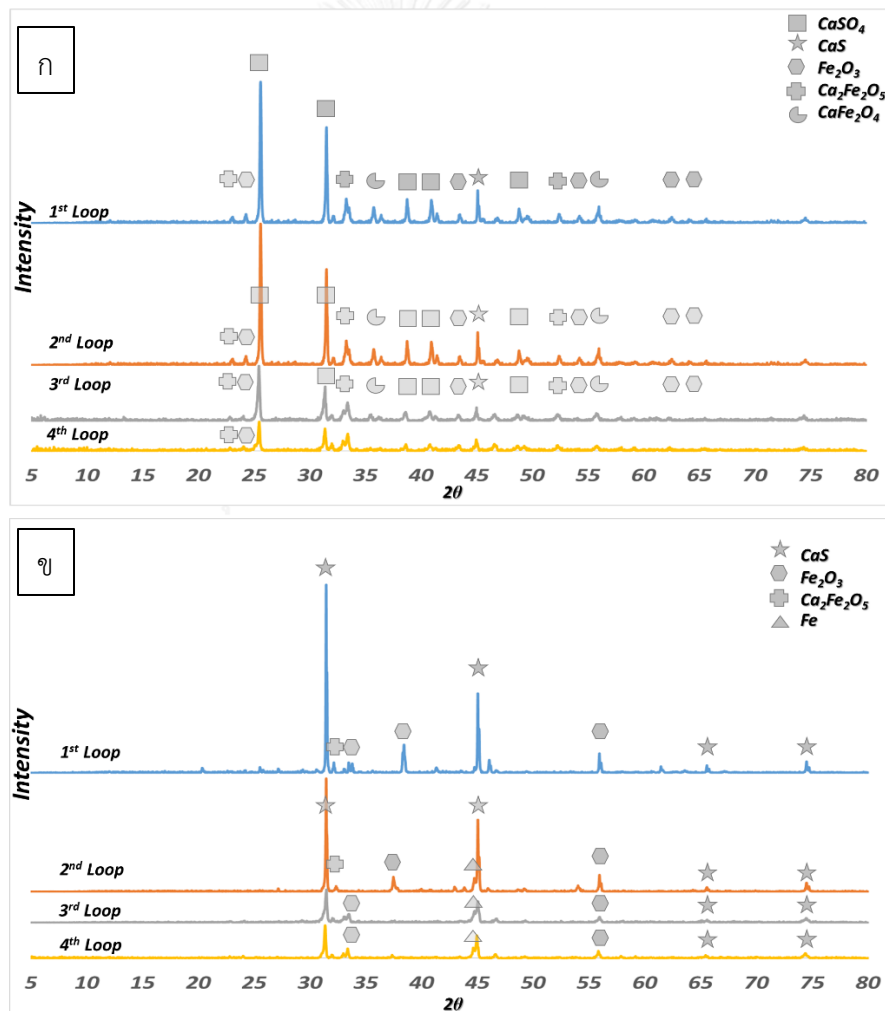
รูปที่ 4.22 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสม เหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

ในการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงเพื่อให้รู้ถึงเวลาที่ใช้การฟื้นฟูโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.22 แสดงอัตราการใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อทำการฟื้นฟูตัวพาออกซิเจนภายในโครงสร้างของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการใช้ออกซิเจนในกระบวนการออกซิเดชันสูงสุดที่ 0.3175 มิลลิโมลต่อนาที พบว่าตัวพาออกซิเจนผสม หยุดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและสิ้นสุดลงด้วยเวลา 150 นาที สำหรับแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์หยุดทำปฏิกิริยาภายใน 180 นาที



รูปที่ 4.23 สัดส่วนน้ำหนักตัวพาออกซิเจนก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.23 แสดงสัดส่วนน้ำหนักของตัวพวออกซิเจนชนิดต่างๆจากการทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงโดยการทำปฏิกิริยาสลับกันระหว่างมีเทนและออกซิเจนในอากาศ พบว่าสัดส่วนน้ำหนักของแคลเซียมซัลเฟตในแต่ละรอบปฏิกิริยาออกซิเดชันลดต่ำลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่ยาวนานทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ทั้งปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้สูญเสียอะตอมของซัลเฟอร์ [32] หรือการทำให้เกิดการเกาะกลุ่มเป็นก้อนแล้วเสื่อมสภาพซึ่งได้แสดงให้เห็นจากผลการทดลองที่ผ่านมาและอ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ ผลของเหล็กออกไซด์ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา [37] เมื่อเหล็กออกไซด์สูญเสียสัดส่วนน้ำหนักจะอยู่ในช่วงร้อยละ 80 - 98 และแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก นั้นมีการสูญเสียน้ำหนักไปในลักษณะเช่นเดียวกับพฤติกรรมของตัวพวออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากปฏิกิริยาของวัสดุผสมนั้นสิ้นสุดได้รวดเร็วกว่าทั้งในปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน ทำให้ตัวพวออกซิเจนไม่เสื่อมสภาพไปในภาวะความร้อนสูง



รูปที่ 4.24 รูปแบบ XRD ของการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ 950 องศาเซลเซียส (ก) รอบการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และ (ข) รอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

รูปที่ 4.24 แสดงรูปแบบ XRD ของแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันในแต่ละรอบการทำปฏิกิริยาจะพบว่าในรอบการเกิดปฏิกิริยารีดักชันในแต่ละครั้ง (4.24.ก) ปริมาณที่สามารถตรวจพบแคลเซียมซิลไฟด์และแคลเซียมเฟอร์ไรต์มีแนวโน้มลดลง เมื่อจำนวนรอบการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และปรากฏในรูปของโครงสร้างเหล็กขึ้นมาซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้ออกซิเจนของตัวพาออกซิเจนในปฏิกิริยารีดักชัน แต่เมื่อพิจารณาที่ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (4.24.ข) จะพบว่าตัวพาออกซิเจนผสมนั้นสามารถคืนสภาพกลับมาได้โดยจะอยู่ในรูปของแคลเซียมซิลเฟต โมโนแคลเซียมเฟอร์ไรต์ (CaFe_2O_4) และไดแคลเซียมเฟอร์ไรต์ ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ในลำดับต่อไป [31,32,38,40]

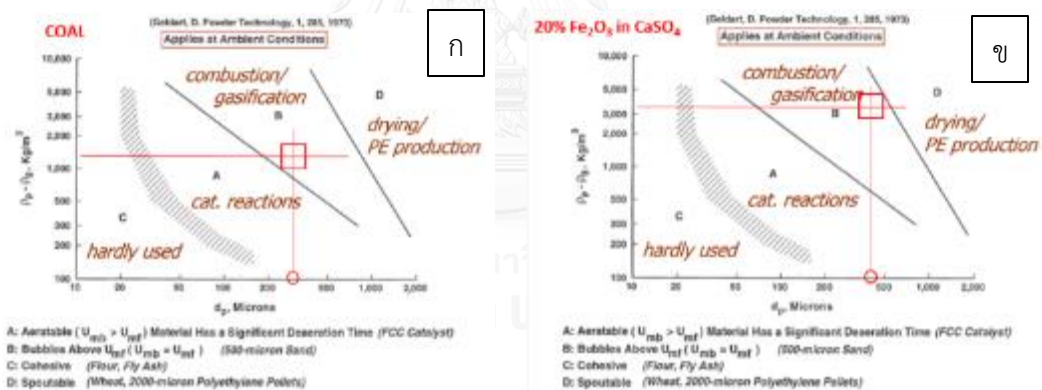
จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ในรอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นทำให้ตัวพาออกซิเจนแต่ละชนิดเกิดการเสื่อมสภาพไปตามรอบการเกิดปฏิกิริยา สำหรับแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่สัดส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แสดงรูปแบบของโครงสร้างในแต่ละรอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและแสดงให้เห็นสอดคล้องถึงการเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันได้

4.4 ผลของถ่านหินและการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของถ่านหินที่ใช้ในการทดสอบ

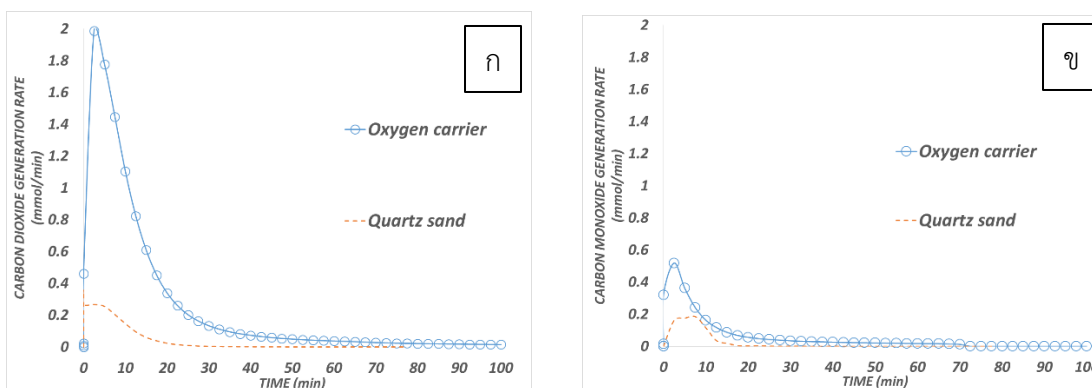
Fuel	Proximate Analysis(%wt)				Ultimate Analysis(%wt)				Density (kg/m ³)
	Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash	C	H	N	O	
Coal	10.53	48.52	25.77	15.18	49.62	6.01	0.62	43.75	1,251.38

ในการทำปฏิกิริยารีดักชันในระบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดกับถ่านหินจะใช้อัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาทีกับถ่านหินซึ่งมีสมบัติแสดงในตารางที่ 4.1 ที่ผ่านการคัดขนาดในช่วง 250 ถึง 500 ไมโครเมตร ตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 3,348.17 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดอนุภาค 28 - 112 ไมโครเมตร ซึ่งทั้ง 2 อนุภาคมีลักษณะตามการจำแนกเจลดาร์ท (geldart classification) ชนิด B ดังรูป 4.25



รูปที่ 4.25 การจำแนกวัสดุตามเจลดาร์ทของ (ก) ถ่านหิน (ข) ตัวพาออกซิเจน [41]

การทดสอบการทำปฏิกิริยารีดักชันกับถ่านหิน เริ่มต้นจากการเลือกสัดส่วนของตัวพาออกซิเจนผสมที่ดีที่สุดและอุณหภูมิในการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดจากการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งมาใช้ทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อให้ทราบว่า ถ่านหินนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับตัวพาออกซิเจนนั้นเกิดขึ้นได้ การทดสอบนั้นจะแบ่งเป็นออกเป็น การทำปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินกับตัวพาออกซิเจน และการทดสอบการสลายตัวของถ่านหินกับทรายควอตซ์ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 28 - 112 ไมโครเมตร



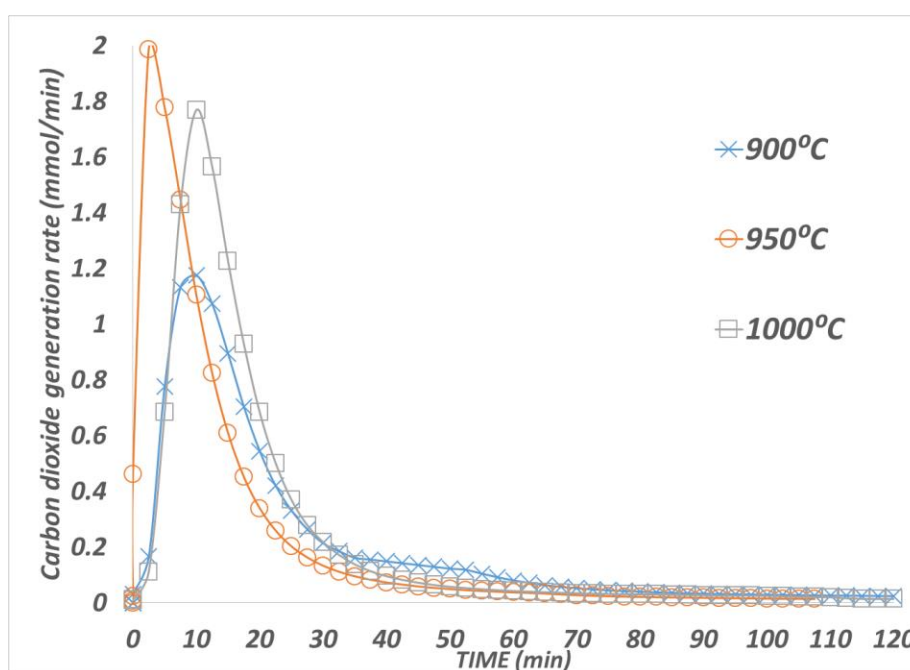
รูปที่ 4.26 อัตราการเกิด (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) คาร์บอนมอนอกไซด์กับถ่านหินที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถแตกสลาย (decomposition) ได้ที่อุณหภูมิสูง ในการศึกษาปฏิกิริยารีดักชันของถ่านหินจึงแยกออกเป็น 2 ส่วนคือการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้กับตัวพาออกซิเจนและการสลายตัวของถ่านหินสูง โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ รูปที่ 4.26 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ระหว่างแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกับถ่านหิน พบว่า การสลายตัวของสารประกอบในถ่านหินที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ทรายควอตซ์เพื่อทำให้เกิดสถานะฟลูอิดเบดและไม่เกิดการส่งถ่ายออกซิเจนขณะการสลายตัว เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ 1.55 มิลลิโมล และในการทำปฏิกิริยารีดักชันกับถ่านหินกับแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าตัวพาออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับถ่านหิน เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น 13.24 มิลลิโมล ซึ่งคิดเป็นปริมาณที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันได้ 11.69 มิลลิโมลซึ่งมากกว่าการสลายตัวของถ่านหินอย่างมาก และในส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นทั้งหมด 3.46 มิลลิโมล เกิดจากการแตกสลายถ่านหิน 1.53 มิลลิโมล คิดเป็นส่วนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ 2.53 มิลลิโมล ดังปฏิกิริยาที่ 4.9 และ 4.10 ที่กล่าวไปข้างต้น

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ทำปฏิกิริยาการรีดักชันระหว่างถ่านหินและตัวพาออกซิเจนผสมเหล็กออกไซด์ พบว่าตัวพาออกซิเจนสามารถเกิดปฏิกิริยากับถ่านหินได้

4.5 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันด้วยถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

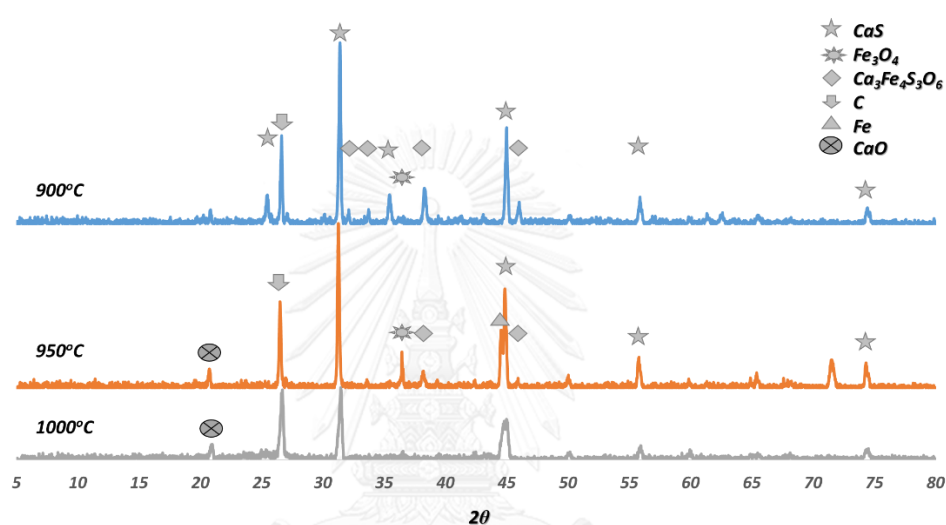
การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งและฟลูอิดไคซ์เบดมีลักษณะการทำงานต่างกัน เนื่องจากระบบของเบดนิ่งเน้นใช้เวลานานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาซึ่งต่างกับฟลูอิดไคซ์เบดที่จำเป็นต้องใช้เวลาสั้นที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา การทดสอบอุณหภูมิในระบบฟลูอิดไคซ์เบดจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้เพื่อนำไปใช้ในขยายขนาดและระบบเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบจะเลือกช่วงอุณหภูมิ 900 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อสังเกตปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา



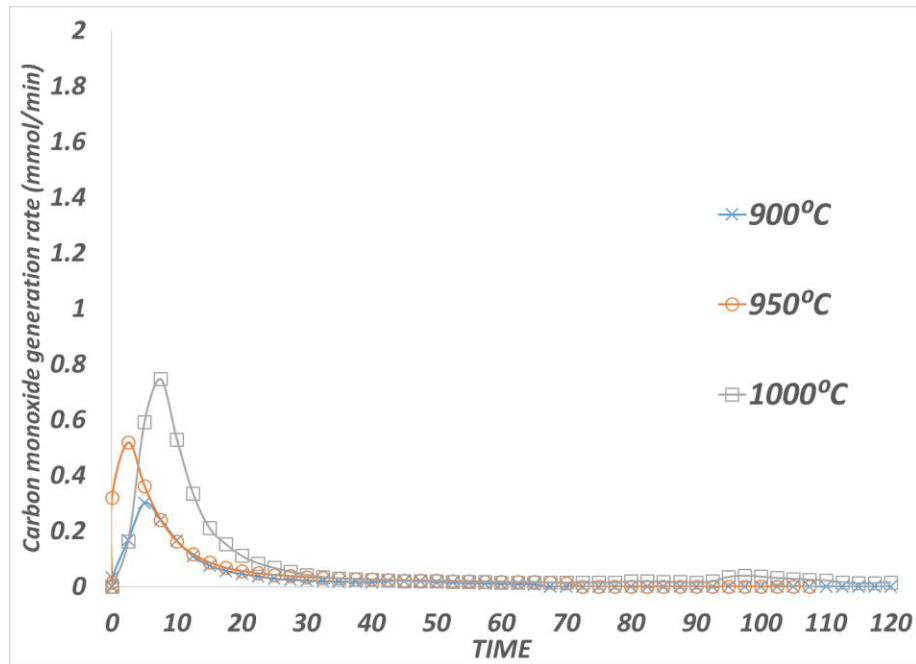
รูปที่ 4.27 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

รูปที่ 4.27 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกับถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงที่สุดคือ 950 องศาเซลเซียสและต่ำที่สุดที่ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองมีลักษณะเดียวกับมีเทน ปฏิกิริยารีดักชันระหว่างตัวพาออกซิเจนกับถ่านหินทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้น อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงจนทำให้แก๊สตัวพาเกิดการขยายตัว ส่งผลให้ปฏิกิริยาควรจะเกิดเป็น

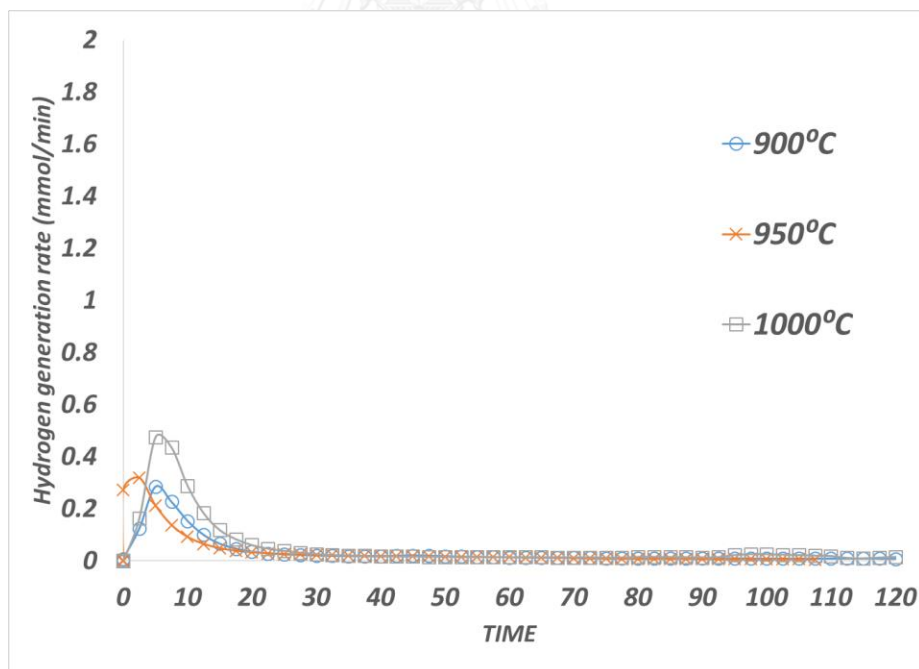
คาร์บอนไดออกไซด์ให้ปริมาณน้อยกว่าที่ควรเป็น จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าที่ 950 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.28 รูปแบบ XRD ของแคลเซียมซิลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงโครงสร้างของแคลเซียมซิลเฟตเริ่มเกิดโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ขึ้นเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้โครงสร้างแคลเซียมซิลไฟด์ก็มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน จึงเป็นการยืนยันในลักษณะของการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์ขึ้น



