

การศึกษาการผลิตก๊าซจากถิกไนต์โดยใช้เทคโนโลยีแบบเบดนิ่ง



นาย เฉลิมพล ใจหนัก

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-7181-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF LIGNITE GASIFICATION USING FIXED-BED TECHNOLOGY



Mr. Chalernpol Jainak

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mining Engineering
Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-7181-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการผลิตก๊าซจากลิกไนต์โดยใช้เทคโนโลยีแบบเบดนิ่ง
โดย นายเฉลิมพล ใจหนัก
สาขาวิชา วิศวกรรมเหมืองแร่
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ทีเฝ้าพันธุ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณะเดช)

..... กรรมการ
(อาจารย์สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย)

เฉลิมพล ไชหนัก: การศึกษาการผลิตก๊าซจากลิกไนต์โดยใช้เทคโนโลยีแบบเบดนิ่ง.
(STUDY OF LIGNITE GASIFICATION USING FIXED BED TECHNOLOGY) อาจารย์ที่
ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญญา มีขำณะ. 114 หน้า ISBN: 974-17-7181-9

การศึกษานี้เป็นการนำถ่านหินจากเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และเหมืองสบปราบ จังหวัดลำปางขนาดอนุภาค 9 – 13 เซนติเมตรมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เพื่อนำไปทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed – Bed Gasifier) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 750 เซนติเมตร โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนอากาศ 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และสัดส่วนของ Oxygen Rich Air 40%, 60% และ 100% ซึ่งการทดลองเหล่านี้ทำให้ความดัน 1 บรรยากาศ

จากการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินเชียงม่วนคือ ใช้ Oxygen Rich Air/Steam เป็นสารตัวกลางที่สัดส่วนของ Oxygen Rich Air 100% อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของก๊าซที่เผาไหม้ได้ คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 24.70% ก๊าซไฮโดรเจน 42.82% และก๊าซมีเทน 2.70% ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เท่ากับ 9.130 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง 65%

ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินสบปราบคือใช้ Oxygen Rich Air/Steam เป็นสารตัวกลางในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่สัดส่วนของ Oxygen Rich Air 100% อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของก๊าซที่เผาไหม้ได้ คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 25.57% ก๊าซไฮโดรเจน 43.97% และก๊าซมีเทน 2.94% ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เท่ากับ 9.340 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง 67%

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เหมืองแร่และปิโตรเลียม

สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่

ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4570264421: MINING ENGINEERING

KEYWORD: COAL / LIGNITE / GASIFICATION / FIXED BED GASIFIER

CHALERMPOL JAINAK: STUDY OF LIGNITE GASIFICATION USING FIXED
BED TECHNOLOGY. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PINYO MEECHUMNA.
114 pp. ISBN: 974-17-7181-9

In this study a column of fixed – bed gasifier diameter 10 cm. and 750 cm. height has been investigated. The test run on the gasification of 2 coal types, Chiang Muan coal and Lampang coal, with particle size range of 9 – 13 cm. The interesting experiment parameters were reaction temperatures (varying at 750, 850 and 950⁰C), air flow rates (varying at 3.0, 4.0, 5.0 and 6.0 m³/hr) and proportion of Oxygen Rich Air (varying 40%, 60% and 100%) respectively. These experiments were done at atmospheric pressure.

The result showed that the optimum operating condition in the fixed – bed gasifier for Chiang Muan coal is the use of 100% oxygen rich air and steam as reagent gas. The combustible component in producer gas was composed of carbon monoxide 24.70%, hydrogen 42.82% and methane 2.70% with heating value of 9.013 MJ/m³ and gasification efficiency of 65%.

For Sobprab coal, the optimum operating condition in the fixed – bed gasifier the use of 100% oxygen rich air and steam as reagent gas. The combustible component in produced gas was composed of carbon monoxide 25.57%, hydrogen 43.97% and methane 2.94%with heating value of coal gas of 9.340 MJ/m³ and gasification efficiency of 67%.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Mining and Petroleum Engineering Student's signature.....

Field of Study Mining Engineering Advisor's signature.....

Academic Year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. ภิญโญ มีชานะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของงานวิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ลิเฝ้าพันธุ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณะเดช และอาจารย์สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทเหมืองเชียงม่วน และบริษัทบ้านปู จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านหินที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณสถาบัน Beijing Research Institute of Coal Chemistry ประเทศจีน ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องปฏิกรณ์ในงานวิจัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมที่ทำให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 พื้นที่ที่ทำการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.5 วิธีการดำเนินการ.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	6
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถ่านหิน.....	6
2.2 ความหมายของการกาซิฟิเคชัน.....	9
2.3 ปฏิกิริยากาซิฟิเคชัน (Gasification Reaction).....	10
2.4 องค์ประกอบที่จุดสมดุล (Equilibrium Composition).....	15
2.5 ก๊าซรีเอเจนต์ (Reagent Gas).....	18
2.6 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน.....	20
2.7 เทคโนโลยีการจัดมลสารที่เกิดจากกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหิน.....	23
2.8 ระบบผลิตก๊าซจากถ่านหิน (Coal Gasifier).....	42
2.9 สักยภาพในการนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซจากถ่านหินมาใช้.....	45
2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	47
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	53
3.1 เภณท์เบื้องต้นของอุปกรณ์ผลิตก๊าซจากถ่านหิน.....	53
3.2 องค์ประกอบหลักของระบบผลิตก๊าซจากถ่านหิน.....	53

3.3	ระบบผลิตก๊าซจากถ่านหินที่ใช้ในการศึกษานี้.....	56
3.4	วิธีการทดลอง.....	65
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย.....	69
4.1	ผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน.....	69
4.2	ผลการวิจัยการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน.....	72
4.3	การเปรียบเทียบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้ง 2 แหล่ง.....	94
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	96
5.1	การศึกษาผลของอุณหภูมิในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินโดยใช้อากาศเป็นก๊าซตัวกลางที่ความดันบรรยากาศ.....	96
5.2	การศึกษาผลของอัตราการป้อนอากาศในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่ความดันบรรยากาศ.....	96
5.3	การศึกษาผลของสัดส่วนของ Oxygen Rich Air ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่ความดันบรรยากาศ.....	97
5.4	ภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน.....	98
5.5	ข้อเสนอแนะ.....	98
5.6	เปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในการทดลองกับงานวิจัยอื่น.....	99
	รายการอ้างอิง.....	101
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์สมบัติของถ่านหิน.....	103
	ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณสมบัติถ่านหิน.....	110
	ภาคผนวก ค วิธีคำนวณหาความหนาแน่นของถ่านหิน.....	112
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับไม้และพีต.....	8
2.2	ปฏิกิริยาที่เกิดในระหว่างการไพโรไลซ์ถ่านหิน.....	10
2.3	แนวโน้มสมดุลของระบบ C – H – O (H/O = 1 gm-atom/gm-atom).....	18
2.4	กระบวนการแยกก๊าซ H ₂ S ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	25
2.5	สมบัติทั่วไปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	30
3.1	วิธีการวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Proximate Analysis.....	66
3.2	การวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Ultimate Analysis.....	66
4.1	ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Proximate Analysis.....	69
4.2	ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Ultimate Analysis.....	70
4.3	ผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของเถ้า (Coal Ash Refusibility).....	70
4.4	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้า (Coal Ash Composition).....	71
4.5	ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองเชิงม่วนที่อุณหภูมิการเกิด ปฏิกิริยาต่างๆ กัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	72
4.6	ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองสบปราบที่อุณหภูมิการเกิด ปฏิกิริยาต่างๆ กัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	73
4.7	ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองเชิงม่วนที่อัตราการป้อน อากาศ ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส.....	80
4.8	ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองสบปราบที่อัตราการป้อน อากาศ ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส.....	81
4.9	ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองเชิงม่วน โดยใช้ Oxygen Rich Air ที่สัดส่วนต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส.....	87
4.10	ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองสบปราบ โดยใช้ Oxygen Rich Air ที่สัดส่วนต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส.....	88
4.11	ผลการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้ง 2 แหล่ง เมื่อใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเป็นสาร ตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ	94

5.1 สมบัติของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่ภาวะที่ดีที่สุดคือ
อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง..... 98

5.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับผลการทดลอง
จากงานวิจัยอื่นๆ ที่ภาวะการทดลองที่ดีที่สุด..... 99

5.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับผลการทดลอง
จากงานวิจัยอื่นๆ ที่ภาวะการทดลองการใช้อากาศและไอน้ำเป็นสารตัวกลาง..... 100



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การเปลี่ยนแปลงการเกิดของถ่านหิน.....	7
2.2	ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน.....	9
2.3	แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหิน.....	11
2.4	ลักษณะสมดุลของกราฟไฟต์ – ไฮโดรเจน – มีเทน.....	15
2.5	ลักษณะสมดุลของกราฟไฟต์ – ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ – ก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์.....	16
2.6	ลักษณะสมดุลของระบบคาร์บอน – ไฮโดรเจน – ออกซิเจน (H/O = 1).....	17
2.7	เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาพื้นฐานของไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจน.....	23
2.8	The Sulfiban System Diagram Courtesy of Applied Technology Corporation....	26
2.9	Coke Oven Gas Desulphurization with Ammonia Liquor Diagram Courtesy of Dravo/Still.....	27
2.10	กระบวนการ Stretford ที่ใช้แยก H ₂	28
2.11	Flow Diagram of Alkalized Alumina Process.....	35
2.12	การกำจัด SO ₂ โดยใช้ Copper Oxide Process.....	36
2.13	Equilibrium Curve ของสารดูดซับต่าง ๆ.....	37
2.14	กระบวนการ Reinluft Dry Process.....	39
2.15	Lurgi Sulfuric Wet Adsorption Process.....	40
2.16	การกำจัด SO ₂ โดย Cat – Ox Process.....	41
2.17	กระบวนการกาซิฟิเคชันแบบเบดนิ่ง.....	43
3.1	แผนผังการทดลองการผลิตก๊าซจากถ่านหิน.....	55
3.2	ถังเก็บถ่านหิน (Coal Hopper).....	56
3.3	อุปกรณ์ป้อนถ่านหินเข้าเครื่องผลิตก๊าซ (Screw Conveyor).....	57
3.4	เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor).....	57
3.5	Air Pressure Regulator.....	58
3.6	เครื่องวัดอัตราการไหล (Ventury Meter).....	58
3.7	อุปกรณ์ผลิตไอน้ำ (Steam Generator).....	59
3.8	ระบบอุ่นอากาศ (Air Preheater).....	59
3.9	บริเวณป้อนอากาศและไอน้ำ (Air and Steam Input Zone)	60

3.10	บริเวณส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ (Coal Input and Coal Gas Output Zone).....	61
3.11	บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction Zone).....	61
3.12	อุปกรณ์ลดอุณหภูมิก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Cooler).....	62
3.13	อุปกรณ์แยกของเหลวและก๊าซ (Liquid – Gas Separator).....	63
3.14	ระบบควบคุม (Control System).....	64
3.15	จุดเก็บตัวอย่าง (Sampling Point).....	64
3.16	ลูกบอลเก็บตัวอย่าง (Sampling Ball).....	65
3.17	เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography).....	65
3.18	ถ่านชาร์ติดไฟใช้ในการจุดเครื่องผลิตก๊าซ.....	67
3.19	หัวเผาและเปลวไฟจากการเผาไหม้ก๊าซผลิตภัณฑ์.....	68
4.1	ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	74
4.2	ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองสบปราบ จังหวัดลำปาง อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	74
4.3	ผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของ ถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน อัตราการป้อน อากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	76
4.4	ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน อัตราการป้อน อากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	77
4.5	ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน อัตราการป้อน อากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	78
4.6	ผลการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน อัตราการป้อน อากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....	79
4.7	ผลของอัตราการป้อนอากาศที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จาก ถ่านหินเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส..	82

- 4.8 ผลของอัตราการป้อนอากาศที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จาก ถ่านหินเหมืองสบปราบ จังหวัดลำปาง อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส..82
- 4.9 ผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส.....83
- 4.10 ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส..... 84
- 4.11 ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส..... 85
- 4.12 ผลการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส.....86
- 4.13 ผลของสัดส่วน Oxygen Rich Air ที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง..... 89
- 4.14 ผลของสัดส่วน Oxygen Rich Air ที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองสบปราบ จังหวัดลำปาง อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....89
- 4.15 ผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....90
- 4.16 ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....91
- 4.17 ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....92
- 4.18 ผลการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการ

ทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง.....93

4.19 กราฟเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหิน
ทั้ง 2 แหล่ง..... 95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

จากการที่เศรษฐกิจของประเทศไทยได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับปัจจุบันโครงสร้างทางเศรษฐกิจของประเทศไทยได้เปลี่ยนแปลงจากภาคเกษตรกรรมไปสู่การผลิตในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น การผลิตในสภาพปัจจุบันเป็นการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการภายนอกประเทศด้วย ทำให้ความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งนับเป็นภาระหนักต่อฐานะการเงินการลงทุนของประเทศที่จะต้องจัดหาพลังงานมาใช้ให้เพียงพอและเหมาะสม เพราะพลังงานเหล่านั้นส่วนหนึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปจากการผลิตและการใช้พลังงานมหาศาลดังกล่าวด้วย

ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นอุตสาหกรรมถ่านหินซึ่งรวมถึงการสำรวจ ผลิต และการใช้ถ่านหิน จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะประเทศที่เป็นผู้นำทางด้านเศรษฐกิจอุตสาหกรรม เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และจีน เป็นต้น สำหรับประเทศไทยนั้นถึงแม้จะมีแหล่งถ่านหินอยู่ปริมาณมาก แต่ก็ยังไม่มีการพัฒนาการผลิต การนำมาใช้มากนัก ผู้ใช้ก็ใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศที่มีการใช้อยู่แล้ว โดยนำมาใช้ในลักษณะ Turnkey จึงไม่จำเป็นต้องมีการค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติม ทำให้การวิจัยและการพัฒนาได้ดำเนินการในช่วงที่ผ่านมาค่อนข้างน้อย และเกือบทั้งหมดของผลงานเป็นผลงานของหน่วยงานของภาครัฐ โดยเฉพาะของนักวิชาการในมหาวิทยาลัยและเป็นการศึกษาวิจัยขนาดห้องปฏิบัติการหรือขั้นพื้นฐานเกือบทั้งสิ้น งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นทางด้านองค์ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเป็นส่วนใหญ่ เช่น การหาค่าประกอบของถ่านหินทั้ง Proximate และ Ultimate Analysis การเผาไหม้ในรูปแบบต่างๆ เพื่อหาอิทธิพลของตัวแปร และกำจัดการที่ไม่ต้องการบางตัวเช่น เถ้า ซัลเฟอร์ เป็นต้น ส่วนการศึกษาเพื่อพัฒนานั้น ก็ได้มีการศึกษาเพื่อความเข้าใจในเทคโนโลยีที่ได้มีการนำมาใช้ในต่างประเทศแล้วเป็นส่วนใหญ่ เช่นการเผาไหม้ในเตาเผาแบบต่างๆ เช่นในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด การเผาไหม้ในเบดแบบหมุนเวียน การลดกำมะถันในการเผาไหม้โดยการใช้หินปูน เป็นต้น มีการทำวิจัยโดยการประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมในประเทศบ้าง แต่ก็ยังไม่กว้างขวางนัก เช่น การพัฒนาเตาเผาไหม้ถ่านหิน และการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อบ่มไบโอบิวททางภาคเหนือ เป็นต้น

การพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับถ่านหินในปัจจุบัน ส่วนใหญ่มุ่งเน้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการนำถ่านหินไปใช้ การพัฒนาการใช้ถ่านหินเพื่อผลิตพลังงาน เช่น การผลิตไฟฟ้า ในปัจจุบันจะมุ่งแก้ปัญหาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม โดยมุ่งที่จะให้มีการลดปริมาณ

สารพิษที่เกิดขึ้นภายในระบบการเผาไหม้หรือก่อนการเผาไหม้ โดยหลีกเลี่ยงการสร้างระบบกำจัดมลสารแยกออกมาต่างหากหลังการเผาไหม้แล้ว ดังเช่นเตาเผาไหม้ถ่านหินในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการนำถ่านหินมาเปลี่ยนเป็นพลังงานให้สูงขึ้น ซึ่งส่งผลดีทำให้มีผลงานการค้นคว้าหาเทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินก่อนการเผาไหม้ ออกมาหลายวิธี มีการทดลองวิจัยค้นหาเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบใหม่ๆ เพื่อให้ลดปริมาณสารพิษที่เกิดขึ้นในช่วงการเผาไหม้ และพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณสารพิษในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยไม่ต้องทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงหรือทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง

ดังนั้นจึงเกิดเทคโนโลยีเกี่ยวกับถ่านหินที่เรียกว่า CCT (Clean Coal Technology) การศึกษาตามแนวเทคโนโลยีใหม่นี้ เพื่อให้การใช้ถ่านหินมีปัญหาลดน้อยลงซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1. เทคโนโลยีก่อนการเผาไหม้ถ่านหิน เป็นเทคโนโลยีในการลดปริมาณซัลเฟอร์และสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากถ่านหินก่อนเข้าสู่ระบบการใช้ประโยชน์ เช่น ก่อนการเผาไหม้ หรือ ก่อนเข้าสู่ระบบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันขั้นตอนแรกของการกำจัด หรือลดสารเจือปนจากถ่านหินที่ทำได้ ถ่านหินจะผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดที่ปากเหมือง การทำความสะอาดดังกล่าวสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ที่ปล่อยออกมาได้ถึงร้อยละ 10 ปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาขั้นตอนการทำความสะอาดถ่านหิน โดยใช้วิธีทางกายภาพ (Physical Cleaning) ทางเคมี (Chemical Cleaning) เทคนิคทางด้านจุลินทรีย์และเอนไซม์เพื่อนำเอาซัลเฟอร์ออกจากถ่านหินก่อนการเผาไหม้

การทำความสะอาดถ่านหินแบบกายภาพนั้น สามารถกำจัดได้เฉพาะสิ่งเจือปนที่แตกต่างจากถ่านหินอย่างชัดเจน เช่น เศษดิน หิน และซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปของ Pyritic Sulfur เท่านั้น ส่วน Organic Sulfur ไม่สามารถกำจัดออกได้ เทคนิคทางกายภาพที่ทำการซื้อขายกันอยู่ในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟอร์ได้ร้อยละ 30-50 ของซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในรูป Pyritic Sulfur และสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่ทำให้เกิด Ash ได้ประมาณร้อยละ 60 ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบให้ดีขึ้น เช่น การลดขนาดถ่านหินให้เล็กลง ซึ่งสามารถลดได้ทั้งซัลเฟอร์ในรูป Pyrite และสิ่งเจือปนอื่นได้ถึงร้อยละ 90 ของที่มีอยู่

การทำความสะอาดถ่านหินแบบเคมีและแบบชีวภาพ เป็นแบบที่ก้าวหน้ามากสำหรับการกำจัดสิ่งเจือปนออกจากถ่านหินก่อนการเผาไหม้เทคโนโลยีนี้บางระบบได้มีการเริ่มใช้ในการผลิตแล้วเทคนิคที่เป็นไปได้ค่อนข้างแน่นอนสำหรับการทำความสะอาดถ่านหินแบบเคมี คือการใช้วิธี Molten Caustic Leaching

การทำความสะอาดถ่านหินแบบชีวภาพ (Biological Cleaning) ได้มีการทดลองค้นคว้ากันอย่างกว้างขวางโดยมีการใช้จุลินทรีย์ และเชื้อรา (Fungi) โดยมีการใช้เอนไซม์ไปช่วยเร่งให้

เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น วิธีการนี้สามารถลดสารซัลเฟอร์ได้ถึงร้อยละ 90 ของซัลเฟอร์ที่มีอยู่ทั้งหมดคือ ทั้งในรูป Pyrite และ Organic

2. เทคโนโลยีระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดถ่านหินขณะเผาไหม้ ซึ่งขั้นตอนนี้มีผลคือไม่ต้องมีการสร้างเครื่องมือขึ้นมาเพิ่มเติมเพื่อกำจัดทั้งก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เช่นเทคโนโลยี Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) ซึ่งอาจใช้หินปูนบดเข้ากำจัดก๊าซ SO_x ในระหว่างการเผาไหม้ และการเผาไหม้จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเผาไหม้ทั่วไปจึงทำให้ก๊าซ NO_x เกิดขึ้นน้อยด้วย

3. เทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ถ่านหิน เป็นเทคโนโลยีการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินหลังการเผาไหม้ถ่านหิน เช่นในปลุก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศนั้น เรียกกระบวนการนี้ว่า Flue Gas Desulphurization (FGD) ใช้วิธีการให้ก๊าซทำปฏิกิริยากับน้ำปูนหรือหินปูนทั้งในรูปของการฉีดพ่น หรือใส่เข้าไปเป็นของเหลว ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดซัลเฟตหรือซัลไฟต์ขึ้น อนุภาคหรือของเสียที่เกิดขึ้นต้องกำจัดโดยเอาออกจากระบบ การดักจับดังกล่าวมี 2 แบบคือ แบบเปียก (Wet) และแบบแห้ง (Dry) ทั้งสองแบบมีปฏิกิริยาเคมีเหมือนกัน แต่แบบแห้งของเสียที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นผง และมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบเปียกซึ่งใช้กันมากอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ได้ประมาณร้อยละ 80-90 แต่ไม่สามารถลดปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนได้

4. การแปรสภาพ ได้มีการศึกษาการแปรสภาพถ่านหินให้เป็นก๊าซโดยกระบวนการ Gasification ซึ่งจะทำให้สามารถนำก๊าซที่เกิดขึ้นไปกำจัดสารซัลเฟอร์ออกก่อนเอาไปใช้เผาไหม้เป็นเชื้อเพลิง หรือเอาไปผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป เรียกว่า Gasification Combined Cycle กระบวนการนี้เป็นที่คาดหวังว่าจะถูกนำมาใช้แทนระบบการเผาไหม้ถ่านหินโดยตรงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันเพราะมีข้อดีกว่าระบบเดิมหลายประการ รวมทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดซัลเฟอร์ต่ำลง รวมทั้งผลิตของเสียจากการกำจัดน้อยลงและการกำจัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงขั้นตอนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหิน
2. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซจากถ่านหินโดยใช้เทคโนโลยีแบบใดหนึ่ง
3. เพื่อเพิ่มศักยภาพให้กับแหล่งถ่านหินค่าความร้อนต่ำ

1.3 พื้นที่ทำการศึกษ

ถ่านหินเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และถ่านหินจากเหมืองบ้านปูล อำเภอสบปราบ จังหวัดลำปาง

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน โดยใช้เทคโนโลยีแบบ เบนดิ่ง (Fixed Bed) ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลที่เป็นและเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหิน โดยเฉพาะเทคโนโลยีแบบเบนดิ่ง ลักษณะและสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง และทำการทดลองผลิตก๊าซจากถ่านหิน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบนดิ่งและทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการบวนการผลิต เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซจากถ่านหิน

1.5 วิธีการดำเนินการ

ขั้นตอนการศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน มีขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ทำการศึกษา รวบรวมข้อมูลทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซจากถ่านหิน

1.5.2 การศึกษาการผลิตก๊าซจากถ่านหิน

1.5.2.1 วิเคราะห์สมบัติของถ่านหิน ซึ่งที่ใช้ในการศึกษาเป็นถ่านหินลิกไนต์ภายในประเทศ จากเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และเหมืองสบปราบ จังหวัด ลำปาง โดยจะทำการวิเคราะห์ทั้งแบบ Proximate และ Ultimate Analysis และจุดหลอมเหลวของถ่าน

1.5.2.2 ทดลองการผลิตก๊าซจากถ่านหิน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบนดิ่ง (Fixed-Bed Gasifier) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีอยู่แล้ว ณ Beijing Research Institute of Coal Chemistry ประเทศจีน โดยตัวแปรที่ศึกษามีดังนี้

1.5.2.2.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

1.5.2.2.2 อัตราการป้อนของอากาศและไอน้ำ

1.5.2.2.3 สัดส่วนของ Oxygen Rich Air

1.5.2.3 เก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลอง

1.5.2.4 วิเคราะห์ก๊าซที่ได้จากการทดลอง

1.5.3 สรุปผลการวิจัย

1.5.4 จัดทำรายงานผลการศึกษา

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อพัฒนาแหล่งอ่านหิน โดยการใช้เทคโนโลยีแปรสภาพอ่านหินให้เป็นก๊าซ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งของการใช้ประโยชน์จากอ่านหิน โดยเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถ่านหิน

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้กันมากที่สุดทั่วโลก ในทางธรณีวิทยาถ่านหินเป็นหินตะกอน (Sedimentary Rock) ชนิดหนึ่ง ถ่านหินเกิดจากการทับถมของซากพืช โดยผ่านกระบวนการสูญเสีย ออกซิเจน (Deoxygenation) และกระบวนการเกิดถ่านหิน (Coalification) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงเป็นเวลาหลายร้อยล้านปี ถ่านหินแต่ละชนิดจึงมีส่วนประกอบแตกต่างกันทั้งในทางกายภาพ และทางเคมีซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ และมีสารอนินทรีย์ปนอยู่เล็กน้อย ถ่านหินมีโครงสร้างเป็นโมเลกุลคล้ายพอลิเมอร์ (Polymer-molecule) ประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และธาตุเจือปนเช่น กำมะถัน ไนโตรเจน ซิลิกอน และแคลเซียม เป็นต้น

แหล่งถ่านหินมีอยู่ทุกทวีป แหล่งถ่านหินในยุค Carboniferous ซึ่งมีอายุมากประมาณ 250 ล้านปี พบมากในทวีปยุโรป อเมริกาเหนือ และสหราชอาณาจักรซึ่งเป็นแหล่งใหญ่ นอกจากนี้ยังมี แหล่งถ่านหินในยุค Cretaceous และ Tertiary ซึ่งมีอายุน้อยประมาณ 20 ล้านปี เช่นถ่านหินที่พบใน ทวีปเอเชีย และออสเตรเลีย

กระบวนการเกิดถ่านหินเริ่มจากการเน่าเปื่อยผุพังของซากพืชกลายเป็นถ่านพีต (Peat) ต่อมาเป็นถ่านหินอ่อน (Soft Coal) ได้แก่ถ่านหินสีน้ำตาล (Brown Coal) และถ่านลิกไนต์ (Lignite) แล้วแปรสภาพเป็นถ่านหินแข็ง (Hard Coal) ได้แก่หินกลุ่มบิทูมินัส (Bituminous) และแอนทราไซต์ (Anthracite)

2.1.1 การจำแนกถ่านหิน

ถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ชนิดและศักดิ์ของถ่านหิน [1]

2.1.1.1 ชนิด (Type) โดยอาศัยการศึกษาระบบไมโครสโคปี (Microscopy) ของ ถ่านว่ามีอะไรเป็นพื้นฐาน ในการศึกษาสามารถจำแนกย่อยได้เป็น 3 แบบคือ

- วิทริไนต์ (Vitrinite) เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของพวกเปลือกไม้ เนื้อเชื้อไม้เป็น
- เอ็กซ์ไนต์ (Exinite) เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของพวกสาหร่าย และพืชชั้นต่ำ
- อินเอทไนต์ (Inertinite) ไม่สามารถจำแนกได้ว่าเกิดจากอะไรเป็นองค์ประกอบ

พื้นฐาน

2.1.1.2 คักดี (Rank) เป็นสมบัติซึ่งบ่งบอกความเป็นถ่านหินของถ่านหินนั้นๆ ความเป็นถ่านหิน หรือลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหิน (Coalification) ขึ้นอยู่กับทั้งอายุและอัตราการเปลี่ยนแปลง

ต้นกำเนิดของถ่านหินมาจากการเน่าเปื่อยทับถมของพืชยืนต้น (Woody Material) ในบริเวณน้ำนิ่ง เริ่มกลายเป็นพีชก่อน แล้วจึงเปลี่ยนแปลงต่อไปภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิเนื่องจากการปิดทับด้วยโคลนและตะกอน ตลอดจนการเคลื่อนทับของชั้นหินทำให้เนื้อถ่านหินแน่นแข็งขึ้น สูญเสียน้ำ ออกซิเจน และไฮโดรเจนมากขึ้น ความเป็นถ่านหินสูงขึ้นตามลำดับ ตั้งแต่พีช ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส เซมิแอนทราไซต์ ไปจนถึงแอนทราไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นถ้าเปรียบเทียบกับเนื้อไม้ที่มีปริมาณน้ำสูง คาร์บอนต่ำ แต่ไฮโดรเจนและออกซิเจนสูง เมื่อเนื้อไม้เปลี่ยนไปเป็นพีชในระยะเริ่มต้น และเปลี่ยนเป็นถ่านหินที่มีคักดีสูงขึ้น จะมีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น ขณะเดียวกันออกซิเจนและความชื้นลดลงตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่

2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงการเกิดของถ่านหิน [1]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของถ่านหินเปรียบเทียบกับไม้และพีต [2]

Rank	% Moisture (As Receive)	% Moisture (Dry Basis)	% (Dry Ash Basis)		
			Carbon	Hydrogen	Oxygen
Wood	30 – 60	10 – 15	50	6.0	43
Peat	+90	10 – 25	55 – 65	5.5	32
Lignite	20 – 40	15 – 25	65 – 73	4.5	21
Sub-bituminous	10 – 20	10 – 20	73 – 78	6.0	16
Bituminous	13 – 1	13 – 1	78 – 92	5.3	8
Anthracite	2 – 3.5	2 – 3.5	92 – 96	2.5	4

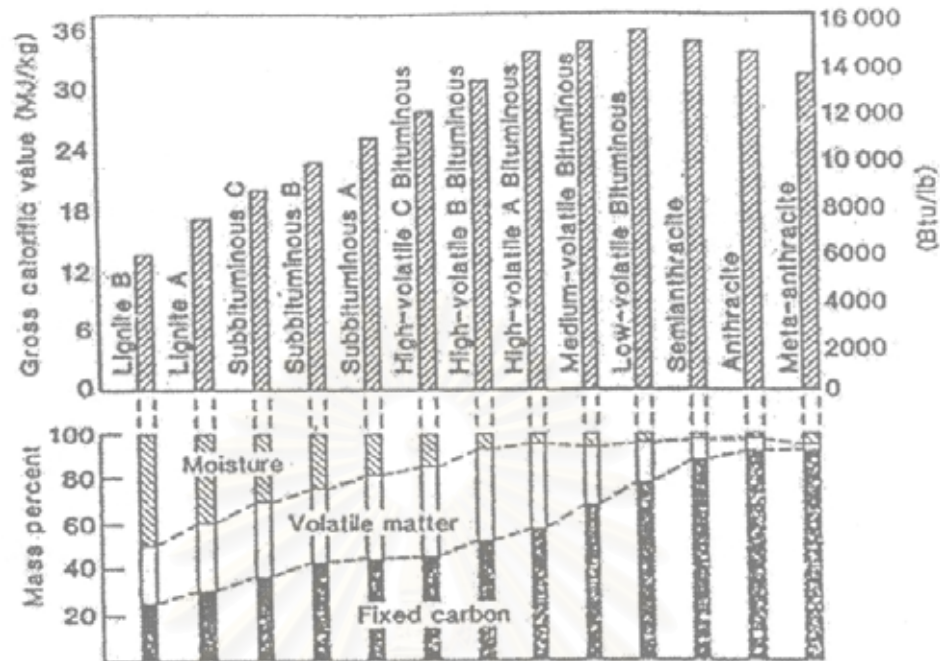
การจำแนกศักดิ์ถ่านหิน และการระบุคุณภาพของถ่านหินเกี่ยวกับการเผาไหม้และการให้ความร้อนอาศัยผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานต่างๆของถ่านหิน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อนรูปที่ 2.2 แสดงค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน โดยถ่านหินแต่ละศักดิ์มีลักษณะเฉพาะ ดังนี้

- ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน Lignum ซึ่งหมายถึงไม้ ถ่านหินลิกไนต์มีความเป็นถ่านหินน้อยที่สุด จัดเป็นถ่านหินอ่อน (Soft Coal) จึงมีร่องรอยของเนื้อไม้ มีสีทึบด้าน มีความชื้นและสารระเหยสูง มีค่าความร้อนต่ำใกล้เคียงเซลลูโลส

- ถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-bituminous Coal) เป็นถ่านหินศักดิ์สูงถัดจากลิกไนต์ บางทีเรียกว่า ลิกไนต์ดำ (Black Lignite) ซึ่งหนังสีอบบางเล่มระบุว่า เป็นถ่านอ่อนเช่นกัน แม้จะมีร้อยละคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ มักจะมีค่าความชื้นสูงและปริมาณเถ้าสูงด้วย แต่เนื่องจากมีสมบัติจุดไฟติดง่าย และไม่เยิ้มเกาะเป็นก้อน จึงเป็นที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบเผาไหม้ขนาดใหญ่

- ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) ถ่านหินศักดิ์สูงขึ้นไป มีความเป็นถ่านหินมากขึ้น จัดเป็นถ่านหินแข็งชนิดหนึ่ง มีความเป็นมันวาวมากขึ้น แต่ยังคงมีปริมาณสารระเหยสูงทำให้เผาไหม้ได้ดี และเป็นวัตถุดิบที่ดีในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทั้งก๊าซและของเหลว ถ่านหินบิทูมินัส บางกลุ่มมีคุณสมบัติการเยิ้มเกาะเป็นก้อนเมื่อให้ความร้อนที่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตถ่านโค้กคุณภาพดีที่ใช้ถลุงเหล็กและโลหะอื่นๆ

- ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินศักดิ์สูงที่สุด มีความแข็งแต่เปราะ มีสีดำเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีทึบ ปริมาณคาร์บอนสูงใกล้เคียงกราฟไฟต์ และมีปริมาณกำมะถันต่ำถึงแม้มีคุณภาพดีแต่ติดไฟได้ยากและอัตราการเผาไหม้ช้า จึงไม่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงแต่นำมาใช้ในการถลุงโลหะมากกว่า



รูปที่ 2.2 ค่าความร้อนและการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหิน [2]

2.2 ความหมายของการกาซิฟิเคชัน [1]

กาซิฟิเคชัน หมายถึง กระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น กับอากาศ ก๊าซออกซิเจน ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือส่วนผสมของตัวทำปฏิกิริยาเหล่านี้ ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้จะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน หรือเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตสารเคมี เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซชนิดอื่นๆต่อไป

กระบวนการกาซิฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบอินทรีย์ของถ่านหินให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนกับอากาศ (ออกซิเจน) ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน หรือก๊าซผสมดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ของกาซิฟิเคชัน ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบบางตัวที่ถือว่าเป็นสารปนเปื้อนอีกเล็กน้อย ได้แก่ น้ำมันทาร์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย เป็นต้น กระบวนการดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical Conversion Process) ขณะเกิดการกาซิฟิเคชันสารอินทรีย์ในถ่านหินเกิดการสลายตัวและถูกออกซิไดซ์เป็นเถ้า ก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยก๊าซผสมของ CO และ H_2 เรียกว่า ก๊าซผลิตภัณฑ์ (Producer Gas)

2.3 ปฏิกิริยากาซิฟิเคชัน [2]

ขั้นตอนสำคัญของการกาซิฟิเคชัน ได้แก่ การไพโรไลซ์ถ่านหินตามด้วยการกาซิฟายถ่านชาร์ นอกจากนี้ยังอาจเกิดการกาซิฟายน้ำมันทาร์ด้วย อุณหภูมิของการกาซิฟายถ่านหินจะประมาณ 700-1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันตั้งแต่บรรยากาศจนถึงมากกว่า 6,900 กิโลปาสคาล ระหว่างการกาซิฟายเกิดปฏิกิริยาหลายอย่างไปพร้อมๆกัน และต่อเนื่องกันซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นก๊าซ รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนกระบวนการกาซิฟิเคชัน ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกาซิฟิเคชันอาจแบ่งได้ดังนี้

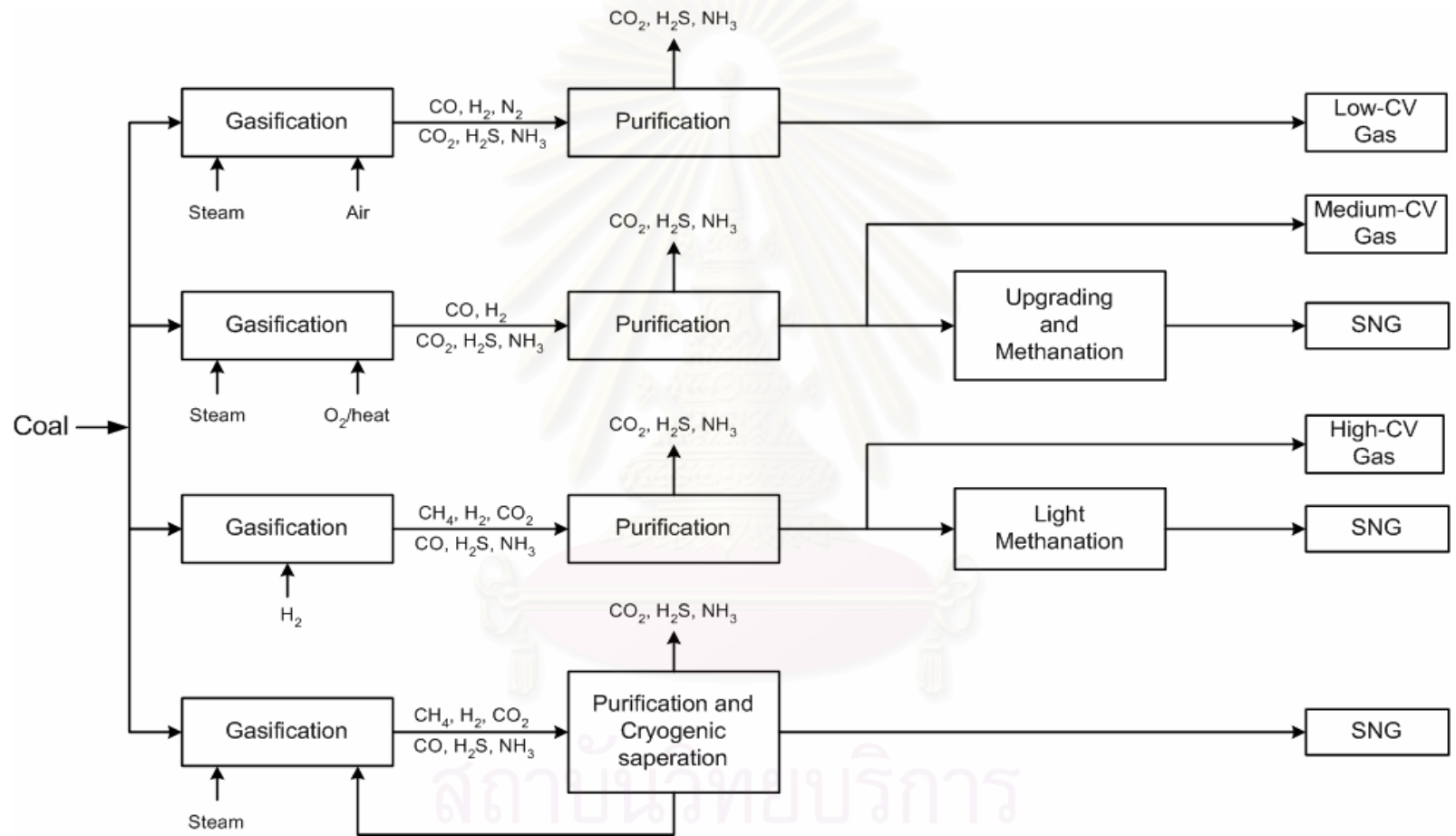
2.3.1 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

การไพโรไลซิสเป็นขั้นตอนแรกที่เกิดในการกาซิฟิเคชัน เมื่อถ่านหินได้รับความร้อนในที่อับอากาศและออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซ น้ำมันทาร์และถ่านชาร์ ช่วงแรกก๊าซและไอน้ำถูกปล่อยออกมาก่อนที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส แต่การสลายตัวจริงๆนั้นเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป การปลดปล่อยของสารระเหยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีทั้งหมดเกิดขึ้นเมื่อถ่านหินได้รับความร้อน ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการไพโรไลซ์ถ่านหิน สารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำจะเกิดการระเหยตัว และกลั่นตัวออกมาโดยไม่เกิดการแตกตัวของพันธะเคมีแต่โมเลกุลที่มีน้ำหนักสูงและโมเลกุลที่มีพันธะเชื่อมขวาง (Cross-linked) เกิดการแตกตัวของ C – O, C – S และ C – C พร้อมทั้งเกิดสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) สารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดการสลายตัวครั้งแรกจะตั้งไฮโดรเจนจากสารระหว่างปฏิกิริยาอื่นๆ แล้วกลั่นตัวและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดเป็นถ่านโค้ก ส่วนถ่านหินที่เหลือที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากลายเป็นถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวในขั้นแรกเกิดการสลายตัวต่อไปอีกที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดในระหว่างการไพโรไลซ์ถ่านหิน [3]

Product	Source	Reaction
Tar + Liquid	Weakly Bounded Ring Clusters	Distillation and Pyrolysis
CO ₂	Carboxyl Groups	Decarboxylation
CO (<500°C)	Carbonyl Groups and Ether Linkage	Decarbonylation
CO (<500°C)	Hetero – Oxygen	Ring Rupture
H ₂ O	Hydroxyl Groups	Dehydroxylation
CH ₄ + C ₂ H ₄	Alkyl Groups	Dealkylation
H ₂	Aromatic C – C Bonds Naphthenic Ring	Ring Rupture and Dehydrogenation



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหิน [3]

ถ่านชาร์ที่เพิ่มขึ้นภายหลังไฟโรไลซ์มีความว่องไวต่ำกว่าถ่านหินมาก ในขั้นนี้จึงต้องอาศัยเวลาทำปฏิกิริยามากขึ้น และปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรกคือ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป เกิดทั้งปฏิกิริยากาซิฟิเคชัน และไฮโดรกาซิฟิเคชัน ได้มีเทน คาร์บอนมอนนอกไซด์ ส่วนปฏิกิริยาชิฟต์ (Shift Reaction) เกิดในทุกสภาวะของการกาซิฟาย

ปฏิกิริยาทั้งหมดเกิดขึ้นอย่างสลับซับซ้อน บางปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่พื้นผิวโดยก๊าซบางตัวเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนบนผิวของถ่านหิน หรือก๊าซบางตัวอาจถูกดูด (Adsorption) อยู่บนผิวถ่านชาร์และทำปฏิกิริยากัน เมื่อได้ผลผลิตก็คายตัวออกจากผิวของผงถ่านหรือบางปฏิกิริยาเกิดในสภาพก๊าซโดยตรง

2.3.2 ปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial Combustion Reaction) เป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนภายใต้สภาวะการเผาไหม้ไม่เพียงพอ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



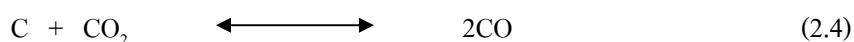
2.3.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction) เป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



2.3.4 ปฏิกิริยาस्टีมกาซิฟิเคชัน (Steam Gasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ก๊าซเหล่านี้มีค่าความร้อนสูง ซึ่งจะเป็นก๊าซที่จะถูกนำไปใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงต่อไป



2.3.5 ปฏิกิริยาคาร์บอกซีกาซิฟิเคชัน (Carboxygasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ก๊าซที่เกิดขึ้น ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์



2.3.6 ปฏิกริยาไฮโดรกาซิฟิเคชัน (Hydrogasification) หรือ เมทานชัน (Mathanation) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนนำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนโดยตรง และเกิดก๊าซมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกิดซัลฟิดเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้มีก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าความร้อนสูงจึงเป็นก๊าซที่ต้องการให้เกิดในการกาซิฟายมาก แต่ปฏิกิริยานี้มักเกิดขึ้นน้อย

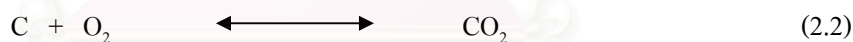


2.3.7 ปฏิกริยาชิฟต์ (Shift Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ บางที่เรียกว่า Water Gas Shift Reaction



ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible) ถึงแม้ปัจจัยทางเวลาและสมดุลเกือบไม่มีผลเลยในการปฏิบัติจริง

กระบวนการแบบต่อเนื่องการกาซิฟายถ่านหินโดยทั่วไป ระบบทำงานจะทำงานแบบเบดนิ่งหรือฟลูอิดไชด์เบด โดยใช้ไอน้ำหรือก๊าซออกซิเจน หรืออากาศ เป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยากาซิฟายกับถ่านหินที่บดละเอียด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นประกอบด้วย [4]



ในภาวะการทำงานของกระบวนการกาซิฟาย การเกิดปฏิกิริยาของก๊าซออกซิเจน (ปฏิกิริยา 2.2 และ 2.7) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก มีผลให้การหายไปของก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนปฏิกิริยากาซิฟายคาร์บอนด้วยไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ปฏิกิริยา 2.3 และ 2.4) ดำเนินไปโดยไม่ถึงจุดสมดุลทางเคมี เนื่องจากปฏิกิริยาที่ค่อนข้างช้า จุดสมดุลทางเคมีของ

ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อไอน้ำเกิดการสลายตัว 100% โดยเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมากที่อุณหภูมิเกินกว่า 1,093 °C ความดัน 1 ถึง 20 บรรยากาศ โดยทั่วไปปฏิกิริยา (2.4) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าปฏิกิริยา (2.3) เมื่อความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเท่าๆ กัน [5]

ปฏิกิริยา (2.6) เรียกว่า “ปฏิกิริยาอวตอร์ก๊าซชิฟต์” (Water Gas Shift Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ก๊าซเกิดขึ้นบนผิวของเชื้อเพลิงแข็ง โดยส่วนใหญ่ และเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นเพียงเล็กน้อยใน วัฏภาคก๊าซ (Gas Phase) ปฏิกิริยานี้จะอยู่ที่จุดสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นฟังก์ชันเนื่องจากการสลายตัวของไอน้ำ หรือความสูงของเบดเชื้อเพลิง ที่อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยานั้นๆ แพลกเตอร์อื่นๆ ก็มีผลกระทบที่สำคัญ เช่น ความสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของเต้าถ่าน เป็นต้น ที่ค่าการสลายตัวของไอน้ำต่ำๆ ปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปไม่ถึงจุดสมดุล แต่จะกลับไปอยู่ที่จุดสมดุลใหม่โดยเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวไอน้ำผ่านปฏิกิริยา (2.3) แทน เมื่อค่าการสลายตัวของไอน้ำสูง และมีปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากพอสมควร ก็เป็นไปได้ที่จะเกิดสมดุลของปฏิกิริยาอวตอร์ก๊าซชิฟต์โดยปฏิกิริยามีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาในทางย้อนกลับในการเกิดสมดุล การเกิดการสลายตัวของไอน้ำจะเป็นตัวแปรตามอุณหภูมิ แต่ที่อุณหภูมิเกินกว่า 1,093 °C แล้ว การสมมุติว่าเกิดสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยานี้จะมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตลอดการสลายตัวของไอน้ำทุกช่วง ซึ่งเป็นจริงเฉพาะปฏิกิริยาในการกาซิฟายถ่านหินบดละเอียด โดยใช้ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำและถ่านถ่านเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ภาวะการหลอมตัวเป็นก้อนของเต้า (Ash Slagging Condition) [6]

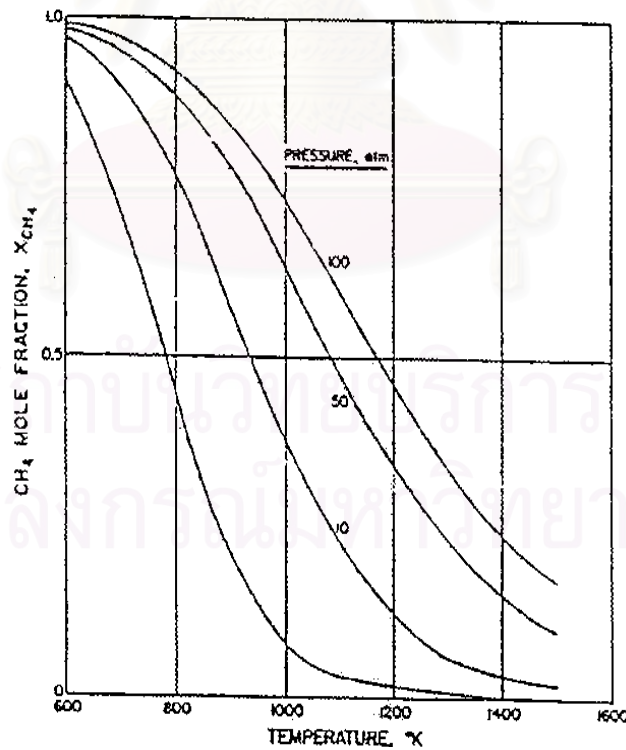
ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทน (Methane Formation Reaction) เป็นปฏิกิริยาสำคัญเกิดขึ้นปฏิกิริยาแรก ในกระบวนการกาซิฟายถ่านหินที่ประกอบด้วยสารระเหยที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,093 °C ความดันบรรยากาศหรือมากกว่า ในถ่านที่ประกอบด้วยคาร์บอนคงตัวเพียงอย่างเดียว ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นน้อยมากถึงแม้ว่าจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนโดยตรงก็ตาม ปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเติมก๊าซไฮโดรเจนของสารระเหยในถ่านจะแปรผันกับอัตราการให้ความร้อน วิธีการทำให้เกิดการสัมผัสกันของสารเข้าทำปฏิกิริยา ระดับอุณหภูมิ และความดันย่อยของไฮโดรเจนและไอน้ำ เป็นภาวะการเกิดก๊าซมีเทนที่ดีมาก ปฏิกิริยาของสารไฮโดร-คาร์บอนาเซียส (Hydro – Carbonaceous) กับไอน้ำเป็นสาเหตุให้เกิดการกระตุ้นพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาให้เป็นพื้นที่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งง่ายในการเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเพื่อเกิดก๊าซมีเทน

อย่างไรก็ตาม ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง การกาซิฟายในระบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ปฏิบัติงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2,000 °F จะมีปริมาณมีเทนสูงกว่าที่เกิดในกระบวนการกาซิฟายแบบเบดนิ่ง ผลเนื่องมาจากการเกิดการผสมผสานกันอย่างต่อเนื่อง และการหมุนเวียนของก้อนของแข็งในฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งนำเอาอนุภาคของเชื้อเพลิงแข็งที่ว่องไวในการทำ

ปฏิกิริยาจากบริเวณที่มีความดันย่อยของไอน้ำสูงทางตอนล่างของเบดไปสู่บริเวณที่มีความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนสูงทางตอนบนของเบด ส่วนในกรณีของเบดหนึ่งส่วนบนของเบดจะไม่ถูกนำกลับมาทำให้เกิดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาใหม่โดยไอน้ำ ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและคาร์บอนจึงมีอัตราเร็วที่ลดลงโดยผลจากการหน่วงปฏิกิริยาเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจน และความดันความดันย่อยของไอน้ำที่ต่ำทางตอนบน ทำให้อัตราการเกิดก๊าซมีเทนลดลง

2.4 องค์ประกอบที่จุดสมดุล (Equilibrium Composition)

จากเหตุผลทางเทอร์โมไดนามิกส์การที่ธาตุคาร์บอนที่อยู่ในถ่านหินมีค่าแอกติวิตีสูงกว่าธาตุคาร์บอนในกราไฟต์ องค์ประกอบของก๊าซที่ได้รับจากปฏิกิริยากาซิฟายถ่านหินภายใต้ภาวะที่สมดุลจะมีค่ามากกว่าที่เกิดจากกราไฟต์ ดังนั้นในการคำนวณค่าขององค์ประกอบของก๊าซต่างๆ จึงตั้งสมมุติฐานให้ธาตุคาร์บอนนั้นๆ มีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานของการรวมกันของสาร เช่นเดียวกับ กราไฟต์ ดังตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาสมดุลระหว่างกราไฟต์ - ไฮโดรเจน - ก๊าซมีเทน

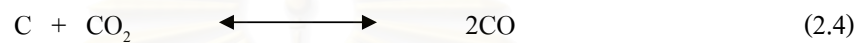


รูปที่ 2.4 ลักษณะสมดุลของกราไฟต์ - ไฮโดรเจน - มีเทน [7]

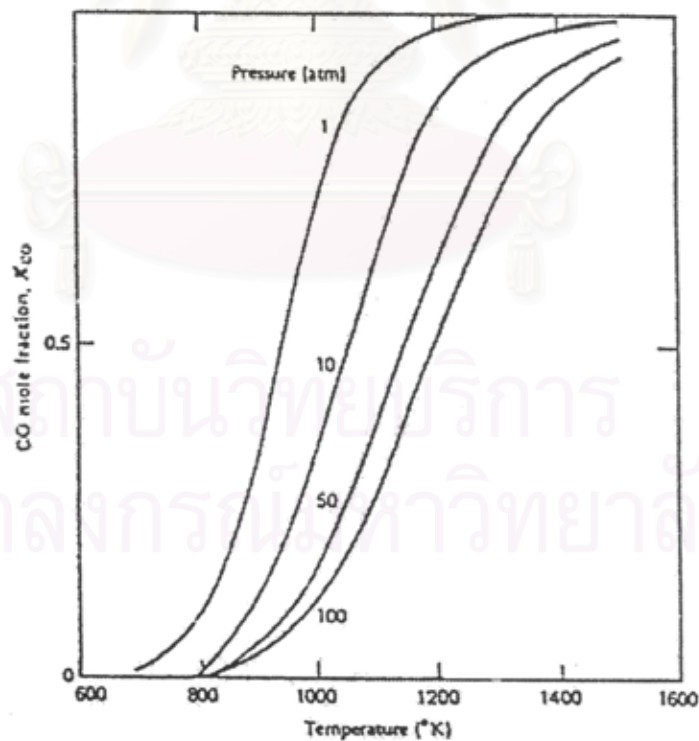
ที่จุดสมดุลสามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในเทอมฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันรวมได้เท่านั้น พิจารณารูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลการคำนวณจาก JANAF Thermochemical Table ⁽⁷⁾ ซึ่งพิจารณาให้ก๊าซทั้งหลายมีพฤติกรรมเป็นก๊าซอุดมคติ

จะเห็นได้ว่าเศษส่วนโมลที่สมดุลของก๊าซมีเทนจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น หรือเมื่อความดันลดลง

สำหรับปฏิกิริยาสมดุลของกราฟไฟต์ – ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ – ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถเขียนสมการการเกิดสมดุลได้ดังนี้



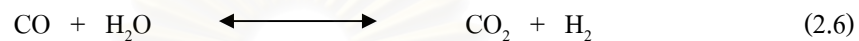
องค์ประกอบของก๊าซต่างๆ ที่สมดุลก็จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันรวมเท่านั้น พิจารณาได้จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าเศษส่วนโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือความดันลดลง ซึ่งแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาจะตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาสมดุลของก๊าซมีเทนในรูปที่ 2.4



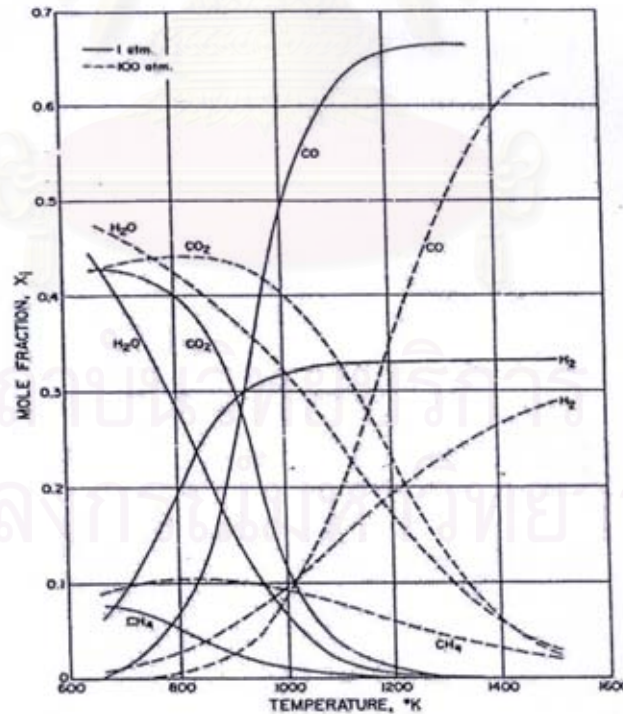
รูปที่ 2.5 ลักษณะสมดุลของกราฟไฟต์ – ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ – ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ [7]

ส่วนในระบบสมดุลของ คาร์บอน – ไฮโดรเจน – ออกซิเจน ซึ่งสมดุลนี้เป็นสมดุลที่สำคัญมากในกระบวนการกาซิฟเคชัน ก๊าซที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยานี้โดยทั่วไปประกอบด้วย CO , CO_2 , H_2 , H_2O องค์ประกอบของก๊าซที่สมดุลในระบบนี้จะอยู่ในเทอมฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ความดันรวมและอัตราส่วน H/O (อะตอม/อะตอม) ในวัฏภาคก๊าซ ปฏิกิริยาสมดุลที่เกิดขึ้นในระบบนี้ค่อนข้างซับซ้อน โดยจะประกอบด้วยสมดุลในสมการ (2.4) และ (2.5) รวมกับสมการสมดุลปฏิกิริยาอวเทอร์กาซิฟต์ด้วย



ซึ่งจะเห็นว่าสมดุลระบบนี้ประกอบด้วย ปฏิกิริยาต่างๆ เกิดร่วมกันถึง 3 ปฏิกิริยา ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาไหนอย่างไรนั้นเป็นไปโดยอิสระ ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ พิจารณารูปที่ 2.6 เป็นสมดุลของระบบเมื่อค่าอัตราส่วน $\text{H}/\text{O} = 1$ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 โดยให้เครื่องหมาย (\uparrow) แสดงถึงมีค่ามากขึ้น (\rightarrow) แสดงถึงมีค่าลดลงในตอนท้ายตัวอย่างเช่น เศษส่วนโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น หรือเมื่ออัตราส่วน H/O เพิ่มขึ้น เป็นต้น [8]



รูปที่ 2.6 ลักษณะสมดุลของระบบคาร์บอน – ไฮโดรเจน – ออกซิเจน ($\text{H}/\text{O} = 1$) [7]

ตารางที่ 2.3 แสดงแนวโน้มสมดุลของระบบ C – H – O (H/O = 1 gm-atom/gm-atom) [7]

Mole Fraction, X_i	Temperature ↑	Pressure ↑	H/O Ratio ↑
X_{CO}	↑	↓	↓
X_{CO_2}	↑	↑	↓
X_{H_2}	↓	↓	↑
X_{H_2O}	↔	↔	↔
X_{CH_4}	↔	↑	↑
$(X_{CH_4} / X_{CH_4} + X_{CO} + X_{CO_2})$	↔ * ↓ **	↑	↑

* H/O < 2

** H/O ≥ 2

2.5 ก๊าซรีเอเจนต์ (Reagent Gas)

ในกระบวนการกาซิฟิเคชัน ก๊าซตั้งต้นพื้นฐานที่นิยมใช้กันมี 3 ชนิด คือ ออกซิเจน ไอน้ำ และไฮโดรเจน

2.5.1 อากาศ (Air)

การใช้ ออกซิเจน ในรูปของอากาศในกระบวนการกาซิฟิเคชัน ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงดังสมการ



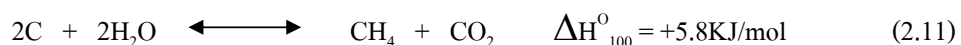
ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนประมาณ 111.9 KJ/mol

2.5.2 อากาศและไอน้ำ (Air and Steam)

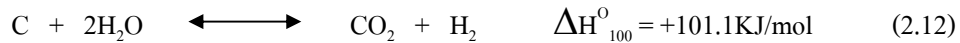
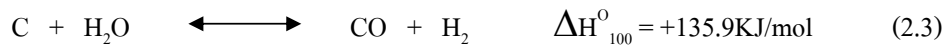
การกาซิฟิเคชันสามารถใช้อากาศแทนออกซิเจนบริสุทธิ์เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการแยกออกซิเจนจากอากาศในกระบวนการนี้ใช้ไอน้ำเล็กน้อยในการกาซิฟาย ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะเรียกว่า Semi – water Gas มีค่าความร้อนประมาณ 7 MJ/m³ ซึ่งก๊าซนี้เหมาะจะนำไปใช้กับเทอร์ไบน์ที่ใช้ก๊าซ (Gas Turbine) เพื่อผลิตไฟฟ้า

2.5.3 ออกซิเจนและไอน้ำ (Steam and Oxygen)

ทางอุคมคติการกาซิฟายโดยใช้ ออกซิเจน และไอน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนและไอน้ำเพื่อให้ได้มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเล็กน้อย แต่การเกิดก๊าซมีเทนเกิดช้าถ้าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พบทั่วไปคือ



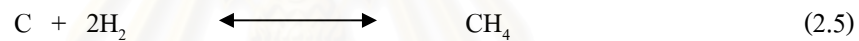
พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนอย่างมาก

2.5.4 ไอน้ำ (Steam)

การใช้ไอน้ำเพียงอย่างเดียวในการกาซิฟิเคชันได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความร้อนปานกลางเนื่องจากได้มีการเจือจางของไนโตรเจน ซึ่งสารที่ได้จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการทางเคมี เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงเหลวหรือ SNG (Substitute Natural Gas)

2.5.5 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

การใช้ไฮโดรเจนในการกาซิฟิเคชันจะทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นมีเทน อาจเรียกว่าไฮโดรกาซิฟิเคชัน (Hydrogasification) ก๊าซที่ออกมาจะให้ค่าความร้อนสูง (High - Calorific Value) แสดงดังสมการ

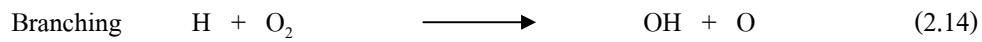
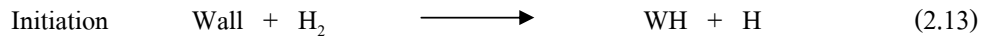


2.6 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน

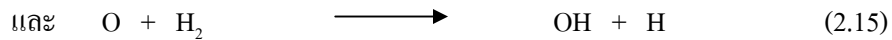
Producer Gas ก็คือก๊าซที่ได้จากกระบวนการรีดักชัน เป็นก๊าซผสมของคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจน (ซึ่งมีอยู่ในอากาศแล้ว) ออกซิเจน (ซึ่งอาจยังมีเหลืออยู่บ้าง) ไฮโดรเจน และมีเทน ก๊าซที่สันดาปได้ (Combustible Gas) ในส่วนผสมนี้คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทนซึ่งในหลักการแล้วควรทำให้มีก๊าซเหล่านี้มากที่สุด ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ ขึ้นอยู่กับว่าคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากแค่ไหน ในช่วงรีดักชัน และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในช่วงรีดักชัน ถ้าต้องการให้คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้งหมดอุณหภูมิในช่วงรีดักชันต้องสูงเกิน 1,100 องศาเซลเซียส

2.6.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของไฮโดรเจน [2]

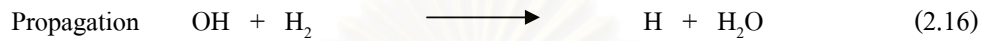
เปลวไฟของไฮโดรเจนกับอากาศหรือออกซิเจนไม่แผ่รังสี มีการปลดปล่อยพลังงานในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระ OH ได้อุณหภูมิเปลวไฟอะเดียบาติกสูงสุดประมาณ 3,100 เคลวิน โดยใช้สัดส่วนมวลสารสัมพัทธ์ พบว่าความเร็วของเปลวไฟสูงสุดด้วยเช่นกัน และในผลผลิตมีน้ำประมาณ 57 ส่วนที่เหลือประมาณ 1/4 อยู่ในรูปอนุมูลอิสระ ปฏิกิริยาเริ่มต้นด้วยการแตกตัวของไฮโดรเจนโดยชนกับผนังกลายเป็นอนุมูลอิสระของไฮโดรเจน ซึ่งจะไปเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดอนุมูลอื่น และปฏิกิริยาลูกโซ่อื่นๆ ปฏิกิริยาที่สำคัญมีดังนี้



$$k = 2.000 \times 10^{14} \exp(-8455/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$



$$k = 2.126 \times 10^{14} \exp(-6860/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

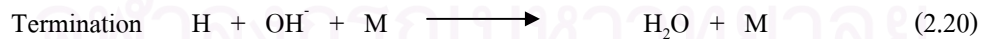


$$k = 5.940 \times 10^{14} \exp(-3880/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

ดังนั้นถ้าทั้งสามสมการเกิดขึ้นตามลำดับ จากอนุมูลอิสระไฮโดรเจนหนึ่งอนุมูล จะได้อนุมูลอิสระไฮโดรเจนถึงสามอนุมูลที่อุณหภูมิต่ำ สมการ (2.14) – (2.16) มีอัตราเร็วต่างกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเข้าใกล้กันมากขึ้น อัตราเร็วจึงไม่ต่างกันมากนัก ในเปลวไฟ ปฏิกิริยา (2.14) – (2.16) สามารถเกิดย้อนกลับได้ดังนี้



ทำให้เกิดสภาวะกึ่งสมดุลขึ้นในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไปได้สามในสี่แต่อนุมูลอิสระและอะตอมต่างๆ ยังมีเอนทัลปีอยู่ พลังงานนี้ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาการรวมตัวอันดับสาม (Third – Order Recombination) ซึ่งใช้เวลาเกิดมากกว่าอันดับสอง ในช่วงหลังเปลวไฟ ก๊าซที่มีเชื้อเพลิงเข้มข้นจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวโดยอนุมูล H เป็นหลัก คือ



ส่วนก๊าซที่มีเชื้อเพลิงเจือจางจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับอนุมูลอิสระ HO_2 เป็นหลัก

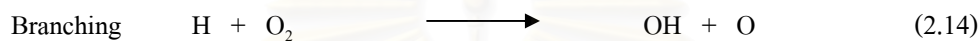


2.6.2 ปฏิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนมอนอกไซด์

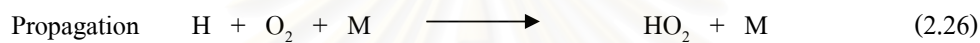
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มักมีสารที่มีไฮโดรเจนเจือปนอยู่เสมอ เช่นในถังก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีก๊าซมีเทนปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ดังนั้นในการออกซิไดซ์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จึงมีอนุมูลอิสระ OH และ HO₂ เข้ามามีบทบาทดังนี้



เกิดต่อเนื่องด้วยปฏิริยา



หรือ



และในที่สุด



นอกจากนี้ยังเกิดปฏิริยาเพิ่มเติมเนื่องจากก๊าซมีเทนที่เจือปน คือ



ปฏิริยาเหล่านี้ถึงแม้จะเริ่มต้นจากอนุมูลจำนวนน้อยแต่มีผลสำคัญ เนื่องจากอนุมูลหมุนเวียนกลับมาเกิดปฏิริยาได้อีกครั้งดังแสดงในสมการ (2.24) และ (2.25)

สมการที่ (2.24), (2.25) และ (2.27) มีความสำคัญที่สุดในการออกซิไดซ์ก๊าซ CO ไปเป็น CO₂ และเป็นปฏิริยาสำคัญในการออกซิไดซ์เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนและไฮโดรคาร์บอน

สมการที่ (2.25) มีความสำคัญที่สุด นั่นคือไม่สามารถเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยตรงโดยไม่ผ่านขั้นตอนการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ก่อน ดังนั้นถ้ามีสถานะที่ทำให้อนุมูลอิสระทำปฏิริยากับ CO น้อยลงก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง และเกิดการปล่อย CO สู่อากาศมากขึ้น

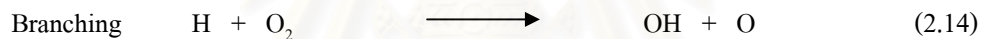
เนื่องจากสมการ (2.25) เกิดได้ช้า เมื่อเทียบกับการที่อนุมูลอิสระ OH จะดึงไฮโดรเจนออกจากไฮโดรคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเคลวิน ค่าคงที่ของปฏิริยาระหว่างอนุมูล OH และ CH₄ เร็วกว่าความเร็วในการเกิดปฏิริยาระหว่างอนุมูล OH และ CO 9 เท่า ดังนั้นเมื่อต้องมีการแข่งขันกัน จะทำให้มี CO เหลืออยู่รอบเท่าที่มีเชื้อเพลิงเหลืออยู่ในระบบ และภายใต้สถานะเชื้อเพลิงเข้มข้นจะได้ CO เป็นผลผลิตสุดท้ายเสมอ

2.6.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก๊าซมีเทน (Methane Combustion)

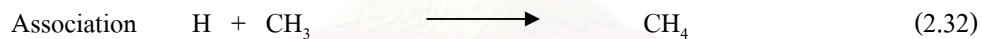
ปฏิกิริยาเริ่มต้นด้วยการแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) ก่อน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังสมการ



จากปฏิกิริยานี้ได้อนุมูลอิสระคือ เมทิล และไฮโดรเจน ต้องมีเวลาเพียงพอสำหรับเริ่มต้นปฏิกิริยานี้เพื่อที่จะผลิตอนุมูลอิสระจำนวนหรือความเข้มข้นมากพอที่จะไปทำให้เริ่มต้นกระบวนการเผาไหม้อย่างแท้จริงได้ ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเหนี่ยวนำ (Induction Delay) จากนั้นอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะไฮโดรเจน ซึ่งว่องไวมากกว่า จะไปทำปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้ง Abstraction Branching และ Association ดังสมการ

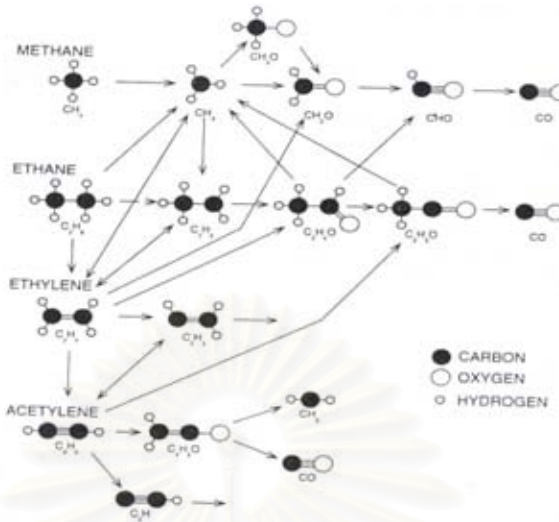


ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมอัตราเร็วโดยรวมของปฏิกิริยาออกซิไดซ์



โอกาสที่อนุมูลอิสระตั้งแต่สองอนุมูลขึ้นไปมาชนกัน น้อยกว่าโอกาสที่อนุมูลอิสระไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ปฏิกิริยานี้จึงช้ากว่าแต่เป็นปฏิกิริยาหลักสำหรับการรวมตัวของอนุมูลที่อุณหภูมิสูง

ถ้าเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนอื่นที่เกิดการเผาไหม้ในวัฏภาคก๊าซมีปฏิกิริยาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องมากมาย ทั้งที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (เกิดต่อเนื่อง) และปฏิกิริยาอื่นๆ (ซึ่งเกิดเดี่ยวๆ ไปพร้อมกัน) เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาจึงมีความซับซ้อนมากดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาพื้นฐานของไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจน [2]

2.7 เทคโนโลยีการขจัดมลสารที่เกิดจากกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหิน

มลพิษหรือของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหินมีหลายชนิดดังต่อไปนี้

- (1) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)
- (2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)
- (3) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)
- (4) ออกไซด์ของกำมะถัน (SO_x)
- (5) ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)
- (6) อนุภาค (Particulates)
- (7) แสลดและเถ้า (Slag and Ash)

องค์ประกอบและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตก๊าซจากถ่านหินจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของถ่านหิน กระบวนการกาซิฟิเคชันที่เลือกใช้ วิธีการกำจัดของเสียที่เลือกใช้

2.7.1 การแยกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

ในการนำก๊าซที่ได้จากถ่านหินไปใช้ประโยชน์ในด้านเป็นเชื้อเพลิงนั้น จำเป็นต้องลดปริมาณ H_2S ลงให้เหลือ 20 g/100SCF ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการแยก H_2S ออกจากก๊าซเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้ ตารางที่ 2.4 เป็นตารางที่แสดงถึงกระบวนการแยก H_2S ที่สำคัญที่มีการใช้กันอยู่ ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในรายละเอียดของกระบวนการดังนี้ [10]

2.7.1.1 กระบวนการซัลไฟแบน (Sulfiban Process)

กระบวนการ Sulfiban เป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากกระบวนการแยก H_2S และ CO_2 ออกจากก๊าซธรรมชาติ ซึ่งใช้สารละลาย Monoethanolamine โดยการเติมสารบางตัว

ลงไปเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง และการกัดกร่อนของระบบ รายละเอียดของกระบวนการแสดงในรูปที่ 2.8 กระบวนการ Sulfinban นี้สามารถลดปริมาณของ H_2S ได้ต่ำกว่า $10 \text{ g}/100 \text{ SCF}$

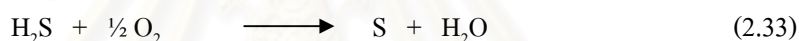
2.7.1.2 กระบวนการแอมโมเนีย (Ammonia Process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เก่าแก่มาใช้กันมานานในอดีต ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเพิ่มเติมและมีการจดลิขสิทธิ์กันหลายกระบวนการ รูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนของกระบวนการแอมโมเนียที่ใช้กันอยู่ ประสิทธิภาพในการแยกจะแปรตามอุณหภูมิ เช่น ประสิทธิภาพร้อยละ 97 ที่อุณหภูมิ $20 - 26 \text{ }^\circ\text{C}$ และร้อยละ 85 ที่อุณหภูมิ $28 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นต้น

2.7.1.3 กระบวนการ Stretford

กระบวนการแยก H_2S แบบ Stretford ได้มีการพัฒนาตั้งแต่ปี 2493 และได้มีการพัฒนามาเป็นลำดับ ปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวได้ถูกพัฒนามาโดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.10

กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการ Stretford เป็นดังนี้



กำมะถันที่แยกออกมาจะมีลักษณะเป็น Cake ซึ่งต้องนำไปกำจัดต่อไป

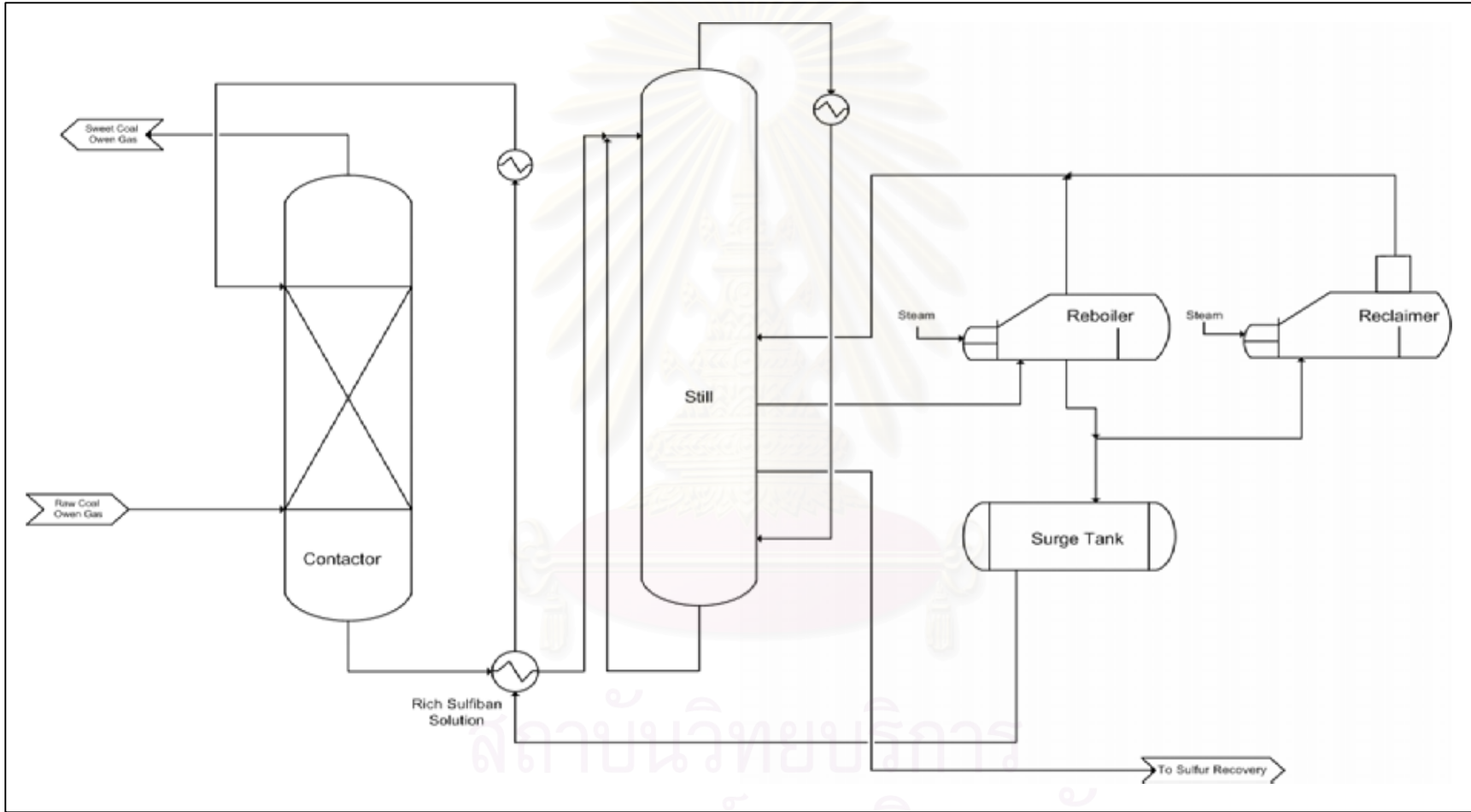
2.7.1.4 กระบวนการแยก H_2S โดยสารดูดซับ Zn-Ti-O

กระบวนการแยก H_2S ดังกล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นกระบวนการที่รู้จักและใช้กันในกระบวนการแยก H_2S ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีขนาดใหญ่ ปริมาณก๊าซที่เกี่ยวข้องมีจำนวนมาก ดังนั้นระบบแยกก๊าซ H_2S จึงมีขนาดใหญ่และเนื่องจากระบบเป็นระบบ Wet Process เกือบทั้งหมด จึงทำให้การบำรุงรักษาและการใช้งานค่อนข้างยุ่งยาก นอกจากนี้ยังต้องสูญเสียความร้อนแฝงไปกับก๊าซบางส่วน เพราะการแยกดังกล่าวต้องทำที่อุณหภูมิต่ำและยังต้องมีระบบกำจัดน้ำเสียด้วย

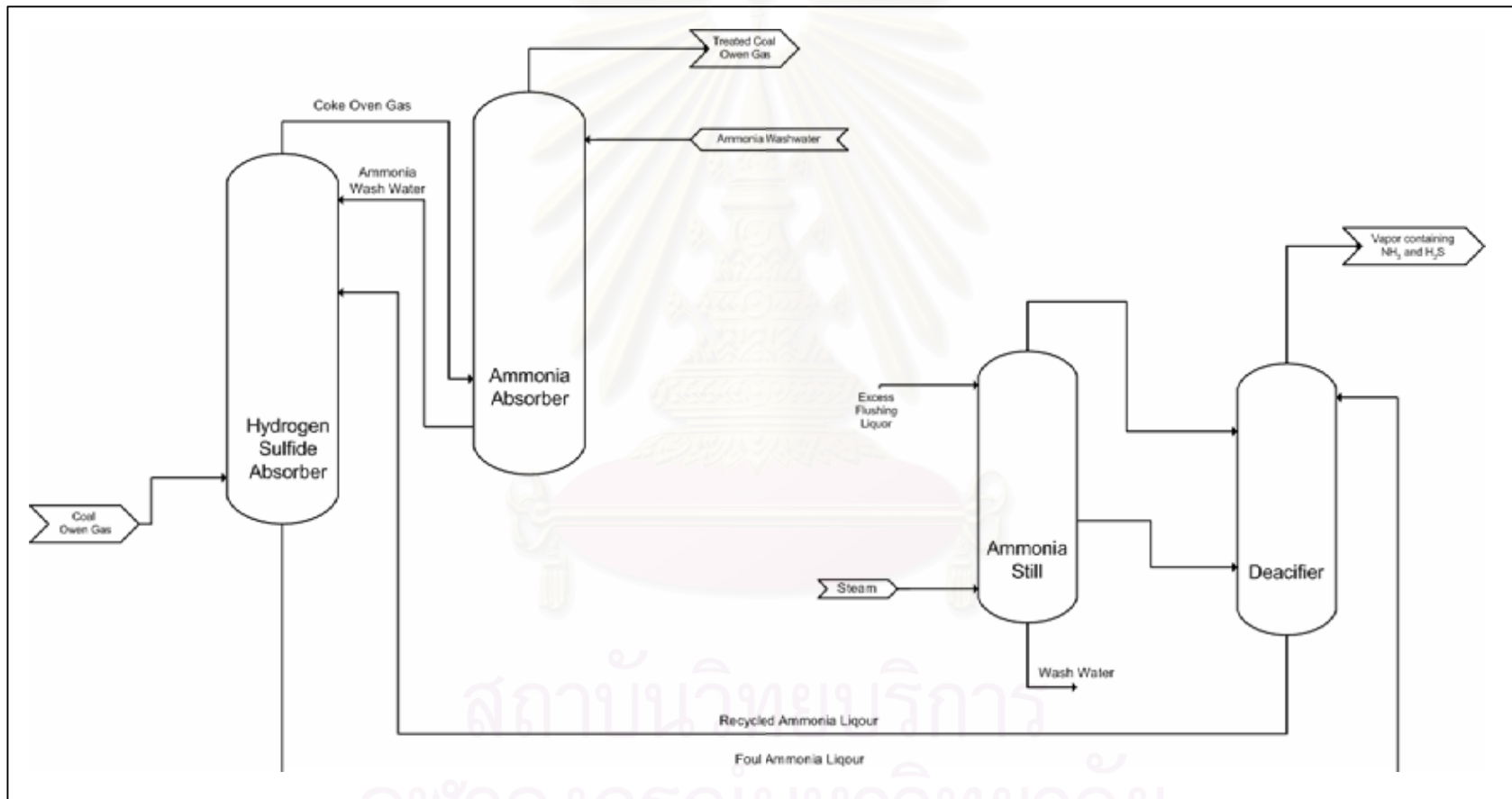
ตารางที่ 2.4 แสดงกระบวนการแยกก๊าซ H₂S ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน [10]

Process	H ₂ S Removal Efficiency	Organic Sulfur Removal	Form of Recovered Sulfur	Regeneration Medium	Effluent Problems	Remarks
Absorption – Desorption						
Vacuum Carbonate						
Single Stage	90 – 93%	None	Rich H ₂ S Acid Gas	Steam under	Small amount of Circulation Solution	Many single Stage
Two Stage	98%	None	Rich H ₂ S Acid Gas	Vacuum	Containing HCN and as H ₂ S	Plants in operation
Sulfiban	90 – 98%	Partial	Lean H ₂ S Acid Gas	Steam	Condensates Sludge from Reclaimer, Ammonia	Limited Operation Experience
Ammonia Processes	90% normal 98% maximum	None	Acid Gas Containing H ₂ S + NH ₃ + CO ₂ + HCN	Steam	Contaminated Condensated Minimal	May Require Refrigeration
Oxidation Type	99%+	None	Elemental Sulfur	Air		Many Plants in Operation
Stretford					Serious liquid effluent problem;	
Takahax	99%+	None	Ammonium Sulfate or Elemental Sulfur	Air	Effluent Treatment Required Similar to Stretford except for Hirohax,	In Japan Only, at Present
Fumaks - Rhodacs	90 – 99%	None	Elemental Sulfur Elemental Sulfur	Air Air	which Produces ammonium Sulfate Similar to Stretford Arsenic Contamination must by Reclaimed	Indapany Only Sulfur is also comtaminated with arsanic

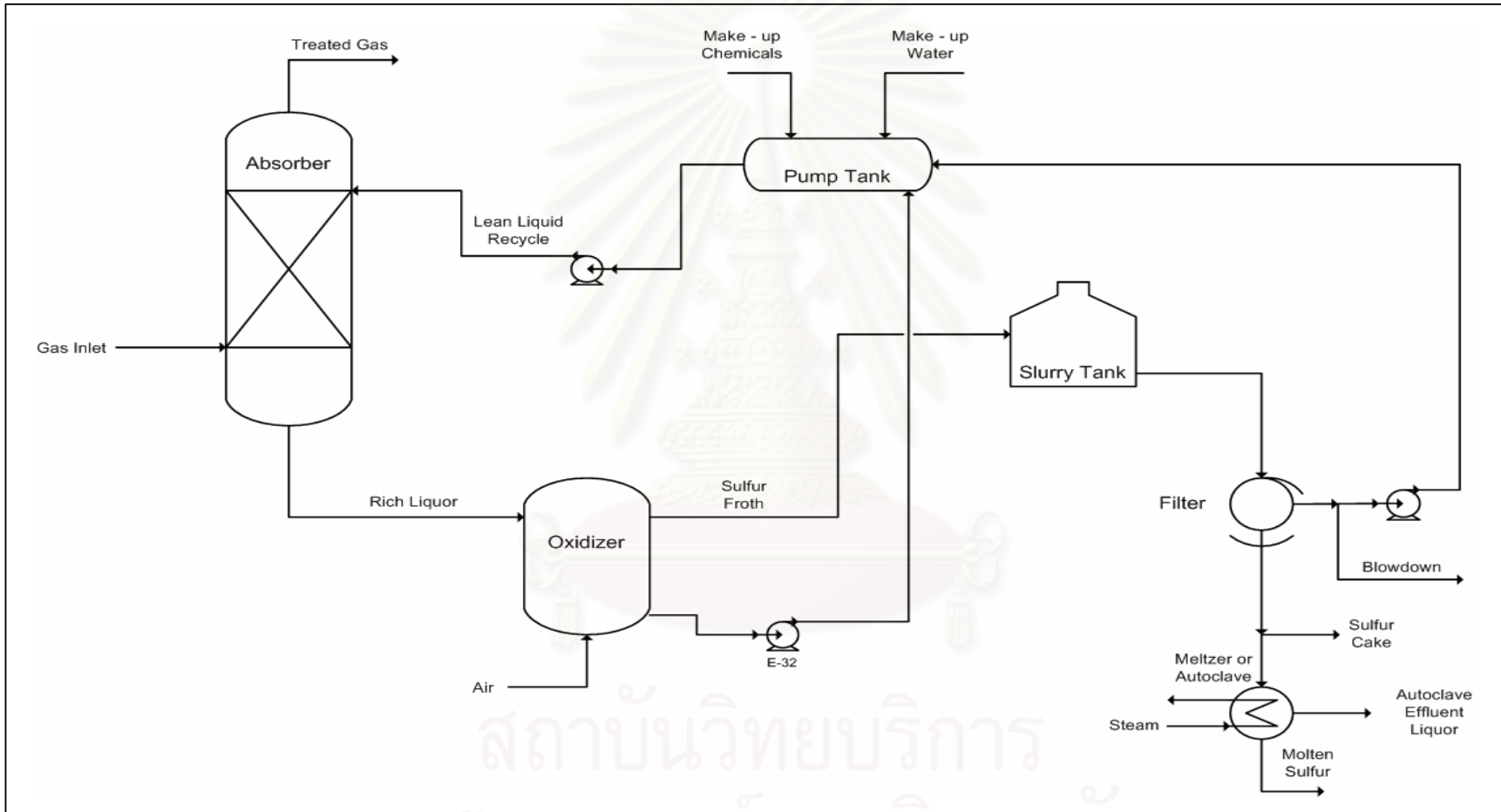
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 The Sulfiban System Diagram Courtesy of Applied Technology Corporation [10]



รูปที่ 2.9 The Coke Oven Gas Desulfurization with Ammonia Liquor Diagram Courtesy of Dravo/Still [10]



รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการ Stretford ที่ใช้แก๊ส H_2 [10]

ดังนั้นระบบดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้กับระบบที่มีขนาดเล็ก เช่นการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปเพื่อผลิตพลังงาน ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการแยกก๊าซ H_2S ที่อุณหภูมิสูง Hot Process หรือแบบแห้ง (Dry Process) ขึ้น ซึ่งใช้สารดูดซับ Zn-Ti-O ซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ที่สามารถนำมาใช้ในการดูดซับ H_2S ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ และสามารถลด H_2S ลงเหลือน้อยกว่า 5 ppm และสามารถนำเอา Zn-Ti-O กลับมาใช้ใหม่ได้ (Regeneration) กระบวนการนี้ใช้หลักการการดูดซับ (Adsorption) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed - Bed และไม่มีของเหลวมาเกี่ยวข้องทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้กับอุตสาหกรรมที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก

2.7.2 การแยกก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์

ในถ่านหินมีองค์ประกอบที่ก่อให้เกิดมลภาวะที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำคัญตัวหนึ่งคือ กำมะถัน ซึ่งมีอยู่ในถ่านหินทุกชนิดในปริมาณต่างกัน ขึ้นอยู่กับศักดิ์ (Rank) และแหล่งของถ่านหิน กำมะถันที่มีอยู่ในถ่านหินจะอยู่ในรูปแบบทั้งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic Sulfur) และอนินทรีย์ (Inorganic Sulfur) กำมะถันอินทรีย์ไม่สามารถแยกออกได้โดยวิธีทางกายภาพ ส่วนมากจะติดมากับถ่านหินจนถึงขั้นตอนการใช้ประโยชน์ถ่านหิน เช่น การเผาไหม้ การกาซิฟาย เป็นต้น ส่วนกำมะถันอนินทรีย์ซึ่งได้แก่ กำมะถันซัลเฟต (Sulfate Sulfur) และ Pyritic Sulfur ซึ่งมีปริมาณมากกว่าจะสามารถแยกออกได้บางส่วน ก่อนนำถ่านหินไปใช้ประโยชน์ แต่ถ่านหินโดยเฉพาะในประเทศไทยไม่ได้มีกระบวนการแยกออกก่อนจึงทำให้มีกำมะถันส่วนนี้อยู่ในถ่านหินจนถึงขั้นการใช้ประโยชน์

กำมะถันในรูปของสารประกอบดังกล่าวเมื่อเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ หรือกาซิฟายแบบ Air Blown ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะมีความร้อนและออกซิเจน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์บางส่วนหรือทั้งหมด แต่สำหรับบางสถานะของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิและส่วนประกอบของกระบวนการเฉพาะ เช่น มีไอน้ำ ก็อาจเกิดสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปของ SO_2 และ H_2S ได้

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟ ไม่มีสี ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.0 ppm จะมีรสซึ่งรับรู้ได้โดยการสัมผัส และจะรู้สึกแสบร้อนและมีกลิ่นฉุนที่ความเข้มข้นมากกว่า 3 ppm ขึ้นไป ซึ่งความเข้มข้นระดับนี้จะก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อมนุษย์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้ละลายน้ำได้เล็กน้อย ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทั่วไปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

Physical constants of Sulfur Dioxide	
Molecular weight	64.06
Density (g/l) (gas)	2.927 at 0°C : 1 atm
Specific gravity (liquid)	1.424 at -10°C
Molecular volume (ml) (liquid)	44
Melting point (°C)	-75.45
Boiling point (°C)	-10.02
Critical temperature (°C)	157.2
Critical pressure (atm)	77.7
Heat of fusion (Kcal/mole)	1.769
Heat of vaporization (Kcal/mole)	5.96
Dielectric constant (Σ)	13.8 at 14.5°C
Viscosity (dyne sec./cm ²)	0.0039 at 0°C
Molecular boiling point constant (°C/1000g)	1.45
Dipole moment (Debye units)	1.61

ในปัจจุบัน มีกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แบ่งออกเป็น 4 กระบวนการคือ

- Wet Absorption Process
- Dry Absorption Process
- Wet and dry Absorption Process
- Catalytic Oxidation Process

2.7.2.1 กระบวนการดูดซึมแบบเปียก (Wet Absorption Process)

เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีการพัฒนาและศึกษากันอย่างกว้างขวางทั่วโลก โดยมากเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นแบบ Spray Column Reactor โดยให้ก๊าซทำปฏิกิริยากับของเหลวที่พ่นสวนทางลงมา กระบวนการต่างๆ แบ่งตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ดังต่อไปนี้

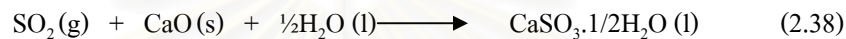
1) Wet Limestone Process

สารเคมีที่ใช้กันมากใน Wet Scrubber คือ หินปูน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน Limestone Scrubbing คือ



2) Lime Process

ระบบนี้ใช้ปูนขาวในการทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยารวมของ Lime Scrubbing เป็นไปดังสมการ



ปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Calcium Sulfite และ Calcium sulfate และตกตะกอนลงเช่นเดียวกับ Limestone

3) Wellman – Lord Process

ในระบบนี้เป็นระบบ Wet System with by Product Recovery โดยมีพื้นฐานอยู่ที่ กระบวนการ Sodium Sulfite/Bisulfite Regenerative Cycle ซึ่งกระบวนการต่างๆเป็นดังสมการ



4) Magnesium Oxide

กระบวนการที่ใช้ Magnesium oxide มีลักษณะเช่นเดียวกับ Calcium Oxide แต่จะแตกต่างกันไป คือ ไม่เพียงแต่รูป Hydrate Sulfite เท่านั้นที่เกิดขึ้นแต่อาจจะมีถึง 3 รูปแบบที่เกิดขึ้น เนื่องจากราคาของ Magnesium Oxide ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงต้องมี Recycle สารที่ทำปฏิกิริยาแล้ว กลับมาใช้

5) Aqueous Sodium

กระบวนการ Nonregeneration Sodium Scrubbing เป็นแบบที่พื้นฐานที่สุดและง่ายที่สุดในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูก๊าส กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการใช้

Scrubbing และใช้สารละลาย NaOH หรือ Na_2CO_3 เป็นตัวจับแล้วจะให้สารละลายของเกลือ Sodium/Sulfur Salts ดังสมการต่อไปนี้

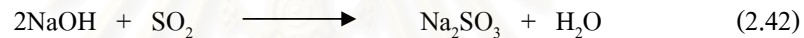


ใน Scrubbing นั้น จะถูก Oxidize ต่อไปให้สารละลาย Sodium Sulfate ดังสมการ



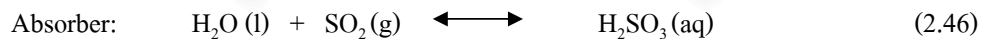
6) Double Alkali

กระบวนการนี้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกดูดซับในสารละลาย Sodium Sulfite ให้สารละลาย Bisulfite Scrubber Effluent Solution ดังสมการ

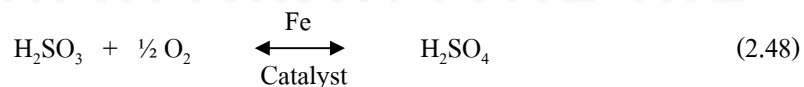


7) Sulfuric Acid

ตัวอย่างได้แก่ กระบวนการ Chiyoda ซึ่งจะเป็นกระบวนการแบบ Lime Scrubbing Process แต่ที่แตกต่างไปคือ Absorbent Liquor ปฏิกริยาต่างๆ มีดังต่อไปนี้



ใน Oxidizer จะใช้เหล็กเป็น Catalyst



ในเครื่องปฏิกรณ์



ในกระบวนการนี้จะได้ยิปซัมเป็น Recovery By Product

2.7.2.2 กระบวนการแบบ Dry Adsorption Process

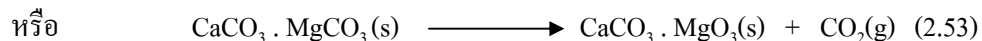
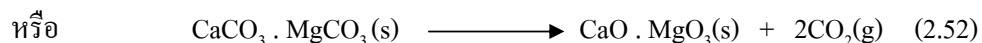
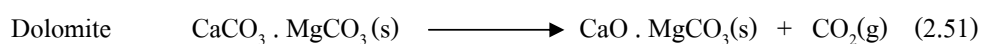
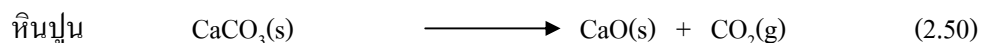
เป็นกระบวนการที่สามารถใช้ในการลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ในก๊าซผสมที่อุณหภูมิสูงได้ ในระบบแบบนี้จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับ Absorbent ซึ่งปกติควรเป็นวัสดุราคาต่ำ เช่น หินปูน แบบที่นิยมมากที่สุด คือ Limestone Dry Injection Process

1) Injection of Alkaline Solid

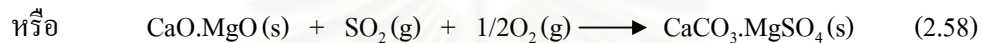
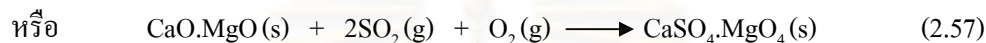
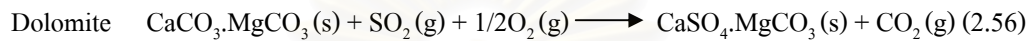
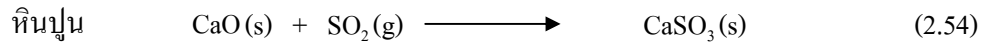
วิธีการของกระบวนการแบบนี้คือ การพ่นผงของสารประกอบอัลคาไลน์เข้าไปใน Boiler Firebox หรือพ่นเข้าไปใน Flue Gas ให้ทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แล้วจึงแยกเอาผงที่ใช้แล้วออกมาพร้อมกับเถ้าลอย โดยระบบการแยก Particulate ออกจากก๊าซ เช่น ระบบไซโคลน (Cyclone) ระบบถุงกรอง เป็นต้น ได้มีการนำหลักการนี้ไปใช้ในอีกกระบวนการหนึ่ง ซึ่งเป็นการใช้หินปูนหรือ Dolomite บดละเอียดพ่นเข้าไปในถ่านหินหรือเตาเผา แต่ปัญหาเรื่องประสิทธิภาพในการกำจัดเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับวิธีนี้ ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านเทคนิคเพราะการเกิดการ Adsorption ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะปรากฏในช่วงสั้นๆ ในก๊าซที่ร้อนและจะเกิดเมื่อก๊าซมีการสัมผัสกับปูนขาวเท่านั้น การเกิด Calcinations ปกติจะเกิดที่อุณหภูมิ 2,000 °F ทำให้ในการพ่นต้องมีการเลือกตำแหน่งที่มีความร้อนอยู่ในระดับดังกล่าว ซึ่งมักจะอยู่บริเวณกันเตาหากพ่นไม่ได้อาจทำให้ไฟดับได้ ถ้าพ่นในเชื้อเพลิงจะทำให้อุณหภูมิลดลง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเช่นกัน

ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับหินปูนที่เกิดการ Calcinations และจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 1,000 – 2,000 °F ประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ปริมาณหินปูนที่ใช้ โดยทั่วไปหากใช้หินปูนในปริมาณที่ได้จากการคำนวณทาง Stoichiometric จะสามารถกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 20 หากเพิ่มหินปูนเกินพอร้อยละ 75 จะสามารถลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ประมาณร้อยละ 40 – 50 ถ้าหากลดปริมาณหินปูนลงก็จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง ข้อดีคือ สามารถประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินได้ และง่ายในการติดตั้งใช้งาน ลงทุนน้อย แต่ข้อเสีย คือ ประสิทธิภาพต่ำ