รูปที่ 4.28 รูปแบบ XRD ของตัวพาทออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.29 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด



รูปที่ 4.30 อัตราการเกิดไฮโดรเจนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด

รูปที่ 4.29 แสดงอัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกับถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นก็สูงตามเป็นแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกัน ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์นั้น ไม่ว่าจะเกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดจากแคลเซียมซัลเฟตหรือเหล็กออกไซด์ต่างเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงาน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น และเมื่อแก๊สตัวพาที่ทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดไชน์เบดนั้นขยายตัวมากขึ้นจากอุณหภูมิที่มาก อัตราการไหลของแก๊สก็จะสูงจนทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นมากขึ้นและปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์จึงลดลง

รูปที่ 4.30 แสดงอัตราการเกิดไฮโดรเจนอุณหภูมิต่างๆ สำหรับการเกิดไฮโดรเจนในปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินกับแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แก๊สที่ตรวจจับได้มีองค์ประกอบเทียบเท่ากับการเกิดการแตกสลายตัวของถ่านหินซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและเกิดขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกันคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณไฮโดรเจนที่ได้นั้นมากขึ้นตามเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ตารางที่ 4.2 ยังแสดงปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันที่สามารถตรวจจับได้ทั้งหมดทั้งในส่วนของการแตกสลายตัวและการเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชัน

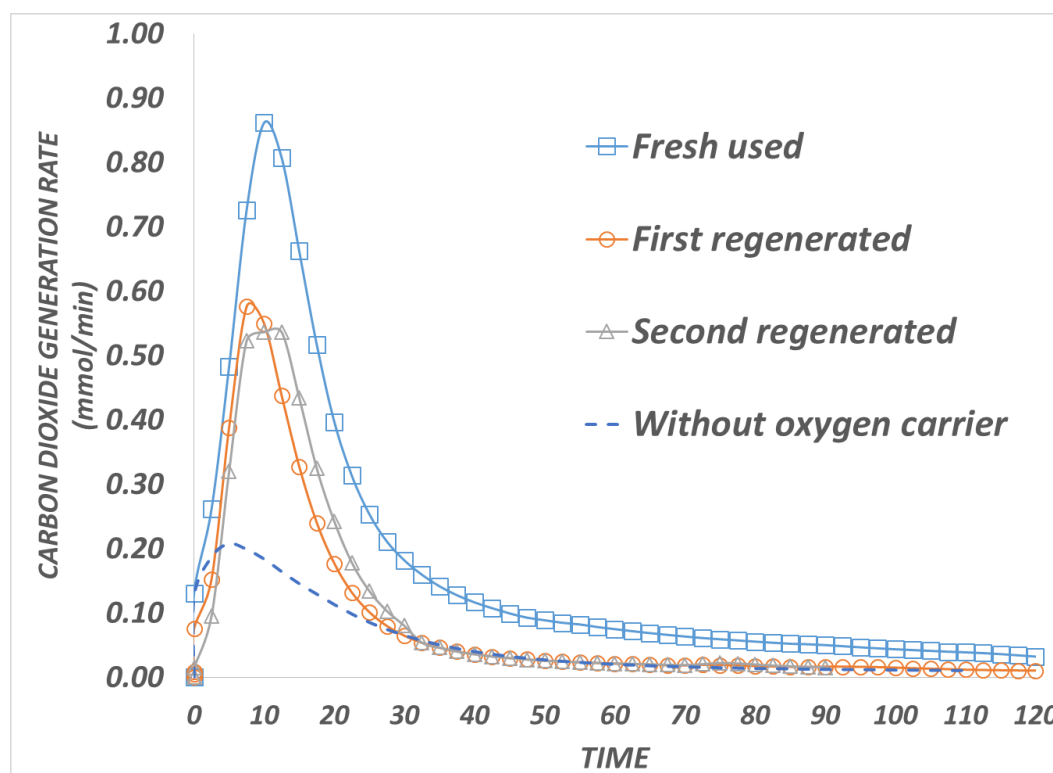
ตารางที่ 4.2 ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิต่างๆ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด

Components	900°C		950°C		1000°C	
	Blank	Reaction	Blank	Reaction	Blank	Reaction
H ₂	0.63	1.29	0.92	1.21	1.17	2.13
CH ₄	0.22	1.03	0.23	1.11	0.19	1.43
CO	0.47	1.57	0.57	2.89	0.85	4.35
CO ₂	0.84	7.06	1.01	12.23	1.10	10.68
C ₂ H ₄	0.03	0.09	0.01	0.08	0.02	0.14
C ₂ H ₆	0.02	0.09	0.02	0.07	0.02	0.09

การเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า แคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักสามารถเกิดปฏิกิริยากับถ่านหินได้จริงและการเกิดสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยารีดักชันอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 60 นาทีโดยประมาณ

4.6 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไชน์เบต ในอุณหภูมิกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

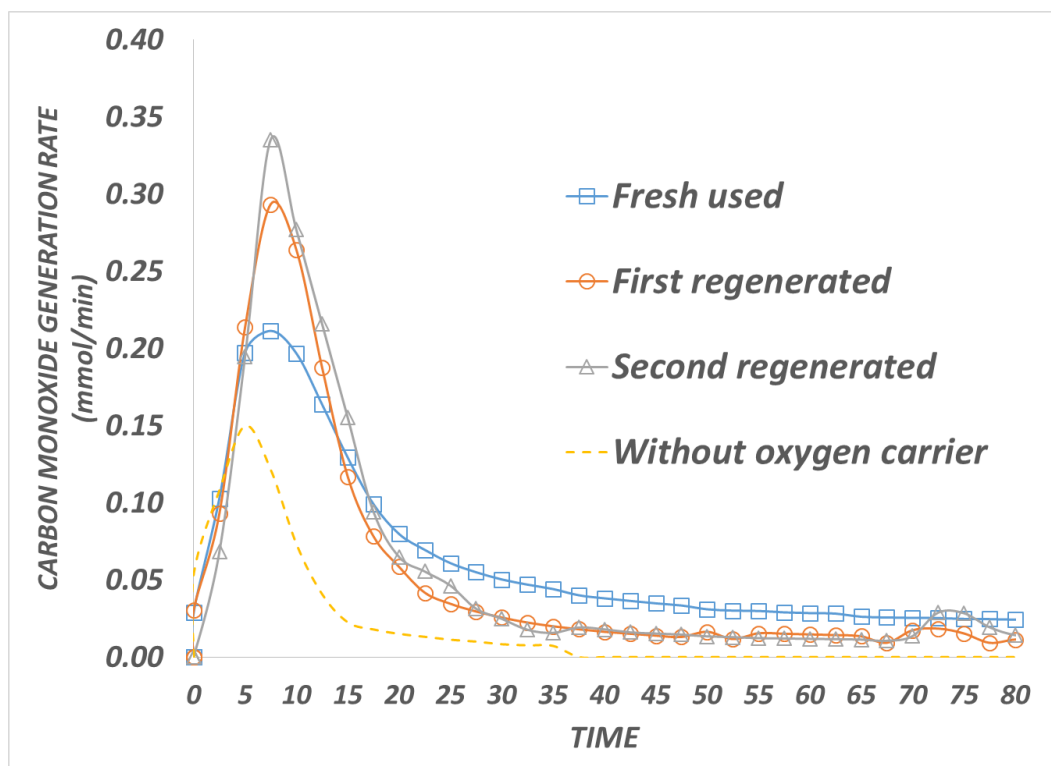
สำหรับการทดสอบกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงกับตัวพาออกซิเจนนั้น จะใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเพียง 200 มิลลิลิตรต่อนาทีเพื่อทำให้อุปกรณ์ตรวจจับแก๊สสามารถทำงานได้อย่างละเอียดมากขึ้น ทั้งนี้จะใช้การทดสอบในสภาวะฟลูอิดไชน์เบตที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.31 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยารีดักชันในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ฟลูอิดไชน์เบต ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

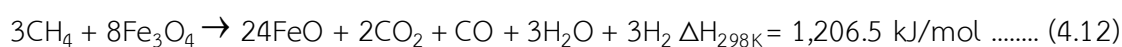
รูปที่ 4.31 แสดงอัตราการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในแต่ละรอบการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ในรอบแรกนั้นปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นด้วยอัตราสูงสุดที่ 0.86 มิลลิลิตรต่อนาทีและเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด 0.68 มิลลิโมลในระยะเวลา 140 นาที และเมื่อเกิดปฏิกิริยาในรอบที่ 2 และ 3 พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.55 มิลลิโมลต่อนาทีและเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด 0.46 และ 0.43 มิลลิโมลตามลำดับ ซึ่งปฏิกิริยาในรอบที่ 2 และ 3 นั้นลดลงมาอยู่ที่ร้อยละ 64 จากปฏิกิริยาแรก และมี

ความเสถียร ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาในลักษณะของฟลูอิด์เบดนั้นอนุภาคของเบตจะมีการขยับตัวอยู่ตลอดเวลาและทำให้เกิดการถ่ายเทอุณหภูมิอยู่เสมอ จึงทำให้โครงสร้างของอนุภาคแตกตัวออกได้ช้าลง



รูปที่ 4.32 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์จากปฏิกิริยารีดักชันในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ฟลูอิด์เบต ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

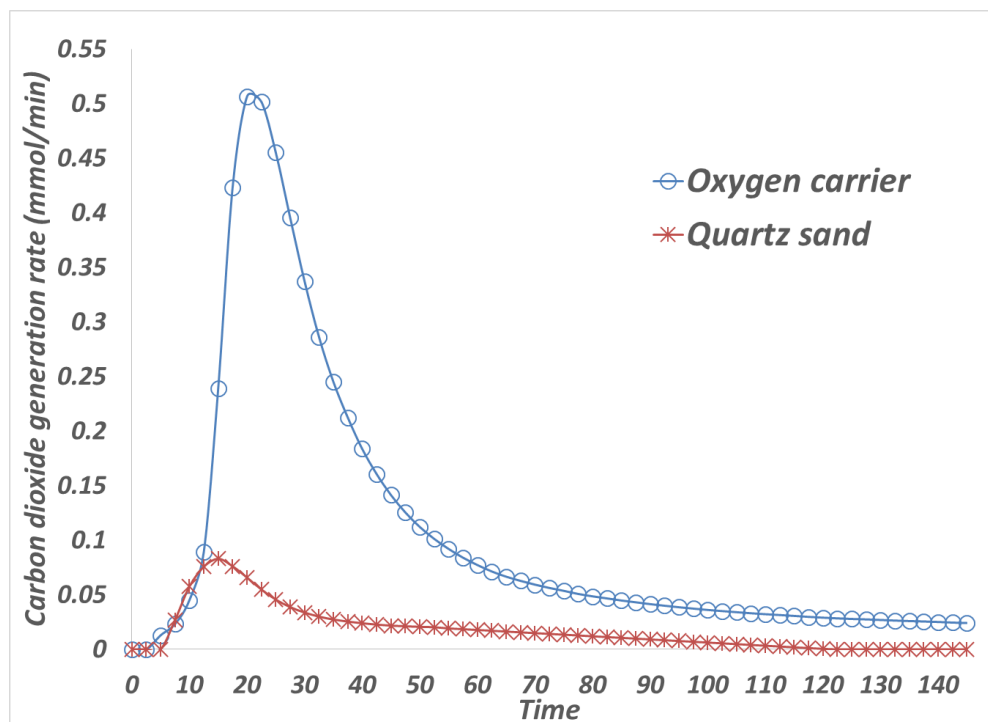
รูปที่ 4.32 แสดงการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนและถ่านหินที่ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าความสามารถในการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจาก เมื่อปริมาณของเหล็กออกไซด์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน บางส่วนไม่สามารถฟื้นฟูออกซิเจนในโครงสร้างได้ทุกอนุภาค และอยู่รูป Fe_3O_4 ซึ่งเป็นโครงสร้างรีดิวซ์ อัตราของออกซิเจนภายในโครงสร้างที่ลดต่ำลงเทียบกับถ่านหินนั้นมีอัตราส่วนที่ลดลง โอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จึงเกิดขึ้นได้มากกว่า นอกจากนั้นจากสมการปฏิกิริยาที่ 4.12 และ 4.13



พบว่าด้วยพลังงานที่ใช้ในการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ของ Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 เป็นปฏิกิริยาคูดพลังงานที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาระยะหนึ่ง สัดส่วนของ Fe_3O_4 ที่เพิ่มมากขึ้นและอัตราส่วนการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนต่อตัวพาออกซิเจนเป็น 2:3 ซึ่งเกิดได้ง่ายกว่า Fe_2O_3 ที่ใช้ 3:12 ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาในหลักจำนวนรอบปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้น อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเพิ่มขึ้น



4.7 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยตัวพาออกซิเจนปริมาณเกินพอร้อยละ 20 โดยโมล



รูปที่ 4.33 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยถ่านหินกับตัวพาออกซิเจนที่มากเกินพอ

สำหรับการทดลองนี้ ทำเพื่อทดสอบการเผาไหม้กับตัวพาออกซิเจนที่มากเกิดพอเพื่อดูการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ รูปที่ 4.32 แสดงการเผาไหม้ระหว่างถ่านหินกับแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักด้วยการใช้ปริมาณที่มากเกินพอร้อยละ 20 โดยโมลของออกซิเจนพบว่าเกิดการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเกิดในอัตราที่สูงในช่วง 60 นาทีแรกและปฏิกิริยายังสามารถดำเนินอย่างต่อเนื่อง อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 0.51 มิลลิโมลต่อนาที ซึ่งคิดเป็นผลรวมคาร์บอนไดออกไซด์ 0.40 มิลลิโมลในช่วง 140 นาที นอกจากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแก๊สเผาไหม้อื่นๆที่เกิดขึ้นพบว่าคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 85 ขององค์ประกอบแก๊สขาออกที่เกิดขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนของปริมาณออกซิเจนจากตัวพาออกซิเจนมีมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นเลือกเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น นอกจากนั้นองค์ประกอบของแก๊สอินทรีย์ดังเช่น มีเทน เอทิลีนและอีเทนนั้นมีปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับการทดสอบการสลายตัวของถ่านหิน เนื่องจากการปฏิกิริยารีดักชันกับตัวพาออกซิเจนมีปริมาณมากเพียงพอที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของปริมาณการผสมเหล็กออกไซด์ลงในตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซิลิเกต อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งและเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณของแก๊สองค์ประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา จากผลการทดลองสามารถสรุปออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของการผสมเหล็กออกไซด์กับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

การผสมตัวพาทออกซิเจนเหล็กออกไซด์ลงในแคลเซียมซิลิเกตที่ปริมาณร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ร้อยละ 10 และทำงานร่วมกันได้ที่ร้อยละ 20 แต่เมื่อใส่เหล็กออกไซด์มากเกินไป จะไม่ทำให้อัตราในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานคือแคลเซียมซิลิเกตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

5.1.2 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันกับตัวพาทออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

การทดสอบปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่ที่ 1,000 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นจุดที่อุณหภูมิสูงและทำให้อุณหภูมิของเหล็กออกไซด์นั้นเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อน จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นลดต่ำลง อุณหภูมิที่เหมาะสมกับตัวพาทออกซิเจนแคลเซียมซิลิเกตผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก คือที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

5.1.3 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง ที่อุณหภูมิกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

การทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งที่ 950 องศาเซลเซียสพบว่า ความสามารถของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทำปฏิกิริยากับมีเทนในปฏิกิริยารีดักชันได้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวพาออกซิเจนบริสุทธิ์ทั้ง 2 ชนิด และสามารถคืนสภาพกลับมาได้ แต่เนื่องจากตัวพาออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งใช้เวลานานจึงทำให้ตัวพาออกซิเจนเสื่อมสภาพลงและส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในรอบถัดไป

5.1.4 ผลของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบตกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

หลักการเลือกตัวพาออกซิเจนในการทดลองนี้คือการเลือกตัวพาออกซิเจนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณสูงสุด แคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยารีดักชันกับถ่านหิน พบว่า ตัวพาออกซิเจนผสมสามารถเกิดปฏิกิริยากับถ่านหินและทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลายชนิดออกมาได้ โดยลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่เกิดขึ้นพร้อมกันคือส่วนของการแตกสลายถ่านหินและส่วนของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

5.1.5 ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันด้วยถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบตกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

การทดสอบปฏิกิริยารีดักชันกับถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบตที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ 950 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสทำให้เกิดการขยายตัวมากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ และความสามารถในการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงนั้นเกิดขึ้นได้มากจึงทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

5.1.6 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบต ในอุณหภูมิกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

การทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสพบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากในรอบการเกิดปฏิกิริยาที่ 1 และลดต่ำลงในรอบปฏิกิริยาถัดไป ในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์ปริมาณมากขึ้นในทุกรอบการเกิดปฏิกิริยา

5.1.7 ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงด้วยตัวพาออกซิเจนปริมาณเกินพอร้อยละ 20 โดยโมล

การทดสอบการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสโดยมีปริมาณของตัวพาออกซิเจนเกินพอร้อยละ 20 โดยโมล พบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างแก๊สเผาไหม้ร้อยละ 85 โดยโมล

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงนั้นทำให้สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงขอเสนอแนะดังนี้

- ทำการทดสอบตัวพาออกซิเจนที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับถ่านหินชนิดสารระเหยต่ำได้ โดยไม่ต้องพึ่งการทำปฏิกิริยาการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification reaction) หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาได้โดยตรงกับถ่านหินหรือชีวมวลได้โดยตรง
- ทำการพัฒนาตัวพาออกซิเจนที่มีความสามารถในการทนความร้อนได้เป็นระยะเวลาที่ยาวนาน พร้อมทั้งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เป็นอย่างดี
- ทำการขยายสเกลเครื่องปฏิกรณ์ไม่ว่าจะเป็นแบบเบดนิ่งหรือฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อทำการทดสอบในระดับใหญ่
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ ควรสามารถตรวจสอบองค์ประกอบแก๊สได้ทุกชนิดและมีความความคงทนต่อสารระเหย นอกจากนี้ควรตรวจสอบได้ตลอดเวลาในลักษณะของเซนเซอร์ตรวจจับ
- เนื่องด้วยถ่านหินมีหลายชนิดและคุณภาพที่แตกต่างกัน จึงควรทดสอบในกระบวนการเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ

รายการอ้างอิง

1. Electricity generating authority of Thailand. *Introduction of coal*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: http://projects-pdp2010.egat.co.th/projects1/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=8.
2. Learning center of for earth science and astronomy. *Peat*. 2016 [cited 2016 10 October 2016].
3. Geoscience news and Information. *Lignite*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://geology.com/rocks/coal.shtml>.
4. Proteux global energy. *Sub-bituminous*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://proteux.com/product/proteux-sub-bituminous-coal/>.
5. Proteux global energy. *Bituminous*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://proteux.com/product/proteux-bituminous-coal>.
6. Proteux global energy. *Antracite*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://proteux.com/product/proteux-anthracite-coal/>.
7. Green to earth. *Global warming*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.greentheearth.info/>.
8. Thailand greenhouse gas management organization. *Global warming potential*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=7&s2=16>.
9. Thailand greenhouse gas management organization. *Effect of global warming*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=7&s2=18&sub3=sub3>.
10. Intergovernment panel on climate change. *GWP of greenhouse gasses*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/016.htm>.
11. Carbon capture and storage association. *Carbon capture and storage*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/>.

12. DNV GL safeguarding life, p.a.t.e. *CCS transportation*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://blogs.dnvgl.com/software/2014/04/carbon-capture-storage-ccs-lets-make-happen>.
13. Transition Network. *CCS storage*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <https://transitionnetwork.org/blogs/rob-hopkins/2014-03/prof-myles-allen-climate-change-flooding-and-carbon-capture-silver-bullet>.
14. Rackley, S.A., *Carbon Capture and Storage*. 1 ed, ed. s. Edition. 2016: Elsevier.
15. Carbon capture and storage association. *Pre combustion*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/capture/pre-combustion-capture/>.
16. Global CCS institute. *Pre combustion application*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <https://www.globalccsinstitute.com/content/capture>.
17. Department of primary industries and mines. *Integrated gasification combined cycle*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://lc.dpim.go.th/kb/922>.
18. environment, G.f.o.h.a.t. *Ultra-supercritical steam cycles*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.greenfacts.org/glossary/pqrs/supercritical-ultra-supercritical-technology.htm>.
19. Global CCS institute. *Advantages and disadvantages of major CO₂ capture technologies(pre combustion)*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/technology-options-co2-capture/advantages-and-disadvantages-major-co2-capture>.
20. Global CCS institute. *Advantages and disadvantages of major CO₂ capture technologies(post combustion)*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/technology-options-co2-capture/advantages-and-disadvantages-major-co2-capture>.