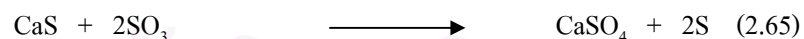
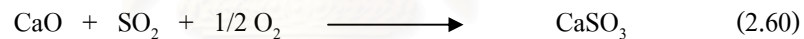
ปฏิกิริยา Calcinations เป็นปฏิกิริยาการสลายตัวของ Adsorbent หรือ CaCO_3 เมื่อได้รับพลังงานความร้อนในเตาเผาหรือเตาผลิตก๊าซ เกิดขึ้นเป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีความพรุนและว่องไวต่อปฏิกิริยา



ปฏิกิริยา Sulfation ปฏิกิริยาสำคัญระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และสารประกอบออกไซด์ในบรรยากาศที่มี O₂ เกินพอ เกิดเป็นสารประกอบซัลเฟตมีสีน้ำตาลภายในรูปพรุน บริเวณผิวของอนุภาคจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

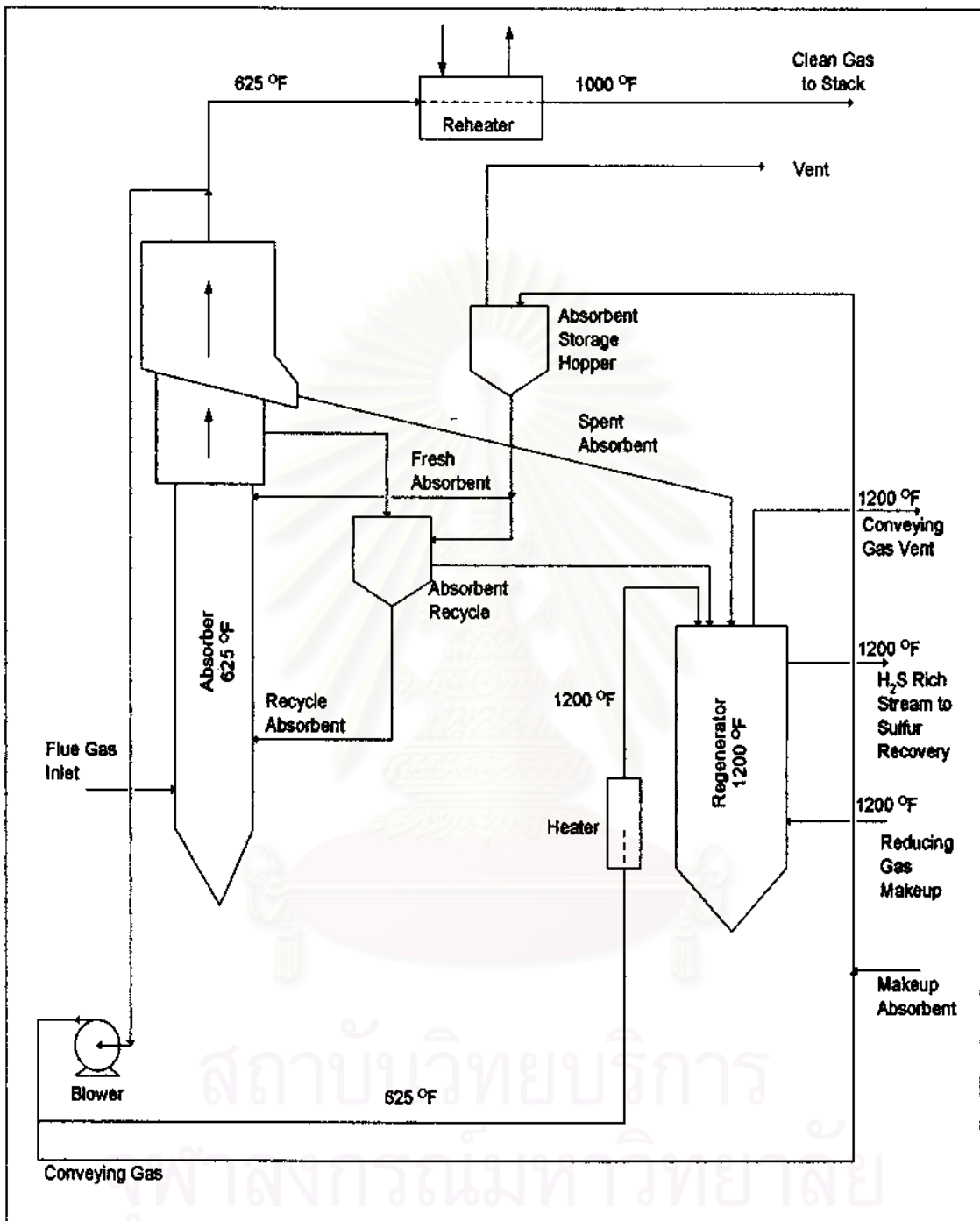


ในกรณีที่ใช้ปูนขาว (Lime) เป็นสารดูดซับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นและรายละเอียดของกลไกของปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีรายละเอียดดังนี้



2) Alkalized Alumina Process (ดูรูปที่ 2.11)

กระบวนการนี้จะใช้ Alkali Alumina (Na₂O·Al₂O₃) เป็นตัวดึงก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูก๊าส โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกดูดซับบนผิวของ Absorbent ที่ร้อน จากนั้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกออกซิไดซ์และทำปฏิกิริยากับออกไซด์โลหะอย่างรวดเร็ว ให้สารประกอบซัลเฟตออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 625 °F



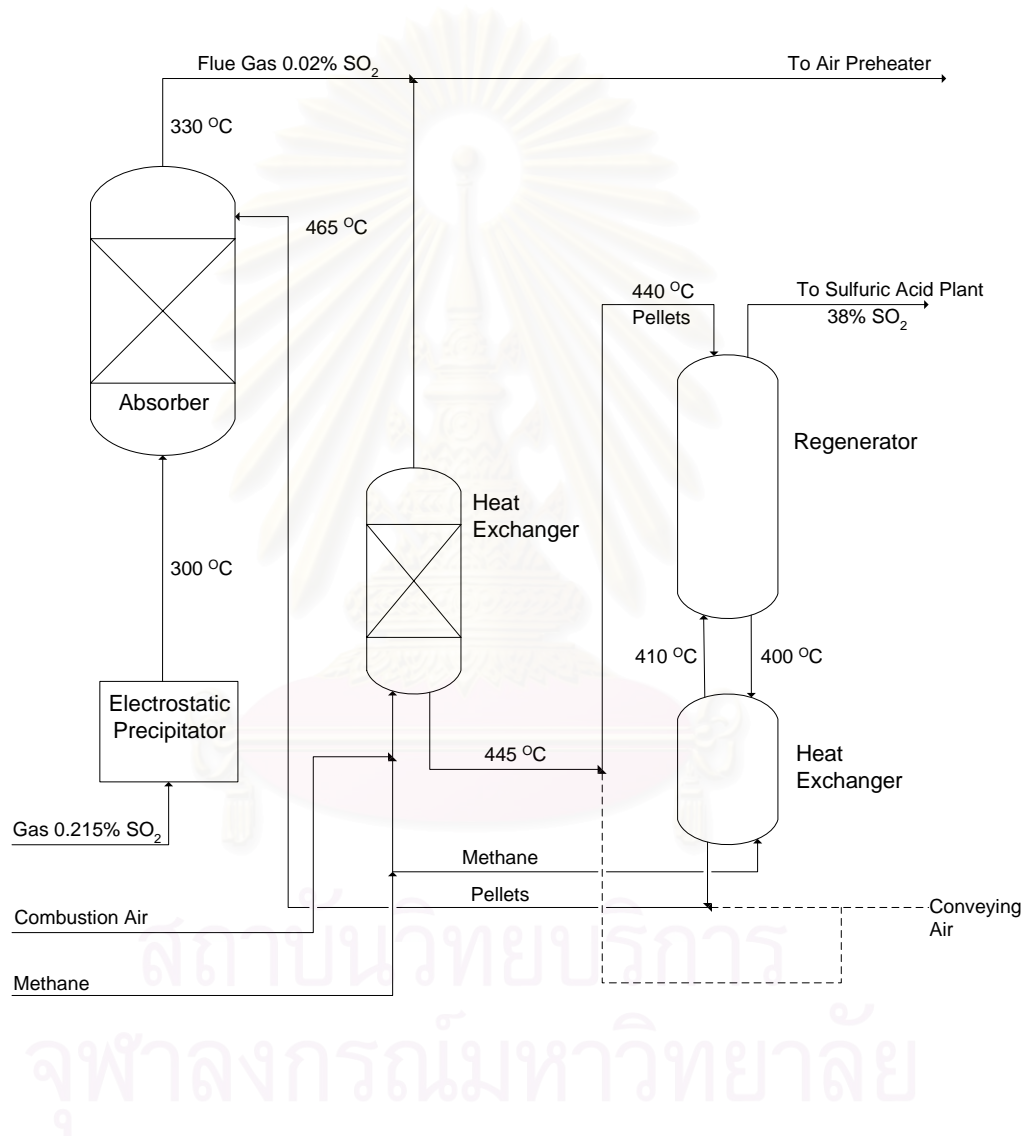
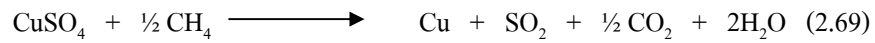
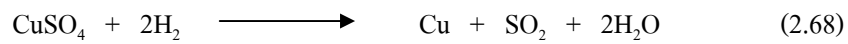
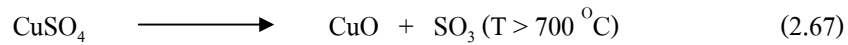
รูปที่ 2.11 Flow Diagram of Alkalized Alumina Process

3) Copper Oxide Process (ดูรูป 2.12)

ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ



Regeneration:

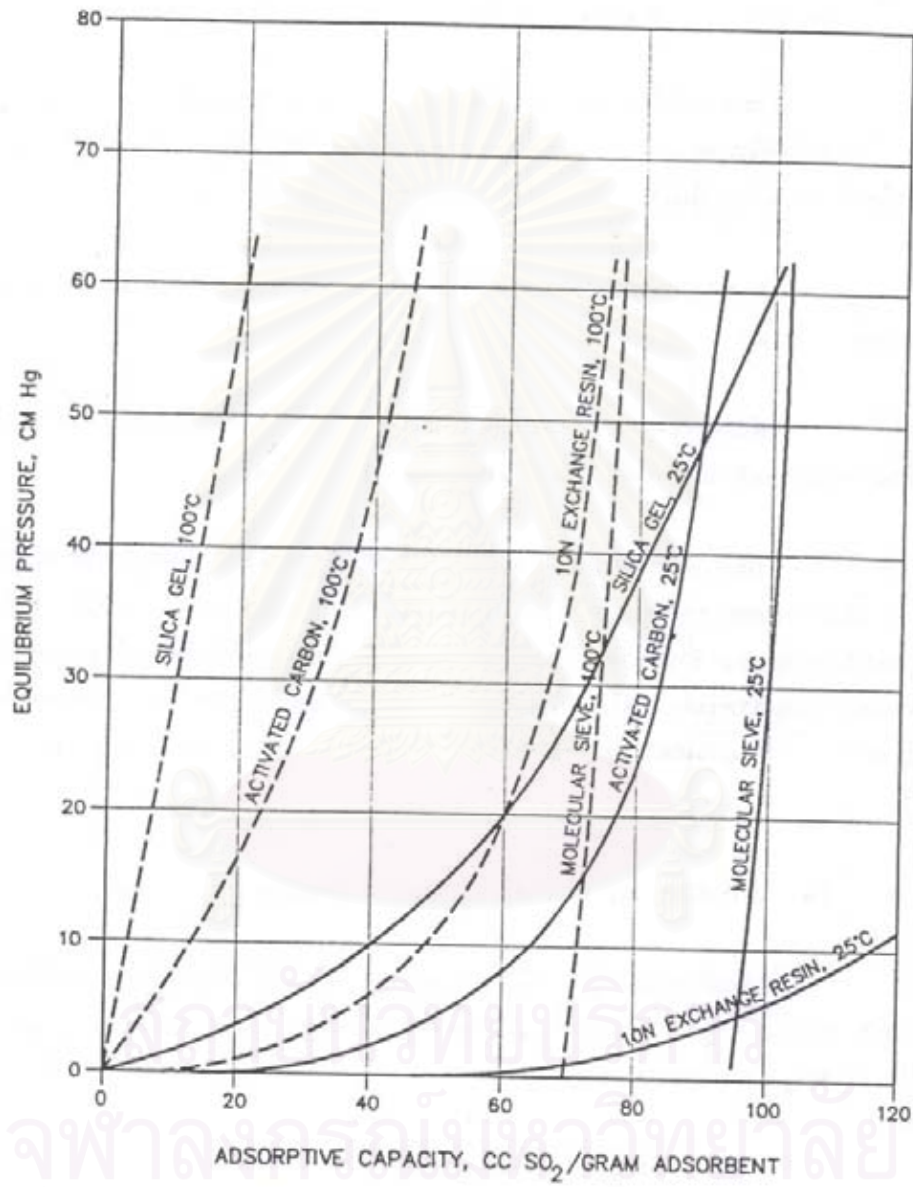


รูปที่ 2.12 การกำจัด SO₂ โดยใช้ Copper Oxide Process

2.7.2.3 กระบวนการแบบ Wet and Dry Adsorption Process

กระบวนการแบบนี้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกดึงออกจากฟลูว์ก๊าซ โดยการดูดซับไวนอนผิวของสารดูดซับ วิธีแบบนี้เป็นที่สนใจมาก เนื่องจากสามารถสามารถนำกลับมาใช้ใหม่

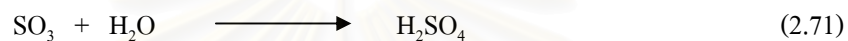
ได้ โดยการ Regeneration สารดูดซับ รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ SO_2 ที่ถูกดูดซับโดยสารดูดซับต่างๆ



รูปที่ 2.13 Equilibrium Curve ของสารดูดซับต่าง ๆ กับ SO_2

ในกระบวนการแบบที่ใช้สารดูดซับเป็น Activated Carbon ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกดูดซับไว้บนผิวของ Activated Carbon และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูก Oxidized ไปเป็น SO_3 แล้วเป็น H_2SO_4 เมื่อมีความชื้นซึ่งจะติดค้างอยู่ในรูพรุนของสารดูดซับ

ปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับไว้โดยคาร์บอนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของ Activated Carbon เมื่อ Activated Carbon อิ่มตัว ก็สามารถกลับมาใช้ใหม่ โดย Regenerate ที่อุณหภูมิ 750 – 1,500 °F ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ Activated Carbon

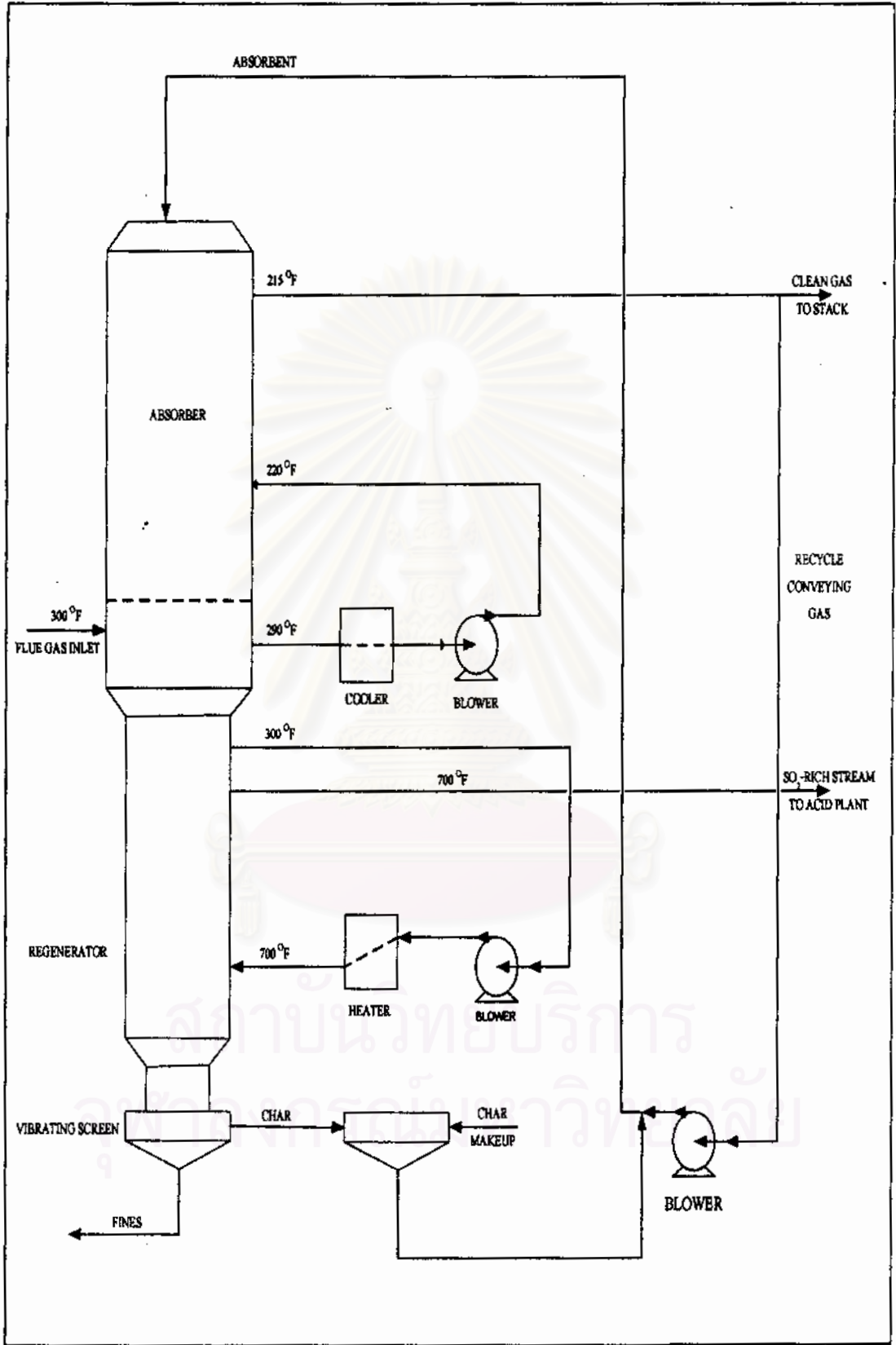


สมการที่ (2.70) และ (2.71) เป็นแบบ Exothermic สมการที่ (2.72) จะต้องใช้ อุณหภูมิประมาณ 275 °F จึงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดและดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการ Regenerate โดยการล้างด้วยน้ำหรือเพิ่มความร้อน ซึ่งมักจะใช้ Activated Carbon ที่ราคาต่ำ มากๆ เช่น Coke

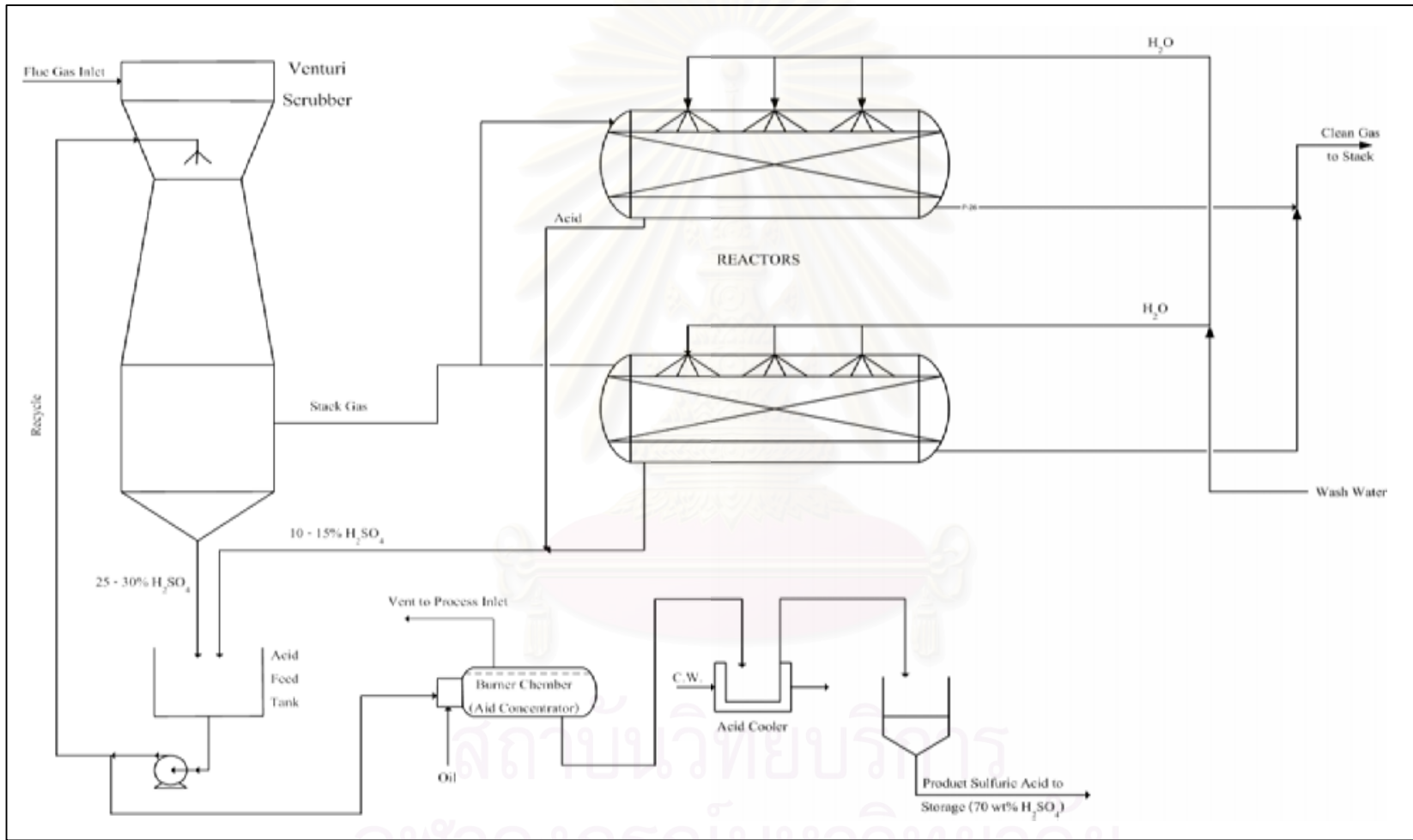
กระบวนการนี้อาจแบ่งได้ 2 แบบ ซึ่งก็มีหลักการที่คล้ายกัน คือ แบบ Dry Adsorption และแบบ Wet Adsorption

ตัวอย่าง Dry Adsorption ได้แก่ Reinluft Dry Process ซึ่งมักจะใช้เครื่องปฏิกรณ์ แบบ Slowly Moving Bed และใช้ Activated Carbon เป็นสารดูดซับ (รูปที่ 2.14)

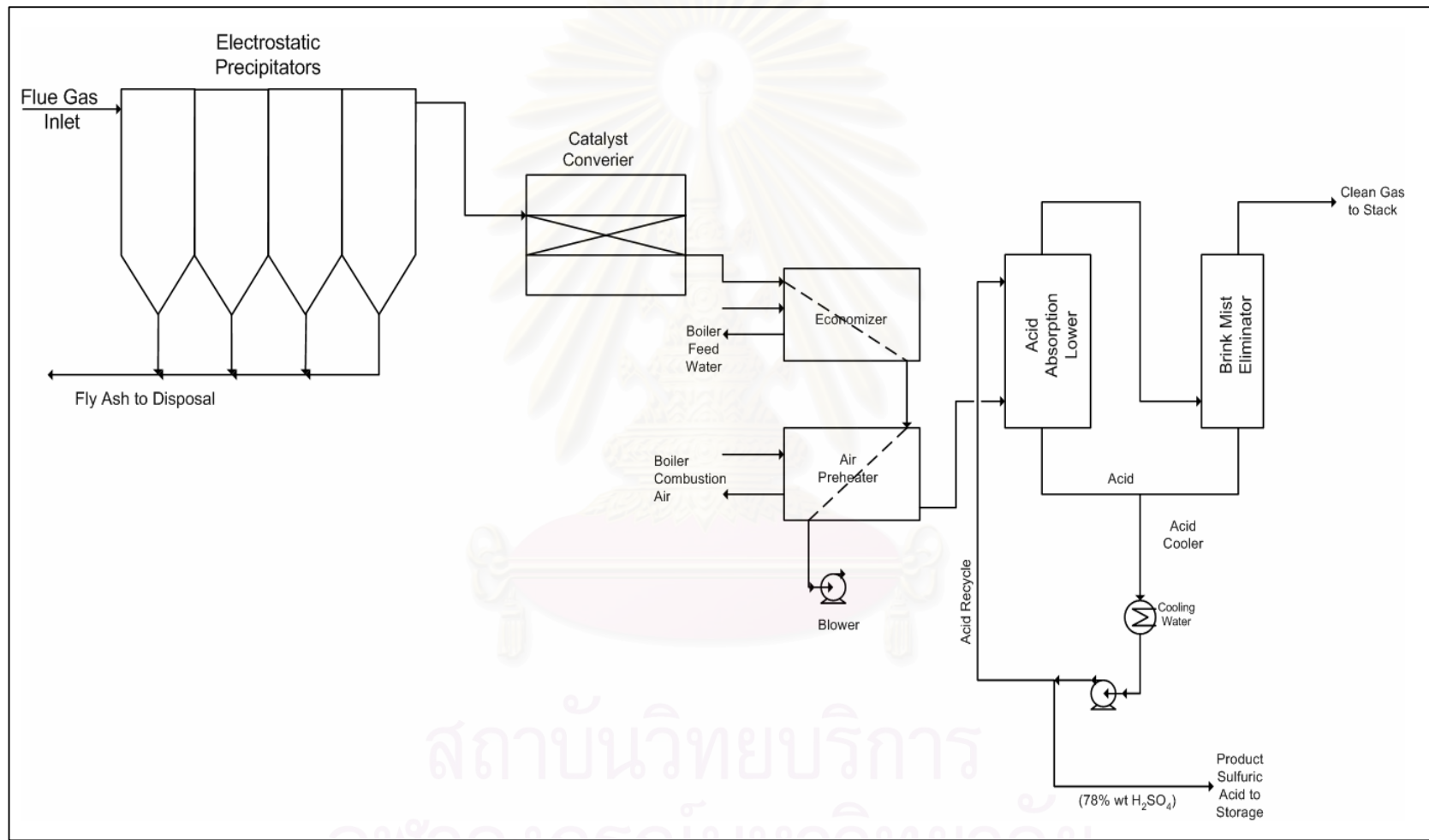
กระบวนการแบบ Wet Adsorption จะมีหลักการคล้ายกันกับแบบแรก แต่จะมีข้อแตกต่างกันไป คือ ชั้นแรก ก๊าซขาเข้าจะสัมผัสกับ H_2SO_4 เจือจางทำให้ก๊าซเย็นลง จากนั้นก็ผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed – Bed Absorber ซึ่งจะบรรจุไว้ด้วย Activated Carbon น้ำจะถูกพัดลงทางด้านบนเพื่อกำจัด H_2SO_4 ที่เกิดขึ้น และเกาะอยู่ที่รูพรุนใน Carbon กรดเข้มข้นประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ประสิทธิภาพของระบบอาจมากกว่าร้อยละ 90 ตัวอย่างของกระบวนการนี้ได้แก่ Lurgi Sulfacid Wet Adsorption Process รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 กระบวนการ Reinluft Dry Process



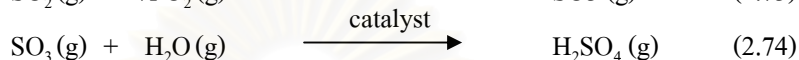
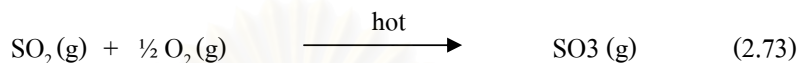
รูปที่ 2.15 Lurgi Sulfuric Wet Adsorption Process



รูปที่ 2.16 การกำจัด SO₂ โดย Cat - Ox Process

2.7.2.4 กระบวนการแบบ Catalytic Oxidation Process

เป็นกระบวนการที่อาศัยการ Catalytic Oxidation เป็นพื้นฐาน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปะปนอยู่ในฟลูก๊าสจะผ่านไปบน Catalytic Bed จากนั้นจึงถูก Oxidized ไปเป็น SO_3 และจึงทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น H_2SO_4 ดังสมการ



H_2SO_4 ที่ได้นี้จะ เป็น By Product ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของกระบวนการแบบนี้ คือ Monsanto Cat – Ox and Other Process (รูปที่ 2.16)

2.7.2.5 กระบวนการแบบ Electron Beam Process (E – Beam)

กระบวนการนี้ใช้วิธีลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam) ซึ่งเทคโนโลยีนี้พัฒนาโดย DOE (U.S. Department of Energy) โดยการฉีดเอาน้ำที่ผสมกับแอมโมเนีย หรือ Lime เข้าไปในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้แล้วปล่อยให้ก๊าซนั้นไหลผ่านลำแสงอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนไหลกระทบกับโมเลกุลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้ก๊าซดังกล่าวกลายเป็นของแข็งสามารถนำออกจากก๊าซก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ วิธีการนี้สามารถลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 97 ในขณะที่เดียวกันได้มีการพัฒนาระบบดักจับแบบ Jet Scrubbing Reactor โดยให้ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ผ่านไปยังชั้นของของเหลวที่ใช้ในการจับซัลเฟอร์ วิธีการนี้สามารถลดซัลเฟอร์ได้สูงเช่นกัน นอกจากนี้ยังลดปัญหาการเกิดการกัดกร่อน เกิดสนิม การอุดตัน การจับกันเป็นก้อน ซึ่งเป็นปัญหาของเครื่อง Scrubber ทั่วไปได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธี Selection Catalytic Reduction (SCR) ในการลดออกไซด์ของไนโตรเจนจากก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยไม่ต้องปรับปรุงระบบเผาไหม้เดิมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

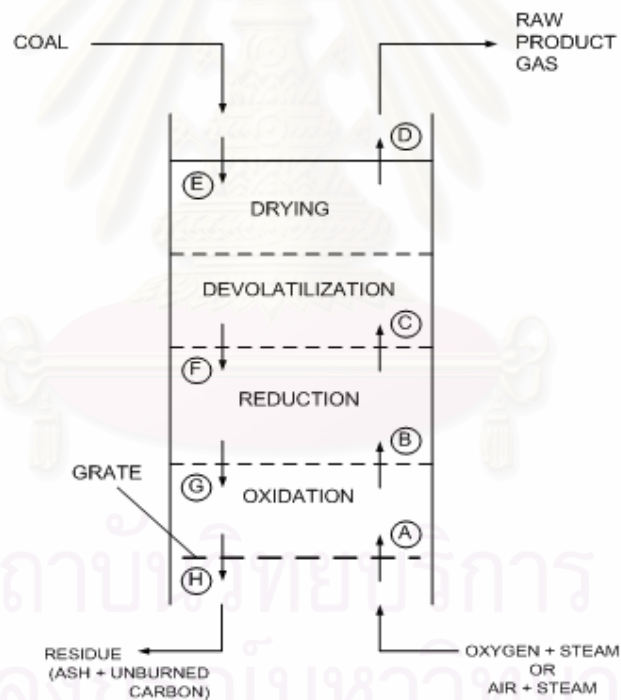
2.8 ระบบผลิตก๊าซจากถ่านหิน (Coal Gasifier)

ระบบผลิตก๊าซแบ่งออกเป็น 3 แบบ

2.8.1 ระบบผลิตก๊าซแบบเบดนิ่ง (Fixed bed)

ระบบเบดนิ่งเป็นแบบที่มีการนำเอาเชื้อเพลิงจากถ่านหินตั้งแต่สมัยแรกๆ ระบบเบดนิ่งเชื้อเพลิงภายในเบดจะเคลื่อนที่อย่างช้าๆ จากบนลงล่างมายังบริเวณกาซิฟิเคชัน (Gasification Zone) ที่เป็นเช่นนั้นเพราะขนาดเชื้อเพลิงเล็กลงทุกขณะ ต้องมีการเติมเชื้อเพลิงตลอดเวลา เพื่อให้ระดับเบดคงที่

จากรูปที่ 2.17 กระบวนการกาซิฟิเคชันแบบเบดนิ่งเริ่มจากไอน้ำและอากาศที่เข้าทางด้านล่างจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน บริเวณส่วนล่างของเบด คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับอากาศและไอน้ำตามปฏิกิริยาที่ (2.1) และ (2.2) โดยปฏิกิริยาที่ (2.5) และ (2.6) จะเกิดขึ้นเล็กน้อย ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็น CO และ CO₂ เรียกบริเวณนี้ว่า Oxidation Zone จากนั้นก๊าซที่เกิดขึ้นจะลอยเข้าสู่ Reduction Zone ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2.3) และ (2.4) เกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ คือ CO และ H₂ หลังจากนั้นก๊าซผลิตภัณฑ์ซึ่งมีค่าความร้อนสูงจะลอยขึ้นสู่ด้านบนสัมผัสกับถ่านหินที่ถูกป้อนเข้ามาใหม่ในบริเวณ Devolatilization Zone และ Drying Zone สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมาแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอน โมเลกุลหนักอื่นๆ ลอยปะปนไปกับก๊าซผลิตภัณฑ์ (Producer Gas) ที่ได้จากการบวนการกาซิฟิเคชัน ส่วนที่เหลือจากการกาซิฟิเคชันที่เป็นกากจะนำออกทางส่วนล่างของเตากระบวนการกาซิฟิเคชันแบบเบดนิ่ง (Fixed-Bed) มีข้อดีหลายอย่างเช่น การไหลของเชื้อเพลิงและส่วนที่เหลือจากการกาซิฟิเคชันที่เป็นกากจะไหลสวนทางกับ



รูปที่ 2.17 กระบวนการกาซิฟิเคชันแบบเบดนิ่ง

ก๊าซตัวกลางที่ใช้ในการกาซิฟิเคชันและก๊าซผลิตภัณฑ์ (Producer Gas) ที่ได้จากการกาซิฟิเคชัน ซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงาน เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นาน (Long Residence Time) ทำให้คาร์บอนเปลี่ยนไปเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ได้มาก (High Conversion) ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมี

ของแข็งปนออกมาเล็กน้อย สำหรับข้อเสียของกระบวนการกาซิฟิเคชันแบบเบดนิ่ง เช่น อุณหภูมิค่อนข้างสูงทำให้เกิดปัญหาการหลอมเหลวของเถ้า (Slagging) ลักษณะหรือองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนี้คือ

- การป้อนถ่านหินและอากาศจะเป็นลักษณะสวนทางกัน (Counter Current) เป็นส่วนมาก แต่ก็มีระบบที่เป็น Cocurrent และ Crossflow บ้าง

- ขนาดของถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีขนาดใหญ่กว่าทุกระบบคือ ประมาณ $\frac{1}{4}$ นิ้วขึ้นไป ทำให้ค่าจ่ายในส่วนของการเตรียมวัตถุดิบถูกเมื่อเทียบกับแบบอื่น

- เถ้า (Ash) ออกจากระบบในลักษณะเป็นอนุภาคส่วนมากของเถ้าที่มีจะออกทางด้านล่างของตัวเครื่องปฏิกรณ์ แต่ก็มีเถ้าลอย (Fly ash) บางส่วนออกทางด้านบนของเตา โดยรวมกับก๊าซที่ผลิตได้

- อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากระบบประมาณ 500 – 550 องศาเซลเซียส

2.8.2 ระบบผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier)

เทคนิคทางด้านฟลูอิดไคซ์เบดได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ มากมายในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการอบแห้ง (Drying) กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการดูดซับ (Absorption) เป็นต้น ทั้งนี้เพราะฟลูอิดไคซ์เบดมีข้อดีหลายประการ เมื่อเทียบกับระบบอื่น เช่น การควบคุมสามารถทำได้ในระบบอัตโนมัติได้ทั้งระบบ การถ่ายเทมวลสาร ถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอภายในเบด ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ แต่ระบบการผลิตก๊าซจากถ่านหินในฟลูอิดไคซ์เบดจะมีปัญหาเรื่องการควบคุมอุณหภูมิให้เกิดบริเวณต่างๆ เพื่อให้เกิดการกาซิฟิที่สมบูรณ์ทำได้ยาก จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ยังไม่มีการพัฒนายังต่ำกว่าศักยภาพที่ระบบจะสามารถทำได้ถ้าหากพัฒนาใช้เทคนิคในการออกแบบช่วย เช่น ใช้ระบบฟลูอิดไคซ์เบดหลายชั้น (Multistage) หรือหลายคอลัมน์ (Multi-column) ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้อีก ลักษณะหรือองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนี้คือ

- การป้อนถ่านหินและอากาศหรือออกซิเจนจะเป็นแบบสวนทางกัน การไหลของอากาศหรือออกซิเจนจะต้องมีความเร็วสูงพอ หรือมากกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ (Minimum Fluidizing Velocity) ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องมากกว่า 1.5 เท่าจึงจะทำให้ถ่านหินลอยตัวอยู่ในอุปกรณ์ได้เป็นอย่างดี

- ขนาดของอนุภาคจะมีขนาดเล็กมากพอที่จะต้องทำให้อัตราการป้อนอากาศหรือออกซิเจนไม่มากเกินไป (ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค โดยถ้าอนุภาคยิ่งเล็ก ความเร็วของอากาศที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์ก็จะต่ำลง) ทำให้ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ ระบบนี้จึงมีค่าใช้จ่ายในการเตรียมถ่านหินสูงเพราะต้องทำการย่อยก่อนให้สม่ำเสมอและเล็กลง

- ถ้าจะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ในลักษณะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับขนาดถ่านหินที่ป้อนเข้า บางส่วนของถ่านที่มีขนาดเล็กมากๆ จะออกทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ไปพร้อมกับก๊าซซึ่งจะต้องทำการแยกต่อไป ส่วนถ่านที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จะถูกนำออกทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องได้

- อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะสูงประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส

2.8.3 ระบบผลิตก๊าซแบบ Entrained Bed

เป็นระบบที่มีการใช้กันมานานแล้วระบบหนึ่ง ประสิทธิภาพสูง ความคุมได้ง่ายกว่าระบบเบดนิ่ง (Fixed Bed)

ลักษณะหรือองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนี้คือ

- การป้อนถ่านหิน อากาศ หรือ ออกซิเจนจะป้อนไปพร้อมๆกันในทิศทางเดียวกัน ส่วนมากจากด้านบนมาด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์

- ถ่านหินที่ใช้จะต้องมีขนาดเล็กเป็นผง (Powdered Form) ดังนั้นจึงทำให้ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูงมาก เมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว

- ถ่านที่ออกจากระบบจะเป็นแบบถ่านหลอมละลาย เป็นถ่านที่มีคุณสมบัติในการนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าถ่านระบบอื่น

- อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะสูงประมาณ 1,260-1,540 องศาเซลเซียส

2.9 ศักยภาพในการนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซจากถ่านหินมาใช้

วัตถุประสงค์ในการผลิตก๊าซจากถ่านหิน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

- เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเรียก Combined Cycle

- ใช้แทนก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) ที่ส่งไปตามระบบท่อได้

- ใช้แทนก๊าซสังเคราะห์ในการผลิตสารเคมี

- เป็นก๊าซเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ

2.9.1 ศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากเมื่อทำการผลิตก๊าซจากถ่านหินแล้ว ก๊าซที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ Flue Gas ที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบกำมะถันในก๊าซสูงสามารถลดปริมาณกำมะถันได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการลดปริมาณกำมะถันจาก Flue Gas ที่เกิดการเผาไหม้ เนื่องจากปริมาณก๊าซที่จะแยกเอากำมะถันออกมีปริมาณน้อย ซึ่งทำให้ก๊าซจากถ่านหินมีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูง นอกจากนี้ก๊าซที่

เป็นแบบ High BTU ยังสามารถนำไปใช้ร่วมหรือทดแทนเชื้อเพลิงอื่นๆได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงครึ่งทศวรรษที่ผ่านมา มีการผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมจากถ่านหิน หรือ Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) เป็นจำนวนมาก เทคโนโลยีทางด้าน IGCC นั้นคาดว่าจะมีการพัฒนาอีกไกลในอนาคต เพราะมีแนวโน้มความต้องการการใช้สูง เพราะสามารถลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ถ่านหินได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ทำให้ยืดอายุการใช้งานหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นศักยภาพของการผลิตก๊าซจากถ่านหินเพื่อไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจึงสูงมาก

2.9.2 ศักยภาพในการนำไปใช้แทนก๊าซธรรมชาติ

จากการประเมินเทคโนโลยีการผลิตก๊าซและคุณสมบัติก๊าซที่ได้จากถ่านหินพบว่า การนำก๊าซที่ผลิตจากถ่านหินไปใช้แทนก๊าซธรรมชาติมีศักยภาพสูงมากในอนาคต เพราะก๊าซจากถ่านหินสามารถนำไปใช้แทนก๊าซธรรมชาติได้ในเกือบทุกๆด้าน โดยเฉพาะกับอุปกรณ์ต่างๆที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่มีอยู่ในโลกจะมีปริมาณลดลงตามลำดับ และจะหมดไปในระยะเวลาประมาณอีกไม่เกิน 60 ปี ดังนั้นราคาของก๊าซธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ การนำก๊าซธรรมชาติมาใช้เป็นเชื้อเพลิงก็จะมีความไม่เหมาะสมในไม่ช้านี้ เพราะการนำไปผลิตสารเคมีต่างๆอาจคุ้มค่ากว่าเนื่องจากมีราคาแพงขึ้น แต่ในปัจจุบันปริมาณผู้ใช้ก๊าซธรรมชาติมีเป็นจำนวนมากดังนั้นจึงเป็นที่คาดคะเนได้ว่าศักยภาพของก๊าซจากถ่านหินจะสูงมากในอนาคต ในการนำไปใช้เพื่อเพลิงทดแทนการใช้ก๊าซธรรมชาติในปัจจุบัน

2.9.3 ศักยภาพการใช้เป็นก๊าซสังเคราะห์ในการผลิตสารเคมี

สารเคมีต่างๆ และวัสดุที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากผลิตจากสารตั้งต้นคือ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเนื่องจากในเวลาไม่เกินครึ่งทศวรรษ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจะหมดจากโลก ดังนั้นสารเคมีต่างๆ ซึ่งมีการใช้อยู่เป็นจำนวนมากที่ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมก็จะแพงขึ้นตามราคาผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและจะไม่สามารถผลิตได้ในอนาคต ดังนั้นการนำก๊าซจากถ่านหินไปใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตสารเคมีผลิตสารตั้งต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์วัสดุบางอย่างจะมีความสำคัญมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าศักยภาพของก๊าซจากถ่านหินในด้านนี้จึงมีแนวโน้มจะสูงขึ้นตามลำดับทั้งในด้านความจำเป็นและความเหมาะสมในอนาคต

2.9.4 ศักยภาพในการใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันยังมีการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมไม่มากนัก เมื่อเทียบกับการผลิตกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ส่วนมากจะใช้ในรูปของถ่านหินโดยตรงซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ามีผลทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและต่อกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมด้วย ดังนั้นจึงยังไม่ได้มีการนำเอาก๊าซจากถ่านหินมาใช้กันมากนักเหมือนเช่นในการผลิตพลังงานไฟฟ้า แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงปัจจุบันที่โรงงานอุตสาหกรรมใช้อยู่จะเป็นเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในอนาคตเมื่อผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมีราคาสูงขึ้นเนื่องจากมีปริมาณน้อยลง ต้นทุน

การผลิตของอุตสาหกรรมก็จะสูงขึ้น ซึ่งในตอนนั้นจะทำให้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ หันมาสนใจการใช้ก๊าซจากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมากขึ้น โดยเฉพาะในระยะแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงเช่น น้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติอยู่เดิมซึ่งมีเป็นจำนวนมาก

ดังนั้นศักยภาพของการใช้ก๊าซจากถ่านหินในด้านการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรมจึงมีความเป็นไปได้สูง

2.9.5 ศักยภาพในด้านปริมาณวัตถุดิบ

ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานที่ค้นพบแล้วเป็นจำนวนมาก สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้อีกมากกว่า 500 ปี ดังนั้นในอนาคตจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญทดแทนผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่กำลังลดน้อยลง ปัจจุบันได้พบแล้วว่าวิธีการใช้ถ่านหินที่มีความเป็นไปได้สูงในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก็คือ การนำเอาถ่านหินมาผลิตเป็นก๊าซก่อนนำไปใช้ ดังนั้นถึงแม้จะมีการนำถ่านหินมาใช้มากขึ้น ก็จะไม่เกิดความขาดแคลนในด้านปริมาณและราคาที่ไม่น่าเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

2.9.6 ศักยภาพในรูปแบบของเทคโนโลยีการผลิตการใช้

เทคโนโลยีในการใช้ก๊าซเชื้อเพลิงในปัจจุบัน ส่วนมากสามารถใช้กับก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินได้เลย บางอย่างก็ปรับแก้เล็กน้อย ดังนั้นเทคโนโลยีในการนำเอาก๊าซจากถ่านหินมาใช้จึงมีความพร้อมสูง ในเทคโนโลยีด้านการผลิตก๊าซจากถ่านหินและย้อนหลังไป 1 – 2 ทศวรรษ จะพบว่าได้มีการค้นคว้าวิจัยและสร้างเครื่องมือเครื่องปฏิกรณ์ขึ้นมาในระดับตั้งแต่ห้องปฏิบัติการจนถึงระดับสาธิตทดลองมากมาย ดังนั้นแนวโน้มการผลิตก๊าซจากถ่านหินคาดว่าจะมีศักยภาพสูงมากตั้งแต่ปัจจุบันเป็นต้นไปเพราะความพร้อมของเทคโนโลยีดังกล่าวมากขึ้นตามลำดับ

2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) Haslam R.T., Hitchcock F.L. and Rudow E.W. [11] ได้ศึกษาปฏิกิริยาอวตอร์ก๊าซ (Water – Gas Reaction) ที่อุณหภูมิ 650 – 1200 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่าปฏิกิริยาที่สำคัญคือ



โดยเสนอกฎการเกิดที่ผิวคาร์บอนและปฏิกิริยาเป็นแบบโมเลกุลเดี่ยว (Monomolecule Reaction) อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส คือ

$$[\text{CO}_2] = 0.5([\text{H}_2\text{O}] - [\text{H}_2\text{O}]^2) \quad (2.75)$$

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส

$$[\text{CO}_2] = 0.47([\text{H}_2\text{O}] - [\text{H}_2\text{O}]^{1.85}) \quad (2.76)$$

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยา (2.3) จะไม่เกิด แต่ปฏิกิริยา (2.4) จะมีอัตราเร็วเป็น 2 เท่าของปฏิกิริยา (2.12)

ส่วนที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของปฏิกิริยา (2.4) จะเป็น 2.18 เท่าของปฏิกิริยา (2.3) การเพิ่มความดันมีผลให้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์มากขึ้น

2) **Scott, G.S. [12]** ศึกษากลไกการสลายตัวของไอน้ำในปฏิกิริยากาซิฟเคชันถ่านหินลิกไนต์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาปฐมภูมิที่เกิดขึ้นคือ



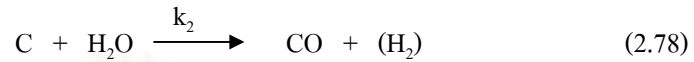
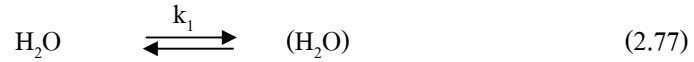
โดยก๊าซแห้งที่เป็นผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย 33.33% CO_2 และ 66.67% H_2 อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด (Overall Reaction) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีอันดับของปฏิกิริยา (Order of Reaction) = 2 และมีค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) เป็น 26 กิโลแคลอรี/โมล

3) **Goring G.E., Curran G.P., Zielke C.W. และ Everett Gorin [13]** ได้ศึกษาอิทธิพลของความดันและปริมาณคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้หมดไปต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านด้วยก๊าซผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส สรุปว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนคาร์บอนที่เผาไหม้จะเป็นเหตุให้เกิดการลดอัตราเร็วปฏิกิริยาทั้งหมดของปฏิกิริยากาซิฟเคชันและอัตราเร็วปฏิกิริยาการผลิตก๊าซมีเทน แต่เมื่อเพิ่มความดันในระบบ จะเพิ่มอัตราเร็วทั้งหมดและอัตราเร็วปฏิกิริยาการผลิตก๊าซมีเทน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำ อัตราส่วนของ $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ จะลดลงแต่จะเพิ่มอัตราเร็วทั้งหมดของปฏิกิริยากาซิฟเคชันและปฏิกิริยาการผลิตก๊าซมีเทน

4) **Pilcher, et. al. [14]** ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันย่อยของไอน้ำ ที่มีผลต่ออัตราเร็วปฏิกิริยา โดยใช้เทคนิคความร้อนสมดุล (Thermobalance) ที่อุณหภูมิ 800 – 1,450 องศาเซลเซียส ความดันย่อยไอน้ำ 30 – 360 มม.ปรอท ได้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเป็น 40.7 กิโลแคลอรี ที่อุณหภูมิ 1,000 – 1,100 องศาเซลเซียส สำหรับที่อุณหภูมิสูงกว่านี้อัตราการแพร่จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมปฏิกิริยา อันดับของปฏิกิริยาปรากฏ (Apparent Reaction Order) มีค่าเป็น 0.66 และอัตราส่วน CO/CO_2 จะมีค่ามากตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่จะเป็นอัตราส่วนกลับต่อความดันย่อยของไอน้ำ

5) **Von Fredersdoff, et. al. [4]** ได้เสนอแนะกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ $\text{C} - \text{H}_2\text{O}$ โดยเกิดสมดุลการดูดซับ (Equilibrium Adsorption) ของไอน้ำบนผิวของคาร์บอน หลังจากนั้นจะ

เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของคาร์บอน ก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จะเกิดปฏิกิริยาสมดุลและหลุดตัวออกมาจากผิวคาร์บอนเข้าสู่กระแสของก๊าซต่อไป



$$R = k_f \cdot \sigma_c \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} (1 - P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (2.80)$$

$k_f = k_1 k_2 / k_1$; $\infty = k_3 / k_3$; $\beta = k_1 / k_1$; $\sigma_c = \text{Active Surface Area}$

6) Ergun [15] ได้ศึกษาปฏิกิริยาการคายของคาร์บอน และเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ C-H₂O และ C-CO₂ และเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาโดยใช้สมการดูดซับ แลงเมียร์-ไฮน์เชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) โดยมีสมมุติฐานว่า การดูดซับของแก๊สที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน และการคายตัวของผลิตภัณฑ์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว

$$r = k \cdot \sigma_c / (1 + P_{\text{H}_2} / P_{\text{H}_2\text{O}})$$

r = อัตราเร็วปฏิกิริยา (Reaction Rate of C – H₂O)

k = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา (Reaction Rate Constant)

σ_c = ปริมาณพื้นที่ผิวที่ว่างไปปฏิกิริยา (Active Surface Area)

$P_{\text{H}_2}, P_{\text{H}_2\text{O}}$ = ความดันย่อยของไฮโดรเจนและไอน้ำ

7) Von Fredersdorf และ Elliot [4] ได้ศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง C – H₂O ว่ามีปฏิกิริยาสำคัญ คือ



โดยปฏิกิริยา (2.3) และ (2.12) เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสของของแข็งและก๊าซ แต่ปฏิกิริยา (2.12) อาจเกิดขึ้นในวัฏภาคก๊าซก็ได้ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาชีพท์จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

8) Leven Spiel [16] และ Wen [17] ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งกับก๊าซ เรียก “The Shrinking Core Model” โดยเสนอว่า ในขั้นแรกปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกสุดของของแข็ง เมื่อเวลาผ่านไปผิวของอนุภาคที่จะเกิดปฏิกิริยาจะหดตัว โดยมีชั้นของเถ้าถ่านหุ้มไว้ด้านนอกแทน ดังนั้นจึงเกิดความต้านทานการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

- 1) การแพร่ของก๊าซเข้าทำปฏิกิริยาผ่านฟิล์มที่หุ้มนิ่งของก๊าซซึ่งห่อหุ้มอนุภาคไว้
- 2) การแพร่ของก๊าซผ่านชั้นของเถ้าถ่าน
- 3) ปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของของแข็ง

ขั้นตอนทั้งสามที่เกิดขึ้นขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง อาจจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาได้ ขึ้นอยู่กับภาวะการเกิดปฏิกิริยาของระบบ

9) Jensen [18] ได้ศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากาซิฟิเคชันของถ่านหินด้วยไอน้ำ ในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิ 1,000-1,300 องศาเซลเซียส โดยพบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีบนผิวคาร์บอน โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น 19.8 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งผลการทดลองเข้าได้ดีกับแบบจำลองแกนกลางหดตัว (The Shrinking Core Model) อุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับปฏิกิริยานี้อยู่ระหว่าง 1,100-1,200 องศาเซลเซียส เพราะให้ค่าความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์มีน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่าพลังงานกระตุ้นที่ทดลองได้ค่อนข้างจะมีค่าต่ำ

ส่วนปฏิกิริยาชีพท์เกิดขึ้นน้อยมากที่ผิวอนุภาค เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า แต่เมื่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และหลุดตัวออกจากผิวคาร์บอนโดยแพร่ผ่านชั้นของเถ้า (Ash Layer) ที่ห่อหุ้มอยู่ ทำให้เวลาในการสัมผัสกันกับไอน้ำที่แพร่สวนทางเข้าไปในชั้นของเถ้า มีมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาออกเตอร-แก๊ส ชีฟท์ได้ และเป็นที่น่าทึ่งกันว่าองค์ประกอบของธาตุบางชนิดในเถ้า มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย ดังนั้นจึงพบว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเร็วกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

10) Riede และ Havesian [19] ได้ทดลองปฏิกิริยากาซิฟายถ่านหินระหว่างอุณหภูมิ 500 – 900 องศาเซลเซียส ความดันย่อยระหว่าง 70 – 120 มม.ปรอท ความเร็วของก๊าซ 5 – 15 ซม./วินาที พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีพื้นผิว ค่าพลังงานกระตุ้น 16.4 กิโลแคลอรี/โมล

11) Li Shufen and Xiao Xinyan [20] ศึกษาผลของความดัน และอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการกาซิฟายถ่านชาร์จากค่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน อัตราการกาซิฟิเคชันจำเพาะและค่าคงที่

อัตราเร็วใน Packed Bed Balance Reactor โดยใช้ภาวะที่ความดัน 0.098, 0.98, 1.96, 2.45 เมกะพาสคัล ขนาดของถ่านชาร์ 180 ถึง 250 ไมโครเมตร น้ำหนักถ่านชาร์ 650 มิลลิกรัม อัตราการไหลของก๊าซผสมระหว่างปริมาณไอน้ำร้อยละ 25 กับไนโตรเจน 50 ลิตรต่อชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 1,023, 1,073, 1,123, 1,173, 1,223 และ 1,273 องศาเซลเซียส พบว่าผลของการเพิ่มความดัน และอุณหภูมิจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน อัตราการกาซิฟิเคชัน และค่าคงที่อัตราเร็วมีค่าเพิ่มขึ้น

11) P.K. Chatterlee, A.B. Datta and K.M. Kundu [21] ศึกษาการกาซิฟิเคชันถ่านหินอินเดียที่มีปริมาณเถ้าสูง คือ บิทุมินัส และ Coke – Breeze โดยใช้อากาศกับไอน้ำในการทำให้เกิดภาวะฟลูอิดไคซ์เบด ภายใต้ความดันบรรยากาศ ศึกษาผลกระทบของไอน้ำและอากาศที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนและไอน้ำ ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงอุณหภูมิเฉลี่ยของเบด และเปรียบเทียบปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณได้ทางคณิตศาสตร์ โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองที่ความสูงของเบด 600 มิลลิเมตร อุณหภูมิของเบด 750 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ความเร็วของการฟลูอิด 0.5 ถึง 1.0 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศ 10 ถึง 35 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไอน้ำ 3 ถึง 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการป้อนถ่านหิน 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมงพบว่า ผลของอัตราการไหลของไอน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง อุณหภูมิของเบด และค่าความร้อนคือ ที่มีอัตราการไหลของไอน้ำต่ำปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะมากกว่าปริมาณของไฮโดรเจน การเพิ่มอัตราการไหลของไอน้ำจะไปลดอุณหภูมิของเบดทำให้ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงต่ำลง อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคือที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส สำหรับ Coke – Breeze และที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสสำหรับถ่านหินบิทุมินัส ปริมาณออกซิเจนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนคือ เมื่อปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของไอน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนและไอน้ำคือ เมื่ออัตราการไหลของไอน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิของเบด ลดลงเป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนและไอน้ำลดลง จากค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่า 4 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน) ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากการทดลองจากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้ทางคณิตศาสตร์มีค่าแตกต่างกันร้อยละ 12

12) จิระศักดิ์ แสงพุ่ม [22] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของเตาผลิตเชื้อเพลิงที่ออกแบบขึ้นในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชันเพื่อให้ได้โปรคิวเซอร์ก๊าซปริมาณสูงพอที่จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ ขนาดของถ่านไม้ที่ขนาด 2 ถึง 4 มิลลิเมตร และขนาด 4 ถึง 6 มิลลิเมตร และอัตราการป้อนถ่านไม้โดยที่ขนาดของถ่านไม้ 2 ถึง 4 มิลลิเมตร อัตราการป้อนถ่านไม้เป็น 130, 162 และ 280 กรัมต่อนาที และขนาดของถ่านไม้ 4 ถึง 6 มิลลิเมตร อัตราการป้อนถ่านไม้เป็น 88, 99, 132, 157 และ 195 กรัมต่อ

นาที่ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิช่วง 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส สามารถผลิตปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีที่สุด ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน คือ ถ่านไม้ขนาด 4 ถึง 6 มิลลิเมตร อัตราการป้อนถ่านไม้ 99 กรัมต่อนาที อัตราการป้อนอากาศ 0.29 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ความสูงของเบด 60 เซนติเมตร อุณหภูมิของเบดประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส จะทำให้สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 27.5 โดยปริมาตร สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในขนาด 1,600 ลูกบาศก์เซนติเมตร ได้อย่างดี แรงงานที่ได้ประมาณ 4.6 แรงม้า ใช้หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ โดยไม่เกิดปัญหาขัดข้อง

13) วรเดช เจริศพรายวงศ์ [23] ศึกษาการทำงานของเครื่องมือฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ และศึกษาถึงผลของความเร็วของอากาศ และผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเผาไหม้เพื่อนำความร้อนที่เกิดไปใช้ประโยชน์โดยตรง โดยใช้ถ่านหินขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร อัตราการไหลของอากาศ 0.06 ถึง 0.36 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที หรือด้วยความเร็วของอากาศ 76.08 ถึง 98.20 เซนติเมตรต่อวินาที จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อัตราการป้อนถ่านลิกไนต์จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเผาไหม้ และปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อจะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดีและต่อเนื่อง คือ เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้หรือปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น อัตราการป้อนถ่านลิกไนต์ต้องเพิ่มขึ้นเช่นกัน ความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ 76.08 ถึง 98.02 เซนติเมตรต่อวินาที หรือประมาณ 1.55 ถึง 2.00 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ ภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดร้อยละ 89.57 ที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ 900 องศาเซลเซียส ความเร็วของอากาศ 98.02 เซนติเมตรต่อวินาที

14) อรรถพล ณรงค์ฤทธิชัย [24] ศึกษาภาวะในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินเวียงแหง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 39 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร โดยใช้อากาศเป็นก๊าซตัวกลางภายใต้ความดันบรรยากาศ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ขนาดถ่านหิน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.8, 0.8 – 2.36 และ 2.36 – 4.75 มิลลิเมตร และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ให้ค่าร้อยละความเข้มข้นของก๊าซองค์ประกอบ และค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่สูง

การศึกษาพบว่าในช่วงของค่าตัวแปรที่ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 900 องศาเซลเซียส และถ่านหินขนาด 2.36 – 4.75 มิลลิเมตร ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความเข้มข้นไฮโดรเจนร้อยละ 8.89 มีเทนร้อยละ 0.36 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 16.32 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 7.51 ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อน 3.35 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ภาวะมาตรฐาน

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เกณฑ์เบื้องต้นของอุปกรณ์ผลิตก๊าซจากถ่านหิน

เทคโนโลยีของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน ได้มีการศึกษาและดำเนินการกันมาเป็นระยะเวลานานแล้วและมาหลายรูปแบบ เช่น Updraft, Downdraft, Cross Draft และ Fluidized Bed Gasifier เป็นต้น แต่ละระบบก็มีลักษณะของการทำงานและข้อจำกัดต่างๆแตกต่างกันออกไปในด้านเทคนิค โดยทั่วไปเกณฑ์เบื้องต้นของอุปกรณ์ผลิตก๊าซจากถ่านหิน จะต้องมีความสมบัติดังนี้

1. สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้
2. สามารถควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้
3. สามารถควบคุมอัตราการป้อนอากาศและออกซิเจนได้
4. ควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายและมีการกระจายถ่ายเทความร้อนอย่างทั่วถึง
5. มีการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างถ่านหิน อากาศ และ/หรือ ออกซิเจน และไอน้ำ
6. มีคาร์บอนหลงเหลืออยู่ในถ่านน้อยที่สุด หรือไม่มีเลย
7. เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษาต่ำ
8. มีประสิทธิภาพสูง

3.2 องค์ประกอบหลักของระบบผลิตก๊าซจากถ่านหิน

ระบบผลิตก๊าซจากถ่านหินที่นำมาใช้ในการศึกษา จะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญๆ แยกออกได้เป็นระบบๆ ซึ่งแต่ละระบบก็มีเทคโนโลยีที่แตกต่างกันไป องค์ประกอบที่สำคัญของระบบประกอบด้วย

- ตัวเครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซ (Gasifier)
- ระบบเตรียมและป้อนวัตถุดิบ
- ระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิง
- อุปกรณ์แยกก๊าซผลิตภัณฑ์กับของเหลว (Gas Liquid Separator)

3.2.1 ตัวเครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซ (Gasifier)

ตัวเครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเป็นส่วนสำคัญซึ่งมีหลายเทคโนโลยีที่ผู้ใช้สามารถนำมาใช้ได้ แต่เทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 ระบบคือ ระบบ Fixed Bed และระบบ Fluidized Bed ซึ่งเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ของทั้งสองระบบ

3.2.2 หน่วยการเตรียมวัตถุดิบ

ขนาดของถ่านหินที่ขุดจากเหมืองถ่านหินโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่เล็กแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการทำเหมืองและศักดิ์ของถ่านหิน เมื่อนำมาขายหรือใช้ประโยชน์ถ่านหิน จะถูกทำให้มีขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และอุปกรณ์ที่จะใช้ประโยชน์ถ่านหิน

ในระบบผลิตก๊าซบางระบบจำเป็นต้องมีการลดขนาดของถ่านหินให้เล็กลง โดยเฉพาะระบบ Fluidized Bed และ Entrained Bed เพราะจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็วและการเกิด Fluidized Bed ได้ที่ความเร็วของอากาศไม่สูงมากนัก และทำให้ง่ายต่อการควบคุมปฏิกิริยา อุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ อุปกรณ์ Size Reduction แบบต่างๆ เช่น Jaw Crusher, Hammer Mill, Ball Mill, Vibration Mill เป็นต้น

การเลือกอุปกรณ์ Size Reduction จะต้องพิจารณาระบบผลิตก๊าซจากถ่านหินว่าเป็นระบบใด ถ้าเป็นระบบ Fixed Bed ขนาดของอนุภาคจะประมาณ 0.65 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นระบบ Fluidized Bed จะมีขนาดต่ำกว่า 0.2 มิลลิเมตร เป็นต้น

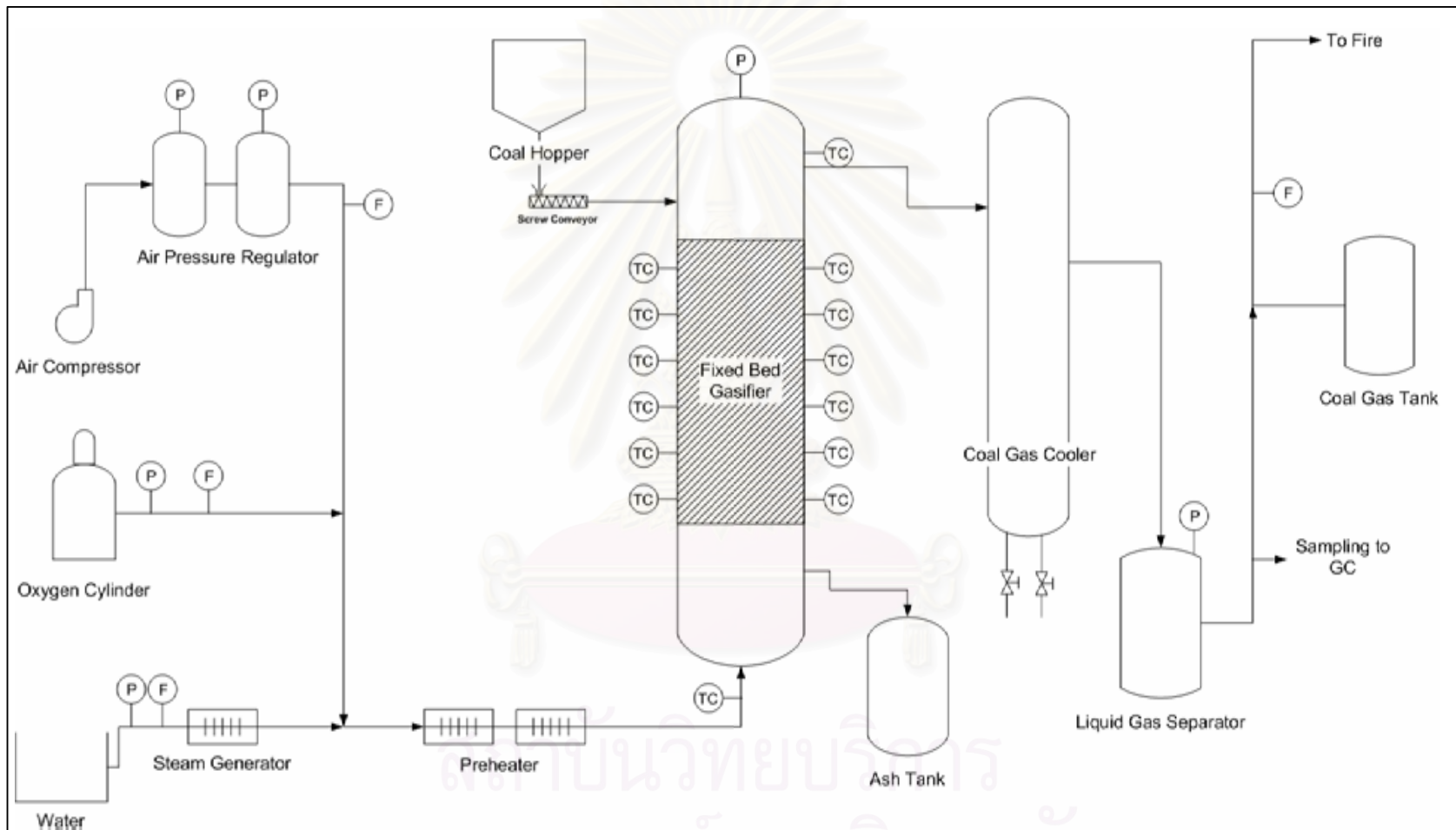
ในส่วนของการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ตัวเครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซ จะขึ้นอยู่กับระบบและขนาดของถ่านหิน ในการศึกษานี้ใช้ Screw Conveyor