21. World nuclear association. *Clean coal technology*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/clean-coal-technologies.aspx>.
22. Department of primary industries and mines. *Coal gasification*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://lc.dpim.go.th/kb/921>.
23. Greenpeace international. *Clean coal technology situation*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: http://www.greenpeace.org/seasia/th/PageFiles/673080/EndCoalCleanCoalFacsheet_TH.pdf.
24. T. Mattisson, *Materials for Chemical-Looping with Oxygen Uncoupling*. Hindawi Publishing Corporation ISRN Chemical Engineering, 2013. **2013**(ID 526375): p. 19 pages.
25. A. Fossdal, E.B., B.A. Øye, C. Schøning, I. Kaus, T. Mokkelbost, Y. Larring,, *Study of inexpensive oxygen carriers for chemical looping combustion*. International Journal of Greenhouse Gas Control 2010. **5**: p. 483–488.
26. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Calcium Sulfate*, F. Wirsching, Editor. 2000.
27. survey, U.S.G. *Gypsum*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gypsum/mcs-2008-gypsu.pdf>.
28. Center for disease control and prevention. *Calcium sulfate*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0095.html>.
29. Kurt J. Lesker Company. *Iron oxide safety data sheet*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.lesker.com/msds/pdfs/cd72f997d54d3bc42d09a34d6bdca56ebf2ea7fd3a31f08843ec5bd413.pdf>.
30. nations, F.a.a.o.o.t.u. *Ferric oxide*. 2016 [cited 2016 10 October 2016]; Available from: <http://www.fao.org/ag/agn/jecfa-additives/specs/monograph5/additive-238-m5.pdf>.

31. E. R. Monazam, R.W.B., R. Siriwardane, G. Richards, S. Carpenter,, *Kinetics of the reduction of hematite (Fe₂O₃) by methane (CH₄) during chemical looping combustion: A global mechanism*. Chemical Engineering Journal, 2013. **232**: p. 478-487.
32. Q. Song, R.X., Z. Deng, L. Shen, M. Zhang,, *Reactivity of a CaSO₄-oxygen carrier in chemical-looping combustion of methane in a fixed bed reactor*. Korean J. Chem. Eng, 2008. **26**(2): p. 592-602.
33. D. D. Miller, R.S., J. Poston,, *Fluidized-bed and fixed-bed reactor testing of methane chemical looping combustion with MgO-promoted hematite*. Applied Energy, 2015. **146**: p. 111-121.
34. M. Rydén, M.K., D. Jing, A. Hedayati, T. Mattisson, A. Lyngfelt, *(Fe_{1-x}Mnx)TiO₃ based oxygen carriers for chemical-looping combustion and chemical-looping with oxygen uncoupling*. Energy Procedia, 2014. **51**: p. 85 – 98.
35. Y. Chen, N.G., Z. Wang, F. Li,, *Investigation of perovskite supported composite oxides for chemical looping conversion of syngas*. Fuel, 2014. **134**: p. 521-530.
36. R. Siriwardane, H.T., D. Miller, G. Richards,, *Fluidized bed testing of commercially prepared MgO-promoted hematite and CuO–Fe₂O₃ mixed metal oxide oxygen carriers for methane and coal chemical looping combustion*. Applied Energy, 157. **157**: p. 384-357.
37. W. Yang, H.Z., K. Wang, C. Zheng,, *Synergistic effects of mixtures of iron ores and copper ores as oxygen carriers in chemical-looping combustion*. Proceedings of the Combustion Institute, 2015. **35**: p. 2811-2818.
38. M. Ismail, W.L., M. T. Dunstan, S. A. Scott,, *Development and performance of iron based oxygen carriers containing calcium ferrites for chemical looping combustion and production of hydrogen*. International journal of hydrogen energy, 2016. **41**: p. 4073-4084.
39. H.C. Wu, Y.K., H.H. Tsai, Y.L. Kuo, Y.H. Tseng,, *Rice husk as solid fuel for chemical looping combustion in an annular dual-tube moving bed reactor*. Chemical Engineering Journal, 2015. **280**: p. 82-89.

40. E. Demirel, N.A., *Thermodynamic Modeling of Water-Gas Shift Reaction in Supercritical Water* Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2012. **2**.
41. R. Siriwardane, W.B., J. Riley, H. Tian, G. Richards,, *Investigation of reactions in a fluidized bed reactor during chemical looping combustion of coal/steam with copper oxide-iron oxide-alumina oxygen carrier*. Applied Energy, 2016. **183**: p. 1550–1564.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟี

เครื่องไมโครแก๊สโครมาโตกราฟีจากบริษัท Agilent โมเดล 490 gas chromatograph เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยแก๊สผลิตภัณฑ์จะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (column) ที่บรรจุสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับและมีแก๊สตัวพาเป็นเฟสเคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์และเข้าสู่เครื่องตรวจวัด สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะบันทึกเป็นโครมาโตแกรม โดยประกอบด้วย

1. แก๊สตัวพา (carrier gas)

แก๊สตัวพาเป็นแก๊สที่ใช้ในการพาแก๊สตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์ โดยการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สต้องมีค่าเหมาะสมทั้งปริมาณและคุณภาพ คุณสมบัติของแก๊สตัวพา คือ มีความเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับแก๊สตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำ ราคาไม่แพง

2. คอลัมน์ (column)

คอลัมน์เป็นส่วนที่แก๊สตัวอย่างไหลผ่าน สารที่บรรจุด้านในของคอลัมน์จะทำหน้าที่แยกชนิดแก๊สตัวอย่างออกจากกันตามหลักการของโครมาโตกราฟี

3. เครื่องตรวจวัด (detector)

เครื่องตรวจวัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบอกปริมาณและคุณภาพของแก๊สตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ เครื่องตรวจวัดจึงเป็นอุปกรณ์ที่ต้องตรวจวัดสัญญาณของสารในลักษณะต่างๆได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ในปัจจุบันตัวตรวจวัดส่วนใหญ่เป็นในลักษณะของ thermal conductivity detector (TCD) และ flame ionization detector (FID)

การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านหิน

1. การวิเคราะห์ความชื้นตามหลักของ ASTM D3173-00

ทำการชั่งถ่านหินตัวอย่างปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยครุชิวีล (crucible) จากนั้นนำไปอบในตู้อบความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งถ่านหินหลังอบ โดยสามารถคำนวณหาปริมาณความชื้นเป็นร้อยละได้ โดย

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \left(\frac{\text{น้ำหนักของถ่านหินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักของถ่านหินหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของถ่านหินก่อนอบ}} \right) \times 100$$

2. การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยตามหลักของ ASTM D3175-00

ชั่งน้ำหนักของถ่านหินตัวอย่างปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยครุชิวีลและปิดฝา นำไปเผาในเตาเผาแบบท่อ (Tubular furnace) ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาที ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนักถ่านหินหลังเผา โดยสามารถคำนวณปริมาณสารระเหยเป็นร้อยละได้โดย

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \left(\frac{\text{น้ำหนักของถ่านหินก่อนเผา} - \text{น้ำหนักของถ่านหินหลังเผา}}{\text{น้ำหนักของถ่านหินก่อนเผา}} \right) \times 100$$

3. การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าตามหลักของ ASTM D3174-00

ชั่งน้ำหนักของถ่านหินตัวอย่างปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยครุชิวีลและปิดฝา จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเผาต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนักถ่านหิน

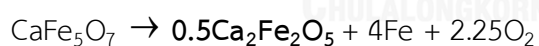
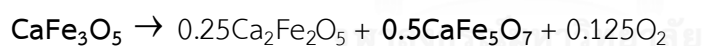
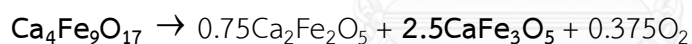
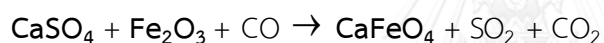
$$\text{ร้อยละเถ้า} = \left(\frac{\text{น้ำหนักของเถ้า}}{\text{น้ำหนักของถ่านหินก่อนเผา}} \right) \times 100$$

การคำนวณความหนาแน่นของถ่านหินและตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็ก
ออกไซด์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

1. ทำการชั่งถ่านหินหรือตัวพาออกซิเจนปริมาณ 2 กรัม
2. เทสารลงในกระบอกตวงขนาดเล็กพร้อมทั้งเติมน้ำลงไป 5.00 มิลลิลิตร
3. ทำการบันทึกค่าปริมาตรที่อ่านได้จากสเกลวัดของกระบอกตวง
4. ทำการคำนวณจากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของอนุภาค} = \frac{\text{น้ำหนักอนุภาค}}{\text{ปริมาตรหลังเติมน้ำ} - \text{ปริมาตรน้ำที่เติม}}$$

การเกิดปฏิกิริยาการหลอมตัวระหว่างแคลเซียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์



ภาคผนวก ข

การคำนวณ

1. การคำนวณความสามารถในการส่งออกซิเจนจากแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์

การคำนวณความสามารถในการส่งออกซิเจนจากตัวพาออกซิเจนนั้นสามารถหาได้จากผลต่างของโลหะรูปออกไซด์และรีดิวซ์ โดยเป็นไปดังสมการ ข.1

$$R_0 = \frac{m_{ox} - m_{red}}{m_{ox}} \quad \dots\dots\dots(ข.1)$$

โดย

R_0 = ความสามารถในการส่งออกซิเจนของตัวพาออกซิเจน

m_{ox} = มวลโมเลกุลของตัวพาออกซิเจนในรูปออกไซด์

m_{red} = มวลโมเลกุลของตัวพาออกซิเจนในรูปรีดิวซ์

การคำนวณความสามารถในการส่งออกซิเจนของแคลเซียมซัลเฟต

$$R_0 = \frac{m_{CaSO_4} - m_{CaS}}{m_{CaSO_4}}$$

$$R_0 = \frac{136.14 - 72.17}{136.14}$$

$$R_0 = 0.47$$

ความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนของแคลเซียมซัลเฟตมีค่า 0.47

การคำนวณความสามารถในการส่งออกซิเจนของเหล็กออกไซด์

$$R_0 = \frac{m_{Fe_2O_3} - m_{Fe}}{m_{Fe_2O_3}}$$

$$R_0 = \frac{159.69 - 55.86}{159.69}$$

$$R_0 = 0.65$$

ความสามารถในการส่งออกซิเจนของเหล็กออกไซด์มีค่า 0.65

2. การคำนวณเวลาในการทำปฏิกิริยากับตัวพาออกซิเจน

เวลาในการทำปฏิกิริยา (gas space velocity, GSV) เป็นค่าที่ใช้ในการบอกปริมาณเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ สามารถคำนวณได้ดังสมการ ข.2

$$GSV = \frac{\text{Flow rate}}{\text{Bed volume}} \quad \dots\dots\dots (\text{ข.2})$$

ค่าที่ใช้ในการคำนวณในเครื่องปฏิกรณ์เบตหนึ่ง

- อัตราการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีค่า 50 มิลลิลิตรต่อนาที
- การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ 1 บรรยากาศ
- กำหนดให้ใช้ค่าคงที่ของแก๊สที่ $82.06 \text{ cm}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- ความสูงของเบตเมื่อบรรจุแคลเซียมซัลเฟตลงในเครื่องปฏิกรณ์ 2.5 เซนติเมตร
- ความสูงของเบตเมื่อบรรจุเหล็กออกไซด์ลงในเครื่องปฏิกรณ์ 1.2 เซนติเมตร
- ความสูงของเบตเมื่อบรรจุตัวพาออกซิเจนผสมลงในเครื่องปฏิกรณ์ 2.0 เซนติเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเครื่องปฏิกรณ์ 1.6 เซนติเมตร

สำหรับองค์ประกอบแก๊สแต่ละองค์ประกอบ

ไนโตรเจนที่ 25 องศาเซลเซียส $PV = nRT$

$$n = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

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

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

ไนโตรเจนที่ 0 องศาเซลเซียส $P\dot{V} = nRT$

$$\dot{V} = \frac{nTR}{P}$$

$$\dot{V}_{N_2} = \frac{(1.84 \times 10^{-3}\text{ mol}/\text{min})(82.06\text{ cm}^3\text{ atm}/\text{molK})(273\text{K})}{(1\text{atm})}$$

$$\dot{V}_{N_2} = 44.22\text{ ml}/\text{min}$$

มีเทนที่ 25 องศาเซลเซียส $P\dot{V} = nRT$

$$n = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

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

$$n = 0.20 \times 10^{-3} \text{ mol}/\text{min}$$

มีเทนที่ 0 องศาเซลเซียส

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

$$\dot{V} = \frac{nTR}{P}$$

$$\dot{V}_{CH_4} = \frac{(0.20 \times 10^{-3} \text{ mol}/\text{min})(82.06 \text{ cm}^3 \text{ atm}/\text{molK})(273 \text{ K})}{(1 \text{ atm})}$$

$$\dot{V}_{CH_4} = 4.57 \text{ ml}/\text{min}$$

ที่สภาวะ STD มีปริมาตรแก๊สทั้งหมด

$$\dot{V}_{Total} = \dot{V}_{N_2} + \dot{V}_{CH_4}$$

$$\dot{V}_{Total} = 44.22 + 4.57$$

$$\dot{V}_{Total} = 48.79 \text{ ml}/\text{min}$$

ปริมาตรสารในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อแคลเซียมซัลเฟตมีความสูง 2.5 เซนติเมตร

$$V_{CaSO_4} = \pi r^2 l$$

$$V_{CaSO_4} = \pi (0.8 \text{ cm})^2 (2.5 \text{ cm})$$

$$V_{CaSO_4} = 5.03 \text{ cm}^3$$

ค่า GSV มีค่า

$$GSV = \frac{\dot{V}_{Total}}{V_{CaSO_4}}$$

$$GSV = \frac{45.79 \text{ cm}^3 / \text{min}}{5.03 \text{ cm}^3}$$

$$GSV = 9.10 \text{ min}^{-1}$$

แคลเซียมซัลเฟตปริมาณ 2 กรัมที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตรสามารถทำปฏิกิริยากับมีเทนได้ 9.10 ต่อนาที

ปริมาตรสารในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเหล็กออกไซด์มีความสูง 1.2 เซนติเมตร

$$V_{Fe_2O_3} = \pi r^2 l$$

$$V_{Fe_2O_3} = \pi (0.8 \text{ cm})^2 (1.2 \text{ cm})$$

$$V_{Fe_2O_3} = 2.41 \text{ cm}^3$$

ค่า GSV มีค่า

$$GSV = \frac{\dot{V}_{Total}}{V_{Fe_2O_3}}$$

$$GSV = \frac{45.79 \text{ cm}^3 / \text{min}}{2.41 \text{ cm}^3}$$

$$GSV = 19.00 \text{ min}^{-1}$$

เหล็กออกไซด์ปริมาณ 2 กรัมที่มีความสูง 1.2 เซนติเมตรสามารถทำปฏิกิริยากับมีเทนได้ 19.00 ต่อนาที

ปริมาตรสารในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อตัวพาออกซิเจนผสมมีความสูง 2.0 เซนติเมตร

$$V_{20\%wtFe_2O_3} = \pi r^2 l$$

$$V_{20\%wtFe_2O_3} = \pi (0.8 \text{ cm})^2 (2.0 \text{ cm})$$

$$V_{20\%wtFe_2O_3} = 4.02 \text{ cm}^3$$

ค่า GSV มีค่า

$$GSV = \frac{\dot{V}_{Total}}{V_{20\%wtFe_2O_3}}$$

$$GSV = \frac{45.79 \text{ cm}^3 / \text{min}}{4.02 \text{ cm}^3}$$

$$GSV = 11.39 \text{ min}^{-1}$$

ตัวพาออกซิเจนผสมเหล็กออกไซด์ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปริมาณ 2 กรัมที่มีความสูง 2.0 เซนติเมตรสามารถทำปฏิกิริยากับมีเทนได้ 11.39 ต่อนาที

3. การคำนวณหาปริมาณสารของแก๊สผลิตภัณฑ์จากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

ในการทดสอบปฏิกิริยาทั้งในปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันจะเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ขึ้น ซึ่งแก๊สเหล่านี้จะถูกส่งไปตามท่อเพื่อทำการตรวจสอบชนิดและปริมาณด้วยเครื่องมือโครมาโทกราฟี หลังจากเครื่องตรวจวัดเสร็จจะแสดงผลออกมาเป็นค่าของพื้นที่ใต้กราฟแต่ละองค์ประกอบชนิดสาร ซึ่งสามารถคำนวณเป็นปริมาณสารได้

เมื่อเริ่มต้นการทดลองจะต้องทำการตรวจแก๊สมาตรฐาน (standard gas) ที่มีความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดร้อยละ 1 โดยปริมาตร โดยพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากโครมาโตแกรมจะมีค่าพื้นที่เทียบเท่ากับปริมาณสารที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 สามารถคำนวณได้ตามสมการ ข.3

$$\%Vol = \frac{\text{Sample area}}{\text{Standard area}} \dots\dots\dots (\text{ข.3})$$

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างแก๊สมาตรฐาน พื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นที่ได้จากโครมาโตแกรม

ชนิดของแก๊ส	พื้นที่[uV.Min]	อัตราส่วน(%vol Balance in N ₂)
H ₂	1663.7	1
CH ₄	380.1	1
CO	142.5	1
CO ₂	528.5	1
C ₂ H ₄	548.9	1
C ₂ H ₆	596.1	1

ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดสอบหากเมื่อพบคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ 2000 uV.Min นั้นหมายความว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มีค่าร้อยละ 3.78 โดยปริมาตร หลังจากหาคำนวณร้อยละโดยปริมาตรของสารผลิตภัณฑ์แต่ละตัวออกมาได้จะทำการคำนวณอัตราการเกิดสารแต่ละชนิดโดยจะใช้หลักการคำนวณจากปริมาณสารสัมพันธ์ดังสมการจากสมการ

$$PV = nRT$$

กำหนดให้อัตราการไหลที่บริเวณขาออกรวมที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

$$n_{CO_2} = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

$$n_{CO_2} = \frac{(1\text{atm})(3.78\%vol)(50\text{ml}/\text{min})}{(0.08206\text{atmL}/\text{molK})(298\text{K})}$$

$$n_{CO_2} = 0.07729 \times 10^{-3} \text{ mol}/\text{min}$$

$$n_{CO_2} = 0.07729 \text{ mmol}/\text{min}$$

ณ จุดที่เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟีตรวจพบคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ 2000 uV.Min หลังจากที่ได้คำนวณแล้วได้อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.07729 มิลลิโมลต่อนาที

4. การคำนวณอัตราส่วนร้อยละของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลังเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน

การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาทำเพื่อใช้พูดการเกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและความสามารถในการฟื้นฟูออกซิเจนภายในโครงสร้างของตัวพ้ออกซิเจน สำหรับการคำนวณจะเป็นไปตามสมการที่ ข.4

$$\%W = \left(\frac{m_{\text{initial}} - (m_{\text{initial}} - m)}{m_{\text{initial}}} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (\text{ข.4})$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดสอบแคลเซียมซัลเฟตโดยเริ่มต้นใช้ 2.00 กรัม หลังเกิดปฏิกิริยาเหลือ 1.5 กรัม

$$W = \frac{2.0 - (2.0 - 1.5)}{2.0} \times 100$$

$$W = 75\%$$

ดังนั้นหลังเกิดปฏิกิริยาจึงเหลือน้ำหนักเพียงร้อยละ 75

5. การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดภาวะฟลูอิดไคซ์ (Minimum fluidization velocity)

5.1. การคำนวณค่าตัวเลขเรโนลด์ (Reynold number) เพื่อใช้ในการเลือกสูตรการคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์

เราสามารถคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดภาวะฟลูอิดไคซ์ได้โดยการเริ่มต้นหาภาวะของการไหลจากการคำนวณค่าตัวเลขเรโนลด์จากสมการที่ ข.5

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad \dots\dots\dots (ข.5)$$

โดย

Re	=	ตัวเลขเรโนลด์
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ (0.2795 kg/m ³)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (4 mm)
v	=	ความเร็วแก๊สตัวพาที่ใช้ (0.00163 m/s)
μ	=	ความหนืดของแก๊สตัวพาที่ใช้ (4.75 x 10 ⁻⁵ kg/m•s)

$$Re = \frac{(0.2795 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0.004\text{m})(0.00163 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{4.75 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}$$

$$Re = 0.0384$$

5.2. การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์

หลังจากคำนวณตัวเลขเรโนลด์ พบว่ามีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) การคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ จึงเลือกใช้สมการเออร์แกน (Ergun equation) จากสมการ ข.6

$$u_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g)}{150 \mu_g} g \frac{(\epsilon_{mf})^3}{(1 - \epsilon_{mf})} \quad \dots\dots\dots (ข.6)$$

โดย

u_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอซ์
d_p	=	ขนาดอนุภาคที่ใช้งาน
ρ_s	=	ความหนาแน่นอนุภาค
ρ_g	=	ความหนาแน่นของแก๊สตัวพา
μ_g	=	ความหนืดของแก๊สตัวพา
ε_{mf}	=	สัดส่วนของว่างของเบดในขณะเกิดฟลูอิดไอซ์

$$u_{mf} = \frac{(0.79 \times 5.6 \times 10^{-5})^2 (1251.38 - 0.28)}{150} \frac{9.8 (0.53)^3}{4.75 \times 10^{-5} (1 - 0.53)}$$

$$u_{mf} = 0.001068 \frac{m}{s}$$

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลอง

1. ผลของการผสมเหล็กออกไซด์กับตัวพาออกซิเจนแคลเซียมซัลเฟตในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ตารางที่ ค.1 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวพาออกซิเจนชนิดต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
0.0	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.7	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.3	500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.0	750	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6.7	950	0.0000	0.0000	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8.3	950	0.0000	0.0000	0.0006	0.0023	0.0082	0.0000	0.0000
10.0	950	0.0000	0.0000	0.0005	0.0032	0.0082	0.0000	0.0000
11.7	950	0.0000	0.0000	0.0005	0.0050	0.0085	0.0038	0.0000
13.3	950	0.0000	0.0028	0.0006	0.0076	0.0094	0.0056	0.0000
15.0	950	0.0025	0.0053	0.0011	0.0111	0.0111	0.0079	0.0000
16.7	950	0.0030	0.0101	0.0019	0.0153	0.0138	0.0108	0.0025
18.3	950	0.0036	0.0174	0.0031	0.0202	0.0176	0.0142	0.0033
20.0	950	0.0043	0.0263	0.0045	0.0255	0.0224	0.0180	0.0046
21.7	950	0.0051	0.0357	0.0062	0.0314	0.0279	0.0221	0.0065
23.3	950	0.0059	0.0446	0.0079	0.0373	0.0341	0.0265	0.0092
25.0	950	0.0067	0.0525	0.0098	0.0395	0.0407	0.0310	0.0125
26.7	950	0.0075	0.0590	0.0116	0.0449	0.0474	0.0355	0.0167
28.3	950	0.0083	0.0649	0.0134	0.0559	0.0540	0.0401	0.0216
30.0	950	0.0091	0.0690	0.0152	0.0619	0.0607	0.0447	0.0271
31.7	950	0.0107	0.0723	0.0169	0.0679	0.0671	0.0491	0.0332
33.3	950	0.0115	0.0744	0.0186	0.0735	0.0733	0.0534	0.0396
35.0	950	0.0122	0.0757	0.0202	0.0790	0.0791	0.0575	0.0464
36.7	950	0.0130	0.0764	0.0218	0.0842	0.0847	0.0614	0.0534
38.3	950	0.0137	0.0765	0.0234	0.0891	0.0900	0.0651	0.0606
40.0	950	0.0144	0.0761	0.0248	0.0937	0.0949	0.0686	0.0675
41.7	950	0.0152	0.0753	0.0263	0.0980	0.0993	0.0719	0.0744
43.3	950	0.0159	0.0743	0.0277	0.1021	0.1035	0.0750	0.0810

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
45.0	950	0.0159	0.0730	0.0291	0.1058	0.1073	0.0778	0.0871
46.7	950	0.0166	0.0715	0.0304	0.1093	0.1108	0.0804	0.0933
48.3	950	0.0174	0.0699	0.0317	0.1124	0.1141	0.0828	0.0990
50.0	950	0.0181	0.0682	0.0329	0.1154	0.1171	0.0850	0.1043
51.7	950	0.0189	0.0664	0.0341	0.1182	0.1199	0.0870	0.1093
53.3	950	0.0197	0.0647	0.0353	0.1205	0.1221	0.0888	0.1138
55.0	950	0.0206	0.0628	0.0365	0.1228	0.1243	0.0904	0.1179
56.7	950	0.0215	0.0609	0.0377	0.1247	0.1264	0.0919	0.1216
58.3	950	0.0225	0.0590	0.0388	0.1265	0.1280	0.0932	0.1247
60.0	950	0.0235	0.0569	0.0399	0.1282	0.1295	0.0944	0.1276
61.7	950	0.0246	0.0551	0.0409	0.1296	0.1309	0.0954	0.1300
63.3	950	0.0257	0.0534	0.0419	0.1310	0.1321	0.0963	0.1320
65.0	950	0.0269	0.0517	0.0430	0.1322	0.1332	0.0973	0.1339
66.7	950	0.0282	0.0500	0.0440	0.1331	0.1339	0.0980	0.1351
68.3	950	0.0294	0.0483	0.0450	0.1339	0.1347	0.0985	0.1363
70.0	950	0.0307	0.0468	0.0460	0.1346	0.1355	0.0990	0.1373
71.7	950	0.0321	0.0452	0.0470	0.1352	0.1362	0.0994	0.1377
73.3	950	0.0334	0.0438	0.0478	0.1357	0.1368	0.0997	0.1381
75.0	950	0.0348	0.0424	0.0489	0.1361	0.1373	0.0999	0.1384
76.7	950	0.0348	0.0410	0.0498	0.1362	0.1378	0.1001	0.1382
78.3	950	0.0361	0.0398	0.0506	0.1366	0.1381	0.1001	0.1380
80.0	950	0.0374	0.0386	0.0513	0.1367	0.1385	0.1000	0.1374
81.7	950	0.0388	0.0375	0.0527	0.1366	0.1391	0.0998	0.1368
83.3	950	0.0402	0.0364	0.0537	0.1364	0.1394	0.0995	0.1358
85.0	950	0.0415	0.0354	0.0547	0.1366	0.1398	0.0990	0.1347
86.7	950	0.0428	0.0344	0.0557	0.1363	0.1402	0.0983	0.1339
88.3	950	0.0442	0.0335	0.0565	0.1361	0.1408	0.0975	0.1325
90.0	950	0.0456	0.0327	0.0574	0.1360	0.1411	0.0966	0.1308
91.7	950	0.0469	0.0318	0.0592	0.1358	0.1414	0.0956	0.1285
93.3	950	0.0483	0.0310	0.0592	0.1355	0.1418	0.0945	0.1271
95.0	950	0.0496	0.0304	0.0600	0.1353	0.1422	0.0933	0.1245
96.7	950	0.0509	0.0297	0.0609	0.1350	0.1430	0.0919	0.1229
98.3	950	0.0521	0.0291	0.0627	0.1346	0.1431	0.0906	0.1203
100.0	950	0.0534	0.0285	0.0636	0.1342	0.1439	0.0892	0.1179
101.7	950	0.0546	0.0280	0.0647	0.1342	0.1440	0.0877	0.1160
103.3	950	0.0558	0.0275	0.0657	0.1338	0.1446	0.0862	0.1139
105.0	950	0.0570	0.0270	0.0669	0.1336	0.1452	0.0848	0.1117

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
106.7	950	0.0582	0.0266	0.0678	0.1335	0.1454	0.0833	0.1092
108.3	950	0.0594	0.0262	0.0689	0.1333	0.1460	0.0818	0.1067
110.0	950	0.0605	0.0258	0.0701	0.1332	0.1465	0.0803	0.1049
111.7	950	0.0616	0.0255	0.0714	0.1331	0.1469	0.0789	0.1028
113.3	950	0.0627	0.0252	0.0725	0.1330	0.1473	0.0774	0.1006
115.0	950	0.0638	0.0249	0.0737	0.1330	0.1478	0.0760	0.0982
116.7	950	0.0648	0.0246	0.0749	0.1329	0.1481	0.0745	0.0961
118.3	950	0.0658	0.0244	0.0773	0.1330	0.1483	0.0732	0.0941
120.0	950	0.0668	0.0241	0.0788	0.1330	0.1484	0.0718	0.0922
121.7	950	0.0678	0.0239	0.0802	0.1331	0.1480	0.0705	0.0903
123.3	950	0.0687	0.0237	0.0817	0.1333	0.1474	0.0692	0.0888
125.0	950	0.0696	0.0235	0.0831	0.1335	0.1469	0.0679	0.0866
126.7	950	0.0705	0.0233	0.0845	0.1337	0.1455	0.0667	0.0848
128.3	950	0.0714	0.0231	0.0860	0.1349	0.1442	0.0655	0.0835
130.0	950	0.0722	0.0230	0.0873	0.1344	0.1423	0.0643	0.0814
131.7	950	0.0731	0.0228	0.0888	0.1348	0.1407	0.0631	0.0802
133.3	950	0.0739	0.0226	0.0903	0.1351	0.1384	0.0620	0.0786
135.0	950	0.0746	0.0225	0.0918	0.1356	0.1357	0.0610	0.0770
136.7	950	0.0754	0.0223	0.0930	0.1362	0.1333	0.0599	0.0755
138.3	950	0.0761	0.0222	0.0944	0.1367	0.1311	0.0589	0.0741
140.0	950	0.0769	0.0221	0.0971	0.1373	0.1281	0.0579	0.0723
141.7	950	0.0776	0.0220	0.0978	0.1379	0.1256	0.0570	0.0712
143.3	950	0.0782	0.0219	0.0989	0.1385	0.1229	0.0559	0.0696
145.0	950	0.0790	0.0217	0.0997	0.1391	0.1204	0.0551	0.0686
146.7	950	0.0796	0.0216	0.1005	0.1397	0.1179	0.0542	0.0673
148.3	950	0.0801	0.0215	0.1012	0.1404	0.1153	0.0533	0.0660
150.0	950	0.0807	0.0214	0.1015	0.1412	0.1127	0.0524	0.0647
151.7	950	0.0818	0.0213	0.1016	0.1418	0.1103	0.0516	0.0636
153.3	950	0.0823	0.0212	0.1015	0.1425	0.1081	0.0507	0.0624
155.0	950	0.0827	0.0211	0.1012	0.1433	0.1058	0.0499	0.0613
156.7	950	0.0832	0.0210	0.1007	0.1440	0.1035	0.0492	0.0599
158.3	950	0.0837	0.0210	0.0999	0.1447	0.1014	0.0484	0.0591
160.0	950	0.0841	0.0209	0.0990	0.1456	0.0994	0.0477	0.0584
161.7	950	0.0844	0.0208	0.0980	0.1463	0.0973	0.0470	0.0574
163.3	950	0.0848	0.0208	0.0967	0.1471	0.0954	0.0462	0.0565
165.0	950	0.0850	0.0207	0.0954	0.1478	0.0934	0.0456	0.0555
166.7	950	0.0854	0.0206	0.0941	0.1486	0.0916	0.0449	0.0546

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
168.3	950	0.0858	0.0205	0.0925	0.1493	0.0899	0.0443	0.0537
170.0	950	0.0860	0.0205	0.0912	0.1501	0.0882	0.0437	0.0529
171.7	950	0.0862	0.0204	0.0895	0.1506	0.0866	0.0431	0.0520
173.3	950	0.0865	0.0203	0.0879	0.1514	0.0849	0.0425	0.0512
175.0	950	0.0867	0.0203	0.0866	0.1519	0.0834	0.0419	0.0504
176.7	950	0.0868	0.0202	0.0833	0.1527	0.0820	0.0414	0.0496
178.3	950	0.0869	0.0201	0.0819	0.1533	0.0805	0.0408	0.0488
180.0	950	0.0871	0.0200	0.0804	0.1537	0.0792	0.0403	0.0481
181.7	950	0.0872	0.0199	0.0788	0.1542	0.0778	0.0398	0.0473
183.3	950	0.0873	0.0199	0.0772	0.1547	0.0766	0.0393	0.0466
185.0	950	0.0872	0.0198	0.0757	0.1550	0.0753	0.0388	0.0459
186.7	950	0.0873	0.0197	0.0742	0.1554	0.0742	0.0383	0.0453
188.3	950	0.0871	0.0196	0.0728	0.1555	0.0731	0.0378	0.0445
190.0	950	0.0871	0.0195	0.0713	0.1557	0.0718	0.0374	0.0439
191.7	950	0.0871	0.0194	0.0701	0.1555	0.0708	0.0370	0.0433
193.3	950	0.0870	0.0194	0.0686	0.1553	0.0698	0.0366	0.0426
195.0	950	0.0868	0.0193	0.0671	0.1549	0.0688	0.0361	0.0420
196.7	950	0.0866	0.0192	0.0656	0.1543	0.0678	0.0357	0.0414
198.3	950	0.0865	0.0191	0.0643	0.1534	0.0669	0.0354	0.0408
200.0	950	0.0863	0.0190	0.0629	0.1524	0.0659	0.0349	0.0402
201.7	950	0.0860	0.0189	0.0616	0.1509	0.0650	0.0346	0.0396
203.3	950	0.0858	0.0188	0.0602	0.1493	0.0641	0.0342	0.0391
205.0	950	0.0856	0.0187	0.0590	0.1472	0.0633	0.0339	0.0385
206.7	950	0.0852	0.0186	0.0578	0.1449	0.0625	0.0335	0.0380
208.3	950	0.0849	0.0185	0.0566	0.1420	0.0617	0.0332	0.0375
210.0	950	0.0846	0.0185	0.0551	0.1391	0.0609	0.0329	0.0370
211.7	950	0.0842	0.0184	0.0541	0.1357	0.0602	0.0326	0.0365
213.3	950	0.0838	0.0183	0.0529	0.1322	0.0595	0.0323	0.0360
215.0	950	0.0835	0.0182	0.0518	0.1284	0.0589	0.0320	0.0355
216.7	950	0.0831	0.0181	0.0507	0.1246	0.0581	0.0317	0.0351
218.3	950	0.0826	0.0180	0.0497	0.1208	0.0575	0.0314	0.0346
220.0	950	0.0822	0.0179	0.0476	0.1168	0.0568	0.0311	0.0341
221.7	950	0.0817	0.0178	0.0466	0.1134	0.0562	0.0308	0.0337
223.3	950	0.0812	0.0177	0.0457	0.1087	0.0555	0.0306	0.0332
225.0	950	0.0806	0.0176	0.0447	0.1049	0.0549	0.0303	0.0328
226.7	950	0.0802	0.0175	0.0438	0.1009	0.0544	0.0301	0.0323
228.3	950	0.0796	0.0174	0.0430	0.0971	0.0539	0.0298	0.0319

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
230.0	950	0.0791	0.0174	0.0421	0.0935	0.0533	0.0296	0.0315
231.7	950	0.0786	0.0173	0.0412	0.0897	0.0528	0.0294	0.0311
233.3	950	0.0780	0.0172	0.0405	0.0861	0.0523	0.0291	0.0307
235.0	950	0.0774	0.0171	0.0397	0.0827	0.0517	0.0289	0.0303
236.7	950	0.0769	0.0170	0.0389	0.0794	0.0512	0.0287	0.0299
238.3	950	0.0763	0.0169	0.0381	0.0761	0.0507	0.0285	0.0296
240.0	950	0.0756	0.0168	0.0375	0.0730	0.0503	0.0283	0.0292
241.7	950	0.0750	0.0167	0.0367	0.0699	0.0498	0.0281	0.0288
243.3	950	0.0744	0.0166	0.0360	0.0670	0.0493	0.0279	0.0284
245.0	950	0.0737	0.0166	0.0353	0.0643	0.0489	0.0277	0.0281
246.7	950	0.0731	0.0165	0.0347	0.0616	0.0485	0.0275	0.0278
248.3	950	0.0724	0.0164	0.0340	0.0591	0.0480	0.0273	0.0274
250.0	950	0.0717	0.0163	0.0334	0.0567	0.0477	0.0272	0.0271
251.7	950	0.0711	0.0162	0.0328	0.0543	0.0472	0.0270	0.0267
253.3	950	0.0704	0.0161	0.0322	0.0521	0.0468	0.0268	0.0264
255.0	950	0.0697	0.0161	0.0315	0.0500	0.0464	0.0266	0.0261
256.7	950	0.0690	0.0160	0.0309	0.0479	0.0459	0.0265	0.0258
258.3	950	0.0682	0.0159	0.0304	0.0460	0.0456	0.0263	0.0255
260.0	950	0.0676	0.0158	0.0298	0.0442	0.0452	0.0261	0.0252
261.7	950	0.0669	0.0157	0.0293	0.0424	0.0448	0.0260	0.0249
263.3	950	0.0661	0.0157	0.0287	0.0408	0.0445	0.0259	0.0246
265.0	950	0.0654	0.0156	0.0282	0.0392	0.0441	0.0257	0.0243
266.7	950	0.0647	0.0155	0.0276	0.0376	0.0438	0.0255	0.0240
268.3	950	0.0640	0.0154	0.0272	0.0362	0.0435	0.0254	0.0238
270.0	950	0.0632	0.0153	0.0267	0.0349	0.0432	0.0253	0.0235
271.7	950	0.0624	0.0153	0.0262	0.0336	0.0428	0.0251	0.0232
273.3	950	0.0617	0.0152	0.0257	0.0323	0.0425	0.0250	0.0229
275.0	950	0.0609	0.0151	0.0257	0.0311	0.0422	0.0249	0.0227
276.7	950	0.0601	0.0151	0.0252	0.0300	0.0419	0.0248	0.0224
278.3	950	0.0594	0.0150	0.0248	0.0289	0.0416	0.0246	0.0221
280.0	950	0.0586	0.0149	0.0243	0.0279	0.0413	0.0245	0.0219
281.7	950	0.0579	0.0149	0.0239	0.0270	0.0410	0.0244	0.0217
283.3	950	0.0571	0.0148	0.0235	0.0260	0.0408	0.0243	0.0214
285.0	950	0.0564	0.0147	0.0230	0.0251	0.0405	0.0242	0.0212
286.7	950	0.0556	0.0146	0.0226	0.0243	0.0402	0.0241	0.0210
288.3	950	0.0548	0.0146	0.0222	0.0235	0.0400	0.0239	0.0207
290.0	950	0.0541	0.0145	0.0218	0.0227	0.0397	0.0238	0.0205

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
291.7	950	0.0533	0.0144	0.0214	0.0220	0.0395	0.0237	0.0203
293.3	950	0.0526	0.0144	0.0210	0.0213	0.0392	0.0237	0.0201
295.0	950	0.0518	0.0143	0.0207	0.0206	0.0390	0.0235	0.0199
296.7	950	0.0511	0.0142	0.0203	0.0200	0.0388	0.0234	0.0197
298.3	950	0.0504	0.0142	0.0200	0.0194	0.0385	0.0234	0.0193
300.0	950	0.0497	0.0141	0.0196	0.0188	0.0384	0.0233	0.0191
301.7	950	0.0489	0.0140	0.0192	0.0183	0.0383	0.0232	0.0189
303.3	950	0.0482	0.0140	0.0189	0.0177	0.0382	0.0231	0.0187
305.0	950	0.0476	0.0139	0.0185	0.0172	0.0380	0.0230	0.0185
306.7	950	0.0469	0.0139	0.0182	0.0167	0.0377	0.0229	0.0183
308.3	950	0.0462	0.0138	0.0179	0.0162	0.0374	0.0228	0.0182
310.0	950	0.0455	0.0137	0.0176	0.0158	0.0371	0.0227	0.0180
311.7	950	0.0449	0.0137	0.0173	0.0154	0.0367	0.0227	0.0178
313.3	950	0.0442	0.0136	0.0169	0.0149	0.0364	0.0226	0.0176
315.0	950	0.0436	0.0136	0.0167	0.0145	0.0361	0.0225	0.0175
316.7	950	0.0429	0.0135	0.0163	0.0141	0.0357	0.0224	0.0173
318.3	950	0.0423	0.0135	0.0161	0.0138	0.0354	0.0223	0.0172
320.0	950	0.0417	0.0134	0.0158	0.0134	0.0350	0.0223	0.0170
321.7	950	0.0411	0.0134	0.0155	0.0131	0.0346	0.0222	0.0169
323.3	950	0.0405	0.0133	0.0152	0.0127	0.0343	0.0221	0.0167
325.0	950	0.0399	0.0132	0.0150	0.0124	0.0340	0.0220	0.0166
326.7	950	0.0394	0.0132	0.0147	0.0120	0.0336	0.0220	0.0164
328.3	950	0.0386	0.0132	0.0145	0.0117	0.0333	0.0219	0.0163
330.0	950	0.0382	0.0131	0.0142	0.0113	0.0329	0.0218	0.0162
331.7	950	0.0378	0.0130	0.0140	0.0110	0.0326	0.0217	0.0160
333.3	950	0.0372	0.0130	0.0137	0.0106	0.0323	0.0217	0.0159
335.0	950	0.0367	0.0129	0.0135	0.0102	0.0320	0.0216	0.0158
336.7	950	0.0362	0.0129	0.0133	0.0099	0.0317	0.0215	0.0157
338.3	950	0.0356	0.0128	0.0130	0.0096	0.0314	0.0215	0.0156
340.0	950	0.0352	0.0128	0.0128	0.0092	0.0311	0.0214	0.0154
341.7	950	0.0347	0.0128	0.0126	0.0089	0.0308	0.0213	0.0153
343.3	950	0.0342	0.0127	0.0124	0.0086	0.0305	0.0213	0.0152
345.0	950	0.0338	0.0127	0.0121	0.0083	0.0303	0.0212	0.0151
346.7	950	0.0334	0.0126	0.0119	0.0080	0.0300	0.0212	0.0150
348.3	950	0.0329	0.0126	0.0117	0.0077	0.0297	0.0211	0.0149
350.0	950	0.0326	0.0125	0.0115	0.0075	0.0295	0.0210	0.0148
351.7	950	0.0322	0.0125	0.0113	0.0072	0.0292	0.0210	0.0147

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
353.3	950	0.0318	0.0124	0.0111	0.0069	0.0290	0.0209	0.0146
355.0	950	0.0314	0.0124	0.0109	0.0067	0.0287	0.0208	0.0145
356.7	950	0.0310	0.0124	0.0107	0.0065	0.0285	0.0208	0.0144
358.3	950	0.0307	0.0123	0.0105	0.0063	0.0282	0.0207	0.0143
360.0	950	0.0303	0.0123	0.0103	0.0060	0.0281	0.0207	0.0142
361.7	950	0.0300	0.0122	0.0101	0.0058	0.0278	0.0206	0.0141
363.3	950	0.0297	0.0122	0.0100	0.0056	0.0276	0.0205	0.0140
365.0	950	0.0293	0.0121	0.0098	0.0055	0.0274	0.0205	0.0139
366.7	950	0.0290	0.0121	0.0096	0.0053	0.0272	0.0204	0.0139
368.3	950	0.0287	0.0120	0.0094	0.0051	0.0270	0.0204	0.0138
370.0	950	0.0284	0.0120	0.0093	0.0049	0.0268	0.0203	0.0137
371.7	950	0.0281	0.0120	0.0091	0.0048	0.0266	0.0203	0.0136
373.3	950	0.0278	0.0119	0.0089	0.0046	0.0264	0.0202	0.0135
375.0	950	0.0275	0.0119	0.0088	0.0045	0.0262	0.0202	0.0134
376.7	950	0.0273	0.0119	0.0086	0.0043	0.0260	0.0202	0.0133
378.3	950	0.0270	0.0118	0.0084	0.0042	0.0258	0.0201	0.0133
380.0	950	0.0267	0.0118	0.0083	0.0041	0.0257	0.0201	0.0132
381.7	950	0.0265	0.0117	0.0081	0.0000	0.0255	0.0201	0.0131
383.3	950	0.0262	0.0117	0.0079	0.0000	0.0253	0.0199	0.0131
385.0	950	0.0259	0.0117	0.0078	0.0000	0.0252	0.0199	0.0130
386.7	950	0.0257	0.0116	0.0076	0.0000	0.0250	0.0199	0.0129
388.3	950	0.0255	0.0116	0.0075	0.0000	0.0248	0.0198	0.0129
390.0	950	0.0253	0.0115	0.0073	0.0000	0.0246	0.0198	0.0127
391.7	950	0.0250	0.0115	0.0072	0.0000	0.0245	0.0198	0.0127
393.3	950	0.0248	0.0115	0.0070	0.0000	0.0243	0.0197	0.0126
395.0	950	0.0246	0.0114	0.0069	0.0000	0.0242	0.0197	0.0125
396.7	950	0.0244	0.0114	0.0067	0.0000	0.0240	0.0196	0.0125
398.3	950	0.0242	0.0114	0.0066	0.0000	0.0239	0.0195	0.0124
400.0	950	0.0240	0.0113	0.0065	0.0000	0.0237	0.0195	0.0124
401.7	950	0.0238	0.0113	0.0063	0.0000	0.0236	0.0194	0.0123
403.3	950	0.0236	0.0112	0.0062	0.0000	0.0234	0.0194	0.0123
405.0	950	0.0234	0.0112	0.0061	0.0000	0.0232	0.0193	0.0122
406.7	950	0.0232	0.0112	0.0059	0.0000	0.0231	0.0193	0.0122
408.3	950	0.0230	0.0112	0.0058	0.0000	0.0230	0.0192	0.0121
410.0	950	0.0228	0.0111	0.0057	0.0000	0.0228	0.0193	0.0120
411.7	950	0.0227	0.0111	0.0055	0.0000	0.0227	0.0192	0.0120
413.3	950	0.0225	0.0111	0.0054	0.0000	0.0226	0.0191	0.0119

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CaSO ₄ (mmol/min)	Fe ₂ O ₃ (mmol/min)	5 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	10 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	20 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	30 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)	40 % Fe ₂ O ₃ in CaSO ₄ (mmol/min)
415.0	950	0.0223	0.0110	0.0053	0.0000	0.0224	0.0191	0.0119
416.7	950	0.0222	0.0110	0.0052	0.0000	0.0223	0.0190	0.0118
418.3	950	0.0220	0.0110	0.0050	0.0000	0.0221	0.0190	0.0118
420.0	950	0.0218	0.0109	0.0049	0.0000	0.0221	0.0190	0.0117
421.7	950	0.0216	0.0109	0.0048	0.0000	0.0220	0.0190	0.0117
423.3	950	0.0215	0.0109	0.0047	0.0000	0.0219	0.0189	0.0116
425.0	950	0.0213	0.0108	0.0046	0.0000	0.0218	0.0188	0.0116
426.7	950	0.0211	0.0108	0.0045	0.0000	0.0216	0.0188	0.0116
428.3	950	0.0210	0.0108	0.0043	0.0000	0.0215	0.0188	0.0115
430.0	950	0.0208	0.0107	0.0042	0.0000	0.0214	0.0187	0.0115
431.7	950	0.0207	0.0107	0.0041	0.0000	0.0213	0.0188	0.0114
433.3	950	0.0205	0.0107	0.0040	0.0000	0.0211	0.0186	0.0114
435.0	950	0.0204	0.0107	0.0039	0.0000	0.0210	0.0186	0.0113
436.7	950	0.0202	0.0106	0.0037	0.0000	0.0209	0.0185	0.0113
438.3	950	0.0201	0.0106	0.0036	0.0000	0.0208	0.0184	0.0113
440.0	950	0.0199	0.0106	0.0035	0.0000	0.0207	0.0184	0.0112
441.7	950	0.0198	0.0106	0.0034	0.0000	0.0205	0.0185	0.0112
443.3	950	0.0197	0.0105	0.0033	0.0000	0.0204	0.0183	0.0111
445.0	950	0.0196	0.0105	0.0032	0.0000	0.0203	0.0184	0.0111
446.7	950	0.0194	0.0105	0.0031	0.0000	0.0202	0.0182	0.0111
448.3	950	0.0193	0.0105	0.0030	0.0000	0.0200	0.0181	0.0110
450.0	950	0.0191	0.0104	0.0029	0.0000	0.0199	0.0181	0.0110
451.7	950	0.0190	0.0104	0.0028	0.0000	0.0198	0.0180	0.0110
453.3	950	0.0189	0.0104	0.0027	0.0000	0.0196	0.0179	0.0109
455.0	950	0.0188	0.0104	0.0026	0.0000	0.0195	0.0180	0.0109
456.7	950	0.0187	0.0103	0.0025	0.0000	0.0194	0.0178	0.0109
458.3	950	0.0186	0.0103	0.0024	0.0000	0.0193	0.0177	0.0108

2. ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วน
องค์ประกอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ ค.2 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	750	0.0000	0.0000	0.0000
10.00	900	0.0013	0.0000	0.0000
12.50	900	0.0018	0.0000	0.0000
15.00	900	0.0034	0.0006	0.0029
17.50	900	0.0065	0.0019	0.0057
20.00	900	0.0107	0.0033	0.0078
22.50	900	0.0155	0.0045	0.0094
25.00	900	0.0205	0.0056	0.0106
27.50	900	0.0255	0.0066	0.0114
30.00	900	0.0302	0.0074	0.0119
32.50	900	0.0346	0.0081	0.0124
35.00	900	0.0388	0.0086	0.0128
37.50	900	0.0427	0.0091	0.0129
40.00	900	0.0462	0.0095	0.0129
42.50	900	0.0495	0.0098	0.0129
45.00	900	0.0526	0.0101	0.0128
47.50	900	0.0555	0.0103	0.0128
50.00	900	0.0583	0.0105	0.0126
52.50	900	0.0607	0.0106	0.0124
55.00	900	0.0631	0.0106	0.0123
57.50	900	0.0654	0.0107	0.0121

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
60.00	900	0.0675	0.0107	0.0115
62.50	900	0.0693	0.0106	0.0112
65.00	900	0.0709	0.0105	0.0111
67.50	900	0.0725	0.0104	0.0108
70.00	900	0.0740	0.0103	0.0105
72.50	900	0.0751	0.0101	0.0102
75.00	900	0.0760	0.0100	0.0098
77.50	900	0.0772	0.0098	0.0094
80.00	900	0.0781	0.0096	0.0092
82.50	900	0.0789	0.0094	0.0090
85.00	900	0.0799	0.0092	0.0084
87.50	900	0.0805	0.0090	0.0081
90.00	900	0.0813	0.0088	0.0077
92.50	900	0.0820	0.0085	0.0075
95.00	900	0.0824	0.0083	0.0071
97.50	900	0.0831	0.0081	0.0069
100.00	900	0.0836	0.0078	0.0067
102.50	900	0.0841	0.0076	0.0063
105.00	900	0.0845	0.0074	0.0059
107.50	900	0.0848	0.0071	0.0055
110.00	900	0.0847	0.0067	0.0053
112.50	900	0.0858	0.0065	0.0051
115.00	900	0.0862	0.0064	0.0049
117.50	900	0.0864	0.0062	0.0048
120.00	900	0.0866	0.0062	0.0047
122.50	900	0.0867	0.0062	0.0047
125.00	900	0.0868	0.0062	0.0048
127.50	900	0.0868	0.0062	0.0045

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
130.00	900	0.0867	0.0063	0.0047
132.50	900	0.0870	0.0065	0.0047
135.00	900	0.0869	0.0067	0.0048
137.50	900	0.0867	0.0070	0.0050
140.00	900	0.0865	0.0073	0.0052
142.50	900	0.0859	0.0076	0.0053
145.00	900	0.0854	0.0080	0.0055
147.50	900	0.0847	0.0085	0.0058
150.00	900	0.0837	0.0091	0.0061
152.50	900	0.0827	0.0097	0.0064
155.00	900	0.0812	0.0104	0.0071
157.50	900	0.0796	0.0113	0.0073
160.00	900	0.0775	0.0122	0.0078
162.50	900	0.0751	0.0131	0.0081
165.00	900	0.0724	0.0138	0.0083
167.50	900	0.0695	0.0144	0.0085
170.00	900	0.0666	0.0149	0.0088
172.50	900	0.0637	0.0152	0.0089
175.00	900	0.0610	0.0156	0.0090
177.50	900	0.0585	0.0158	0.0091
180.00	900	0.0560	0.0159	0.0092
182.50	900	0.0537	0.0160	0.0093
185.00	900	0.0516	0.0161	0.0094
187.50	900	0.0497	0.0162	0.0093
190.00	900	0.0479	0.0162	0.0094
192.50	900	0.0463	0.0162	0.0095
195.00	900	0.0447	0.0162	0.0095
197.50	900	0.0432	0.0162	0.0095

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
200.00	900	0.0418	0.0162	0.0096
202.50	900	0.0406	0.0162	0.0094
205.00	900	0.0395	0.0162	0.0095
207.50	900	0.0384	0.0162	0.0095
210.00	900	0.0374	0.0162	0.0094
212.50	900	0.0364	0.0162	0.0094
215.00	900	0.0355	0.0161	0.0096
217.50	900	0.0347	0.0162	0.0095
220.00	900	0.0340	0.0162	0.0096
222.50	900	0.0332	0.0162	0.0099
225.00	900	0.0325	0.0162	0.0096
227.50	900	0.0319	0.0162	0.0097
230.00	900	0.0312	0.0162	0.0097
232.50	900	0.0306	0.0162	0.0097
235.00	900	0.0300	0.0163	0.0098
237.50	900	0.0295	0.0163	0.0099
240.00	900	0.0290	0.0163	0.0099
242.50	900	0.0285	0.0164	0.0099
245.00	900	0.0280	0.0165	0.0099
247.50	900	0.0276	0.0166	0.0101
250.00	900	0.0271	0.0167	0.0102
252.50	900	0.0267	0.0169	0.0103
255.00	900	0.0263	0.0171	0.0103
257.50	900	0.0259	0.0173	0.0105
260.00	900	0.0254	0.0174	0.0107
262.50	900	0.0247	0.0178	0.0108
265.00	900	0.0243	0.0179	0.0108
267.50	900	0.0240	0.0181	0.0108

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
270.00	900	0.0237	0.0182	0.0110
272.50	900	0.0233	0.0183	0.0110
275.00	900	0.0230	0.0184	0.0111
277.50	900	0.0227	0.0185	0.0111
280.00	900	0.0221	0.0186	0.0112
282.50	900	0.0218	0.0187	0.0113
285.00	900	0.0215	0.0187	0.0116
287.50	900	0.0213	0.0190	0.0114
290.00	900	0.0210	0.0188	0.0115
292.50	900	0.0205	0.0189	0.0116
295.00	900	0.0203	0.0190	0.0116
297.50	900	0.0201	0.0190	0.0116
300.00	900	0.0199	0.0190	0.0117
302.50	900	0.0195	0.0191	0.0118
305.00	900	0.0192	0.0191	0.0118
307.50	900	0.0190	0.0192	0.0119
310.00	900	0.0188	0.0192	0.0120
312.50	900	0.0186	0.0193	0.0118
315.00	900	0.0184	0.0193	0.0120
317.50	900	0.0183	0.0194	0.0120
320.00	900	0.0180	0.0194	0.0122
322.50	900	0.0179	0.0195	0.0122
325.00	900	0.0177	0.0196	0.0122
327.50	900	0.0175	0.0196	0.0122
330.00	900	0.0173	0.0198	0.0123
332.50	900	0.0171	0.0198	0.0121
335.00	900	0.0170	0.0199	0.0122
337.50	900	0.0168	0.0200	0.0123

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
340.00	900	0.0167	0.0201	0.0123
342.50	900	0.0165	0.0202	0.0125
345.00	900	0.0163	0.0203	0.0125
347.50	900	0.0161	0.0204	0.0125
350.00	900	0.0160	0.0206	0.0126
352.50	900	0.0158	0.0207	0.0128
355.00	900	0.0156	0.0209	0.0129
357.50	900	0.0154	0.0211	0.0131
360.00	900	0.0151	0.0216	0.0133
362.50	900	0.0150	0.0218	0.0134
365.00	900	0.0148	0.0221	0.0135
367.50	900	0.0146	0.0226	0.0138
370.00	900	0.0145	0.0230	0.0141
372.50	900	0.0143	0.0236	0.0143
375.00	900	0.0141	0.0244	0.0149
377.50	900	0.0140	0.0253	0.0149
380.00	900	0.0138	0.0265	0.0151
382.50	900	0.0136	0.0277	0.0155
385.00	900	0.0135	0.0290	0.0155
387.50	900	0.0133	0.0305	0.0155
390.00	900	0.0131	0.0320	0.0157
392.50	900	0.0129	0.0336	0.0158
395.00	900	0.0127	0.0353	0.0157
397.50	900	0.0126	0.0371	0.0156
400.00	900	0.0124	0.0390	0.0156
402.50	900	0.0122	0.0414	0.0150
405.00	900	0.0120	0.0445	0.0145
407.50	900	0.0117	0.0485	0.0145

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
410.00	900	0.0115	0.0487	0.0123
412.50	900	0.0113	0.0582	0.0111
415.00	900	0.0112	0.0626	0.0100
417.50	900	0.0110	0.0663	0.0093
420.00	900	0.0109	0.0686	0.0086
422.50	900	0.0107	0.0698	0.0078
425.00	900	0.0105	0.0697	0.0074
427.50	900	0.0104	0.0690	0.0071
430.00	900	0.0103	0.0675	0.0068
432.50	900	0.0101	0.0657	0.0065
435.00	900	0.0100	0.0637	0.0061
437.50	900	0.0098	0.0617	0.0059
440.00	900	0.0097	0.0597	0.0058
442.50	900	0.0096	0.0580	0.0056
445.00	900	0.0094	0.0563	0.0056
447.50	900	0.0093	0.0547	0.0054
450.00	900	0.0092	0.0533	0.0053
452.50	900	0.0091	0.0521	0.0052
455.00	900	0.0090	0.0510	0.0052
457.50	900	0.0089	0.0501	0.0051

ตารางที่ ค.3 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	750	0.0083	0.0000	0.0000
10.00	950	0.0082	0.0000	0.0000
12.50	950	0.0082	0.0002	0.0000
15.00	950	0.0082	0.0012	0.0000
17.50	950	0.0085	0.0032	0.0000
20.00	950	0.0094	0.0059	0.0000
22.50	950	0.0111	0.0088	0.0006
25.00	950	0.0138	0.0119	0.0006
27.50	950	0.0176	0.0153	0.0007
30.00	950	0.0224	0.0186	0.0226
32.50	950	0.0279	0.0218	0.0256
35.00	950	0.0341	0.0247	0.0278
37.50	950	0.0407	0.0272	0.0296
40.00	950	0.0474	0.0294	0.0308
42.50	950	0.0540	0.0312	0.0317
45.00	950	0.0607	0.0328	0.0323
47.50	950	0.0671	0.0340	0.0328
50.00	950	0.0733	0.0349	0.0330
52.50	950	0.0791	0.0356	0.0332
55.00	950	0.0847	0.0361	0.0330
57.50	950	0.0900	0.0364	0.0329
60.00	950	0.0949	0.0365	0.0326
62.50	950	0.0993	0.0365	0.0324
65.00	950	0.1035	0.0364	0.0321

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
67.50	950	0.1073	0.0362	0.0318
70.00	950	0.1108	0.0359	0.0313
72.50	950	0.1141	0.0355	0.0310
75.00	950	0.1171	0.0351	0.0305
77.50	950	0.1199	0.0346	0.0302
80.00	950	0.1221	0.0340	0.0297
82.50	950	0.1243	0.0334	0.0290
85.00	950	0.1264	0.0327	0.0283
87.50	950	0.1280	0.0320	0.0279
90.00	950	0.1295	0.0313	0.0266
92.50	950	0.1309	0.0306	0.0255
95.00	950	0.1321	0.0297	0.0249
97.50	950	0.1332	0.0289	0.0242
100.00	950	0.1339	0.0281	0.0230
102.50	950	0.1347	0.0272	0.0226
105.00	950	0.1355	0.0264	0.0214
107.50	950	0.1362	0.0256	0.0206
110.00	950	0.1368	0.0249	0.0201
112.50	950	0.1373	0.0241	0.0193
115.00	950	0.1378	0.0234	0.0187
117.50	950	0.1381	0.0228	0.0185
120.00	950	0.1385	0.0222	0.0178
122.50	950	0.1391	0.0217	0.0168
125.00	950	0.1394	0.0211	0.0169
127.50	950	0.1398	0.0206	0.0167
130.00	950	0.1402	0.0202	0.0160
132.50	950	0.1408	0.0198	0.0155
135.00	950	0.1411	0.0194	0.0151

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
137.50	950	0.1414	0.0191	0.0147
140.00	950	0.1418	0.0188	0.0146
142.50	950	0.1422	0.0185	0.0141
145.00	950	0.1430	0.0183	0.0138
147.50	950	0.1431	0.0180	0.0137
150.00	950	0.1439	0.0178	0.0132
152.50	950	0.1440	0.0176	0.0130
155.00	950	0.1446	0.0174	0.0126
157.50	950	0.1452	0.0172	0.0122
160.00	950	0.1454	0.0171	0.0122
162.50	950	0.1460	0.0169	0.0120
165.00	950	0.1465	0.0168	0.0119
167.50	950	0.1469	0.0167	0.0116
170.00	950	0.1473	0.0167	0.0113
172.50	950	0.1478	0.0167	0.0112
175.00	950	0.1481	0.0168	0.0111
177.50	950	0.1483	0.0170	0.0112
180.00	950	0.1484	0.0173	0.0114
182.50	950	0.1480	0.0177	0.0117
185.00	950	0.1474	0.0182	0.0116
187.50	950	0.1469	0.0189	0.0117
190.00	950	0.1455	0.0194	0.0123
192.50	950	0.1442	0.0200	0.0126
195.00	950	0.1423	0.0205	0.0132
197.50	950	0.1407	0.0210	0.0133
200.00	950	0.1384	0.0214	0.0133
202.50	950	0.1357	0.0218	0.0133
205.00	950	0.1333	0.0221	0.0136

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
207.50	950	0.1311	0.0225	0.0132
210.00	950	0.1281	0.0227	0.0130
212.50	950	0.1256	0.0230	0.0136
215.00	950	0.1229	0.0232	0.0137
217.50	950	0.1204	0.0234	0.0135
220.00	950	0.1179	0.0236	0.0140
222.50	950	0.1153	0.0238	0.0134
225.00	950	0.1127	0.0239	0.0135
227.50	950	0.1103	0.0241	0.0134
230.00	950	0.1081	0.0243	0.0136
232.50	950	0.1058	0.0244	0.0135
235.00	950	0.1035	0.0245	0.0139
237.50	950	0.1014	0.0247	0.0142
240.00	950	0.0994	0.0248	0.0140
242.50	950	0.0973	0.0249	0.0138
245.00	950	0.0954	0.0250	0.0140
247.50	950	0.0934	0.0251	0.0146
250.00	950	0.0916	0.0252	0.0146
252.50	950	0.0899	0.0253	0.0141
255.00	950	0.0882	0.0254	0.0147
257.50	950	0.0866	0.0255	0.0138
260.00	950	0.0849	0.0256	0.0142
262.50	950	0.0834	0.0256	0.0141
265.00	950	0.0820	0.0258	0.0146
267.50	950	0.0805	0.0258	0.0148
270.00	950	0.0792	0.0259	0.0143
272.50	950	0.0778	0.0260	0.0146
275.00	950	0.0766	0.0260	0.0145

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
277.50	950	0.0753	0.0261	0.0148
280.00	950	0.0742	0.0262	0.0146
282.50	950	0.0731	0.0263	0.0146
285.00	950	0.0718	0.0263	0.0146
287.50	950	0.0708	0.0264	0.0148
290.00	950	0.0698	0.0265	0.0147
292.50	950	0.0688	0.0266	0.0148
295.00	950	0.0678	0.0267	0.0150
297.50	950	0.0669	0.0268	0.0152
300.00	950	0.0659	0.0268	0.0153
302.50	950	0.0650	0.0269	0.0150
305.00	950	0.0641	0.0270	0.0153
307.50	950	0.0633	0.0271	0.0147
310.00	950	0.0625	0.0271	0.0154
312.50	950	0.0617	0.0272	0.0156
315.00	950	0.0609	0.0273	0.0156
317.50	950	0.0602	0.0274	0.0153
320.00	950	0.0595	0.0274	0.0155
322.50	950	0.0589	0.0276	0.0152
325.00	950	0.0581	0.0276	0.0150
327.50	950	0.0575	0.0277	0.0161
330.00	950	0.0568	0.0278	0.0153
332.50	950	0.0562	0.0279	0.0159
335.00	950	0.0555	0.0280	0.0163
337.50	950	0.0549	0.0281	0.0161
340.00	950	0.0544	0.0282	0.0162
342.50	950	0.0539	0.0283	0.0160
345.00	950	0.0533	0.0285	0.0158

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
347.50	950	0.0528	0.0287	0.0166
350.00	950	0.0523	0.0288	0.0166
352.50	950	0.0517	0.0290	0.0165
355.00	950	0.0512	0.0292	0.0165
357.50	950	0.0507	0.0294	0.0168
360.00	950	0.0503	0.0296	0.0171
362.50	950	0.0498	0.0299	0.0171
365.00	950	0.0493	0.0301	0.0170
367.50	950	0.0489	0.0304	0.0175
370.00	950	0.0485	0.0306	0.0173
372.50	950	0.0480	0.0309	0.0179
375.00	950	0.0477	0.0312	0.0180
377.50	950	0.0472	0.0314	0.0180
380.00	950	0.0468	0.0317	0.0179
382.50	950	0.0464	0.0320	0.0180
385.00	950	0.0459	0.0323	0.0187
387.50	950	0.0456	0.0326	0.0191
390.00	950	0.0452	0.0329	0.0193
392.50	950	0.0448	0.0333	0.0191
395.00	950	0.0445	0.0336	0.0191
397.50	950	0.0441	0.0339	0.0192
400.00	950	0.0438	0.0343	0.0194
402.50	950	0.0435	0.0346	0.0203
405.00	950	0.0432	0.0350	0.0206
407.50	950	0.0428	0.0354	0.0203
410.00	950	0.0425	0.0358	0.0206
412.50	950	0.0422	0.0362	0.0207
415.00	950	0.0419	0.0366	0.0214

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
417.50	950	0.0416	0.0371	0.0215
420.00	950	0.0413	0.0375	0.0217
422.50	950	0.0410	0.0380	0.0214
425.00	950	0.0408	0.0386	0.0226
427.50	950	0.0405	0.0392	0.0221
430.00	950	0.0402	0.0398	0.0225
432.50	950	0.0400	0.0405	0.0228
435.00	950	0.0397	0.0412	0.0229
437.50	950	0.0395	0.0421	0.0232
440.00	950	0.0392	0.0432	0.0234
442.50	950	0.0390	0.0445	0.0239
445.00	950	0.0388	0.0463	0.0246
447.50	950	0.0385	0.0493	0.0247
450.00	950	0.0384	0.0537	0.0250
452.50	950	0.0383	0.0603	0.0218
455.00	950	0.0382	0.0677	0.0210
457.50	950	0.0380	0.0755	0.0199
460.00	950	0.0377	0.0827	0.0182
462.50	950	0.0374	0.0889	0.0161
465.00	950	0.0371	0.0942	0.0139
467.50	950	0.0367	0.0982	0.0120
470.00	950	0.0364	0.1011	0.0104
472.50	950	0.0361	0.1030	0.0091
475.00	950	0.0357	0.1038	0.0079
477.50	950	0.0354	0.1039	0.0069
480.00	950	0.0350	0.1033	0.0056
482.50	950	0.0346	0.1021	0.0039
485.00	950	0.0343	0.1006	0.0032

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
487.50	950	0.0340	0.0987	0.0028
490.00	950	0.0336	0.0966	0.0024
492.50	950	0.0333	0.0944	0.0019
495.00	950	0.0329	0.0921	0.0017
497.50	950	0.0326	0.0899	0.0015
500.00	950	0.0323	0.0877	0.0006
502.50	950	0.0320	0.0855	0.0002
505.00	950	0.0317	0.0835	0.0000
507.50	950	0.0314	0.0815	0.0000
510.00	950	0.0311	0.0797	0.0000
512.50	950	0.0308	0.0780	0.0000
515.00	950	0.0305	0.0763	0.0000
517.50	950	0.0303	0.0748	0.0000
520.00	950	0.0300	0.0735	0.0000
522.50	950	0.0297	0.0722	0.0000
525.00	950	0.0295	0.0711	0.0000
527.50	950	0.0292	0.0700	0.0000
530.00	950	0.0290	0.0691	0.0000
532.50	950	0.0287	0.0682	0.0000
535.00	950	0.0285	0.0668	0.0000
537.50	950	0.0282	0.0662	0.0000
540.00	950	0.0281	0.0655	0.0000
542.50	950	0.0278	0.0650	0.0000
545.00	950	0.0276	0.0646	0.0000
547.50	950	0.0274	0.0641	0.0000
550.00	950	0.0272	0.0637	0.0000
552.50	950	0.0270	0.0634	0.0000
555.00	950	0.0268	0.0631	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
557.50	950	0.0266	0.0628	0.0000
560.00	950	0.0264	0.0625	0.0000
562.50	950	0.0262	0.0623	0.0000
565.00	950	0.0260	0.0621	0.0000
567.50	950	0.0258	0.0619	0.0000
570.00	950	0.0257	0.0617	0.0000
572.50	950	0.0255	0.0615	0.0000
575.00	950	0.0253	0.0614	0.0000
577.50	950	0.0252	0.0612	0.0000
580.00	950	0.0250	0.0611	0.0000
582.50	950	0.0248	0.0610	0.0000
585.00	950	0.0246	0.0609	0.0000
587.50	950	0.0245	0.0608	0.0000
590.00	950	0.0243	0.0607	0.0000
592.50	950	0.0242	0.0606	0.0000
595.00	950	0.0240	0.0605	0.0000
597.50	950	0.0239	0.0604	0.0000
600.00	950	0.0237	0.0603	0.0000
602.50	950	0.0236	0.0603	0.0000
605.00	950	0.0234	0.0602	0.0000
607.50	950	0.0232	0.0601	0.0000
610.00	950	0.0231	0.0601	0.0000
612.50	950	0.0230	0.0600	0.0000
615.00	950	0.0228	0.0600	0.0000
617.50	950	0.0227	0.0599	0.0000
620.00	950	0.0226	0.0598	0.0000
622.50	950	0.0224	0.0598	0.0000
625.00	950	0.0223	0.0597	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
627.50	950	0.0221	0.0597	0.0000
630.00	950	0.0221	0.0597	0.0000
632.50	950	0.0220	0.0597	0.0000
635.00	950	0.0219	0.0596	0.0000
637.50	950	0.0218	0.0596	0.0000
640.00	950	0.0216	0.0595	0.0000
642.50	950	0.0215	0.0595	0.0000
645.00	950	0.0214	0.0595	0.0000
647.50	950	0.0213	0.0595	0.0000
650.00	950	0.0211	0.0594	0.0000
652.50	950	0.0210	0.0594	0.0000
655.00	950	0.0209	0.0593	0.0000
657.50	950	0.0208	0.0593	0.0000
660.00	950	0.0207	0.0593	0.0000
662.50	950	0.0205	0.0592	0.0000
665.00	950	0.0204	0.0592	0.0000
667.50	950	0.0203	0.0592	0.0000
670.00	950	0.0202	0.0592	0.0000
672.50	950	0.0200	0.0591	0.0000
675.00	950	0.0199	0.0591	0.0000
677.50	950	0.0198	0.0591	0.0000
680.00	950	0.0196	0.0591	0.0000
682.50	950	0.0195	0.0590	0.0000
685.00	950	0.0194	0.0590	0.0000
687.50	950	0.0193	0.0590	0.0000
690.00	950	0.0192	0.0590	0.0000
692.50	950	0.0191	0.0590	0.0000
695.00	950	0.0190	0.0589	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
697.50	950	0.0189	0.0590	0.0000
700.00	950	0.0188	0.0589	0.0000
702.50	950	0.0187	0.0589	0.0000
705.00	950	0.0186	0.0589	0.0000
707.50	950	0.0185	0.0589	0.0000
710.00	950	0.0184	0.0589	0.0000
712.50	950	0.0183	0.0589	0.0000
715.00	950	0.0182	0.0588	0.0000
717.50	950	0.0181	0.0588	0.0000
720.00	950	0.0180	0.0588	0.0000
722.50	950	0.0179	0.0588	0.0000
725.00	950	0.0178	0.0588	0.0000
727.50	950	0.0177	0.0588	0.0000
730.00	950	0.0176	0.0588	0.0000
732.50	950	0.0175	0.0588	0.0000
735.00	950	0.0174	0.0587	0.0000
737.50	950	0.0173	0.0587	0.0000
740.00	950	0.0172	0.0587	0.0000
742.50	950	0.0171	0.0587	0.0000
745.00	950	0.0171	0.0587	0.0000
747.50	950	0.0170	0.0587	0.0000
750.00	950	0.0169	0.0587	0.0000
752.50	950	0.0168	0.0587	0.0000
755.00	950	0.0167	0.0587	0.0000
757.50	950	0.0167	0.0587	0.0000
760.00	950	0.0165	0.0587	0.0000
762.50	950	0.0165	0.0587	0.0000
765.00	950	0.0164	0.0587	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
767.50	950	0.0163	0.0587	0.0000
770.00	950	0.0162	0.0586	0.0000
772.50	950	0.0161	0.0587	0.0000
775.00	950	0.0161	0.0587	0.0000
777.50	950	0.0160	0.0586	0.0000
780.00	950	0.0159	0.0586	0.0000
782.50	950	0.0158	0.0586	0.0000
785.00	950	0.0157	0.0586	0.0000
787.50	950	0.0157	0.0586	0.0000
790.00	950	0.0156	0.0586	0.0000
792.50	950	0.0155	0.0586	0.0000
795.00	950	0.0154	0.0586	0.0000
797.50	950	0.0153	0.0586	0.0000
800.00	950	0.0152	0.0586	0.0000
802.50	950	0.0152	0.0586	0.0000
805.00	950	0.0151	0.0586	0.0000
807.50	950	0.0150	0.0586	0.0000
810.00	950	0.0150	0.0586	0.0000
812.50	950	0.0149	0.0586	0.0000
815.00	950	0.0148	0.0586	0.0000
817.50	950	0.0147	0.0586	0.0000
820.00	950	0.0146	0.0586	0.0000
822.50	950	0.0146	0.0586	0.0000
825.00	950	0.0145	0.0586	0.0000
827.50	950	0.0144	0.0586	0.0000
830.00	950	0.0143	0.0586	0.0000
832.50	950	0.0142	0.0586	0.0000
835.00	950	0.0142	0.0586	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
837.50	950	0.0141	0.0586	0.0000
840.00	950	0.0140	0.0586	0.0000
842.50	950	0.0140	0.0586	0.0000
845.00	950	0.0139	0.0586	0.0000
847.50	950	0.0138	0.0586	0.0000
850.00	950	0.0138	0.0586	0.0000
852.50	950	0.0137	0.0586	0.0000
855.00	950	0.0136	0.0586	0.0000
857.50	950	0.0136	0.0586	0.0000
860.00	950	0.0135	0.0586	0.0000
862.50	950	0.0134	0.0586	0.0000
865.00	950	0.0134	0.0586	0.0000
867.50	950	0.0133	0.0586	0.0000
870.00	950	0.0132	0.0586	0.0000
872.50	950	0.0132	0.0587	0.0000
875.00	950	0.0131	0.0587	0.0000
877.50	950	0.0131	0.0587	0.0000
880.00	950	0.0130	0.0587	0.0000
882.50	950	0.0129	0.0587	0.0000
885.00	950	0.0128	0.0587	0.0000
887.50	950	0.0128	0.0587	0.0000
890.00	950	0.0127	0.0587	0.0000
892.50	950	0.0127	0.0587	0.0000
895.00	950	0.0126	0.0587	0.0000
897.50	950	0.0125	0.0587	0.0000
900.00	950	0.0125	0.0587	0.0000
902.50	950	0.0124	0.0588	0.0000
905.00	950	0.0123	0.0588	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
907.50	950	0.0123	0.0588	0.0000
910.00	950	0.0122	0.0588	0.0000
912.50	950	0.0122	0.0588	0.0000
915.00	950	0.0121	0.0588	0.0000
917.50	950	0.0121	0.0588	0.0000
920.00	950	0.0120	0.0588	0.0000
922.50	950	0.0119	0.0588	0.0000

ตารางที่ ค.4 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	750	0.0000	0.0000	0.0000
10.00	900	0.0019	0.0001	0.0000
12.50	1000	0.0023	0.0008	0.0000
15.00	1000	0.0040	0.0017	0.0090
17.50	1000	0.0085	0.0025	0.0091
20.00	1000	0.0167	0.0036	0.0098
22.50	1000	0.0283	0.0063	0.0130
25.00	1000	0.0421	0.0112	0.0169
27.50	1000	0.0568	0.0168	0.0205
30.00	1000	0.0710	0.0216	0.0230
32.50	1000	0.0835	0.0254	0.0245
35.00	1000	0.0945	0.0285	0.0256
37.50	1000	0.1038	0.0308	0.0263

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
40.00	1000	0.1116	0.0324	0.0267
42.50	1000	0.1183	0.0335	0.0270
45.00	1000	0.1238	0.0341	0.0275
47.50	1000	0.1283	0.0343	0.0270
50.00	1000	0.1322	0.0341	0.0267
52.50	1000	0.1352	0.0338	0.0263
55.00	1000	0.1378	0.0331	0.0258
57.50	1000	0.1399	0.0324	0.0253
60.00	1000	0.1412	0.0316	0.0244
62.50	1000	0.1422	0.0309	0.0246
65.00	1000	0.1427	0.0306	0.0249
67.50	1000	0.1428	0.0312	0.0255
70.00	1000	0.1411	0.0322	0.0259
72.50	1000	0.1379	0.0332	0.0263
75.00	1000	0.1333	0.0343	0.0267
77.50	1000	0.1276	0.0352	0.0271
80.00	1000	0.1212	0.0361	0.0280
82.50	1000	0.1146	0.0369	0.0283
85.00	1000	0.1083	0.0375	0.0286
87.50	1000	0.1021	0.0380	0.0290
90.00	1000	0.0960	0.0384	0.0291
92.50	1000	0.0906	0.0388	0.0294
95.00	1000	0.0856	0.0391	0.0296
97.50	1000	0.0809	0.0394	0.0298
100.00	1000	0.0767	0.0396	0.0302
102.50	1000	0.0727	0.0399	0.0303
105.00	1000	0.0692	0.0402	0.0305
107.50	1000	0.0659	0.0404	0.0308

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
110.00	1000	0.0630	0.0407	0.0318
112.50	1000	0.0602	0.0409	0.0312
115.00	1000	0.0578	0.0411	0.0322
117.50	1000	0.0556	0.0414	0.0323
120.00	1000	0.0535	0.0416	0.0321
122.50	1000	0.0516	0.0418	0.0322
125.00	1000	0.0499	0.0420	0.0332
127.50	1000	0.0483	0.0422	0.0334
130.00	1000	0.0468	0.0424	0.0336
132.50	1000	0.0455	0.0426	0.0340
135.00	1000	0.0442	0.0429	0.0341
137.50	1000	0.0431	0.0431	0.0344
140.00	1000	0.0420	0.0434	0.0347
142.50	1000	0.0410	0.0436	0.0349
145.00	1000	0.0401	0.0439	0.0352
147.50	1000	0.0393	0.0442	0.0355
150.00	1000	0.0385	0.0446	0.0359
152.50	1000	0.0377	0.0450	0.0362
155.00	1000	0.0371	0.0454	0.0363
157.50	1000	0.0364	0.0459	0.0372
160.00	1000	0.0358	0.0465	0.0368
162.50	1000	0.0352	0.0471	0.0374
165.00	1000	0.0345	0.0480	0.0379
167.50	1000	0.0340	0.0491	0.0387
170.00	1000	0.0335	0.0512	0.0389
172.50	1000	0.0330	0.0562	0.0373
175.00	1000	0.0324	0.0664	0.0332
177.50	1000	0.0318	0.0820	0.0289

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
180.00	1000	0.0311	0.0979	0.0256
182.50	1000	0.0304	0.1074	0.0228
185.00	1000	0.0296	0.1103	0.0203
187.50	1000	0.0288	0.1095	0.0191
190.00	1000	0.0281	0.1065	0.0181
192.50	1000	0.0274	0.1024	0.0175
195.00	1000	0.0266	0.0978	0.0167
197.50	1000	0.0260	0.0932	0.0162
200.00	1000	0.0253	0.0886	0.0165
202.50	1000	0.0247	0.0843	0.0162
205.00	1000	0.0241	0.0803	0.0160
207.50	1000	0.0236	0.0766	0.0156
210.00	1000	0.0231	0.0732	0.0163
212.50	1000	0.0226	0.0700	0.0161
215.00	1000	0.0221	0.0672	0.0165
217.50	1000	0.0217	0.0645	0.0167
220.00	1000	0.0212	0.0621	0.0173
222.50	1000	0.0208	0.0598	0.0171
225.00	1000	0.0204	0.0578	0.0180
227.50	1000	0.0201	0.0559	0.0000
230.00	1000	0.0199	0.0546	0.0000
232.50	1000	0.0196	0.0530	0.0000
235.00	1000	0.0193	0.0515	0.0000
237.50	1000	0.0190	0.0501	0.0000
240.00	1000	0.0186	0.0488	0.0000
242.50	1000	0.0183	0.0476	0.0000
245.00	1000	0.0179	0.0460	0.0000
247.50	1000	0.0176	0.0450	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
250.00	1000	0.0173	0.0440	0.0000
252.50	1000	0.0171	0.0432	0.0000
255.00	1000	0.0168	0.0424	0.0000
257.50	1000	0.0166	0.0416	0.0000
260.00	1000	0.0164	0.0410	0.0000
262.50	1000	0.0161	0.0404	0.0000
265.00	1000	0.0159	0.0398	0.0000
267.50	1000	0.0157	0.0393	0.0000
270.00	1000	0.0155	0.0388	0.0000
272.50	1000	0.0153	0.0384	0.0000
275.00	1000	0.0151	0.0380	0.0000
277.50	1000	0.0149	0.0377	0.0000
280.00	1000	0.0147	0.0374	0.0000
282.50	1000	0.0146	0.0371	0.0000
285.00	1000	0.0144	0.0368	0.0000
287.50	1000	0.0142	0.0366	0.0000
290.00	1000	0.0140	0.0364	0.0000
292.50	1000	0.0139	0.0362	0.0000
295.00	1000	0.0137	0.0360	0.0000
297.50	1000	0.0135	0.0359	0.0000
300.00	1000	0.0134	0.0357	0.0000
302.50	1000	0.0132	0.0356	0.0000
305.00	1000	0.0129	0.0355	0.0000
307.50	1000	0.0127	0.0353	0.0000
310.00	1000	0.0126	0.0352	0.0000
312.50	1000	0.0124	0.0351	0.0000
315.00	1000	0.0123	0.0351	0.0000
317.50	1000	0.0121	0.0350	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
320.00	1000	0.0120	0.0349	0.0000
322.50	1000	0.0118	0.0348	0.0000
325.00	1000	0.0117	0.0348	0.0000
327.50	1000	0.0116	0.0347	0.0000
330.00	1000	0.0114	0.0346	0.0000
332.50	1000	0.0113	0.0346	0.0000
335.00	1000	0.0112	0.0346	0.0000
337.50	1000	0.0110	0.0345	0.0000
340.00	1000	0.0109	0.0345	0.0000
342.50	1000	0.0107	0.0345	0.0000
345.00	1000	0.0106	0.0345	0.0000
347.50	1000	0.0105	0.0345	0.0000
350.00	1000	0.0104	0.0345	0.0000
352.50	1000	0.0103	0.0345	0.0000
355.00	1000	0.0102	0.0345	0.0000
357.50	1000	0.0101	0.0345	0.0000
360.00	1000	0.0100	0.0345	0.0000
362.50	1000	0.0099	0.0345	0.0000
365.00	1000	0.0098	0.0346	0.0000
367.50	1000	0.0097	0.0346	0.0000
370.00	1000	0.0096	0.0346	0.0000
372.50	1000	0.0095	0.0346	0.0000
375.00	1000	0.0094	0.0347	0.0000
377.50	1000	0.0093	0.0347	0.0000
380.00	1000	0.0092	0.0347	0.0000
382.50	1000	0.0090	0.0347	0.0000
385.00	1000	0.0089	0.0348	0.0000
387.50	1000	0.0088	0.0348	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)
390.00	1000	0.0087	0.0348	0.0000
392.50	1000	0.0087	0.0348	0.0000
395.00	1000	0.0086	0.0348	0.0000
397.50	1000	0.0085	0.0348	0.0000
400.00	1000	0.0084	0.0347	0.0000
402.50	1000	0.0083	0.0347	0.0000
405.00	1000	0.0082	0.0347	0.0000
407.50	1000	0.0081	0.0347	0.0000
410.00	1000	0.0080	0.0347	0.0000
412.50	1000	0.0079	0.0347	0.0000
415.00	1000	0.0079	0.0347	0.0000
417.50	1000	0.0078	0.0347	0.0000
420.00	1000	0.0077	0.0347	0.0000
422.50	1000	0.0076	0.0347	0.0000
425.00	1000	0.0075	0.0348	0.0000
427.50	1000	0.0075	0.0348	0.0000
430.00	1000	0.0074	0.0348	0.0000
432.50	1000	0.0073	0.0349	0.0000
435.00	1000	0.0072	0.0349	0.0000
437.50	1000	0.0071	0.0349	0.0000
440.00	1000	0.0071	0.0349	0.0000
442.50	1000	0.0070	0.0350	0.0000
445.00	1000	0.0069	0.0350	0.0000
447.50	1000	0.0069	0.0350	0.0000
450.00	1000	0.0068	0.0351	0.0000
452.50	1000	0.0068	0.0351	0.0000
455.00	1000	0.0067	0.0351	0.0000

ตารางที่ ค.5 อัตราการใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	O ₂ (mmol/min)
0.00	30	0.0529
1.67	250	0.0492
3.33	500	0.0451
5.00	750	0.0413
6.67	950	0.0382
8.33	950	0.0359
10.00	950	0.0375
11.67	950	0.0504
13.33	950	0.0701
15.00	950	0.0920
16.67	950	0.1137
18.33	950	0.1344
20.00	950	0.1548
21.67	950	0.1743
23.33	950	0.1918
25.00	950	0.2086
26.67	950	0.2244
28.33	950	0.2399
30.00	950	0.2558
31.67	950	0.2740
33.33	950	0.2913
35.00	950	0.3072
36.67	950	0.3169
38.33	950	0.3175
40.00	950	0.3096
41.67	950	0.2962
43.33	950	0.2793

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	O ₂ (mmol/min)
45.00	950	0.2614
46.67	950	0.2433
48.33	950	0.2256
50.00	950	0.2086
51.67	950	0.1930
53.33	950	0.1784
55.00	950	0.1650
56.67	950	0.1526
58.33	950	0.1410
60.00	950	0.1303
61.67	950	0.1205
63.33	950	0.1115
65.00	950	0.1027
66.67	950	0.0953
68.33	950	0.0882
70.00	950	0.0819
71.67	950	0.0759
73.33	950	0.0704
75.00	950	0.0652
76.67	950	0.0605
78.33	950	0.0560
80.00	950	0.0520
81.67	950	0.0481
83.33	950	0.0446
85.00	950	0.0413
86.67	950	0.0383
88.33	950	0.0357
90.00	950	0.0332

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	O ₂ (mmol/min)
91.67	950	0.0307
93.33	950	0.0286
95.00	950	0.0266
96.67	950	0.0244
98.33	950	0.0228
100.00	950	0.0211
101.67	950	0.0196
103.33	950	0.0181
105.00	950	0.0167
106.67	950	0.0157
108.33	950	0.0148
110.00	950	0.0137
111.67	950	0.0125
113.33	950	0.0118
115.00	950	0.0111
116.67	950	0.0100
118.33	950	0.0094
120.00	950	0.0087
121.67	950	0.0080
123.33	950	0.0074
125.00	950	0.0069
126.67	950	0.0063
128.33	950	0.0057
130.00	950	0.0054
131.67	950	0.0051
133.33	950	0.0046
135.00	950	0.0042
136.67	950	0.0039

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	O ₂ (mmol/min)
138.33	950	0.0035
140.00	950	0.0032
141.67	950	0.0029
143.33	950	0.0028
145.00	950	0.0026
146.67	950	0.0024
148.33	950	0.0021
150.00	950	0.0020
151.67	950	0.0017
153.33	950	0.0014
155.00	950	0.0014
156.67	950	0.0013
158.33	950	0.0010
160.00	950	0.0011
161.67	950	0.0009
163.33	950	0.0008
165.00	950	0.0007
166.67	950	0.0006
168.33	950	0.0004
170.00	950	0.0004
171.67	950	0.0003
173.33	950	0.0003
175.00	950	0.0000

3. ผลของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงในการทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง ใน อุณหภูมิกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ ค.6 น้ำหนักของแคลเซียมซัลเฟตก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาและรอบการเกิด	น้ำหนัก(กรัม)	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
น้ำหนักก่อนเกิดปฏิกิริยา	2.0061	100%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 1	1.0117	50%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 1	1.5617	78%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 2	0.9917	49%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 2	1.4617	73%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 3	0.9917	49%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 3	1.4017	70%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 4	0.9917	49%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 4	1.3517	67%

ตารางที่ ค.7 น้ำหนักของเหล็กออกไซด์ก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาและรอบการเกิด	น้ำหนัก(กรัม)	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
น้ำหนักก่อนเกิดปฏิกิริยา	2.0079	100%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 1	1.8725	93%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 1	1.9725	98%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 2	1.8625	93%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 2	1.9625	98%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 3	1.8525	92%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 3	1.9625	98%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 4	1.8425	92%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 4	1.9625	98%

ตารางที่ ค.8 น้ำหนักของแคลเซียมซัลเฟตผสมเหล็กออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลัง
เกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาและรอบการเกิด	น้ำหนัก(กรัม)	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
น้ำหนักก่อนเกิดปฏิกิริยา	2.0172	100%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 1	1.2202	60%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 1	1.3802	68%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 2	1.1261	56%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 2	1.3602	67%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 3	1.1102	55%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 3	1.3502	67%
ปฏิกิริยารีดักชันรอบที่ 4	1.1053	55%
ปฏิกิริยาออกซิเดชันรอบที่ 4	1.3302	66%

4. ผลของอุณหภูมิในการทดสอบของปฏิกิริยารีดักชันด้วยถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์
เบดกับตัวพาออกซิเจนในสัดส่วนองค์ประกอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ ค.9 อัตราการเกิดแก๊สชนิดต่างๆ โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างตัวพาออกซิเจนผสมกับถ่านหิน
ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
0.00	30.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	750.00	0.0320	0.0069	0.0320	0.0129	0.0000	0.0000
10.00	900.00	0.1656	0.1236	0.1687	0.1101	0.0035	0.0092
12.50	900.00	0.7758	0.2844	0.3002	0.1877	0.0161	0.0158
15.00	900.00	1.1329	0.2266	0.2414	0.1284	0.0180	0.0149
17.50	900.00	1.1755	0.1531	0.1657	0.0762	0.0149	0.0125
20.00	900.00	1.0735	0.0996	0.1103	0.0444	0.0109	0.0095
22.50	900.00	0.8948	0.0658	0.0756	0.0270	0.0072	0.0078
25.00	900.00	0.7038	0.0467	0.0568	0.0189	0.0048	0.0069
27.50	900.00	0.5447	0.0353	0.0453	0.0145	0.0033	0.0062
30.00	900.00	0.4208	0.0287	0.0376	0.0116	0.0000	0.0000
32.50	900.00	0.3318	0.0247	0.0283	0.0000	0.0000	0.0000
35.00	900.00	0.2639	0.0221	0.0246	0.0000	0.0000	0.0000
37.50	900.00	0.2140	0.0203	0.0218	0.0000	0.0000	0.0000
40.00	900.00	0.1854	0.0190	0.0196	0.0000	0.0000	0.0000
42.50	900.00	0.1618	0.0181	0.0179	0.0000	0.0000	0.0000
45.00	900.00	0.1553	0.0172	0.0162	0.0000	0.0000	0.0000
47.50	900.00	0.1488	0.0167	0.0154	0.0000	0.0000	0.0000
50.00	900.00	0.1424	0.0202	0.0196	0.0000	0.0000	0.0000
52.50	900.00	0.1359	0.0211	0.0209	0.0000	0.0000	0.0000
55.00	900.00	0.1294	0.0197	0.0187	0.0000	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
57.50	900.00	0.1229	0.0179	0.0160	0.0000	0.0000	0.0000
60.00	900.00	0.1186	0.0164	0.0139	0.0000	0.0000	0.0000
62.50	900.00	0.1050	0.0152	0.0123	0.0000	0.0000	0.0000
65.00	900.00	0.0920	0.0142	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000
67.50	900.00	0.0806	0.0134	0.0098	0.0000	0.0000	0.0000
70.00	900.00	0.0714	0.0127	0.0089	0.0000	0.0000	0.0000
72.50	900.00	0.0636	0.0121	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000
75.00	900.00	0.0575	0.0117	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
77.50	900.00	0.0524	0.0112	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
80.00	900.00	0.0484	0.0109	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
82.50	900.00	0.0449	0.0106	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
85.00	900.00	0.0422	0.0103	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
87.50	900.00	0.0398	0.0101	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90.00	900.00	0.0379	0.0099	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
92.50	900.00	0.0361	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
95.00	900.00	0.0345	0.0095	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
97.50	900.00	0.0332	0.0093	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100.00	900.00	0.0321	0.0092	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
102.50	900.00	0.0310	0.0091	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
105.00	900.00	0.0300	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
107.50	900.00	0.0292	0.0088	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110.00	900.00	0.0284	0.0087	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
112.50	900.00	0.0276	0.0087	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
115.00	900.00	0.0270	0.0086	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
117.50	900.00	0.0263	0.0085	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120.00	900.00	0.0258	0.0084	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
122.50	900.00	0.0252	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
125.00	900.00	0.0247	0.0082	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
127.50	900.00	0.0242	0.0082	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130.00	900.00	0.0236	0.0081	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
132.50	900.00	0.0231	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
135.00	900.00	0.0226	0.0079	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
137.50	900.00	0.0222	0.0078	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140.00	900.00	0.0224	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
142.50	900.00	0.0277	0.0091	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
145.00	900.00	0.0329	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
147.50	900.00	0.0351	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150.00	900.00	0.0352	0.0095	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
152.50	900.00	0.0340	0.0093	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
155.00	900.00	0.0324	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
157.50	900.00	0.0307	0.0087	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160.00	900.00	0.0292	0.0085	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
162.50	900.00	0.0278	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
165.00	900.00	0.0265	0.0082	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
167.50	900.00	0.0253	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170.00	177.50	900.00	0.0218	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000
172.50	180.00	900.00	0.0211	0.0075	0.0000	0.0000	0.0000
175.00	182.50	900.00	0.0206	0.0074	0.0000	0.0000	0.0000
177.50	185.00	900.00	0.0201	0.0074	0.0000	0.0000	0.0000
180.00	187.50	900.00	0.0195	0.0073	0.0000	0.0000	0.0000
182.50	190.00	900.00	0.0191	0.0073	0.0000	0.0000	0.0000
185.00	192.50	900.00	0.0186	0.0072	0.0000	0.0000	0.0000
187.50	195.00	900.00	0.0182	0.0071	0.0000	0.0000	0.0000
190.00	197.50	900.00	0.0178	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000
192.50	200.00	900.00	0.0174	0.0069	0.0000	0.0000	0.0000
195.00	202.50	900.00	0.0170	0.0069	0.0000	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
197.50	205.00	900.00	0.0166	0.0068	0.0000	0.0000	0.0000
200.00	207.50	900.00	0.0163	0.0067	0.0000	0.0000	0.0000
202.50	210.00	900.00	0.0160	0.0067	0.0000	0.0000	0.0000
205.00	212.50	900.00	0.0158	0.0066	0.0000	0.0000	0.0000
207.50	215.00	900.00	0.0155	0.0069	0.0000	0.0000	0.0000
210.00	217.50	900.00	0.0173	0.0078	0.0000	0.0000	0.0000
212.50	220.00	900.00	0.0189	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000
215.00	222.50	900.00	0.0191	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000
217.50	225.00	900.00	0.0185	0.0082	0.0000	0.0000	0.0000
220.00	227.50	900.00	0.0178	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000
222.50	230.00	900.00	0.0169	0.0078	0.0000	0.0000	0.0000
225.00	232.50	900.00	0.0162	0.0077	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค.10 อัตราการเกิดแก๊สชนิดต่างๆ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพวออกซิเจนผสมกับถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0074	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0230	0.0008	0.0156	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	750	0.4616	0.2724	0.3210	0.2008	0.0076	0.0137
10.00	950	1.9866	0.3191	0.5187	0.0861	0.0142	0.0136
12.50	950	1.7773	0.2132	0.3626	0.0486	0.0095	0.0088
15.00	950	1.4473	0.1380	0.2409	0.0288	0.0060	0.0068
17.50	950	1.1050	0.0921	0.1628	0.0190	0.0039	0.0056
20.00	950	0.8242	0.0650	0.1170	0.0141	0.0000	0.0000
22.50	950	0.6093	0.0487	0.0872	0.0114	0.0000	0.0000
25.00	950	0.4517	0.0388	0.0679	0.0000	0.0000	0.0000
27.50	950	0.3395	0.0325	0.0565	0.0000	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
30.00	950	0.2599	0.0289	0.0479	0.0000	0.0000	0.0000
32.50	950	0.2030	0.0264	0.0425	0.0000	0.0000	0.0000
35.00	950	0.1629	0.0243	0.0380	0.0000	0.0000	0.0000
37.50	950	0.1334	0.0227	0.0342	0.0000	0.0000	0.0000
40.00	950	0.1118	0.0213	0.0314	0.0000	0.0000	0.0000
42.50	950	0.0953	0.0201	0.0293	0.0000	0.0000	0.0000
45.00	950	0.0829	0.0192	0.0278	0.0000	0.0000	0.0000
47.50	950	0.0733	0.0184	0.0262	0.0000	0.0000	0.0000
50.00	950	0.0656	0.0176	0.0242	0.0000	0.0000	0.0000
52.50	950	0.0590	0.0168	0.0231	0.0000	0.0000	0.0000
55.00	950	0.0537	0.0160	0.0224	0.0000	0.0000	0.0000
57.50	950	0.0494	0.0154	0.0211	0.0000	0.0000	0.0000
60.00	950	0.0456	0.0148	0.0203	0.0000	0.0000	0.0000
62.50	950	0.0425	0.0143	0.0196	0.0000	0.0000	0.0000
65.00	950	0.0399	0.0139	0.0183	0.0000	0.0000	0.0000
67.50	950	0.0375	0.0135	0.0176	0.0000	0.0000	0.0000
70.00	950	0.0355	0.0131	0.0172	0.0000	0.0000	0.0000
72.50	950	0.0333	0.0125	0.0168	0.0000	0.0000	0.0000
75.00	950	0.0301	0.0114	0.0143	0.0000	0.0000	0.0000
77.50	950	0.0275	0.0099	0.0124	0.0000	0.0000	0.0000
80.00	950	0.0254	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
82.50	950	0.0237	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
85.00	950	0.0224	0.0079	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
87.50	950	0.0213	0.0077	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90.00	950	0.0204	0.0075	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
92.50	950	0.0196	0.0074	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
95.00	950	0.0189	0.0073	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
97.50	950	0.0180	0.0067	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
100.00	950	0.0171	0.0063	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
102.50	950	0.0164	0.0060	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
105.00	950	0.0158	0.0059	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
107.50	950	0.0152	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110.00	950	0.0149	0.0057	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
112.50	950	0.0145	0.0056	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
115.00	950	0.0141	0.0056	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค.11 อัตราการเกิดแก๊สชนิดต่างๆ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวพวออกซิเจนผสมกับถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชเบต ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
0.00	30	0.0088	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	250	0.0116	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	500	0.0111	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11.67	750	0.0098	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15.42	900	0.1117	0.1619	0.1619	0.1256	0.0033	0.0079
19.17	1000	0.6834	0.4736	0.5909	0.2431	0.0151	0.0141
22.92	1000	1.4289	0.4354	0.7468	0.2065	0.0235	0.0164
26.67	1000	1.7689	0.2880	0.5298	0.1117	0.0218	0.0141
30.42	1000	1.5653	0.1828	0.3347	0.0624	0.0157	0.0084
34.17	1000	1.2254	0.1181	0.2115	0.0387	0.0103	0.0073
37.92	1000	0.9286	0.0831	0.1537	0.0293	0.0073	0.0064
41.67	1000	0.6834	0.0603	0.1108	0.0226	0.0049	0.0058
45.42	1000	0.5019	0.0466	0.0840	0.0190	0.0033	0.0000
49.17	1000	0.3697	0.0381	0.0675	0.0170	0.0000	0.0000
52.92	1000	0.2786	0.0313	0.0532	0.0151	0.0000	0.0000
56.67	1000	0.2177	0.0260	0.0427	0.0143	0.0000	0.0000
60.42	1000	0.1719	0.0224	0.0347	0.0000	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
64.17	1000	0.1379	0.0202	0.0296	0.0000	0.0000	0.0000
67.92	1000	0.1133	0.0187	0.0264	0.0000	0.0000	0.0000
71.67	1000	0.0958	0.0177	0.0235	0.0000	0.0000	0.0000
75.42	1000	0.0824	0.0169	0.0216	0.0000	0.0000	0.0000
79.17	1000	0.0721	0.0163	0.0209	0.0000	0.0000	0.0000
82.92	1000	0.0640	0.0157	0.0194	0.0000	0.0000	0.0000
86.67	1000	0.0578	0.0153	0.0188	0.0000	0.0000	0.0000
90.42	1000	0.0531	0.0150	0.0183	0.0000	0.0000	0.0000
94.17	1000	0.0491	0.0147	0.0165	0.0000	0.0000	0.0000
97.92	1000	0.0456	0.0144	0.0162	0.0000	0.0000	0.0000
101.67	1000	0.0427	0.0141	0.0155	0.0000	0.0000	0.0000
105.42	1000	0.0402	0.0138	0.0153	0.0000	0.0000	0.0000
109.17	1000	0.0381	0.0135	0.0153	0.0000	0.0000	0.0000
112.92	1000	0.0362	0.0133	0.0150	0.0000	0.0000	0.0000
116.67	1000	0.0347	0.0130	0.0149	0.0000	0.0000	0.0000
120.42	1000	0.0331	0.0129	0.0145	0.0000	0.0000	0.0000
124.17	1000	0.0319	0.0128	0.0145	0.0000	0.0000	0.0000
127.92	1000	0.0308	0.0129	0.0151	0.0000	0.0000	0.0000
131.67	1000	0.0304	0.0148	0.0193	0.0000	0.0000	0.0000
135.42	1000	0.0302	0.0150	0.0194	0.0000	0.0000	0.0000
139.17	1000	0.0294	0.0145	0.0180	0.0000	0.0000	0.0000
142.92	1000	0.0284	0.0137	0.0166	0.0000	0.0000	0.0000
146.67	1000	0.0274	0.0129	0.0153	0.0000	0.0000	0.0000
150.42	1000	0.0263	0.0141	0.0186	0.0000	0.0000	0.0000
154.17	1000	0.0261	0.0222	0.0352	0.0000	0.0000	0.0000
157.92	1000	0.0258	0.0257	0.0391	0.0000	0.0000	0.0000
161.67	1000	0.0248	0.0254	0.0361	0.0000	0.0000	0.0000
165.42	1000	0.0229	0.0236	0.0314	0.0000	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
169.17	1000	0.0221	0.0217	0.0282	0.0000	0.0000	0.0000
172.92	1000	0.0210	0.0199	0.0251	0.0000	0.0000	0.0000
176.67	1000	0.0200	0.0184	0.0223	0.0000	0.0000	0.0000
180.42	1000	0.0163	0.0112	0.0157	0.0000	0.0000	0.0000
184.17	1000	0.0144	0.0095	0.0117	0.0000	0.0000	0.0000
187.92	1000	0.0142	0.0125	0.0128	0.0000	0.0000	0.0000
191.67	1000	0.0142	0.0152	0.0159	0.0000	0.0000	0.0000
195.42	1000	0.0141	0.0160	0.0167	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค.12 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0195	0.0000	0.0000	0.0000	0.0195	0.0000
7.50	750	0.1428	0.0216	0.0782	0.0477	0.1428	0.0000
10.00	900	0.4278	0.2915	0.2356	0.1297	0.4278	0.0120
12.50	900	0.5878	0.4484	0.3446	0.1324	0.5878	0.0178
15.00	900	0.4827	0.2615	0.2405	0.0757	0.4827	0.0123
17.50	900	0.3325	0.1374	0.1105	0.0449	0.3325	0.0073
20.00	900	0.2225	0.0860	0.0665	0.0335	0.2225	0.0043
22.50	900	0.1509	0.0622	0.0506	0.0288	0.1509	0.0000
25.00	900	0.1046	0.0499	0.0448	0.0262	0.1046	0.0000
27.50	900	0.0753	0.0426	0.0384	0.0237	0.0753	0.0000
30.00	900	0.0561	0.0377	0.0351	0.0000	0.0561	0.0000
32.50	900	0.0437	0.0345	0.0332	0.0000	0.0437	0.0000
35.00	900	0.0347	0.0321	0.0307	0.0000	0.0347	0.0000
37.50	900	0.0291	0.0301	0.0294	0.0000	0.0291	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
40.00	900	0.0253	0.0284	0.0282	0.0000	0.0253	0.0000
42.50	900	0.0226	0.0271	0.0280	0.0000	0.0226	0.0000
45.00	900	0.0206	0.0260	0.0269	0.0000	0.0206	0.0000
47.50	900	0.0191	0.0250	0.0265	0.0000	0.0191	0.0000
50.00	900	0.0179	0.0240	0.0259	0.0000	0.0179	0.0000
52.50	900	0.0170	0.0233	0.0245	0.0000	0.0170	0.0000
55.00	900	0.0162	0.0224	0.0242	0.0000	0.0162	0.0000
57.50	900	0.0155	0.0216	0.0237	0.0000	0.0155	0.0000
60.00	900	0.0149	0.0209	0.0234	0.0000	0.0149	0.0000
62.50	900	0.0143	0.0204	0.0231	0.0000	0.0143	0.0000
65.00	900	0.0138	0.0199	0.0229	0.0000	0.0138	0.0000
67.50	900	0.0134	0.0193	0.0226	0.0000	0.0134	0.0000
70.00	900	0.0130	0.0189	0.0224	0.0000	0.0130	0.0000

ตารางที่ ค.13 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0329	0.0000	0.0000
7.50	750	0.0301	0.0705	0.1640	0.3817	0.0034	0.0068
10.00	950	0.3574	0.1431	0.3259	0.6478	0.0087	0.0117
12.50	950	0.7222	0.1043	0.3879	0.6220	0.0077	0.0108
15.00	950	0.4272	0.0450	0.2019	0.4193	0.0042	0.0067
17.50	950	0.2022	0.0240	0.0855	0.2728	0.0000	0.0054
20.00	950	0.1085	0.0167	0.0496	0.1779	0.0000	0.0000
22.50	950	0.0690	0.0000	0.0301	0.1181	0.0000	0.0000
25.00	950	0.0502	0.0000	0.0248	0.0795	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
27.50	950	0.0406	0.0000	0.0217	0.0565	0.0000	0.0000
30.00	950	0.0350	0.0000	0.0267	0.0423	0.0000	0.0000
32.50	950	0.0316	0.0000	0.0248	0.0327	0.0000	0.0000
35.00	950	0.0291	0.0000	0.0242	0.0270	0.0000	0.0000
37.50	950	0.0272	0.0000	0.0227	0.0231	0.0000	0.0000
40.00	950	0.0256	0.0000	0.0214	0.0203	0.0000	0.0000
42.50	950	0.0244	0.0000	0.0209	0.0183	0.0000	0.0000
45.00	950	0.0236	0.0000	0.0211	0.0168	0.0000	0.0000
47.50	950	0.0227	0.0000	0.0200	0.0154	0.0000	0.0000
50.00	950	0.0218	0.0000	0.0197	0.0144	0.0000	0.0000
52.50	950	0.0211	0.0000	0.0198	0.0136	0.0000	0.0000
55.00	950	0.0205	0.0000	0.0200	0.0130	0.0000	0.0000
57.50	950	0.0198	0.0000	0.0194	0.0127	0.0000	0.0000
60.00	950	0.0193	0.0000	0.0192	0.0124	0.0000	0.0000
62.50	950	0.0188	0.0000	0.0191	0.0121	0.0000	0.0000
65.00	950	0.0184	0.0000	0.0185	0.0119	0.0000	0.0000
67.50	950	0.0180	0.0000	0.0183	0.0117	0.0000	0.0000
70.00	950	0.0176	0.0000	0.0184	0.0115	0.0000	0.0000
72.50	950	0.0173	0.0000	0.0182	0.0113	0.0000	0.0000
75.00	950	0.0170	0.0000	0.0184	0.0111	0.0000	0.0000
77.50	950	0.0169	0.0000	0.0186	0.0109	0.0000	0.0000
80.00	950	0.0166	0.0000	0.0183	0.0107	0.0000	0.0000
82.50	950	0.0162	0.0000	0.0184	0.0106	0.0000	0.0000
85.00	950	0.0159	0.0000	0.0181	0.0104	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค.14 อัตราการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0234	0.0000	0.0000
7.50	750	0.0180	0.0322	0.0633	0.0984	0.0000	0.0000
10.00	900	0.3058	0.1322	0.3017	0.5104	0.0088	0.0089
12.50	1000	0.7379	0.1277	0.4481	0.6704	0.0115	0.0111
15.00	1000	0.6175	0.0737	0.3362	0.5351	0.0078	0.0077
17.50	1000	0.3174	0.0424	0.1571	0.3687	0.0047	0.0058
20.00	1000	0.1755	0.0308	0.0870	0.2590	0.0000	0.0000
22.50	1000	0.1034	0.0258	0.0627	0.1870	0.0000	0.0000
25.00	1000	0.0650	0.0224	0.0494	0.1317	0.0000	0.0000
27.50	1000	0.0487	0.0210	0.0446	0.0967	0.0000	0.0000
30.00	1000	0.0383	0.0193	0.0410	0.0738	0.0000	0.0000
32.50	1000	0.0329	0.0000	0.0386	0.0560	0.0000	0.0000
35.00	1000	0.0297	0.0000	0.0365	0.0438	0.0000	0.0000
37.50	1000	0.0275	0.0000	0.0339	0.0364	0.0000	0.0000
40.00	1000	0.0259	0.0000	0.0330	0.0313	0.0000	0.0000
42.50	1000	0.0247	0.0000	0.0329	0.0278	0.0000	0.0000
45.00	1000	0.0237	0.0000	0.0321	0.0251	0.0000	0.0000
47.50	1000	0.0239	0.0000	0.0325	0.0230	0.0000	0.0000
50.00	1000	0.0228	0.0000	0.0323	0.0215	0.0000	0.0000
52.50	1000	0.0217	0.0000	0.0321	0.0202	0.0000	0.0000
55.00	1000	0.0210	0.0000	0.0301	0.0193	0.0000	0.0000
57.50	1000	0.0205	0.0000	0.0299	0.0184	0.0000	0.0000
60.00	1000	0.0204	0.0000	0.0300	0.0178	0.0000	0.0000
62.50	1000	0.0204	0.0000	0.0309	0.0170	0.0000	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	CO ₂ (mmol/min)	H ₂ (mmol/min)	CO (mmol/min)	CH ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₄ (mmol/min)	C ₂ H ₆ (mmol/min)
65.00	1000	0.0201	0.0000	0.0312	0.0164	0.0000	0.0000
67.50	1000	0.0201	0.0000	0.0311	0.0156	0.0000	0.0000
70.00	1000	0.0198	0.0000	0.0315	0.0150	0.0000	0.0000
72.50	1000	0.0194	0.0000	0.0317	0.0147	0.0000	0.0000
75.00	1000	0.0192	0.0000	0.0318	0.0143	0.0000	0.0000
77.50	1000	0.0189	0.0000	0.0317	0.0139	0.0000	0.0000
80.00	1000	0.0187	0.0000	0.0316	0.0136	0.0000	0.0000
82.50	1000	0.0185	0.0000	0.0320	0.0134	0.0000	0.0000
85.00	1000	0.0183	0.0000	0.0327	0.0130	0.0000	0.0000
87.50	1000	0.0181	0.0000	0.0325	0.0130	0.0000	0.0000
90.00	1000	0.0179	0.0000	0.0331	0.0132	0.0000	0.0000
92.50	1000	0.0178	0.0000	0.0314	0.0127	0.0000	0.0000
95.00	1000	0.0177	0.0000	0.0312	0.0121	0.0000	0.0000
97.50	1000	0.0178	0.0000	0.0311	0.0117	0.0000	0.0000
100.00	1000	0.0177	0.0000	0.0314	0.0114	0.0000	0.0000
102.50	1000	0.0175	0.0000	0.0317	0.0112	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค.15 อัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างตัวพวออกซิเจนกับถ่านหินในแต่ละรอบและ การแตกสลายตัวของถ่านหินที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)	การสลายตัวของถ่านหิน (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0060	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0000	0.0092	0.0000	0.0000
7.50	750	0.1309	0.0758	0.0149	0.1266
10.00	950	0.2618	0.1527	0.0956	0.1878
12.50	950	0.4829	0.3881	0.3197	0.2081
15.00	950	0.7264	0.5760	0.5231	0.1992
17.50	950	0.8618	0.5496	0.5364	0.1842
20.00	950	0.8072	0.4377	0.5364	0.1644
22.50	950	0.6624	0.3280	0.4348	0.1457
25.00	950	0.5171	0.2404	0.3248	0.1294
27.50	950	0.3972	0.1772	0.2423	0.1131
30.00	950	0.3135	0.1322	0.1784	0.0984
32.50	950	0.2536	0.1015	0.1342	0.0853
35.00	950	0.2112	0.0801	0.1032	0.0743
37.50	950	0.1818	0.0649	0.0801	0.0649
40.00	950	0.1595	0.0538	0.0540	0.0569
42.50	950	0.1416	0.0463	0.0462	0.0501
45.00	950	0.1277	0.0405	0.0401	0.0445
47.50	950	0.1166	0.0361	0.0359	0.0396
50.00	950	0.1076	0.0327	0.0326	0.0356
52.50	950	0.0995	0.0301	0.0300	0.0322
55.00	950	0.0929	0.0279	0.0279	0.0293
57.50	950	0.0889	0.0260	0.0262	0.0268
60.00	950	0.0850	0.0248	0.0248	0.0247

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)	การสลายตัว ของถ่านหิน (mmol/min)
62.50	950	0.0824	0.0234	0.0236	0.0229
65.00	950	0.0783	0.0225	0.0226	0.0213
67.50	950	0.0751	0.0215	0.0216	0.0199
70.00	950	0.0719	0.0207	0.0210	0.0187
72.50	950	0.0689	0.0200	0.0203	0.0177
75.00	950	0.0662	0.0189	0.0196	0.0168
77.50	950	0.0636	0.0188	0.0192	0.0160
80.00	950	0.0613	0.0195	0.0207	0.0153
82.50	950	0.0594	0.0193	0.0223	0.0146
85.00	950	0.0576	0.0187	0.0217	0.0141
87.50	950	0.0557	0.0178	0.0202	0.0136
90.00	950	0.0540	0.0170	0.0186	0.0132
92.50	950	0.0524	0.0164	0.0173	0.0127
95.00	950	0.0515	0.0162	0.0164	0.0124
97.50	950	0.0502	0.0168	0.0157	0.0121
100.00	950	0.0485	0.0169	0.0148	0.0118
102.50	950	0.0468	0.0165	0.0140	0.0116
105.00	950	0.0453	0.0160	0.0132	0.0113
107.50	950	0.0438	0.0153	0.0124	0.0111
110.00	950	0.0425	0.0144	0.0116	0.0108
112.50	950	0.0413	0.0136	0.0108	0.0106
115.00	950	0.0400	0.0129	0.0100	0.0104
117.50	950	0.0390	0.0122	0.0092	0.0103
120.00	950	0.0378	0.0116	0.0084	0.0101
122.50	950	0.0363	0.0112	0.0076	0.0099
125.00	950	0.0344	0.0109	0.0068	0.0097
127.50	950	0.0325	0.0107	0.0060	0.0095

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)	การสลายตัวของถ่านหิน (mmol/min)
130.00	950	0.0309	0.0105	0.0052	0.0093
132.50	950	0.0294	0.0104	0.0044	0.0091
135.00	950	0.0282	0.0102	0.0036	0.0089
137.50	950	0.0271	0.0101	0.0028	0.0087
140.00	950	0.0262	0.0099	0.0020	0.0085
142.50	950	0.0253	0.0097	0.0012	0.0083
145.00	950	0.0246	0.0096	0.0004	0.0081
147.50	950	0.0239	0.0094	0.0000	0.0079

ตารางที่ ค.16 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ระหว่างตัวพวออกซิเจนกับถ่านหินในแต่ละรอบและการแตกสลายตัวของถ่านหินที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)	การสลายตัวของถ่านหิน (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.00	500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	750	0.0290	0.0307	0.0000	0.0546
10.00	950	0.1029	0.0931	0.0682	0.1085
12.50	950	0.1974	0.2137	0.1946	0.1501
15.00	950	0.2115	0.2935	0.3353	0.1214
17.50	950	0.1969	0.2640	0.2769	0.0732
20.00	950	0.1639	0.1879	0.2160	0.0407
22.50	950	0.1293	0.1170	0.1552	0.0226
25.00	950	0.0992	0.0784	0.0943	0.0179
27.50	950	0.0799	0.0586	0.0650	0.0150
30.00	950	0.0696	0.0419	0.0556	0.0132

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)	การสลายตัว ของถ่านหิน (mmol/min)
32.50	950	0.0610	0.0346	0.0464	0.0113
35.00	950	0.0551	0.0297	0.0314	0.0100
37.50	950	0.0504	0.0258	0.0249	0.0083
40.00	950	0.0471	0.0225	0.0178	0.0076
42.50	950	0.0442	0.0201	0.0158	0.0072
45.00	950	0.0402	0.0181	0.0193	0.0000
47.50	950	0.0382	0.0165	0.0181	0.0000
50.00	950	0.0365	0.0152	0.0162	0.0000
52.50	950	0.0349	0.0140	0.0154	0.0000
55.00	950	0.0336	0.0132	0.0147	0.0000
57.50	950	0.0311	0.0165	0.0135	0.0000
60.00	950	0.0302	0.0118	0.0131	0.0000
62.50	950	0.0300	0.0156	0.0124	0.0000
65.00	950	0.0291	0.0152	0.0122	0.0000
67.50	950	0.0286	0.0148	0.0120	0.0000
70.00	950	0.0283	0.0144	0.0117	0.0000
72.50	950	0.0263	0.0136	0.0115	0.0000
75.00	950	0.0258	0.0094	0.0107	0.0000
77.50	950	0.0255	0.0175	0.0137	0.0000
80.00	950	0.0254	0.0186	0.0290	0.0000
82.50	950	0.0248	0.0155	0.0286	0.0000
85.00	950	0.0247	0.0094	0.0194	0.0000
87.50	950	0.0243	0.0115	0.0143	0.0000
90.00	950	0.0244	0.0112	0.0132	0.0000
92.50	950	0.0241	0.0134	0.0116	0.0000
95.00	950	0.0244	0.0152	0.0113	0.0000
97.50	950	0.0224	0.0146	0.0110	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)	การสลายตัวของถ่านหิน (mmol/min)
100.00	950	0.0225	0.0143	0.0107	0.0000
102.50	950	0.0222	0.0123	0.0104	0.0000
105.00	950	0.0225	0.0112	0.0101	0.0000
107.50	950	0.0223	0.0099	0.0098	0.0000
110.00	950	0.0221	0.0095	0.0094	0.0000
112.50	950	0.0219	0.0090	0.0091	0.0000
115.00	950	0.0217	0.0087	0.0088	0.0000
117.50	950	0.0214	0.0087	0.0085	0.0000
120.00	950	0.0212	0.0085	0.0082	0.0000
122.50	950	0.0210	0.0084	0.0079	0.0000
125.00	950	0.0208	0.0082	0.0076	0.0000
127.50	950	0.0206	0.0080	0.0073	0.0000
130.00	950	0.0204	0.0079	0.0070	0.0000
132.50	950	0.0201	0.0077	0.0066	0.0000
135.00	950	0.0199	0.0076	0.0063	0.0000
137.50	950	0.0197	0.0074	0.0060	0.0000
140.00	950	0.0195	0.0073	0.0057	0.0000
142.50	950	0.0193	0.0071	0.0054	0.0000
145.00	950	0.0190	0.0069	0.0051	0.0000
147.50	950	0.0188	0.0068	0.0048	0.0000

ตารางที่ ค.17 อัตราการใช้ออกซิเจนในการฟื้นฟูโครงสร้างของตัวพาทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)
0.00	30	0.0000	0.0000	0.0000
2.50	250	0.0005	0.0666	0.0000

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)
5.00	500	0.0000	0.0169	0.1669
7.50	750	0.0109	0.0000	0.2142
10.00	950	0.3513	0.1092	0.3452
12.50	950	1.1087	0.6654	0.8697
15.00	950	1.5977	1.2734	1.3832
17.50	950	1.7813	1.5620	1.5898
20.00	950	1.8602	1.6785	1.6715
22.50	950	1.9100	1.7422	1.7181
25.00	950	1.9458	1.7821	1.7506
27.50	950	1.9703	1.8115	1.7706
30.00	950	1.9428	1.8211	1.7013
32.50	950	1.7519	1.8374	1.5331
35.00	950	1.4851	1.4679	1.3695
37.50	950	1.0996	0.8761	1.2171
40.00	950	0.6735	0.5019	1.0539
42.50	950	0.3870	0.3123	0.8443
45.00	950	0.2521	0.2186	0.6104
47.50	950	0.1796	0.1668	0.4714
50.00	950	0.1327	0.1345	0.4116
52.50	950	0.1024	0.1123	0.1732
55.00	950	0.0807	0.0956	0.1541
57.50	950	0.0641	0.0831	0.1420
60.00	950	0.0513	0.0734	0.1327
62.50	950	0.0424	0.0671	0.1259
65.00	950	0.0351	0.0620	0.1224
67.50	950	0.0300	0.0462	0.1245
70.00	950	0.0262	0.0442	0.1194
72.50	950	0.0239	0.0443	0.1158

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)
75.00	950	0.0221	0.0451	0.1138
77.50	950	0.0210	0.0455	0.1111
80.00	950	0.0199	0.0463	0.1106
82.50	950	0.0199	0.0473	0.1117
85.00	950	0.0197	0.0493	0.1114
87.50	950	0.0205	0.0517	0.1125
90.00	950	0.0215	0.0532	0.1147
92.50	950	0.0215	0.0553	0.1167
95.00	950	0.0225	0.0594	0.1187
97.50	950	0.0231	0.0606	0.1205
100.00	950	0.0235	0.0627	0.1218
102.50	950	0.0245	0.0638	0.1230
105.00	950	0.0252	0.0668	0.1242
107.50	950	0.0261	0.0694	0.1253
110.00	950	0.0268	0.0707	0.1265
112.50	950	0.0277	0.0724	0.1273
115.00	950	0.0283	0.0743	0.1288
117.50	950	0.0291	0.0758	0.1298
120.00	950	0.0297	0.0778	0.1315
122.50	950	0.0308	0.0789	0.1326
125.00	950	0.0312	0.0818	0.1337
127.50	950	0.0322	0.0833	0.1353
130.00	950	0.0328	0.0850	0.1371
132.50	950	0.0337	0.0888	0.1383
135.00	950	0.0349	0.0892	0.1382
137.50	950	0.0356	0.0915	0.1402
140.00	950	0.0362	0.0925	0.1413
142.50	950	0.0371	0.0941	0.1428

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	รอบที่ 1 (mmol/min)	รอบที่ 2 (mmol/min)	รอบที่ 3 (mmol/min)
145.00	950	0.0388	0.0946	0.1438
147.50	950	0.0396	0.0964	0.1446
150.00	950	0.0404	0.0968	0.1464
152.50	950	0.0409	0.0977	0.1477
155.00	950	0.0418	0.1001	0.1487
157.50	950	0.0425	0.1007	0.1514
160.00	950	0.0430	0.1024	0.1518
162.50	950	0.0441	0.1035	0.1534
165.00	950	0.0452	0.1049	0.1555
167.50	950	0.0460	0.1067	0.1574
170.00	950	0.0472	0.1079	0.1596
172.50	950	0.0484	0.1095	0.1606
175.00	950	0.0495	0.1110	0.1632
177.50	950	0.0501	0.1133	0.1650
180.00	950	0.0512	0.1142	0.1670
182.50	950	0.0520	0.1177	0.1685
185.00	950	0.0528	0.1181	0.1694
187.50	950	0.0534	0.1193	0.1700

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้า นายภานุวัฒน์ กนกวรรณกร เกิดวันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2532 สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรในปีการศึกษา 2554 จากนั้นจึงได้เข้าทำงานที่บริษัทมิชลินสยามจำกัด เป็น เวลา 2 ปี จึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จ การศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตในปี 2559 ข้าพเจ้าได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ ระดับนานาชาติ The 7th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology and The 22nd PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals and Polymers (PPCSym2016) ในวันที่ 24 พฤษภาคม 2559 ณ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร และงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 26th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (TICHE2016) and The 6th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (ITICHE2016) ในวันที่ 27-28 ตุลาคม 2559 ณ ศูนย์ประชุม อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ปทุมธานี