3.2.3 ระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิง

ก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นและออกจาก Gasifier จะมีอุณหภูมิสูง มีองค์ประกอบอื่นนอกเหนือจากก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงได้แล้ว ยังมีสิ่งเจือปนต่างๆปะปนอยู่อีกเป็นจำนวนมาก เช่น ทาร์ (Tar) อนุภาคมลสารที่มีขนาดเล็ก (Particulates) ก๊าซต่างๆ ระเบิดอุณหภูมิ และปริมาณสิ่งเจือปนต่างๆจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้

ระบบทำความสะอาดก๊าซที่สำคัญๆ ได้แก่

- 1) ระบบกำจัดฝุ่นละอองและทาร์
- 2) ระบบทำความสะอาดก๊าซเจือปน



รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองการผลิตก๊าซจากถ่าน

3.3 ระบบผลิตก๊าซจากถ่านหินที่ใช้ในการศึกษา

ระบบผลิตก๊าซจากถ่านหินที่ใช้ในการศึกษา เป็นระบบที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งของสถาบัน Beijing Research Institute of Coal Chemistry ประเทศจีน แผนผังการทดลองแสดงดังรูปที่

3.1 ซึ่งแบ่งออกเป็นระบบต่างๆ ดังนี้

3.3.1 ระบบเตรียม/ป้อนวัตถุดิบ

3.3.1.1 ระบบเตรียมถ่านหิน

เครื่องบดแยกขนาด อุปกรณ์บดและคัดแยกขนาดถ่านหินที่ใช้ในการจัดเตรียมถ่านหินเพื่อใช้ในการศึกษา

3.3.1.2 ระบบป้อนถ่านหินเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซ

ระบบป้อนวัตถุดิบประกอบด้วยถังพักถ่านหิน (Coal Hopper) แสดงดังรูปที่ 3.2 และระบบลำเลียงถ่านหินเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (Screw Conveyor) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ถังเก็บถ่านหิน (Coal Hopper)



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ป้อนถ่านหินเข้าเครื่องผลิตก๊าซ (Screw Conveyor)

3.3.1.3 ระบบป้อนอากาศ (Air Blower)

ระบบป้อนอากาศประกอบด้วย Air Compressor (รูปที่ 3.4) ทำหน้าที่อัดอากาศเข้าสู่ถึง Air Pressure Regulator (รูปที่ 3.5) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor)



รูปที่ 3.5 Air Pressure Regulator

3.3.1.4 ระบบผลิตไอน้ำ (Steam Generator)

ระบบผลิตไอน้ำทำหน้าที่ผลิตไอน้ำป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซ ซึ่งไอน้ำจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับถ่านหินในเครื่องผลิตก๊าซได้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง โดยระบบนี้เริ่มตั้งแต่ป้อนน้ำผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล (รูปที่ 3.6) จากนั้นเข้าสู่เครื่องผลิตไอน้ำ (รูปที่ 3.7) เป็นไอน้ำร่วมกับอากาศ และ/หรือ ออกซิเจน ผ่านระบบอุ่นอากาศ (Preheater) (รูปที่ 3.8) ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซ



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดอัตราการไหล (Ventury Meter)



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ผลิตไอน้ำ (Steam Generator)



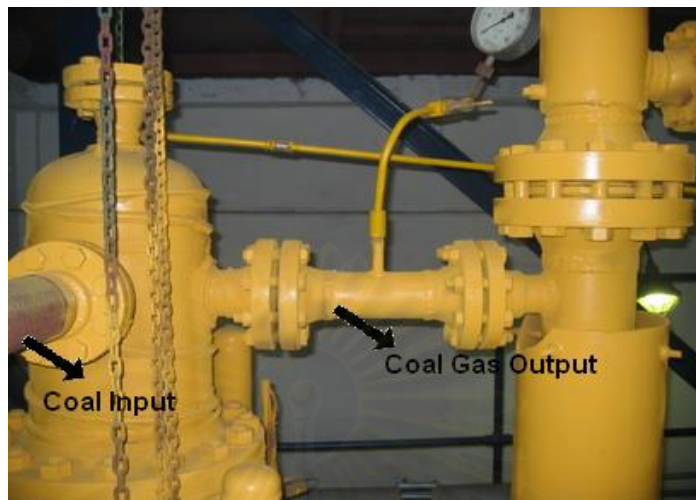
รูปที่ 3.8 ระบบอุ่นอากาศ (Air Preheater)

3.3.2 ระบบผลิตก๊าซแบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Gasifier)

เครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซแบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Gasifier) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 2.5 เมตร แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ บริเวณป้อนถ่านหินและทางออกของก๊าซผลิตภัณฑ์ บริเวณเกิดปฏิกิริยา และบริเวณป้อนอากาศและไอน้ำและทางออกของเถ้าจากปฏิกิริยาดัง แสดงในรูป 3.9 โดยบริเวณเกิดปฏิกิริยาสูง 750 เซนติเมตร ถ่านหินจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ อากาศ และ/หรือออกซิเจน และไอน้ำจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน แสดงดังรูปที่ 3.10 เครื่องปฏิกรณ์มีเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิทั้งหมด 14 ตัว แบ่งเป็นบริเวณป้อนอากาศ และ/หรือออกซิเจน และไอน้ำ 1 ตัว บริเวณเกิดปฏิกิริยา 12 ตัว และบริเวณทางออกของก๊าซเชื้อเพลิง 1 ตัว และเกจวัดความดันในเครื่องปฏิกรณ์ 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.9 บริเวณป้อนอากาศและไอน้ำ (Air and Steam Input Zone)



รูปที่ 3.10 บริเวณส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ (Coal Input and Coal Gas Output Zone)



รูปที่ 3.11 บริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction Zone)

3.3.3 ระบบทำความสะอาดก๊าซผลิตภัณฑ์

3.3.3.1 อุปกรณ์ลดอุณหภูมิก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Cooler)

ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากการกระบวนการกาซิฟิเคชันจะมีอุณหภูมิสูง และมีไถ่ลอยปนอยู่ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไซโคลนในการดักจับก๊าซ แต่ในการทดลองนี้เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีขนาดเล็ก การใช้แผ่นกรองก๊าซผลิตภัณฑ์เพื่อดักจับไถ่ลอยก่อนเข้าสู่คอลัมน์ลดอุณหภูมิก๊าซก็เพียงพอ หลังจากนั้นก๊าซผลิตภัณฑ์เข้าสู่คอลัมน์ลดอุณหภูมิก๊าซ ซึ่งเป็นท่อสองชั้นก๊าซผลิตภัณฑ์ไหลตามท่อชั้นในและน้ำเป็นสารหล่อเย็นไหลตามท่อชั้นนอก ก๊าซผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิลดลงและสารระเหยซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนหนักจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวตกลงมาทางด้านล่าง อุปกรณ์ลดอุณหภูมิก๊าซผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ลดอุณหภูมิก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Cooler)

3.3.3.2 อุปกรณ์แยกของเหลวและก๊าซ (Gas – Liquid Separator)

อุปกรณ์แยกของเหลวและก๊าซเป็นอุปกรณ์ต่อจากอุปกรณ์ลดอุณหภูมิ ก๊าซผลิตภัณฑ์ ลักษณะเป็นคอลัมน์ ของเหลวจะถูกคักอยู่ในคอลัมน์ส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เย็นลงจะ ออกจากคอลัมน์ไปสู่หัวเผา (Burner) ต่อไป แสดงดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์แยกของเหลวและก๊าซ (Liquid – Gas Separator)

3.3.4 ระบบควบคุม (Control System)

เครื่องปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้งหมดควบคุมโดยระบบควบคุมจาก ห้องควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์ผลิตไอน้ำ อุปกรณ์อุ่นอากาศ อัตราการป้อนถ่านหิน อัตราการป้อนอากาศ และอัตราการป้อนก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 3.14 ระบบควบคุม (Control System)

3.3.5 การวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิง (Coal Gas Analysis)

ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ถูกนำมาวิเคราะห์หาสมบัติของก๊าซตามหัวข้อ 3.4.2.5 ซึ่งระบบจะมีจุดเก็บตัวอย่างหลังจากออกจากอุปกรณ์แยกของเหลวและก๊าซดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยเก็บตัวอย่างโดยลูกบอลเก็บตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.16 และวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์โดยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.15 จุดเก็บตัวอย่าง (Sampling Point)



รูปที่ 3.16 ลูกบอลเก็บตัวอย่าง (Sampling Ball)



รูปที่ 3.17 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นถ่านหินจากเหมืองเชียงม่วน จ. พะเยา และเหมืองสบปราบ จ.ลำปาง ซึ่งการวิเคราะห์มีรายละเอียด ดังนี้

3.4.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ จะทำการชั่งตัวอย่างโดยใช้วิธีตาม ASTM D 2013 และ ASTM D 2234

3.4.1.2 วิธีวิเคราะห์ถ่านหิน

การวิเคราะห์ถ่านหินทำการวิเคราะห์ทั้งแบบประมาณ (Proximate Analysis) (ดูภาคผนวก ก) แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) จุดหลอมเหลวของเถ้า (Ash Refusibility) และองค์ประกอบของเถ้า (Ash Composition) ซึ่งวิเคราะห์ตามวิธี American Standard ตามตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Proximate Analysis (ภาคผนวก ก)

ลำดับที่	องค์ประกอบที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1	Moisture	ASTM D 3173-87 Standard test method for moisture in the analysis of coal/coke
2	Ash	ASTM D 3174-89 Standard test method for ash in the analysis of coal/coke
3	Volatile Matter	ASTM D 3175-89 Standard test method for volatile matter in the analysis of coal/coke
4	Fixed Carbon	ASTM D 3172-89 (By difference)
5	Heating Value	ASTM D 2015

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Ultimate Analysis

ลำดับที่	องค์ประกอบที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1	Carbon	ASTM D 3178
2	Hydrogen	ASTM D 3178
3	Sulfur	ASTM D 3177-89
4	Nitrogen	ASTM D 3179-89
5	Oxygen	ASTM D 3176-89 (By difference)

3.4.2 วิธีการทดลองการผลิตก๊าซจากถ่านหิน

3.4.2.1 ทำการบดตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่องบด แล้วนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาดให้มีขนาด 9-13 มิลลิเมตร และนำถ่านหินที่เตรียมได้ใส่ลงใน Hopper จนเต็มประมาณ 10 กิโลกรัม

3.4.2.2 เปิดระบบผลิตไอน้ำ (Steam Generator) โดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 320 องศาเซลเซียส และเปิดระบบอุ่นอากาศ (Air Preheater) โดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 450 องศาเซลเซียส

3.4.2.3 เริ่มทำการจุดถ่านหินให้ติดไฟในเครื่องผลิตก๊าซ โดยเปิด Manhole ใต้อ่อนถ่านชาร์ที่ติดไฟแล้ว (ดังรูปที่ 3.18) จากนั้นปิด Manhole

3.4.2.4 ปรับควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ก๊าซออกซิเจนตามตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังนี้

- อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส
ทำการทดลองโดยใช้อัตราการป้อนอากาศ 6 m³/hr
- อัตราการป้อนอากาศ 3, 4, 5 และ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
ทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 950 องศาเซลเซียส
- อัตราการป้อน Oxygen Rich Air ร้อยละ 40, 60 และ 100
ทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 950 องศาเซลเซียส

อัตราการป้อน 3 m³/hr



รูปที่ 3.18 ถ่านชาร์ติดไฟใช้ในการจุดเครื่องผลิตก๊าซ

3.4.2.5 ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปจนเข้าสู่สภาวะ Steady State เก็บตัวอย่างก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ทุกๆ 1 ชั่วโมงและทำการวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์ ดังนี้

- องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์
- ร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์

- ค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์
- ประสิทธิภาพของการกาซิฟิเคชัน

3.4.2.6 จุดหัวเผาก๊าซตรงทางออกของก๊าซเพื่อเผาก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 หัวเผาและเปลวไฟจากการเผาไหม้ก๊าซผลิตภัณฑ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลองข้อมูลและผลการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนของถ่านหินเชียงม่วนและเหมืองสบปราบแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Proximate Analysis (ดูตัวอย่างการคำนวณภาคผนวก ข)

Analysis Item	Chiang Muan Coal	Sobprab Coal
1. Total Moisture	20.20	24.40
- Surface Moisture	16.88	20.63
- Inherent Moisture	3.92	3.77
3. Ash (%)	17.26	8.55
4. Volatile Matter (%)	41.80	34.50
5. Fixed Carbon (%)	20.74	32.55
2. Heating Value (MJ/kg)		
- Higher H.V.	18.78	19.06
- Lower H.V.	16.78	16.96

จากตาราง 4.1 พบว่าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยทั้ง 2 ชนิดเป็นถ่านหินสัคดีลิกไนต์ ซึ่งมีค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนต่ำ มีปริมาณสารระเหยและน้ำค่อนข้างสูง โดยที่ถ่านหินสบปราบมีค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูงกว่าถ่านหินเชียงม่วนเล็กน้อย และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่า ซึ่งมีผลทำให้ถ่านหินสบปราบสามารถผลิตก๊าซซึ่งมีร้อยละผลได้ (Yield) ของก๊าซผลิตภัณฑ์สูงกว่าถ่านหินเชียงม่วน ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดๆ ไป

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบแยกธาตุ คือ การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจน ปริมาณไนโตรเจน และปริมาณซัลเฟอร์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านหินเชียงม่วนและเหมืองสบปราบแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Ultimate Analysis

Analysis Item	Chiang Muan Coal	Sobprab Coal
1. Carbon (%)	45.77	48.72
2. Hydrogen (%)	3.97	3.21
3. Oxygen (%)	15.10	17.4
4. Nitrogen (%)	0.91	0.59
5. Sulfur (%)	0.19	1.67

4.1.3 ผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของเถ้า (Coal Ash Refusibility)

การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของเถ้าเป็นการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้าถ่านหินตามวิธี ASTM D 27 ซึ่งผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของเถ้าแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวของเถ้า (Coal Ash Refusibility)

Analysis Item	Chiang Muan Coal	Sobprab Coal
1. Deform Point (°C)	1,250	1,080
2. Softening Point (°C)	1,320	1,150
3. Hemispheric Point (°C)	1,330	1,160
4. Fluid Point (°C)	1,330	1,190

จากตารางที่ 4.3 พบว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหินเชียงม่วนสูงกว่าถ่านหินสบปราบ โดยที่จุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหินเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งไม่ควรสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหินเนื่องจากทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของเครื่องกาซิฟายถ่านหินเนื่องจากเถ้าที่หลอมตัวเกาะติดอยู่ตามผนังของเครื่องกาซิฟายถ่านหิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของการกาซิฟายให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้า

4.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้า (Coal Ash Composition)

องค์ประกอบของเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าถ่านหินเชียงม่วนและเหมืองสบปราบแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้า (Coal Ash Composition)

Ash Composition	Chiang Muan Coal	Sobprab Coal
SiO ₂	46.51	34.44
Al ₂ O ₃	23.19	20.08
Fe ₂ O ₃	5.41	23.78
TiO ₂	1.58	1.07
CaO	12.13	8.40
MgO	3.82	1.72
SO ₃	2.58	5.32
K ₂ O	1.88	1.87
Na ₂ O	1.57	0.67

จากผลการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของถ่านหินดังแสดงในตารางที่ 4.1 – 4.4 พบว่าถ่านหินที่ใช้ในการวิจัยทั้ง 2 ชนิดจัดเป็นถ่านหินสัคคีลิกไนต์ มีค่าคาร์บอนคงตัวค่อนข้างต่ำ ค่าความร้อนประมาณ 4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และเมื่อพิจารณาจุดหลอมเหลวของเถ้าตามตารางที่ 4.3 พบว่า เถ้าจากถ่านหินทั้งสองชนิดมีค่าจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะถ่านหินจากเหมืองสบปราบมีค่าอุณหภูมิของการเริ่มเปลี่ยนรูปถ่านหินที่อุณหภูมิประมาณ 1,080 องศาเซลเซียส ทำให้เป็นปัญหาในการกาซิฟายถ่านหินเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของการกาซิฟายถ่านหินสูงกว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้าถ่านหินจะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของเครื่องกาซิฟายถ่านหินเนื่องจากเถ้าที่หลอมตัวเกาะติดอยู่ตามผนังของเครื่องกาซิฟายถ่านหิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของการกาซิฟายให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้า

4.2 ผลการวิจัยการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน

4.2.1 ผลการวิจัยการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่อุณหภูมิ (Temperature) ต่างๆ กัน

การทดลองการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ กัน คือ ที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส ใช้ Air/Steam เป็นก๊าซตัวกลางอัตราการไหล 6 m³/hr ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชิงวม่วนแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสบปราบแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

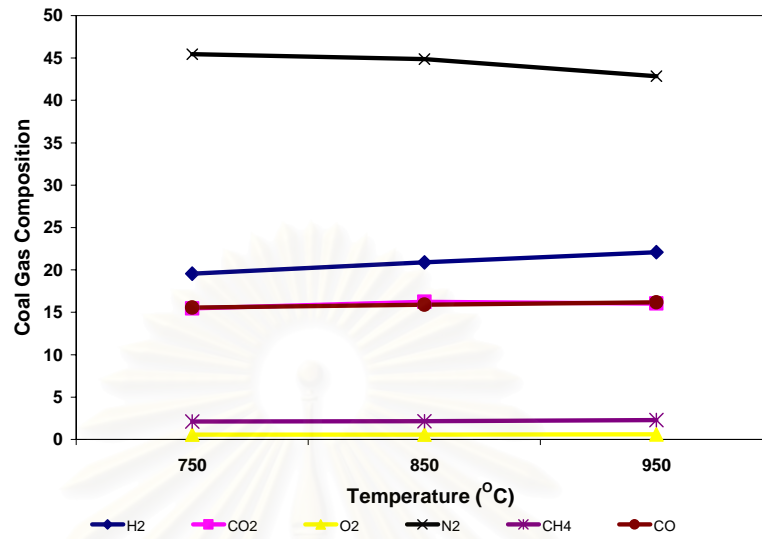
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองเชิงวม่วนที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ กัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

Analysis Item	Temperature (°C)		
	750	850	950
Heating Value of Coal (MJ/kg)	16.78	16.78	16.78
Coal Feed (kg)	10.36	9.45	7.57
Coal Gas Produced (m ³)	18.55	17.48	14.41
Coal Gas Yield (m ³ /kg)	1.79	1.85	1.90
Gas Density (kg/m ³)	1.093	1.098	1.099
H ₂ S (ppm)	325	425	500
Gas Composition			
H ₂	19.55	20.89	22.11
CO ₂	15.45	16.23	16.04
O ₂	0.57	0.59	0.63
N ₂	45.44	44.86	42.85
CH ₄	2.13	2.14	2.28
CO	15.55	15.89	16.18
Heating Value			
- Higher Heating Value (MJ/m ³)	5.322	5.543	5.663
- Lower Heating Value (MJ/m ³)	5.124	5.267	5.309
Efficiency	54.677	58.061	60.227

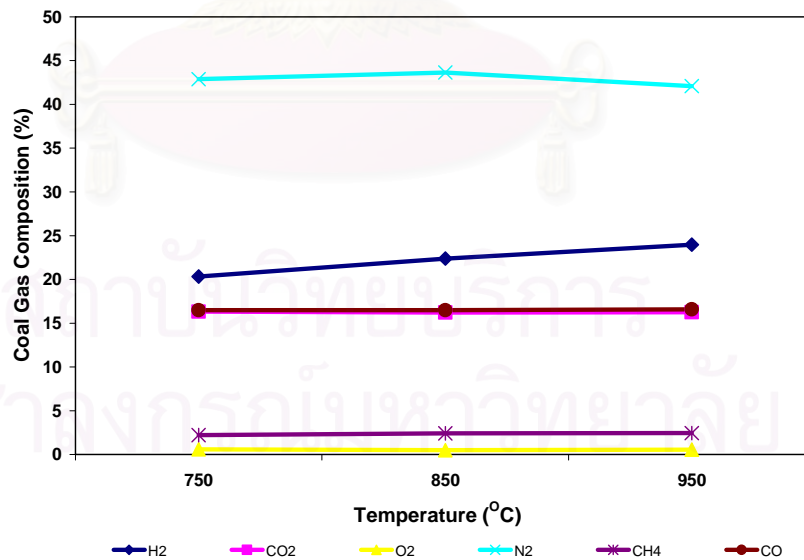
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองสบปราบที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา
ต่างๆ กัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

Analysis Item	Temperature (°C)		
	750	850	950
Heating Value of Coal (MJ/kg)	16.96	16.96	16.96
Coal Feed (kg)	12.20	12.20	12.20
Coal Gas Produced (m ³)	21.95	22.69	23.50
Coal Gas Yield (m ³ /kg)	1.80	1.86	1.93
Gas Density (kg/m ³)	1.090	1.095	1.083
H ₂ S (MJ/m ³)	600	825	950
Gas Composition			
H ₂	20.33	22.38	23.96
CO ₂	16.32	16.21	16.26
O ₂	0.58	0.49	0.57
N ₂	42.87	43.65	42.08
CH ₄	2.23	2.41	2.46
CO	16.48	16.48	16.58
Heating Value			
- Higher Heating Value (MJ/m ³)	5.362	5.574	5.687
- Lower Heating Value (MJ/m ³)	5.215	5.425	5.495
Efficiency	55.146	58.442	62.415

จากข้อมูลตารางที่ 4.5 และ 4.6 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทดลองกับร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ถ่านหินเชิงม่วน) และรูปที่ 4.2 (ถ่านหินสบปราบ) รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่ง รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองสบปราบ จังหวัดลำปาง อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.1 (ถ่านหินเชิงม้วน) พบว่าค่าร้อยละความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 750 องศาเซลเซียสเป็น 15.55 โดยปริมาตร และเพิ่มเป็นร้อยละ 16.28 โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และกราฟรูปที่ 4.2 (ถ่านหินสับปราบ) พบว่าค่าร้อยละความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 750 องศาเซลเซียสเป็น 16.48 โดยปริมาตร และเพิ่มเป็นร้อยละ 16.58 โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เนื่องจาก

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพลังงาน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานจะเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาต่อไปนี้



และ



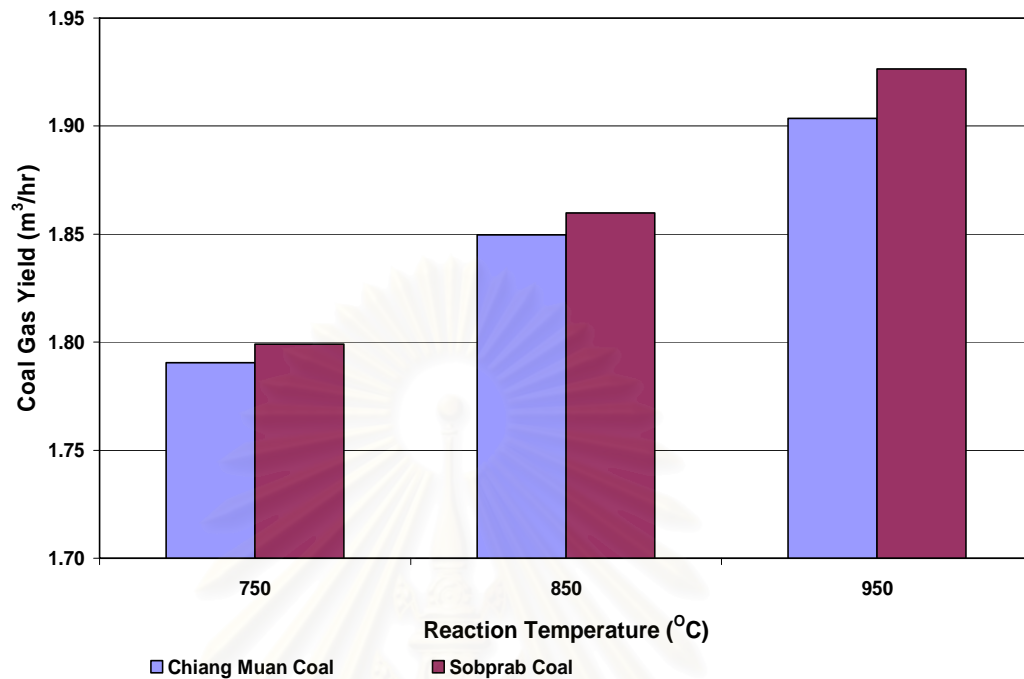
ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าไม่สูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย เป็นผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (2.4) ต่ำ จึงได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย ในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (2.4) เพิ่มขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาทำให้มีปริมาณน้อยลง และผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น

ค่าร้อยละความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 750 องศาเซลเซียสเป็นร้อยละ 19.55 โดยปริมาตร และเพิ่มเป็นร้อยละ 22.11 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยา



ที่อุณหภูมิสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (2.2) และปฏิกิริยา (2.3) เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ผลการทดลองของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบในปฏิกิริยาทางสรีรวิทยาให้แนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yong Jeon Kim และคณะ โดยปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

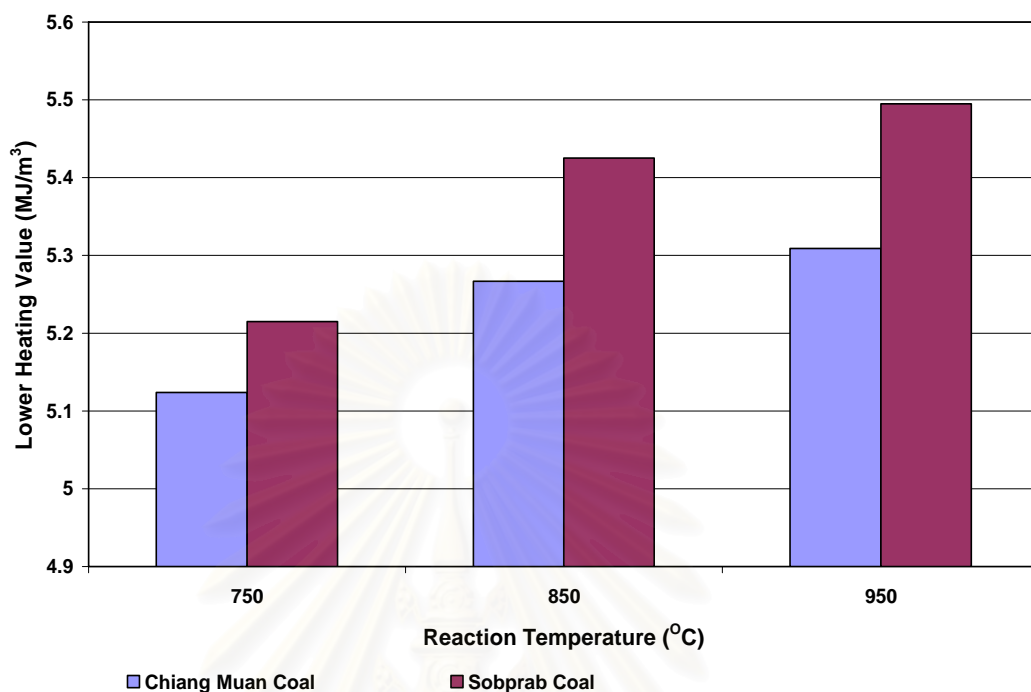


รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงโดยที่

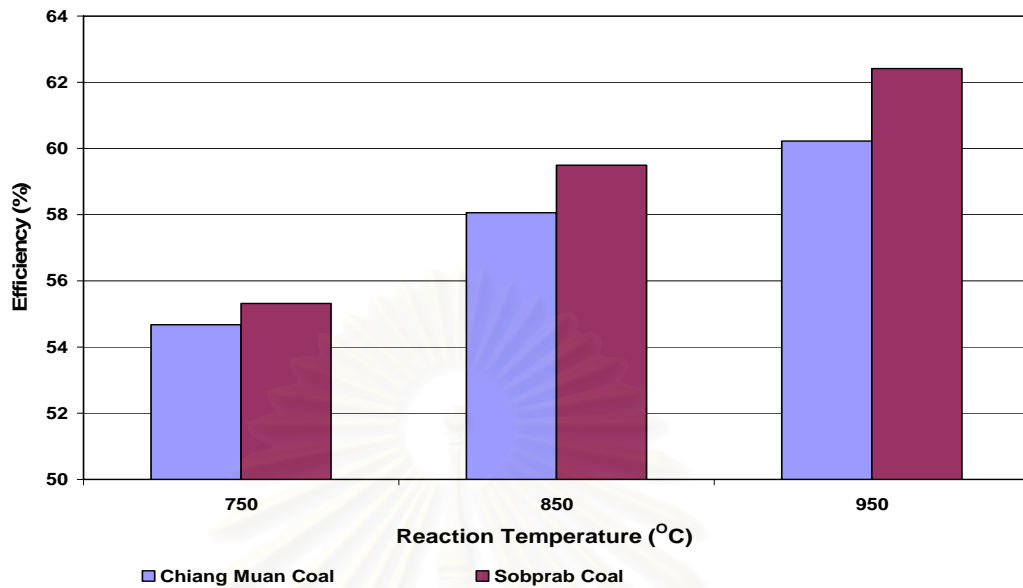
$$\text{Coal Gas Yield} = \frac{\text{ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์}}{\text{น้ำหนักถ่านหินที่ป้อนเข้า}}$$

พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ถ่านหินสบปราบสามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ปริมาณมากกว่าถ่านหินเชิงม่วนเล็กน้อยเนื่องจากถ่านหินสบปราบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่า และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าถ่านหินเชิงม่วน จากผลการทดลองอุณหภูมิที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ปริมาณสูงสุดคือ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกันอัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.4 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความร้อนที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชียงม่วนมีค่าความร้อนต่ำกว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสบปราบ เนื่องจากถ่านหินสบปราบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่า และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าถ่านหินเชียงม่วน จากผลการทดลองอุณหภูมิที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 950 องศาเซลเซียส

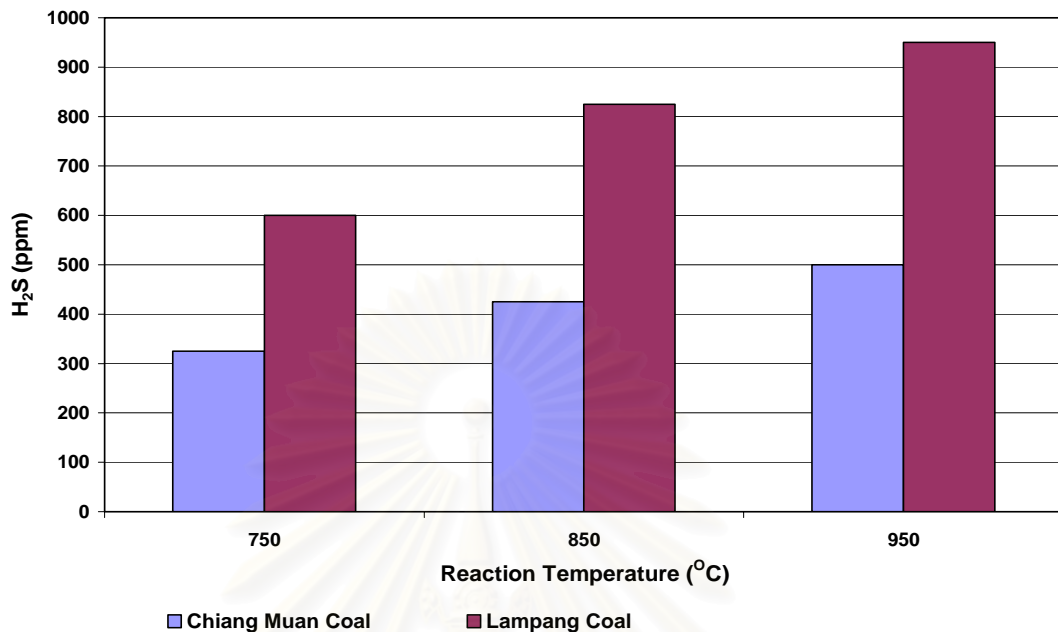


รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซไฟเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.5 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซไฟเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกัน โดยที่ค่าประสิทธิภาพในการกาซไฟเคชันคำนวณจาก

$$\text{Gasification Efficiency} = \frac{\text{Lower Heating Value of Gas} \times \text{Coal Gas Yield} \times 100}{\text{Heating Value of Coal}}$$

จากกราฟพบว่าค่าประสิทธิภาพในการกาซไฟเคชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยที่ถ่านหินเชียงม่วนมีค่าประสิทธิภาพในการกาซไฟเคชันต่ำกว่าถ่านหินสบปราบ จากผลการทดลองอุณหภูมิที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือคือ 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกัน อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆกัน โดยก๊าซ H_2S จะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยที่ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสปรอบมีปริมาณ H_2S สูงกว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชียงม่วน เนื่องจากถ่านหินสปรอบมีปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่าถ่านหินเชียงม่วน จากผลการทดลองอุณหภูมิที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่า H_2S ต่ำที่สุดคือ 750 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองทั้งหมดข้างต้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทดลองเพิ่มขึ้น สมบัติต่างๆของก๊าซมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่อุณหภูมิในการทดลองไม่ควรเกินอุณหภูมิในการหลอมเหลวของถ่านหินเนื่องจากทำให้ถ่านหินเกิดการหลอมตัวกลายเป็น Slag เกาะติดตามผนังของเครื่องกาซิฟายถ่านหิน ซึ่งเป็นปัญหาในการกำจัดถ่านหินออกจากเครื่องกาซิฟายถ่านหิน

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้งสองแหล่งคือ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

4.2.2 ผลการวิจัยการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่อัตราการป้อนอากาศ (Air Feed Rate) ต่างๆ กัน

การทดลองการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทำการทดลองโดยใช้อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน คือใช้ Air/Steam เป็นก๊าซตัวกลางอัตราการไหล 3, 4, 5 และ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชิงม่วนแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสบปราบแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชิงม่วนที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

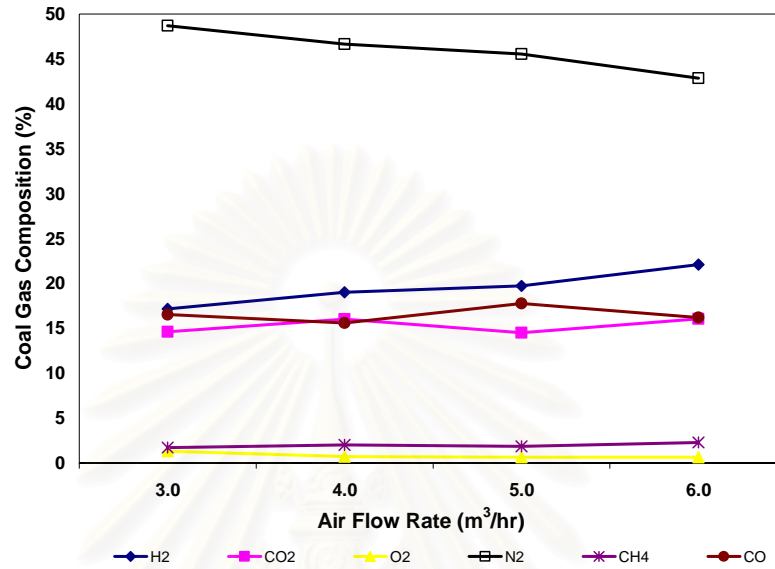
Analysis Item	Air Flow Rate (m ³ /hr)			
	3.0	4.0	5.0	6.0
Heating Value of Coal (MJ/kg)	16.78	16.78	16.78	16.78
Coal Feed (kg)	7.75	8.28	6.62	7.57
Coal Gas Produced (m ³)	9.83	13.27	11.58	14.41
Coal Gas Yield (m ³ /kg)	1.27	1.60	1.76	1.90
Temperature	950	950	950	950
Gas Density (kg/m ³)	1.151	1.136	1.119	1.099
H ₂ S (ppm)	86.67	266.67	437.50	500.00
Gas Composition				
H ₂	17.16	19.02	19.72	22.11
CO ₂	14.60	16.01	14.50	16.04
O ₂	1.32	0.70	0.65	0.63
N ₂	48.71	46.65	45.52	42.85
CH ₄	1.70	2.02	1.86	2.28
CO	14.11	15.59	17.77	16.18
Heating Value				
- Higher Heating Value (MJ/m ³)	4.954	5.200	5.501	5.763
- Lower Heating Value (MJ/m ³)	4.602	4.809	5.097	5.309
Gasification Efficiency	34.774	45.911	53.136	60.238

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสับปราบ ที่อัตราการป้อนอากาศ
ต่างๆ กันอุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

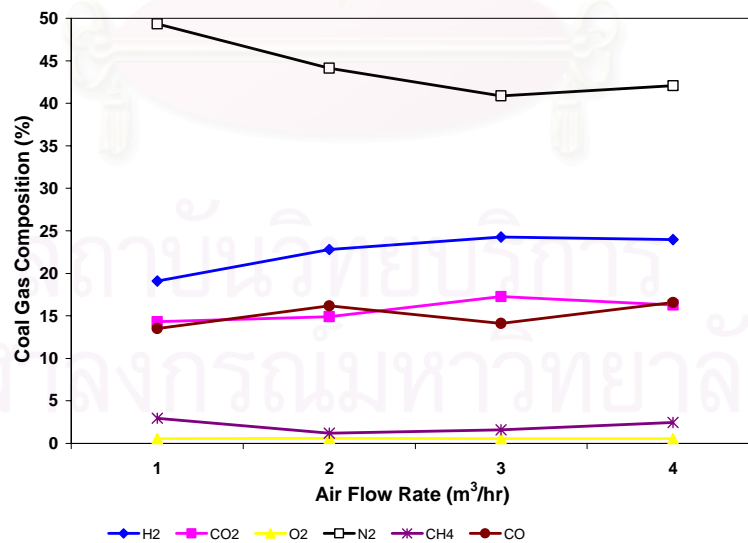
Analysis Item	Air Flow Rate (m ³ /hr)			
	3.0	4.0	5.0	6.0
Heating Value of Coal (MJ/kg)	16.96	16.96	16.96	16.96
Coal Feed (kg)	7.18	9.51	9.49	12.20
Coal Gas Produced (m ³)	9.30	15.21	17.43	23.80
Coal Gas Yield (m ³ /kg)	1.30	1.60	1.84	1.95
Temperature at reaction zone	950	950	950	950
Pressure in gasifier (atm)	1.0	1.0	1.0	1.0
Gas Density (kg/m ³)	1.115	1.086	1.071	1.083
H ₂ S (ppm)	325.25	550.75	700.00	950.00
Gas Composition				
H ₂	19.08	22.80	24.26	23.96
CO ₂	14.29	14.91	17.27	16.26
O ₂	0.58	0.60	0.56	0.57
N ₂	49.34	44.14	40.88	42.08
CH ₄	2.96	1.18	1.59	2.46
CO	13.52	16.17	14.12	16.58
Heating Value				
- Higher Heating Value (MJ/m ³)	5.155	5.422	5.511	5.687
- Lower Heating Value (MJ/m ³)	4.920	4.964	5.021	5.325
Efficiency	37.579	46.819	54.391	61.257

จากข้อมูลตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
อัตราการป้อนอากาศกับค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ถ่านหินเชิงม้วน)
และ 4.8 (ถ่านหินสับปราบ) รูปที่ 4.9 แสดงกราฟการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์
(Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่ง รูปที่ 4.10 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าความร้อน
(Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง รูปที่ 4.11 แสดงกราฟการ
เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง

และรูปที่ 4.12 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง

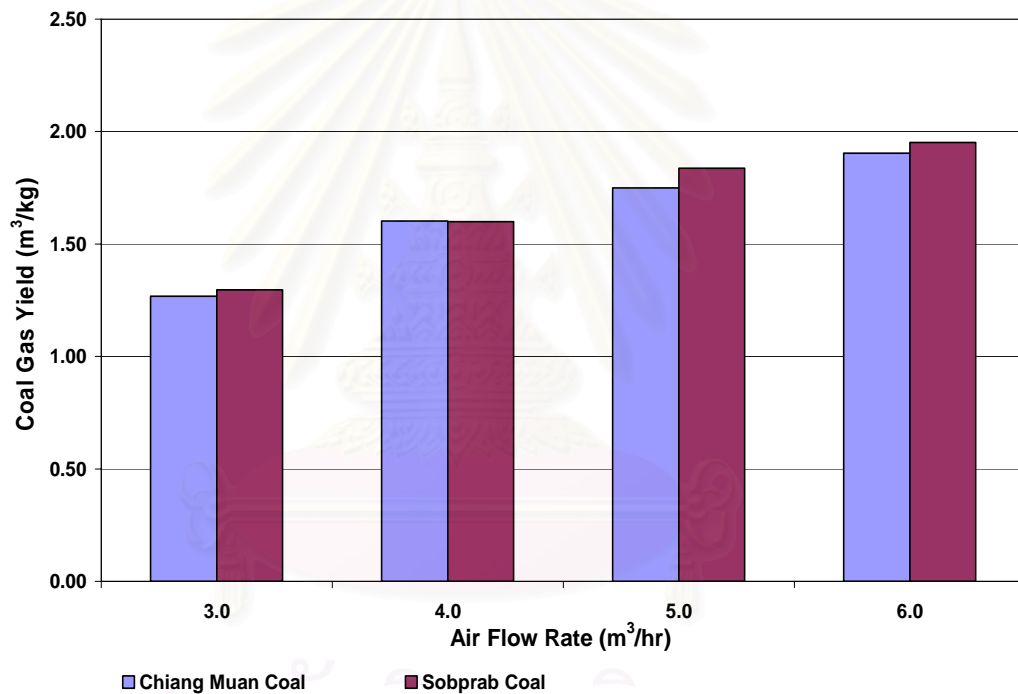


รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการป้อนอากาศที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราการป้อนอากาศที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองสบปราบ จังหวัดลำปาง อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

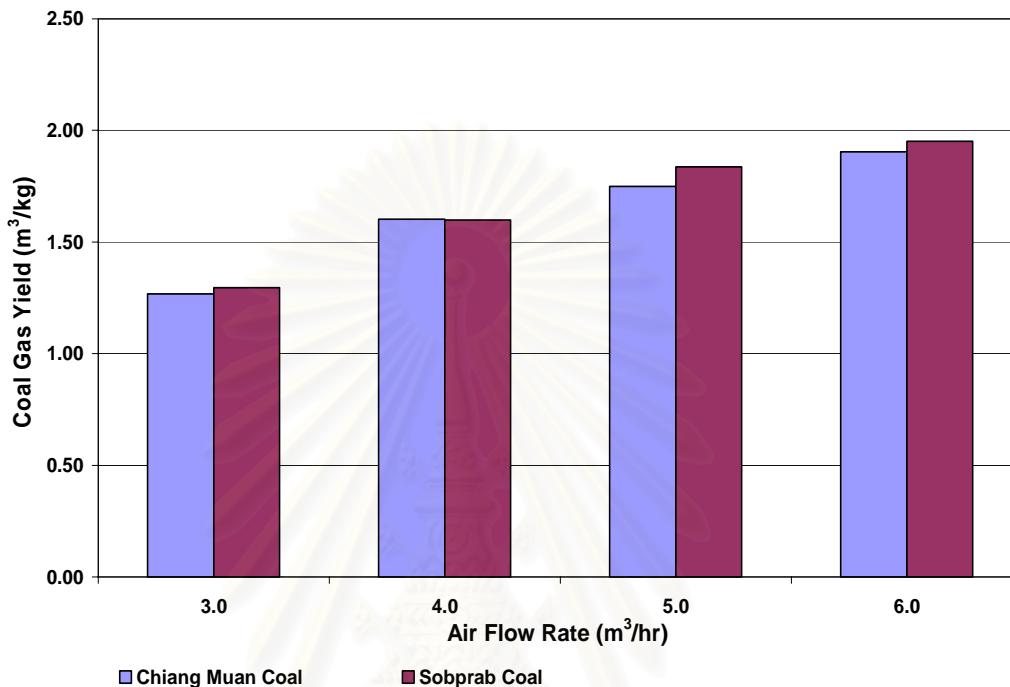
จากกราฟรูปที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ (Producer Gas Composition) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอากาศประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ดังนั้นเมื่ออัตราการป้อนอากาศสูงขึ้นปริมาณของก๊าซออกซิเจนในอากาศที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในถ่านหินเพิ่มสูงขึ้นด้วยทำให้เกิดปฏิกิริยา (2.1) และ (2.2) เพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้เกิดก๊าซ CO และ CO₂ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากาซิฟายต่อไปเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ปริมาณมากขึ้นด้วย แต่เมื่ออัตราการป้อนอากาศมากเกินไปจนมีปริมาณออกซิเจนมากเกินไป จะทำให้ปริมาณของ CO มีปริมาณลดลง ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

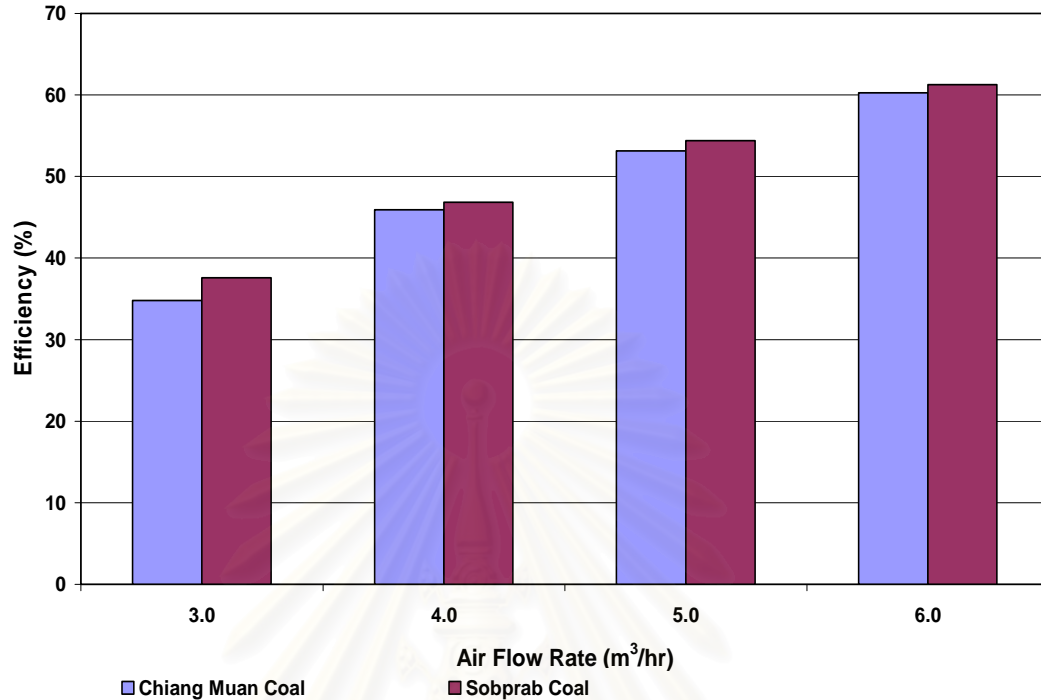
จากกราฟรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน พบว่าเมื่ออัตราการป้อนอากาศสูงขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนอากาศมากขึ้นปริมาณของออกซิเจนที่จะทำปฏิกิริยากับถ่านหินเพิ่มมากขึ้น โดยที่ถ่านหินสบปราบสามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ปริมาณมากกว่าถ่านหินเชียงม่วนเล็กน้อยเนื่องจากถ่านหินสบปราบมี

ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่า และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าถ่านหินเชียงม่วน จากผลการทดลองอัตราการป้อนอากาศที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงสุดคือ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

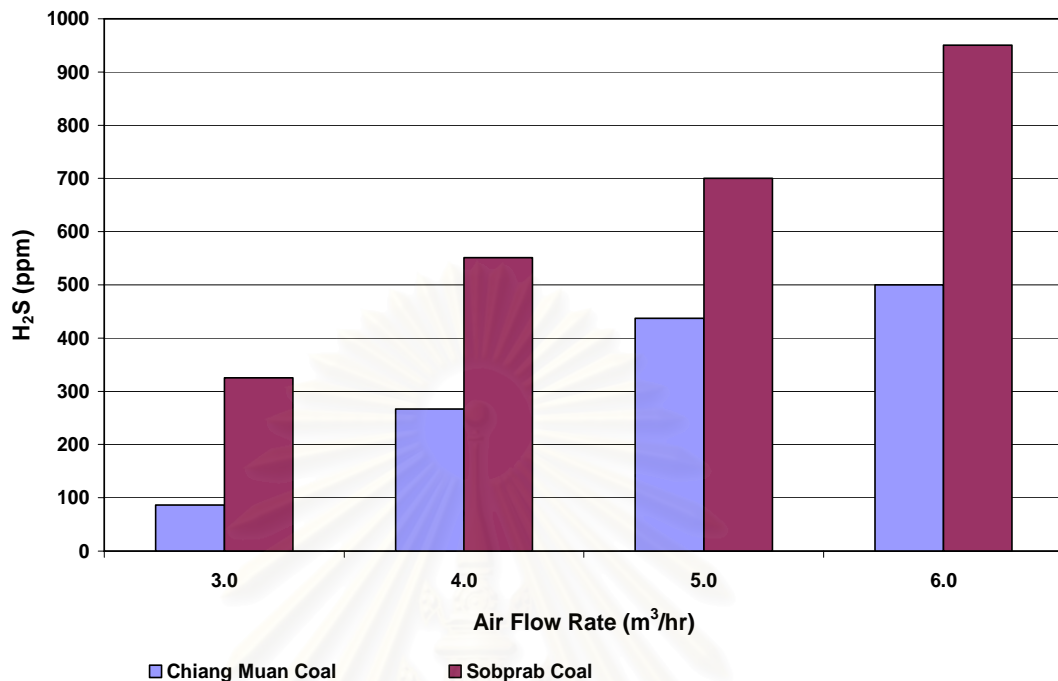
จากกราฟรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน พบว่าเมื่ออัตราการป้อนอากาศสูงขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนอากาศมากขึ้นปริมาณของออกซิเจนที่จะทำปฏิกิริยากับถ่านหินเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่ถ่านหินสบปราบสามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ปริมาณมากกว่าถ่านหินเชียงม่วนเล็กน้อยเนื่องจากถ่านหินสบปราบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่า และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าถ่านหินเชียงม่วน จากผลการทดลองอัตราการป้อนอากาศที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงสุดคือ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

จากกราฟรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพการกาซิฟิเคชันเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้น โดยที่ถ่านหินเชียงม่วนมีค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชันต่ำกว่าถ่านหินสบปราบ จากผลการทดลองอัตราการป้อนอากาศที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

จากกราฟรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆกัน โดยก๊าซ H_2S จะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนอากาศสูงขึ้น โดยที่ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสบปราบมีปริมาณ H_2S สูงกว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชิงม่วน เนื่องจากผลการวิเคราะห์ถ่านหินพบว่าถ่านหินสบปราบมีปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่าถ่านหินเชิงม่วน จากผลการทดลองอัตราการป้อนอากาศที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่า H_2S ต่ำที่สุดคือ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

อย่างไรก็ตามจากทฤษฎีพบว่าเมื่ออัตราการป้อนอากาศเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนมากเกินพอสมบัติต่างๆของก๊าซที่ผลิตได้จะมากาลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete Combustion) ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนซึ่งไม่มีค่าความร้อน

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้งสองแหล่งคือ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

4.2.3 ผลการวิจัยการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินโดยใช้ Oxygen rich air ที่สัดส่วนต่างๆ กัน

ผลการทดลองการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินโดยใช้ Oxygen Rich Air ที่สัดส่วนต่างๆ กัน คือที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ร้อยละ 40, 60 และ 100 อัตราการป้อน 3 m³/hr อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชิงปริมาณแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสรุปแสดงไว้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหมืองเชิงปริมาณ โดยใช้ Oxygen rich air ที่สัดส่วนต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

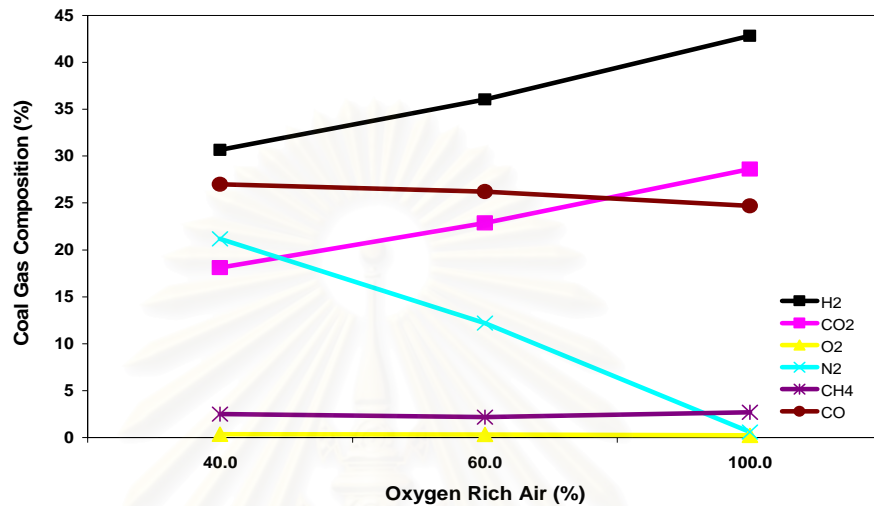
Analysis Item	Oxygen rich air (%)		
	40.0	60.0	100.0
Heating Value of Coal (MJ/kg)	16.78	16.78	16.78
Coal Feed (kg)	9.30	7.52	8.18
Coal Gas Produced (m ³)	11.34	9.35	10.08
Flow Rate (m ³ /hr)	3.00	3.00	3.00
Coal Gas Yield (m ³ /kg)	1.22	1.24	1.23
Temperature	950	950	950
Gas Density (kg/m ³)	1.063	1.076	1.082
H ₂ S (ppm)	115.00	270.00	325.00
Gas Composition			
H ₂	30.66	36.04	42.82
CO ₂	18.12	22.88	28.63
O ₂	0.35	0.31	0.23
N ₂	21.19	12.20	0.58
CH ₄	2.49	2.18	2.70
CO	26.99	26.20	24.70
Heating Value			
- Higher Heating Value (MJ/m ³)	8.49	8.76	9.13
- Lower Heating Value (MJ/m ³)	8.19	8.31	8.88
Efficiency	59.540	61.583	65.176

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากหม้อต้มปรอบ โดยใช้ Oxygen rich air ที่สัดส่วนต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส

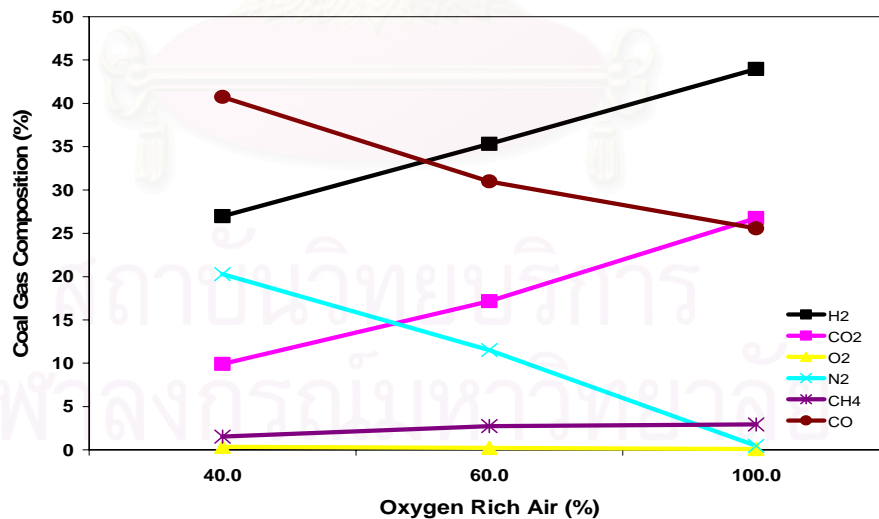
Analysis Item	Oxygen rich air (%)		
	40.0	60.0	100.0
Heating Value of Coal (MJ/kg)	16.96	16.96	16.96
Coal Feed (kg)	16.33	13.23	13.41
Coal Gas Produced (m ³)	19.12	16.07	16.33
Flow Rate (m ³ /hr)	3.00	3.00	3.00
Coal Gas Yield (m ³ /kg)	1.17	1.21	1.22
Temperature	950	950	950
Gas Density (kg/m ³)	1.085	1.067	1.073
H ₂ S (ppm)	175.00	315.25	625.75
Gas Composition			
H ₂	26.96	35.33	43.97
CO ₂	9.90	17.14	26.73
O ₂	0.37	0.22	0.09
N ₂	20.28	11.51	0.45
CH ₄	1.54	2.73	2.94
CO	40.73	30.99	25.57
Heating Value			
- Higher Heating Value (MJ/m ³)	8.93	9.16	9.78
- Lower Heating Value (MJ/m ³)	8.66	8.76	9.34
Efficiency	59.798	62.727	67.065

จากข้อมูลตารางที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.10 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน Oxygen Rich Air กับค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ถ่านหินเชิงม้วน) และ 4.14 (ถ่านหินสปรอบ) รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่ง รูปที่ 4.16 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency)

จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง และรูปที่ 4.18 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่ง

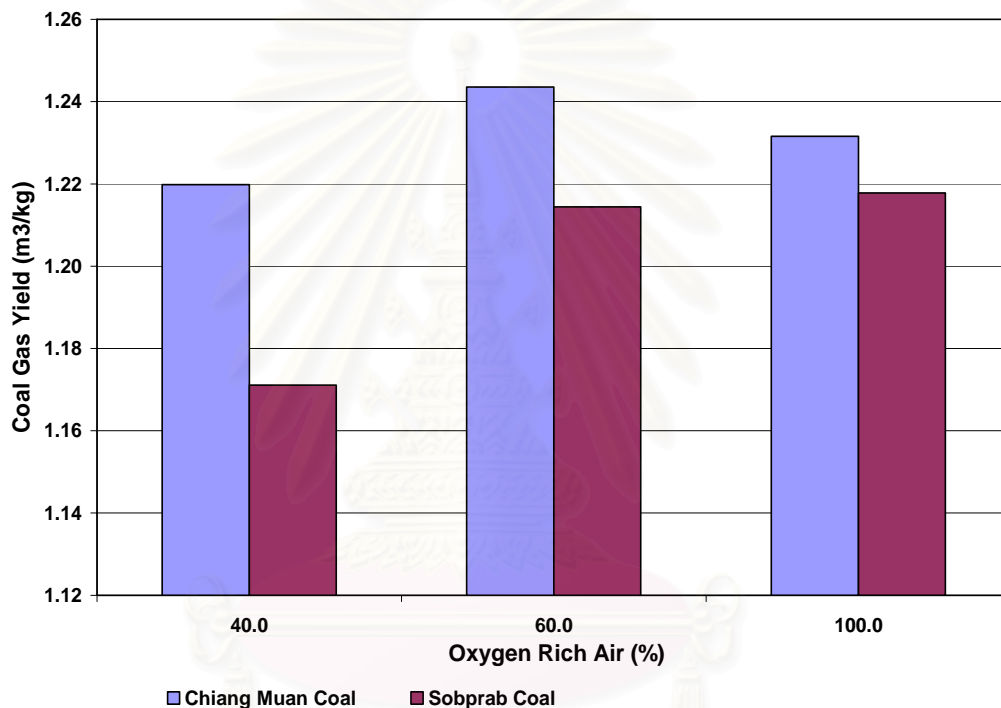


รูปที่ 4.13 ผลของสัดส่วน Oxygen Rich Air ที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



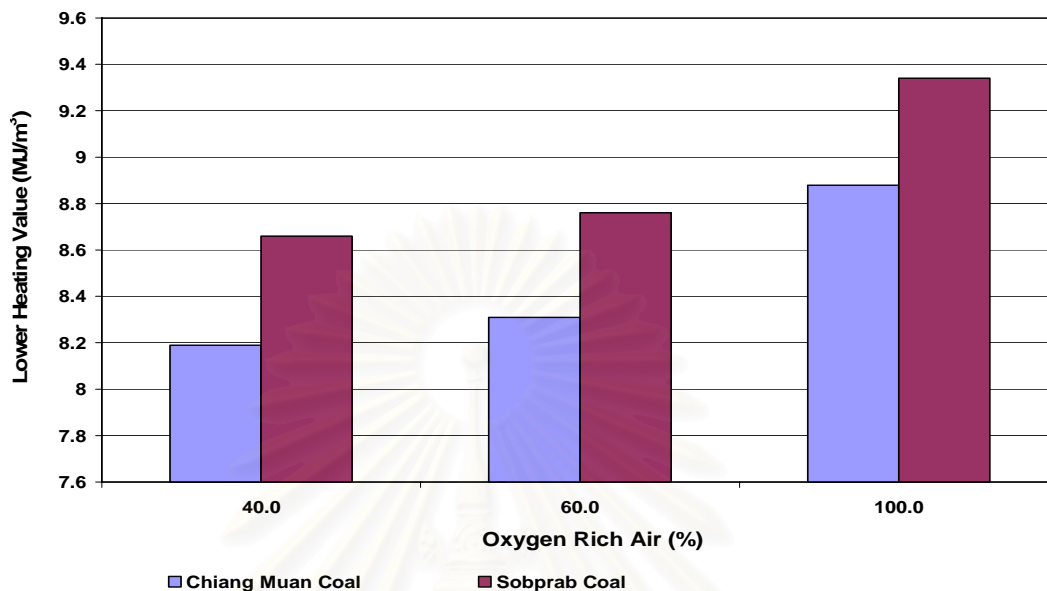
รูปที่ 4.14 ผลของสัดส่วน Oxygen Rich Air ที่มีต่อค่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองสบปราบ จังหวัดลำปาง อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.13 และ 4.14 เมื่อพิจารณาถึงผลต่อองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้พบว่าเมื่อสัดส่วนของ Oxygen Rich Air เพิ่มขึ้น สัดส่วนขององค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ในก๊าซผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซไฮโดรเจน มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อปริมาณของออกซิเจนในอากาศที่ใช้เป็นสารตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาในการกาซไฟและไม่มีค่าความร้อนในการเผาไหม้มีปริมาณลดลง ดังนั้นร้อยละ โดยปริมาตรของก๊าซที่เผาไหม้ได้ (Combustible Gas) จึงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

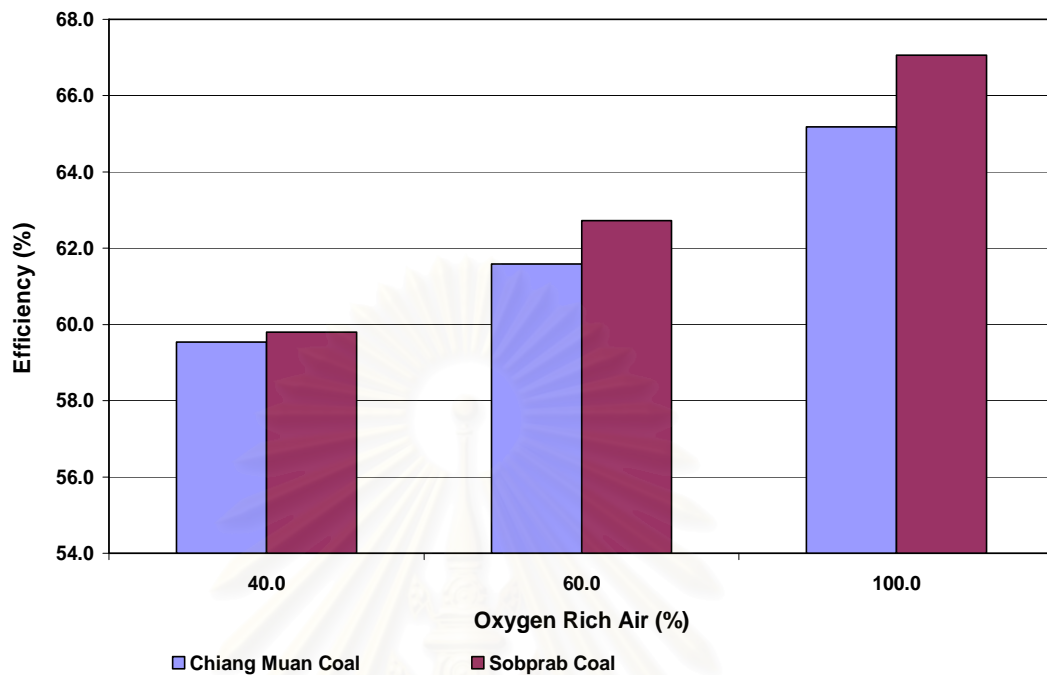
จากกราฟรูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (Coal Gas Yield) ของถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน พบว่าเมื่ออัตราส่วน Oxygen Rich Air เพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่ถ่านหินสบปราบสามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ปริมาณต่ำกว่าถ่านหินเชียงม่วนเล็กน้อย จากผลการทดลองเมื่อใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูงสุด



รูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

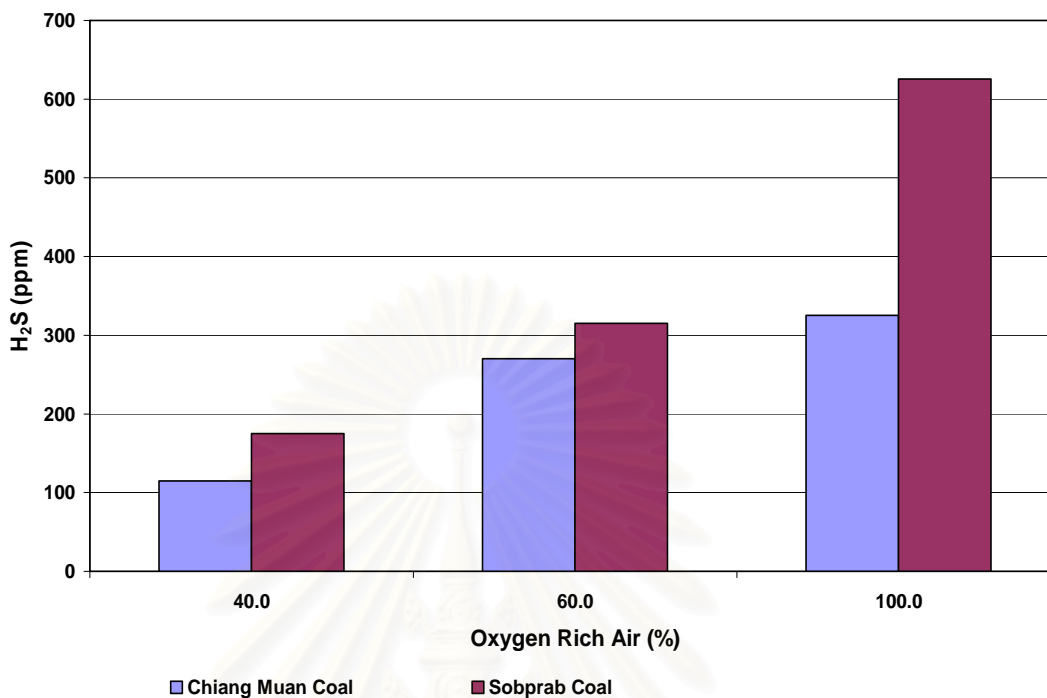
กราฟรูปที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความร้อน (Heating Value) ของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน พบว่าเมื่อสัดส่วนของออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้นก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับถ่านหินเพิ่มขึ้น และก๊าซผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจนซึ่งไม่มีค่าความร้อนลดลงด้วย จากผลการทดลองเมื่อใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความร้อนสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

กราฟรูปที่ 4.17 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชัน (Gasification Efficiency) จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน พบว่าเมื่อสัดส่วนของออกซิเจนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกาซิฟิเคชันถ่านหินเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยที่ถ่านหินเชียงม่วนมีค่าประสิทธิภาพในการกาซิฟิเคชันต่ำกว่าถ่านหินสบปราบ จากผลการทดลองเมื่อใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง การกาซิฟิเคชันจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด



รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน อุณหภูมิในการทดลอง 950 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากกราฟรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่สัดส่วน Oxygen Rich Air ต่างๆ กัน โดยก๊าซ H_2S จะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนอากาศสูงขึ้น โดยที่ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินสบปราบมีปริมาณ H_2S สูงกว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชิงม่วน เนื่องจากผลการวิเคราะห์ถ่านหินพบว่าถ่านหินสบปราบมีปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่าถ่านหินเชิงม่วน จากผลการทดลองสัดส่วน Oxygen Rich Air ที่สามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่า H_2S ต่ำที่สุดคือ สัดส่วน Oxygen Rich Air 40%

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสัดส่วน Oxygen Rich Air ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้งสองแหล่งคือ Oxygen Rich Air 100%

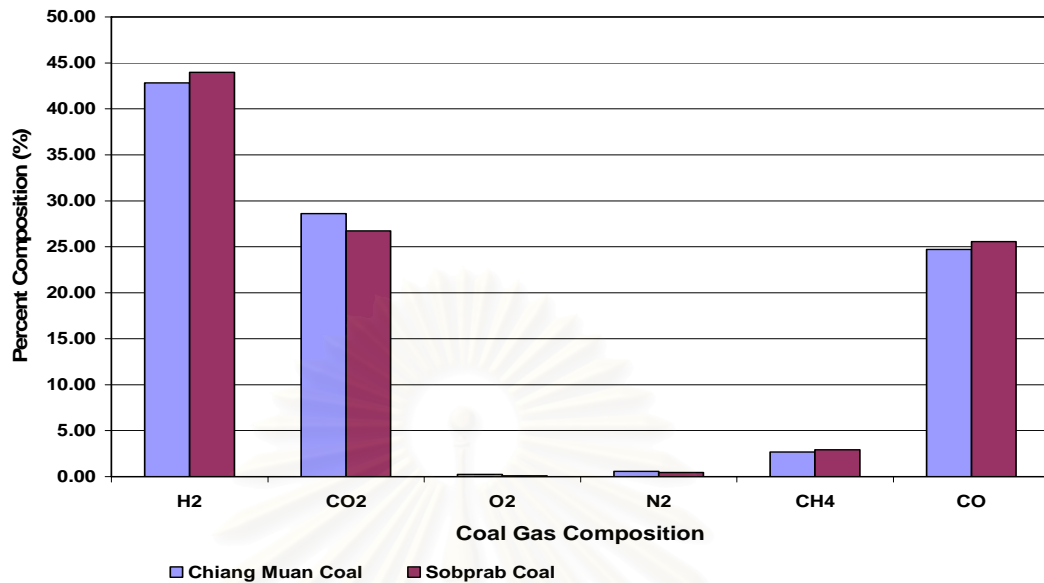
4.3 การเปรียบเทียบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้ง 2 แหล่งที่เหมาะสมที่สุด

การเปรียบเทียบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้ง 2 แหล่งเมื่อใช้ออกซิเจนและไอน้ำสารตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้ง 2 แหล่ง เมื่อใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์อัตราการป้อน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเป็นสารตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

Analysis Item	Coal Type	
	Chiang Muan	Sobprab
Heating Value of Coal (MJ/kg)	16.78	16.96
Coal Feed (kg)	8.18	13.41
Coal Gas Produced (m ³)	10.08	16.33
Coal Gas Yield (m ³ /kg)	1.23	1.22
Gas Density (kg/m ³)	1.082	1.073
H ₂ S (ppm)	325.00	625.75
Gas Composition		
H ₂	42.82	43.97
CO ₂	28.63	26.73
O ₂	0.23	0.09
N ₂	0.58	0.45
CH ₄	2.70	2.94
CO	24.70	25.57
Heating Value		
Higher Heating Value (MJ/m ³)	9.13	9.78
Lower Heating Value (MJ/m ³)	8.88	9.34
Efficiency	65.176	67.065

จากตารางที่ 4.11 สามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้ง 2 แหล่งดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้ง 2 แหล่ง

กราฟรูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้ง 2 แหล่ง พบว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินทั้งสองแหล่งมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านหินทั้งสองแหล่งซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหินจากทั้ง 2 แหล่งพบว่าก๊าซที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองสบปราบมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่าก๊าซที่ผลิตได้จากถ่านหินเหมืองเชียงม่วน เนื่องจากผลการวิเคราะห์ถ่านหินในหัวข้อ 4.1 พบว่าปริมาณของซัลเฟอร์ในถ่านหินสบปราบสูงกว่าถ่านหินเชียงม่วน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกาซิฟิเคชันถ่านหินลิกไนต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ แหล่งของถ่านหิน (เหมืองเชียงม่วนและเหมืองสบปราบ) อุณหภูมิ อัตราการป้อนก๊าซตัวกลาง และชนิดของก๊าซตัวกลาง (อากาศและ Oxygen Rich Air) ซึ่งมีผลต่อปริมาณของก๊าซองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพื่อเลือกภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซให้ได้ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงและค่าความร้อนที่สูง

5.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินโดยใช้อากาศเป็นก๊าซตัวกลางที่ความดันบรรยากาศ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิของการกาซิฟิเคชันเพิ่มขึ้น จะสามารถผลิตก๊าซที่มีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น คือที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ก๊าซผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนอยู่ร้อยละ 19.55 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 20.33 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 15.55 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 16.48 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) ซึ่งปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 22.11 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 23.96 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 16.18 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 16.58 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ดังนั้นก๊าซเชื้อเพลิงผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าความร้อนสูงขึ้น

สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากลิกไนต์สำหรับงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

5.2 การศึกษาผลของอัตราการป้อนอากาศในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่ความดันบรรยากาศ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราการป้อนอากาศสูงขึ้นสามารถผลิตก๊าซที่มีปริมาณร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น โดยที่อัตราการป้อนถ่านหิน 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงสามารถผลิตก๊าซที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 17.16 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 19.08 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) และปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอก-

ไซค์ร้อยละ 14.11 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 13.52 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) ซึ่งปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 22.11 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 23.96 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 16.18 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 16.58 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) เมื่อทำการทดลองที่อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นก๊าซเชื้อเพลิงผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าความร้อนสูงขึ้น

สรุปได้ว่าอัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินสำหรับงานวิจัยนี้ คือ อัตราการป้อนอากาศ 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

5.3 การศึกษาผลของสัดส่วนของ Oxygen Rich Air ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่ความดันบรรยากาศ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อสัดส่วนของ Oxygen Rich Air เพิ่มขึ้นปริมาณร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นแต่ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อมีปริมาณก๊าซออกซิเจนปริมาณมาก เมื่อเกิดปฏิกิริยา (2.1) แล้วจะเกิดปฏิกิริยา(2.2) ต่อทันทีทำให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบมากขึ้นและมีร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง โดยที่สัดส่วนของ Oxygen Rich Air 40% สามารถผลิตก๊าซที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 30.66 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 26.96 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) ซึ่งปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 42.82 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และร้อยละ 23.96 โดยปริมาตร (สำหรับถ่านหินสบปราบ) ที่สัดส่วน Oxygen Rich Air 100% ส่วนปริมาณร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจากร้อยละ 26.99 เป็นร้อยละ 24.70 (สำหรับถ่านหินเชียงม่วน) และลดลงจากร้อยละ 40.73 เป็นร้อยละ 25.56 (สำหรับถ่านหินสบปราบ) แต่ค่าความร้อนรวมของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ Oxygen Rich Air เพิ่มขึ้น

สรุปได้ว่าสัดส่วน Oxygen Rich Air ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินสำหรับงานวิจัยนี้ คือ สัดส่วน Oxygen Rich Air 100%

5.4 ภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินทั้งสองแหล่ง

จากข้อมูลตาราง สามารถหาภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงทั้งสองแหล่งเพื่อให้ค่าความร้อนสูงคือ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง ซึ่งให้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีสมบัติดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สมบัติของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากถ่านหินทั้งสองแหล่งที่ภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง

สมบัติของก๊าซ	ถ่านหินเชียงม่วน	ถ่านหินสบปราบ
ผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์ (m^3/kg)	1.23	1.22
ความหนาแน่นของก๊าซผลิตภัณฑ์ (g/m^3)	1.082	1.073
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (mg/m^3)	325.00	625.75
องค์ประกอบของก๊าซ		
ไฮโดรเจน	42.82	43.97
คาร์บอนมอนอกไซด์	24.70	25.57
มีเทน	2.70	2.94
คาร์บอนไดออกไซด์	28.63	26.73
ออกซิเจน	0.23	0.09
ไนโตรเจน	0.58	0.45
ก๊าซอื่นๆ	0.34	0.25
ค่าความร้อน (MJ/m^3)	8.80	9.34

จะเห็นว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินเชียงม่วนและถ่านหินสบปราบมีภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง จะมีสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิงใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากถ่านหินสบปราบมีค่าสูงกว่าถ่านหินเชียงม่วน

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการเกิดปฏิกิริยากาซิฟิเคชัน โดยใช้เทคโนโลยีแบบฟลูอิดไชด์เบด เพื่อลดปริมาณเถ้าที่ยังเหลือปริมาณคาร์บอนอยู่
2. ควรเพิ่มการศึกษาผลของอัตราการป้อนถ่านหินที่มีผลต่อสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิง

3. จากการทดลองจะเห็นว่าภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากใช้ Oxygen บริสุทธิ์และไอน้ำเป็นสารตัวกลาง แต่การใช้ Oxygen บริสุทธิ์และไอน้ำทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่า Yield ต่ำ เนื่องจากต้องควบคุมอัตราการไหลของสารตัวกลางเพื่อควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนั้นใน Commercial Scale จึงควรใช้อากาศ/ไอน้ำเป็นสารตัวกลาง เนื่องจากได้ค่า Yield สูงและค่าความร้อนที่ได้มีค่าสูงพอสมควร

5.6 เปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในการทดลองกับงานวิจัยอื่น

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองผลิตก๊าซจากถ่านหินเชิงม่วนและเหมืองสบปราบเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ภาวะที่ดีที่สุดจากการวิจัยอื่นๆ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ภาวะการทดลองที่ดีที่สุด

องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์	ก๊าซผลิตภัณฑ์จากเหมืองเชิงม่วน	ก๊าซผลิตภัณฑ์จากเหมืองสบปราบ	ก๊าซผลิตภัณฑ์จากการงานวิจัยของ อรรถพล ณรงค์ฤทธิชัย	ก๊าซผลิตภัณฑ์จากการงานวิจัยของ Foong และคณะ	ก๊าซผลิตภัณฑ์จากการงานวิจัยของ Yong Jeon Kim และคณะ
H ₂	42.82	43.97	8.98	13.5	15
CO	24.70	25.57	16.32	11.5	10
CH ₄	2.70	2.94	0.36	1.3.0	2
CO ₂	28.63	26.73	7.51	12.0	24
O ₂	0.23	0.09	-	-	-
N ₂	0.58	0.45	-	-	-
ค่าความร้อน (MJ/m ³)	8.80	9.34	3.35	3.23	4.51

เนื่องจากภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นสารตัวกลาง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้กับผลการทดลองอื่นๆ พบว่าค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่อนข้างมาก ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองอื่นๆ เมื่อทำการทดลองโดยใช้อากาศและไอน้ำเป็นสารตัวกลางเหมือนกัน

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ภาวะการทดลองการใช้อากาศและไอน้ำเป็นสารตัวกลาง

องค์ประกอบ ของก๊าซ ผลิตภัณฑ์	ก๊าซ ผลิตภัณฑ์ จากเหมือง เชียงม่วน	ก๊าซ ผลิตภัณฑ์ จากเหมือง สบปราบ	ก๊าซผลิตภัณฑ์จาก การงานวิจัยของ อรรถพล ณรงค์ฤทธิ์ชัย	ก๊าซผลิตภัณฑ์จาก การงานวิจัยของ Foong และคณะ	ก๊าซผลิตภัณฑ์จาก การงานวิจัยของ Yong Jeon Kim และคณะ
H₂	22.11	23.96	8.98	13.5	15
CO	16.18	16.26	16.32	11.5	10
CH₄	2.28	2.46	0.36	1.3.0	2
CO₂	16.04	16.26	7.51	12.0	24
O₂	0.63	0.57	-	-	-
N₂	42.85	42.08	-	-	-
ค่าความ ร้อน (MJ/m ³)	5.31	5.33	3.35	3.23	4.51

รายการอ้างอิง

1. กัญจนา บุญเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531
2. กัญจนา บุญเกียรติ, เชื้อเพลิงและการเผาไหม้, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
3. นาวิณ หมั่นเข็ม และมะลิ หุ่นสม. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินในฟลูอิดไดเซเบดแบบ 2
คอลัมน์ โครงการวิจัยปริญญาตรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
4. Von Fredersdorff, C.G. and Martin, A. Elliott in Coal Gasification, Chemistry of Coal Utilization. New York: John Wiley and Sons Inc, 1963
5. Parent, J.D. and Katz, S Inst. Gas Technology Research Bull No.2 (1948): 110.
6. May, W.G., Mueller, R.H. and Sweetser S.B. Hydrocarbon synthesis with 2 – stage coke gasification. Ind. Eng. Chem. 42 (1950): 1289 – 1296
7. Stull, D.R. and Prophet, H.Eds. JANAF Thermochemical Table. 2nd ed. Washington D.C.: Government Printing Office, 1971
8. Baron R.B., Porter, J.H. and Hammare. Jr, O.H. Chemical Equilibrium in Carbon – Hydrogen – Oxygen Systems. MIT. Press,1976.
9. บัณฑิต ปัดทวีคงคา. กระบวนการก๊าซฟายถ่านหินลิกไนต์ในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไดซ์
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2529.
10. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, การศึกษาความเหมาะสมการผลิต
ก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรกฎาคม 2539.
11. Haslam, R.T., Hitchcock, F.L. and Rudow, E.W. The Water – Gas Reactions. Ind. Eng. Chem. 15(1923) : 115 – 121.
12. Scott, G.S. Mechanism of the Steam – Carbon Reaction. Ind. Eng. Chem. 33(1941) : 1279 – 1284
13. Goring, G.E., Curran, G.P., Zielke, C.W. and Everett, Gorin. Kinetics of Farbon Gasification by Steam. Ind. Eng. Chem. 45(1953) : 2586 – 2591
14. Pilcher, J.M., Walker Jr, P.L. and Wright, C.C. Kinetic Study of the Steam – Carbon Reaction. Ind. Eng. Chem. 47(1955) : 1742

15. Ergun, S. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized. Chem. Eng. Progress. 49(1952): 89
16. Octave Levenspiel. Fluid – Particle, Chemical Reaction Engineering. 2nd ed. New York : Wiley, 1972.
17. Wen, C.Y. Noncatalytic Heterogeneous Solid – Fluid Reaction. Ind. Eng. Chem. 60(1968) : 34.
18. Jensen, G.A. The kinetics of Gasification of Carbon Contained in Coal Nucleals at Atmospheric Pressure. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. 14(1975): 308 – 314.
19. Bruce, E., Riede and Deran Hanesian. Kinetics Study of Carbon – Steam Reaction. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. 14(1975) : 70 – 74
20. Li Shufen and Xiao Xinyan. Gasification Reactivity of Three Chinese Coal Chars with Steam at Elevated Pressure. Fuel 72(1993) : 1351 – 1353.
21. P.K. Chatterjee, A.B. Datta and K.M. Kundu. Fluidized Bed Gasification of Coal. Can. J. Chem. Eng. 73(1995) : 204 – 210.
22. จิระศักดิ์ แสงพุ่ม. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ในฟลูอิดไดซ์เบด วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
23. วรเดช เพรศพรายวงศ์, การเผาถ่านลิกไนต์ในฟลูอิดไดซ์เบด วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
24. อรรถพล ณรงค์ฤทธิ์ชัย. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินเวียงแหงในฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
25. อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในเบดนิ่ง วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
26. Chinese National Commission for UNESCO. Clean Coal Engineering & Research Centre of Coal Industry. Clean Coal Technology of China, Beijing, China, 1999
27. James Lee Johnson, Kinetic of Coal Gasification, The Institute of Gas Technology: A Wiley – Interscience Publication, 1937 – 1977.
28. Ronald F. Probstein, and R. Edwin Hicks. Synthetic Fuels. New York : McGraw – Hill Inc, 1982.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน

1. การวิเคราะห์สมบัติถ่านหินแบบประมาณ

1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke), ASTM 3173

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิประมาณ 105 – 110 °C เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไปจากถ่านหิน ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของถ่านหินที่หายไป

เครื่องมือ ตู้อบ (Drying Oven), ถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด และ Desiccators

วิธีการทดลอง

- นำถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดใส่ในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นใน Desiccators ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

- ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในถาดอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน

- นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105 – 110 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างคงที่)

- นำถาดอะลูมิเนียมใส่ใน Desiccators ทิ้งให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดที่บรรจุตัวอย่างถ่านหินอบแล้วอยู่ภายใน บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = (W_1 - W_2) / W \times 100$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 = น้ำหนักของอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักถ่านหินเริ่มต้นก่อนการอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักถ่านหินที่อบ

W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน

1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal), ASTM D 3174

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 500 °C จนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้า คำนวณได้จากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังการเผา

เครื่องมือ เตาเผา (Muffle Furnace), Crucible แบบ Porcelain พร้อมฝา และ Desiccators

วิธีการทดลอง

- เเผา Crucible พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นใน Desiccators ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ใน Crucible ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาย่างรวดเร็ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
- นำตัวอย่างไปเผาบนตะเกียงเบนเซน จนควันระเหยหมดเพื่อไล่กำมะถัน
- นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 450 – 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เพิ่มอุณหภูมิเป็น 700 – 750 °C เเผาจนน้ำหนักคงที่
- นำ Crucible ออกจากเตาเผา ทำให้เย็นใน Desiccator
- ชั่งน้ำหนัก Crucible พร้อมฝา บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = (W_3 - W_4) / W \times 100$$

เมื่อ A = ร้อยละของปริมาณเถ้า

W_3 = น้ำหนักของ Crucible พร้อมฝาปิด และเถ้า (กรัม)

W_4 = น้ำหนักของ Crucible พร้อมฝาปิด (กรัม)

W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน (Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke), ASTM D 3175

หลักการ นำตัวอย่างถ่านหินที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่หายไป

เครื่องมือ เตาเผาแบบ Tubular Furnace, Nickle Crucible พร้อมฝา และ Desiccators

วิธีการทดลอง

- เเผาครุชเชิล Nickle พร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที
- นำออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นใน Desiccators จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชเชิล บันทึกผล

- ชั่งน้ำหนักถ่านหินประมาณ 1 กรัมใส่ครุชเชิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิท บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง

- นำครุชเชิล Nickle พร้อมตัวอย่างถ่านหินเผาใน Tubular Furnace โดยให้ความร้อนเป็นช่วงๆ เริ่มต้นให้ความร้อนแก่ถ่านหินที่อุณหภูมิ 300 °C, 600 °C นาน 3 นาที และที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 6 นาที

- นำครุชเชิลออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นใน Desiccators ชั่งน้ำหนักของครุชเชิลพร้อมฝาและถ่านหินที่เหลือ บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [(W_5 - W_6) / W \times 100] - M$$

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย

M = ร้อยละของความชื้น

W_5 = น้ำหนักของครุชเชิลพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักถ่านหินก่อนเผา (กรัม)

W_6 = น้ำหนักของครุชเชิลพร้อมฝาปิด รวมน้ำหนักถ่านหินหลังเผา (กรัม)

W = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านหิน (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = 100 - ร้อยละความชื้น - ร้อยละของเถ้า - ร้อยละของสาร

ระเหย

2. การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถัน, ASTM D 3177

2.1 ปริมาณกำมะถันรวม (Standard test method for total sulfur in the analysis sample coal and coke), ASTM D 3177

หลักการ เผาตัวอย่างถ่านหินที่ผสมกับ Eschka Mixture กำมะถันที่ประกอบอยู่ในถ่านหิน จะละลายอยู่ในรูปแบบของซัลเฟตไอออน ดังนั้นสามารถหาปริมาณกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินได้ ในรูปแบบเบริยมซัลเฟต (BaSO_4)

เครื่องมือ เตาเผา (Muffle Furnace), Porcelain Crucible

สารเคมี

- Eschka Mixture ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) กับ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก
- สารละลายเบริยมคลอไรด์ (100 กรัม/ลิตร) ละลายเบริยมคลอไรด์ ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 100 กรัมในน้ำและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
- สารละลายกรดเกลือ, HCl (1:9) ผสมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) 1 ส่วน และน้ำกลั่น 9 ส่วนโดยปริมาตร
- สารละลายกรดเกลือ, HCl (1:1) ผสมกรดเกลือเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19) และในอัตราส่วนเท่ากันโดยปริมาตร
- Methyl Orange Indicator โดยละลาย Methyl Orange 0.02 กรัมในน้ำร้อน 100 มิลลิกรัม และกรอง
- สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โดยใช้ผลึกของ ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 60 กรัมหรือ Anhydrous Na_2CO_3 22 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิเมตร

วิธีการทดลอง

- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม รวมกับ Eschka Mixture 3 กรัมในครุชีเบล ผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง แล้วปิดทับด้วย Eschka Mixture 1 กรัม
- นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 825°C ประมาณ 3 ชั่วโมง เผาจนกระทั่งสีดำของถ่านหมดไป
- นำครุชีเบลออกจากเตาเผา ย่อยสารในครุชีเบลด้วยน้ำร้อน 100 มิลลิลิตรและคนให้ทั่วถึง
- ค่อยๆ กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยน้ำร้อน หลายๆ ครั้ง จนสารละลายที่กรองได้มีปริมาณ 250 มิลลิลิตร
- ทำสารละลายที่กรองได้ให้กลางด้วยกรดเกลือ (1:1) โดยใช้เมธิลออเรนจ์ เป็นอินดิเคเตอร์ ทำสารละลายให้เป็นกรดเล็กน้อยด้วยกรดเกลือ (1:9) 1 มิลลิลิตร
- ต้มสารละลายที่กรองได้ให้เดือดและคนช้าๆ ค่อยๆ เติมสารละลายเบริยมคลอไรด์ลงไปช้าๆ 10 มิลลิลิตรด้วยปิเปต ต้มต่อไปเป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน

- กรองสารละลายแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ด้วยกระดาษกรอง Ashless เบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง จนน้ำล้างตะกอนปราศจากคลอไรด์ไอออน ซึ่งสามารถทดสอบโดยการเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3)

- นำตะกอนที่กรองได้พร้อมกระดาษกรอง ใส่ในครุชชีเบิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมตะกอน BaSO_4 คงที่ นำออกจากเตาเผาทำให้เย็นใน Desiccator ชั่งน้ำหนัก

- Blank Correction ทำการทดลองเหมือนข้างต้นทุกประการ แต่ไม่ใช้ตัวอย่างถ่านหินเท่านั้น เพื่อตรวจสอบสารเคมีที่ใช้มีปริมาณก่อกวนอยู่เล็กน้อยเพียงใด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของกำมะถันรวม} = 13.738 (A - B)/C$$

- เมื่อ
- A = น้ำหนักตะกอน BaSO_4 ที่ได้จากตัวอย่าง (กรัม)
 - B = น้ำหนักตะกอน BaSO_4 ที่ได้จาก Blank (กรัม)
 - C = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหินที่ใช้ (กรัม)

3. การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Gross Heating Value), ASTM D 2015

หลักการ การทำงานภายในเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ คือ ปรับอุณหภูมิของน้ำในถังให้เท่ากับเครื่องแช่บอมบ์ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและวัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับจากตัวอย่างที่ถูกเผาไหม้ แล้วนำมาคำนวณหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างถ่านหิน

เครื่องมือ Oxygen Bomb Calorimeter

สารเคมี

- ถ่านหิน 1 กรัม
- 0.072 นอร์มัลของ Na_2CO_3
- Methyl Orange
- ก๊าซออกซิเจน
- น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

- ชั่งถ่านหิน 1 กรัมลงในครุชชีเบิล
- ตัดลวด (Fuse Wire) ยาว 10 เซนติเมตร มาผูกปลายทั้งสองของหัวบอมบ์

- นำครุชชีเบลไปวางตำแหน่งบนหัวบอมบ์ จัดให้หลอดที่ผูกไว้และที่ผิวหน้าของถ่านหิน
 - เติมน้ำกลั่นลงในออกซิเจนบอมบ์ 1 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
 - ประกอบหัวบอมบ์กับออกซิเจนบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวให้แน่นแล้วนำไปอัดก๊าซออกซิเจน จนมรรควาความดัน 20 – 25 บรรยากาศ
 - เติมน้ำกลั่นลงในถังบอมบ์ 1 ลิตร โดยให้น้ำมีอุณหภูมิ 24 – 25 °C นำออกซิเจนบอมบ์ที่อัดก๊าซเรียบร้อยแล้ววางลงในถังบอมบ์เติมน้ำลงไปจนถึงอีก 1 ลิตร เสียบสายจุกระเบิด 2 เส้นต่อกับบอมบ์ ปิดฝาของเครื่อง
 - เปิดสวิตซ์ให้เครื่องกวนทำงานทุกๆนาทิจนที่บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำ เมื่อเครื่องเดินประมาณ 5 นาที กดปุ่มจุกระเบิด บันทึกค่าอุณหภูมิที่จุกระเบิดนี้ และอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นทุกนาทีจนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุดแล้วลดลงหรือคงที่ในที่สุด
 - ปิดสวิตซ์ของเครื่อง นำออกซิเจนบอมบ์ออกจากเครื่อง ปลดปล่อยก๊าซจากบอมบ์อย่างช้าๆ ให้หมด
 - ล้างหัวบอมบ์และออกซิเจนบอมบ์รวมทั้ง Crucible ด้วยน้ำกลั่นที่เติม Methyl Orange จนหมดกรด (น้ำที่ล้างไม่เป็นสีชมพู)
 - น้ำที่ล้างได้ไปไตเตรทกับ 0.072 นอร์มัล ของ Na_2CO_3 บันทึกจำนวนมิลลิลิตรของ Na_2CO_3 ที่ใช้ไป
 - วัดความยาวของหลอดที่เหลือจากการเผาไหม้
- สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$H = (tE - e_1 - e_2 - e_3) / g$$

- เมื่อ
- H = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ถ่านหิน (แคลอรีต่อกรัม)
 - t = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ค่าเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว (°C)
 - = $t_c - t_A$
 - t_c = อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เมื่อได้แก่ค่าเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว (°C)
 - t_A = อุณหภูมิเริ่มจุกระเบิดเมื่อได้แก่ค่าเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แล้ว (°C)
 - e_1 = การแก้ค่าความร้อนของกรดไนตริก
 - = จำนวนมิลลิลิตรของ 0.072 นอร์มัล Na_2CO_3 ที่ใช้ในการไตเตรท
 - e_2 = การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดซัลฟิวริก

$$\begin{aligned} &= 14 \times (\% \text{ กรดกำมะถัน}) \\ e3 &= \text{การแก้ค่าความร้อนของการเผาไหม้ลวด} \\ &= (2.3) \times (\text{ความยาวลวดที่ใช้ไป, เซนติเมตร}) \\ g &= \text{ตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)} \end{aligned}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณสมบัติถ่านหิน

การวิเคราะห์แบบประมาณ

ตัวอย่าง ถ่านหินเชียงม่วน ขนาดต่ำกว่า 250 ไมโครเมตร

การคำนวณปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านหิน

น้ำหนักถาดอะลูมิเนียมและฝาปิด	12.67	กรัม
น้ำหนักถาดอะลูมิเนียมและฝาปิดรวมตัวอย่างที่ใช้	13.68	กรัม
น้ำหนักถาดอะลูมิเนียมและฝาปิดรวมตัวอย่างหลังให้ความร้อน	13.47	กรัม
ร้อยละความชื้น	$= \{(13.68-12.67) / (13.47-12.67)\} / (13.62-12.67) \times 100$	
	$= 20.20$	

การคำนวณปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน

น้ำหนักครุชเชิลและฝาปิด	19.58	กรัม
น้ำหนักครุชเชิลและฝาปิดรวมน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้	20.58	กรัม
น้ำหนักครุชเชิลและฝาปิดรวมตัวอย่างหลังให้ความร้อน	20.16	กรัม
ร้อยละเถ้า	$= \{(20.58-19.58) / (20.43-19.58)\} / (20.53-19.58) \times 100$	
	$= 17.26$	

การคำนวณปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน

น้ำหนักครุชเชิลและฝาปิด	19.67	กรัม
น้ำหนักครุชเชิลและฝาปิดรวมน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้	20.67	กรัม
น้ำหนักครุชเชิลและฝาปิดรวมตัวอย่างหลังให้ความร้อน	20.28	กรัม
ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย	$= \{(20.67-19.67) / (20.28-19.67)\} / (20.28-19.67) \times 100$	
	$= 62$	

ร้อยละสารระเหย

$$= 62 - 20.2 = 41.8$$

การคำนวณสมบัติถ่านหินแบบไม่คิดความชื้น

$$\text{ปริมาณเถ้าในถ่านหิน} = 17.26 \times 100 / (100 - 20.20)$$

$$= 21.6$$

$$\text{ปริมาณสารระเหยในถ่านหิน} = 41.8 \times 100 / (100 - 20.20)$$

$$= 52.4$$

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านหิน} = 100 - 21.6 - 52.4 = 26.0$$

หมายเหตุ การคำนวณร้อยละความชื้น เถ้า สารระเหยในถ่านหิน คำนวณจากการทดลอง
หนึ่งครั้ง ส่วนการคำนวณสมบัติถ่านหิน คำนวณจากร้อยละความชื้น เถ้า และสารระเหยเฉลี่ยจาก
ผลการทดลอง 3 ครั้ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

วิธีคำนวณหาความหนาแน่นของถ่านหิน

ความหนาแน่นของถ่านหินคำนวณได้จากสูตร

$$\text{Density} = \frac{W_2 - W_1}{V}$$

W_1 = น้ำหนักกระบอกตวงเปล่า (กรัม)

W_2 = น้ำหนักกระบอกตวง + น้ำหนักถ่านหิน (กรัม) ณ ปริมาตร V มิลลิลิตร

V = ปริมาตรถ่านหินในกระบอกตวง (มิลลิลิตร)

ความหนาแน่นของถ่านหินจากแหล่งถ่านหินเชียงม่วน อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา

	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3
น้ำหนักกระบอกตวงเปล่า (กรัม)	117.45	117.47	117.41
น้ำหนักกระบอกตวง + น้ำหนักถ่านหิน (กรัม)	245.75	251.56	248.54
ปริมาตรถ่านหินในกระบอกตวง (มิลลิลิตร)	100.00	100.00	100.00
ผลความหนาแน่นของถ่านหิน	1.28	1.34	1.31

ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นถ่านหินเชียงม่วน = $(1.28 + 1.34 + 1.31) / 3$ กรัม / มิลลิลิตร

= 1.31 กรัม / มิลลิลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเฉลิมพล ใจหนัก เกิดวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2522 สถานที่เกิดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ เมื่อ พ.ศ. 2540 และจบการศึกษาระดับอุดมศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2544 และเข้าศึกษาต่อปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ ภาควิชาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2545

งานวิจัยนี้เคยนำเสนอในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วัสดุ และปิโตรเลียมครั้งที่ 7 “Mining Beyond Frontiers: Advanced Technology in Mining Material and Petroleum Engineering” วันที่ 1 – 3 ธันวาคม พ.ศ. 2547 ณ จังหวัดเชียงใหม่



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย