

แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินสำหรับเตาอุตสาหกรรม

นายนิส วงศ์ยานุวัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้ตั้งอยู่ที่ [http://www.cuir.chula.ac.th](#) บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย



The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.


THERMOCHEMICAL EQUILIBRIUM MODELING OF A COAL GASIFIER
FOR INDUSTRIAL FURNACES

Mr. Naris Vongtyanuvat


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2011
Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหิน สำหรับเตาอุตสาหกรรม
โดย	นายณริศ วงศ์ทยานุวัตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐเดช เพ็องจรวงศ์

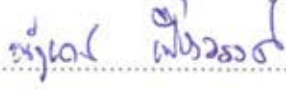
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐเดช เพ็องจรวงศ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

นริศ วงศ์ชานูวัตร : แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจาก
ถ่านหินสำหรับเตาอุตสาหกรรม (THERMOCHEMICAL EQUILIBRIUM MODELING
OF A COAL GASIFIER FOR INDUSTRIAL FURNACES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:
รศ. ดร. พงษ์ธร จริญญากรณ์ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ. ดร. ณัฐเดช เพ็ญจรวงศ์,
126 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจาก
ถ่านหินเพื่อใช้ในเตาอุตสาหกรรม โดยอาศัยหลักการของสมดุลเคมี และสมดุลความร้อนในการ
จำลององค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาให้
แทนด้วยสูตรทางเคมีในรูป $CH_\alpha O_\beta N_\gamma S_\delta$ ซึ่งจะทำการปฏิกิริยากับอากาศและไอน้ำ ได้แก๊สเชื้อเพลิง
ประกอบด้วยแก๊ส CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O , N_2 , SO_2 และ $C(s)$ แบบจำลองนี้จะช่วยในการวิเคราะห์
เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เงื่อนไขในการควบคุมการทำงาน และความคุ้มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์เมื่อ
มีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงมาเป็นแก๊สเชื้อเพลิง

ผลจากแบบจำลองสำหรับถ่านหินอินโดนิเซียที่ใช้ศึกษาพบว่า หลักของสมดุลทางความ
ร้อนเคมีสามารถอธิบายระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีโดยให้ค่า รากที่สองของค่าเฉลี่ย
ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง ที่ไม่เกิน 2.5 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณ
อากาศที่ทำให้คาร์บอนของแข็งในระบบหมดลงพอดี อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินที่เหมาะสมควร
อยู่ระหว่าง 2.6 ถึง 3.3 ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพทางความร้อนมากกว่าร้อยละ 70 และให้ค่าความร้อน
ของแก๊สเชื้อเพลิงระหว่าง 17.5 ถึง 20 เมกะจูลต่อกิโลกรัมถ่านหิน หากมีการใช้ถ่านหินชนิดนี้ใน
เตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงได้มูลค่า 20,957
ถึง 22,551 บาทต่อชั่วโมง (ราคาถ่านหินและราคาน้ำมันเตาเท่ากับ 3.56 บาทต่อกิโลกรัม และ 22.47
บาทต่อลิตรตามลำดับ) มีระยะเวลาคืนทุนไม่เกิน 13 เดือน

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา..... 2554.....

ลายมือชื่อนิสิต พรวดี วงศ์ชานูวัตร
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก พงษ์ธร
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ณัฐเดช เพ็ญจรวงศ์

5370265121: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: GASIFICATION/ COAL GASIFIER/ THERMOCHEMICAL EQUILIBRIUM MODEL

NARIS VONGTYANUVAT: THERMOCHEMICAL EQUILIBRIUM MODELING OF A COAL GASIFIER FOR INDUSTRIAL FURNACES. ADVISOR: ASSOC. PROF. PONGTORN CHARUNYAKORN, Ph.D., CO-ADVISER: ASST. PROF. NATTADATE FUANGWORAWONG, Ph.D., 126 pp.

This research studies mathematical modeling of coal gasification for industrial steel reheating furnace. This model employs the principle of thermochemical to predict the final composition and heating value of producer gas, reaction temperature, cold gas efficiency and second low efficiency. Coal represented as $CH_\alpha O_\beta N_\gamma S_\theta$ reacts with air and steam to produce gasification products containing CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O, N₂ and SO₂. The parameters of interest in this study are air to coal ratio, moisture content in coal, steam to coal ratio and coal composition. This model is a useful tool for analysis and design of coal gasifier including its control conditions.

In case of Indominco coal, the obtained results show that the principle of thermochemical well explain the gasification which RMSE is lower than 2.5. The maximum heating value is reached when solid carbon has been already converted. At air to coal ratio of 2.6 to 3.3, the coal gas efficiency is exhibited more than 70% and the heating value of producer gas is between 17.5 to 20 MJ/Kg coal. Therefore if producer gas is used in place of fuel oil for 50 ton/hr steel reheating furnace, saving of 20,957 to 22,551 baht/hr may be realized (for prices of coal and fuel oil are 3.56 Baht/kg and 22.47 Baht/liter respectively). The payback period is no more than 13 months.

Department : Mechanical Engineering
Field of Study : Mechanical Engineering
Academic Year : 2011

Student's Signature [Signature]
Advisor's Signature [Signature]
Co-advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จริญญากรณ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณิชูเดช เพ็ญวรวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและการดูแลเอาใจใส่ รวมถึงความกรุณาตรวจสอบรูปเล่ม เนื้อหา วิทยานิพนธ์ เพื่อให้เล่มวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์และมีข้อผิดพลาดที่น้อยที่สุด ขอขอบคุณที่อาจารย์พงษ์ธรช่วยกระตุ้นและถามไถ่ถึงความคืบหน้าของงานวิจัยในทุกๆอาทิตย์ สำหรับข้าพเจ้าแล้วมันเป็นสิ่งที่ทำให้ข้าพเจ้ามีจุดหมายในการทำงาน และทำให้งานวิจัยมีการก้าวหน้าในทุกๆอาทิตย์ ขอขอบคุณอาจารย์ณิชูเดช ที่นำโครงการวิจัยนี้มาเสนอ อาจารย์ณิชูเดชเคยกล่าวกับข้าพเจ้าว่า “ความคิดที่ปราศจากการกระทำคือฝันกลางวัน การกระทำที่ปราศจากความคิดคือฝันร้าย” คำพูดนี้ได้ทำให้ข้าพเจ้าผ่านอุปสรรคที่มีในระหว่างการทำงานวิจัย

นอกจากนี้ผู้ทำการวิจัยต้องขอขอบพระคุณต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตดิน แดงเที่ยง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ รวมถึงช่วยตรวจสอบรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดนี้ผู้ทำการวิจัยต้องขอขอบคุณ คุณนันท์วัฒน์ วีระชาติเทวัญ จากบริษัท อีกลิปสคอมบัสชั่น (ประเทศไทย) จำกัด และคุณพสุเชษฐ์ เครือนาค จากบริษัท ปูนขาวและแร่จำกัด ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลของหัวเผาแก๊สและเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่นำมาวิเคราะห์ตามหลักเศรษฐศาสตร์ ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุน คอยดูแลยามเจ็บป่วย คอยอยู่เคียงข้างเสมอมา ขอขอบคุณทุกคนในสถาบันวิจัยพลังงานที่คอยให้กำลังใจจนจบการศึกษา รวมถึงขอบพระคุณคณะวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนการศึกษาตลอดเวลา 2 ปีที่ผ่านมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ถ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ถ่านหินและกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	6
2.1 การกำเนิดถ่านหิน	6
2.1.1 รูปแบบในการกำเนิดถ่านหิน	6
2.1.2 องค์ประกอบต่างๆที่มีความเหมาะสมในการเกิดถ่านหิน.....	7
2.1.3 กระบวนการการเกิดถ่านหิน	8
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านหิน	9
2.2 ชนิดของถ่านหิน	10
2.3 การวิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติของถ่านหิน	11
2.3.1 การวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรม (Proximate analysis)	12

2.3.1.1	ค่าความชื้น (Moisture)	12
2.3.1.2	ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)	13
2.3.1.3	ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	13
2.3.1.4	ขี้เถ้า (Ash)	13
2.3.2	การวิเคราะห์เชิงธาตุ (Ultimate analysis)	14
2.3.2.1	ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน.....	14
2.3.2.2	ธาตุกำมะถันหรือซัลเฟอร์	15
2.3.2.3	ธาตุคลอรีน	16
2.3.2.4	ธาตุออกซิเจน	16
2.3.3	การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Calorific value analysis)	17
2.3.4	การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของถ่านหิน	18
2.4	ผลกระทบจากการใช้ประโยชน์จากถ่านหิน	19
2.5	ถ่านหินเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean coal technology)	21
2.5.1	เทคโนโลยีก่อนการเผาไหม้ถ่านหิน	21
2.5.1.1	การทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ (Physical cleaning)	21
2.5.1.2	การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี (Chemical cleaning)	22
2.5.1.3	การทำความสะอาดโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological cleaning)	22
2.5.2	เทคโนโลยีระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน.....	22
2.5.3	เทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ถ่านหิน	22
2.5.3.1	การกำจัดฝุ่นละออง.....	23
2.5.3.2	การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	23
2.5.3.3	การกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์	25

2.6	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันหรือกระบวนการผลิตแก๊ส (Gasification)	26
2.6.1	ปฏิกิริยาภายในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	27
2.6.1.1	ชั้นการอบแห้งของเชื้อเพลิง (Drying zone)	28
2.6.1.2	ชั้นการกลั่นสลายหรือไพโรไลซิส (Devolatilization or Pyrolysis zone)	28
2.6.1.3	ชั้นการเกิดการเผาไหม้ (Combustion or Oxidation zone)	28
2.6.1.4	ชั้นการรีดักชัน (Reduction or Gasification zone)	29
2.6.2	ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier type)	30
2.6.2.1	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเบดนิ่ง (Fixed bed gasifier)	30
2.6.2.1.1	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้น (Updraft gasifier)	30
2.6.2.1.2	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลง (Downdraft gasifier)	31
2.6.2.2	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิด ไคซ์เบด (Fluidized-bed gasifier).....	32
2.6.2.3	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเอ็นเทรน โฟล์ (Entrained flow gasifier)	34
บทที่ 3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
3.1	งานวิจัยทางการทดลอง.....	35
3.2	งานวิจัยทางด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	40
บทที่ 4	แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหิน	46
4.1	แบบจำลองทางสมดุลเคมีและความร้อน(Thermochemical equilibrium modeling)	47
4.1.1	สมมุติฐานของแบบจำลอง	47
4.1.2	การจัดรูปแบบจำลอง	48
4.1.3	สมดุลมวล.....	50

4.1.4 สมดุลพลังงาน	52
4.1.5 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน	54
4.1.6 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง	56
4.1.7 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สหรือ ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์	57
4.1.8 ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์	57
4.1.9 การปล่อยมลพิษ	59
4.1.10 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้เพื่อทดแทนน้ำมันเตา	60
4.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Calculation procedure)	60
4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	62
บทที่ 5 วิธีการใช้งานและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	63
5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลอง	64
5.1.1 ส่วนการป้อนค่าขาเข้าของแบบจำลอง	64
5.1.2 ส่วนแสดงค่าขาเข้าที่ป้อน.....	67
5.1.3 ส่วนของการดำเนินแบบจำลอง.....	67
5.1.4 ส่วนแสดงผลขาออกของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	68
5.1.5 ส่วนแสดงผลขาออกด้านเศรษฐศาสตร์.....	68
5.1.6 ส่วนของวิธีการใช้งาน.....	68
5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	69
5.2.1 เตาผลิตแก๊สแบบเอ็นเทนรอน โพล์.....	69
5.2.2 เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิด ไคซ์เบด.....	71
5.2.3 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลลง.....	72
5.2.4 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลขึ้น	74

บทที่ 6 ผลการจำลองกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของถ่านหินและการวิจารณ์ผล	76
6.1 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ.....	77
6.2 แก๊สเชื้อเพลิงต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ.....	78
6.2.1 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	78
6.2.2 แก๊สไฮโดรเจน (H ₂)	79
6.2.3 แก๊สมีเทน (CH ₄)	80
6.3 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ.....	81
6.4 ค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	82
6.5 ค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ ...	83
6.6 เงื่อนไขการดำเนินการสำหรับถ่านหินที่นำมาศึกษา.....	85
6.7 การวิเคราะห์ตามหลักเศรษฐศาสตร์.....	85
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
7.1 สรุปผลงานวิจัย	91
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก. การตรวจสอบความถูกต้องและขอบเขตการจำลอง(เพิ่มเติม)	98
ภาคผนวก ข. ผลของค่าเอกซ์เซอียต์ต่ออัตราส่วนอากาศและไอน้ำ.....	103
ภาคผนวก ค. การคำนวณค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิง.....	108
ภาคผนวก ง. ผลจากแบบจำลองของกระบวนการแก๊สเชื้อเพลิงของถ่านหินอินโดมินโด.....	114
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	126
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	127

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การใช้ถ่านหินของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2552	2
1.2 การนำเข้าถ่านหินของไทยในปี พ.ศ. 2553	2
3.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนและแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จาก เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลขึ้นและอากาศไหลลง	39
3.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองของ Anil Khadse กับผลการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านมา (เชื้อเพลิง Subabul wood)	40
3.3 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองของ Andre’s Melgar กับแบบจำลอง และผลการทดลองของ Jayah TH เชื้อเพลิง Rubber wood ความชื้น 14.7%.....	44
4.1 ปฏิบัติการภายในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	47
4.2 ค่าเอกซ์เซอจีทางเคมีที่สภาวะมาตรฐาน (Standard chemical exergy) ของแก๊สแต่ละชนิด ($T^0=298.15K$ และ $P^0=101.325$ kPa)	58
5.1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองที่คิดการเปลี่ยนแปลง คาร์บอนทั่วไปและหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ภายในเตาผลิตแก๊สแบบเอ็นเทรน โฟล์	70
5.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิด ไคซ์เบด....	72
5.3 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง	73
5.4 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น.....	74
6.1 การวิเคราะห์เชิงธาตุและอุตสาหกรรมของถ่านหินอิน โดมิน โค	76
ก.1 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลอง ของถ่านหิน Highvale ภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิด ไคซ์เบด	100
ก.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองของถ่านหินชนิดต่างๆ ภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น.....	101

ตารางที่	หน้า
ค.1 ค่าใช้จ่าย ผลตอบแทน ผลตอบแทนสุทธิ และมูลค่าปัจจุบัน ของผลตอบแทนสุทธิ เมื่อใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ ให้ค่าความร้อนเท่ากับ 17.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัมถ่านหิน (หน่วย: บาท)	112
ง.1 การวิเคราะห์เชิงธาตุและอุตสาหกรรมของถ่านหินอินโดมินโด.....	114
ง.2 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0 (SC = 0)	115
ง.3 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.1 (SC = 0.1)	116
ง.4 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.2 (SC = 0.2)	117
ง.5 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.3 (SC = 0.3)	118
ง.6 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.4 (SC = 0.4)	119
ง.7 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.5 (SC = 0.5)	120
ง.8 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.6 (SC = 0.6)	121
ง.9 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.7 (SC = 0.7)	122
ง.10 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.8 (SC = 0.8)	123
ง.11 ค่าขายออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น จากถ่านหินอินโดมินโด ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.9 (SC = 0.9)	124

ตารางที่

หน้า

ง.12 ค่าขาออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้น	
จากถ่านหินอินโดมิโนโค ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 1 (SC = 1)	125

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของถ่านหิน	10
2.2 ชนิดของถ่านหิน.....	11
2.3 เครื่องคัดฝุ่นด้วยไฟฟ้า.....	24
2.4 เครื่องแยกฝุ่นแบบลมหมุน	24
2.5 เครื่องกรองฝุ่นแบบถุง.....	25
2.6 เครื่องกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (FGD)	25
2.7 กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอย่างง่าย.....	26
2.8 เครื่องปฏิกรณ์ Selective catalytic reduction (SCR)	27
2.9 ปฏิกริยาต่างๆภายในกระบวนการแยกแก๊สเชื้อเพลิง.....	27
2.10 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้น	30
2.11 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลง.....	32
2.12 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิด ไคซ์เบด.....	33
2.13 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเอ็นเทอร์นโพล์.....	34
3.1 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่เวลาต่างๆเมื่อมีการฉีดและไม่ฉีดไอน้ำ	36
3.2 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินต่อ ก) LHV ข) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส.....	37
3.3 ผลของอุณหภูมิอากาศที่เข้าเตาต่อ ก) LHV ข) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส	37
3.4 เปอร์เซ็นต์การแปลงของคาร์บอนต่ออัตราส่วน O/C ของถ่านหินชนิดต่างๆ	38
3.5 เปอร์เซ็นต์การแปลงของคาร์บอนต่อขนาดของถ่านหิน	39
3.6 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนกับ	
ก) อุณหภูมิภายในเตา ข) อัตราส่วน $O_2/Coal$	41
3.7 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่อ	
ก) อัตราส่วนออกซิเจนต่อถ่านหิน ข) อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน	43

ภาพที่	หน้า
3.8 ค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส	
ต่ออัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (F_{fu}) และความชื้นในเชื้อเพลิง (h)	44
4.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ของถ่านหิน	54
4.2 การเผาไหม้สมบูรณ์ของแก๊สเชื้อเพลิง.....	56
4.3 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลอง	61
5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลอง	
ก) ส่วนการป้อนค่าขาเข้าของแบบจำลอง ข) ส่วนแสดงค่าขาเข้าที่ป้อน	
ค) ส่วนของการดำเนินแบบจำลอง ง) ส่วนแสดงผลขาออกของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	
จ) ส่วนแสดงผลขาออกด้านเศรษฐศาสตร์ ฉ) ส่วนของวิธีการใช้งาน	63
5.2 หน้าต่างการป้อนค่าในส่วนของคุณสมบัติของถ่านหิน.....	64
5.3 หน้าต่างการเลือกชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	65
5.4 หน้าต่างการเลือกชนิดของค่าความร้อนที่ใช้ในแบบจำลอง	65
5.5 หน้าต่างการป้อนค่าในส่วน เงื่อนไขในการดำเนินการ	66
5.6 หน้าต่างการเลือกชนิดของปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการผลิตแก๊ส	66
5.7 หน้าต่างการป้อนค่าด้านเศรษฐศาสตร์	66
5.8 หน้าต่างการป้อนค่าคงที่ต่างๆภายในแบบจำลอง	67
5.9 เปอร์เซ็นต์การแปลงคาร์บอนจากแบบจำลองกับผลการทดลอง	
ในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบดในตารางที่ 5.2.....	71
5.10 ผลของค่า RMSE ต่อความชื้นของเชื้อเพลิง.....	73
6.1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน	
ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 : 0.5 : 4.5)	
และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0 : 0.2 : 1)	77

ภาพที่	หน้า
6.2 เปอร์เซ็นต์โดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	
ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 : 0.5 : 6)	
และอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0 : 0.2 : 1)	78
6.3 เปอร์เซ็นต์โดยโมลของแก๊สไฮโดรเจน (H ₂)	
ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน(AC, 2 : 0.5 : 6)	
และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0 : 0.2 : 1)	79
6.4 เปอร์เซ็นต์โดยโมลของแก๊สมีเทน (CH ₄)	
ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 : 0.5 : 6)	
และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0 : 0.2 : 1)	80
6.5 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/kg _{coal})	
ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 : 0.5 : 6)	
และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0 : 0.2 : 1)	81
6.6 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (%)	
ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 : 0.5 : 6)	
และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0 : 0.2 : 1)	82
6.7 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส	
ก) อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน	
ข) อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน	
ค) อุณหภูมิอากาศขาเข้า (K)	83
6.8 ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ (%)	
ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 : 0.5 : 6)	
และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0 : 0.2 : 1)	84

ภาพที่	หน้า
6.9 เปรอร์เซ็นต์ค่าใช้จ่ายในการเตรียมถ่านหินเทียบกับค่าใช้จ่าย ในส่วนของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง [26]	87
6.10 เปรอร์เซ็นต์ค่าใช้จ่ายของระบบบำบัดแก๊ส SO ₂ เทียบกับค่าใช้จ่าย ในส่วนของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง [26]	87
6.11 ระยะเวลาคืนทุนของการเปลี่ยนระบบจากน้ำมันเตาเป็นแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง ตามเงื่อนไขในการดำเนินการและชั่วโมงการทำงาน	89
6.12 ระยะเวลาคืนทุนของการเปลี่ยนระบบจากน้ำมันเตาเป็นแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง ตามความแตกต่าง ของราคาของเชื้อเพลิงถ่านหินกับน้ำมันเตาและชั่วโมงการทำงาน	90
ก.1 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจริงของถ่านหินกับค่าที่ได้จากการคำนวณ จากสมการของ S.A. Channiwala และ P.P. Parikh	98
ก.2 ผลจากแบบการทดลองและแบบจำลองของถ่านหินบิทูมินัส Illinois No.6 [28] ภายในเตาเอ็นเทรนโพล์	99
ข.1 เอกซ์เซอียของแก๊สผลิตภัณฑ์ ถ่านหิน และสารตัวกลาง (อากาศและไอน้ำ) ก) อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน ข) อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน	103
ข.2 ค่าเอกซ์เซอียของแก๊สผลิตภัณฑ์ตามอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน ก) เอกซ์เซอียทางเคมี ข) เอกซ์เซอียทางกายภาพ	106
ข.3 ค่าเอกซ์เซอียของแก๊สผลิตภัณฑ์ตามอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน ก) เอกซ์เซอียทางเคมี ข) เอกซ์เซอียทางกายภาพ	107
ค.1 ราคาของถ่านหินในช่วงหนึ่งปีที่ผ่านมา.....	113
ค.2 ราคาของน้ำมันเตาในช่วงหนึ่งปีที่ผ่านมา	113

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A/F	อัตราส่วนโดยมวลของอากาศต่อถ่านหิน	-
a	โมลของอากาศที่ใช้ในการแก๊สซิฟิเคชั่น	mol
a _{th}	โมลของอากาศจากการเผาไหม้ตามทฤษฎี	mol
b	โมลของ CO ต่อโมลของถ่านหิน	mol
C	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของคาร์บอน	%
c	โมลของ CO ₂ ต่อ โมลของถ่านหิน	mol
d	โมลของ H ₂ ต่อโมลของถ่านหิน	mol
E	ค่าเอกซ์เซอจี (Exergy)	kJ
Exp	ผลที่ได้จากการทดลอง	-
e	โมลของ CH ₄ ต่อ โมลของถ่านหิน	mol
f	โมลของ H ₂ O ต่อ โมลของถ่านหิน	mol
ΔG_T^0	พลังงานอิสระกิบส์	kJ
g	โมลของ N ₂ ต่อโมลของถ่านหิน	mol
HHV	ค่าความร้อนสูง	kJ/kg _{coal}
H	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของไฮโดรเจน	%
h	โมลของ SO ₂ ต่อโมลของถ่านหิน	mol
\bar{h}	เอนทัลปีโดยโมล	kJ/kmol
\bar{h}_f^0	เอนทัลปีของการเปลี่ยนแปลง	kJ/kmol
i	โมลของ C ต่อโมลของถ่านหิน	mol
K	ค่าคงที่สมดุล	-
LHV	ค่าความร้อนต่ำ	kJ/kg _{coal}
MC	ปริมาณความชื้นในถ่านหิน	%
MW	มวลโมเลกุล	g/mol

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
N	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของไนโตรเจน	%
N_{tot}	โมลรวมของสารผลิตภัณฑ์	mol
NPV	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	Baht
O	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของออกซิเจน	%
PV	มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทน	Baht
PWF	ตัวประกอบมูลค่าเงินปัจจุบัน	-
Q	ค่าพลังงานความร้อน	kJ
RMSE	รากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง	-
R_u	ค่าคงที่ของแก๊ส	$\frac{(\text{m}^3)(\text{Pa})}{(\text{K})(\text{mol})}$
ref	สภาวะมาตรฐาน	-
S	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของซัลเฟอร์	%
\bar{S}	เอนโทรปีโดยโมล	kJ/kmol
SC	อัตราส่วนโดยมวลไอน้ำต่อถ่านหิน	-
T	อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	K
w	โมลไอน้ำที่ใช้ในการแก๊สซิฟิเคชัน	mol
X	อัตราส่วนโดยโมล	-
η	ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์	%
η_{II}	ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์	%
α	อะตอมของไฮโดรเจนในสูตรเคมี	-
β	อะตอมของออกซิเจนในสูตรเคมี	-
γ	อะตอมของไนโตรเจนในสูตรเคมี	-
θ	อะตอมของซัลเฟอร์ในสูตรเคมี	-
ϕ	อัตราส่วนสมมูล	-
$\bar{\epsilon}$	ค่า Specific exergy	kJ/kmol

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญเติบโตในระบบอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศในจำนวนมากขึ้นทุกปีเพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานภายในประเทศ รวมถึงโลกของเราเองก็มีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากเช่นกัน การใช้ประโยชน์จากพลังงานที่มีอยู่จึงเป็นสิ่งสำคัญ เชื้อเพลิงหลายชนิดก็มีปริมาณลดน้อยลงเรื่อยๆ เนื่องจากความต้องการของประชากรโลกมีปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานในอันดับแรกๆ ที่เริ่มใช้กัน และถ่านหินในโลกของเรานั้นมีปริมาณสำรองมากที่สุด เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ทำให้การใช้ประโยชน์จากถ่านหินของคนเราจะอยู่คู่โลกของเราไปอีกนาน ประเทศที่เป็นผู้นำด้านเศรษฐกิจอุตสาหกรรมอย่างเช่นประเทศ สหรัฐอเมริกา จีน หรือญี่ปุ่น ก็ได้มีการผลิตและสำรวจวิจัยอย่างต่อเนื่อง ในประเทศไทยของเรานั้นมีปริมาณสำรองของถ่านหินอยู่ปริมาณมากและถ่านหินส่วนใหญ่่นั้นเป็นถ่านหินที่คุณภาพต่ำตั้งแต่ลิกไนต์ (Lignite) จนถึงซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous)

ประเทศไทยนั้นมีการใช้พลังงานจากถ่านหินในหลายๆด้านด้วยกัน หลักๆแล้วจะใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้ารวมถึงอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นต้น ข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน ปรากฏว่าในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยได้มีการนำถ่านหินมาใช้ในประเทศทั้งสิ้นถึง 34.2 ล้านตัน เป็นถ่านหินในประเทศจำนวน 17.8 ล้านตัน และถ่านหินนำเข้า 16.4 ล้านตัน ถ่านหินที่ผลิตภายในประเทศส่วนใหญ่เอามาใช้ในการผลิตไฟฟ้า และถ่านหินนำเข้าจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูง ข้อมูลการใช้ถ่านหินในประเทศไทยแสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1.1 การใช้ถ่านหินของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2552

	ปริมาณการใช้งาน (ล้านตัน)		สัดส่วน (%)	
	กระแสไฟฟ้า	ภาคอุตสาหกรรม	กระแสไฟฟ้า	ภาคอุตสาหกรรม
ถ่านหินลิกไนต์	15.8	2.0	88.8	11.2
ถ่านหินนำเข้า	5.7	10.7	34.8	65.2
ถ่านหินทั้งหมด	21.5	12.7	62.9	37.1

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

ถ่านหินสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆด้านด้วยกัน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ถลุงโลหะ ใช้ในการทำเป็นสารดูดกลิ่น ใช้ทำคาร์บอนไฟเบอร์ รวมถึงการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในระบบอุตสาหกรรมต่าง ในด้านราคาของถ่านหิน ถ่านหินมีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งมีราคาเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีความเสถียรเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีปริมาณสำรองมากที่สุดในโลก ถ่านหินที่ค้นพบในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถ่านหินประเภทลิกไนต์และซับบิทูมินัสซึ่งมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ในประเทศไทยแหล่งถ่านหินส่วนใหญ่จะอยู่ทางภาคเหนือและภาคใต้ แหล่งถ่านหินที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทยคือ เข้มองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ถ่านหินเกือบทั้งหมดจะถูกนำไปใช้เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากถ่านหินที่ผลิตได้ส่วนใหญ่เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนต่ำดังนั้นประเทศไทยจึงต้องมีการนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศ ข้อมูลจากกรมศุลกากรพบว่า ในปี 2553 ประเทศไทยได้มีการนำเข้าถ่านหินประมาณ 16.7 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 36,375 ล้านบาท ถ่านหินที่ประเทศไทยนำเข้ามามากที่สุด คือ ถ่านหินชนิดซับ-บิทูมินัสประมาณ 9.7 ล้านตัน ตลาดนำเข้าหลักอยู่ที่ประเทศอินโดนีเซียคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 88 ในขณะที่การส่งออกถ่านหินของไทยอยู่ที่ 21,360 ตัน หรือมีมูลค่าแค่ 59 ล้านบาท

ตารางที่ 1.2 การนำเข้าถ่านหินของไทยในปี พ.ศ. 2553

ประเภทของถ่านหิน	ตลาดหลัก	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
แอนทราไซต์	อินโดนีเซีย 57.1%, เวียดนาม 40.8%	367,817	1,550
บิทูมินัส	อินโดนีเซีย 96.1%	2,026,430	5,730
ซับบิทูมินัส	อินโดนีเซีย 88.0%	9,700,718	19,286
ลิกไนต์	อเมริกา 67.8%	79	1

ที่มา: กรมศุลกากร

ในอนาคตข้างหน้าคาดว่า การใช้ถ่านหินจะมีปริมาณมากขึ้นเนื่องจากว่าราคาของเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการขยายตัวทางอุตสาหกรรมในประเทศไทย ข้อมูลของสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) พบว่าในไตรมาสที่ 1/2554 การนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.2 การนำเข้าถ่านหินไปใช้ในระบบอุตสาหกรรม ถ่านหินจะถูกนำมาแปรสภาพเป็นแก๊สเพื่อความสะดวกในการใช้งาน สามารถทำได้โดยการนำถ่านหินผ่านกระบวนการผลิตแก๊สหรือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็งไปเป็นแก๊ส แก๊สเชื้อเพลิง (Producer gas) ที่ว่านี้ประกอบไปด้วยมีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน (H_2) แก๊สเชื้อเพลิงเหล่านี้มีความสะดวกต่อการใช้งาน เช่น ใช้สำหรับการเดินกังหันแก๊ส (Gas turbine) การใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในการเผาไหม้โดยตรง แม้ว่าถ่านหินจะมีภาพลักษณ์ที่เสียหายในสายตาหรือความคิดของคนทั่วไป ตัวอย่างเช่น การเกิดปรากฏการณ์ฝนกรดที่บริเวณใกล้เคียงกับเหมืองแม่เมาะ ที่จังหวัดลำปาง เมื่อปี พ.ศ. 2535 อาจเนื่องมาจากเทคโนโลยีในสมัยนั้นยังไม่ทันสมัยและการลงทุนติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ ควบคุมมลภาวะอาจยังไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ประกอบกับแหล่งถ่านหินในประเทศเป็นถ่านหินที่คุณภาพไม่ดีนัก จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้การนำเข้าถ่านหินมาใช้ในระบบอุตสาหกรรมจะถูกต่อต้าน ส่งผลให้ประเทศไทยขาดโอกาสในการใช้เชื้อเพลิงที่มีมูลค่าที่ถูกลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในเตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) ที่กำลังผลิตเหล็ก 50 ตันต่อชั่วโมง รวมถึงวิเคราะห์ความคุ้มค่าและความเหมาะสมในการใช้ถ่านหินมาทดแทนน้ำมันเตาในระบบดั้งเดิม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างโปรแกรมคำนวณสมดุลทางความร้อนและเคมีในระบบกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินเพื่อทำนายหาส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ค่าความร้อน ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนกับเหล็กและความคุ้มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้สำหรับเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง

2. ศึกษาหาขอบเขตการใช้งานของแบบจำลอง และความสามารถของแบบจำลองในการทำนายองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆภายใต้สภาวะที่กำหนด

3. ศึกษาผลของอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน และอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน ที่ป้อนให้กับเตาผลิตแก๊ส ต่อค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส และองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

4. วิเคราะห์ความคุ้มค่าในการใช้เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงรวมถึงเงื่อนไขในการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อใช้สำหรับเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษา ประมวลข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงถ่านหิน ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และ กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง
2. สร้างแบบจำลองในการคำนวณสมดุลความร้อนและเคมี สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง เพื่อทดแทนการใช้น้ำเตา
3. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการทดลองและผลจากแบบจำลองจากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา
4. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง รวมถึงผลของค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สกับอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน และอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินที่ป้อนให้กับเตาผลิตแก๊ส
5. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อมีการเปลี่ยนมาใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหินมาทดแทนน้ำมันเตาที่ใช้ในเตาเผาเหล็ก
6. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย
7. จัดทำรายงานผลการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองสามารถทำนายหาค่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ค่าประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ภายใต้สภาวะหรือเงื่อนไขที่กำหนดได้

2. แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปวิเคราะห์เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับใช้กับเตาเผาเหล็กในระบบอุตสาหกรรมเหล็ก

3. แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประเมินถึงความคุ้มค่าในการเปลี่ยนระบบจากการใช้น้ำมันเตามาเป็นการใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหิน

บทที่ 2

ถ่านหินและกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ถ่านหินคือหินตะกอน (Sedimentary rock) ชนิดหนึ่ง สามารถติดไฟได้ เกิดจากซากพืชตามธรรมชาติเกิดการทับถมกัน เป็นเวลาหลายร้อยล้านปี ภายในถ่านหินมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สารประกอบของคาร์บอนซึ่งมีปริมาณมากที่สุด และสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งสามารถระเหิดเมื่อติดไฟ เรียกอีกอย่างได้ว่า สารระเหย (Volatile matter) ถ่านหินประกอบด้วยธาตุหลัก 4 ธาตุด้วยกันคือ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) นอกจากนี้ยังประกอบด้วย ซัลเฟอร์ (S) และ คลอรีน (Cl) อีกเล็กน้อย

2.1 การกำเนิดถ่านหิน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าถ่านหินเป็นตะกอนชนิดหนึ่ง สามารถติดไฟได้ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สารประกอบของคาร์บอน มีอยู่ประมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักหรือร้อยละ 70 โดยปริมาตร ถ่านหินมีกำเนิดมาจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของพืชพันธุ์ไม้ต่างๆ ที่สลายตัวและสะสมอยู่ในลุ่มน้ำหรือแอ่งน้ำต่างๆ นับเป็นเวลาหลายร้อยล้านปี เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของ ผิวโลกเช่น เกิดแผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด หรือมีการทับถมของตะกอนมากขึ้น ทำให้แหล่งสะสมตัวนั้นได้รับความกดดันและความร้อนที่มีอยู่ภายในโลกเพิ่มขึ้น ซากพืชเหล่านั้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่านหินชนิดต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วยหัวข้อถัดไป

2.1.1 รูปแบบในการกำเนิดถ่าน

สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกรณีด้วยกันดังนี้

1. เป็นการสะสมตัวของซากพืชที่เคยเจริญเติบโตอยู่ในบริเวณนั้น อาจจะเป็นตามลุ่มน้ำหรือแอ่งน้ำตื้นๆ เมื่อมีการร่วงโรยตายลงก็จะสะสมตัวกันอยู่ภายในแอ่งน้ำแห่งนั้นกลายเป็นชั้นถ่านหินที่เรียกว่าแหล่งการสะสมตัวอยู่กับที่ (Autochthonous coal deposit) ถ่านหินที่เกิดขึ้นจากการสะสมตัวแบบนี้ มักพบว่าชั้นดินเหนียววางตัวอยู่ใต้ชั้นถ่านหิน โดยจะมีชั้นถ่านหินสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้างแม้ว่าจะมีชั้นหินดินดานแทรกสลับอยู่บ้างก็ตาม และไม่ค่อยมีสารอินทรีย์ปะปนในชั้นถ่านหิน เนื้อถ่านหินจะคงรูปซากพืชไว้อย่างเห็นได้ชัด

โดยเฉพาะในถ่านหินคุณภาพต่ำ (Low rank coal) และคุณภาพของเนื้อถ่านหินมักไม่คงที่ตลอด ชั้นถ่านหินส่วนที่อยู่ส่วนล่างจะมีลักษณะอ่อนและยุ่ย ส่วนกลางๆ จะเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีมีลักษณะเป็นมันวาว แต่ส่วนตอนบนจะมีคุณภาพของ ถ่านหินต่ำลงอีก ทั่วไปแล้วชั้นถ่านหินที่เกิดอยู่กับที่แบบนี้จะมีชั้นหินดินดานปิดอยู่ข้างบน แหล่งถ่านหินแบบนี้สามารถพบได้ทั่วไป โดยเฉพาะแหล่งขนาดใหญ่และสำคัญๆ ของโลก ที่อยู่ก่อนไปทางขั้วโลกเหนือเป็นแหล่งที่มีการกำเนิดแบบนี้ทั้งสิ้น

2. เป็นการสะสมตัวของซากพืชที่เคยเจริญเติบโตในที่อื่น เมื่อมีการร่วงโรยตายลงและถูกน้ำพัดพาไปพร้อมกับตะกอนอื่นๆ เมื่อถูกพัดพามาอยู่ในบริเวณที่เหมาะสมก็จะตกตะกอนสะสมทับถมกันเป็นชั้นถ่านหินที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดเดิม เรียกว่าแหล่งการสะสมตัวจากพืชที่เกิดที่อื่น (Allochthonous coal deposit) แหล่งถ่านหินแบบนี้ไม่ค่อยมีอยู่ทั่วไป แต่จะมีอยู่ในบางประเทศโดยเฉพาะในบริเวณขั้วโลกด้านใต้ แหล่งถ่านหินแบบนี้มีอาณาบริเวณไม่ค่อยกว้างขวางและความหนาของชั้นถ่านหินไม่แน่นอน เนื่องจากบางส่วนของซากพืชที่ถูกน้ำพัดพาไปจากแหล่งเดิม ชั้นถ่านหินจะมี สารอื่นๆปะปนอยู่มาก โดยเฉพาะสารที่เกิดจากพวกโคลนตม ทำให้มีปริมาณขี้เถ้า (Ash content) มากกว่าแบบแรก ส่วนชั้นหินที่วางอยู่บนชั้นของถ่านหินขึ้นอยู่กับชั้นหินต้นกำเนิดที่ถูกทำลายให้ผุกร่อนและพัดพาไปตามสายน้ำ ทั่วไปแล้วมักจะเกิดเป็นชั้นหินทรายและหินดินดาน ในกรณีที่เกิดได้ชั้นหินทรายจะทำให้ถ่านหินที่ได้ไม่มีคุณสมบัติในการระเหยของสารระเหยหรือการแปรสภาพเป็นถ่านโค้กได้ เพราะแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะมีการไล่ตลอดผ่านทางช่องว่างของหินทรายได้ ส่วนในกรณีของชั้นถ่านหินที่มีหินดินดานปิดทับอยู่ข้างบนนั้น แก๊สที่เกิดในระหว่างกระบวนการสลายตัวของซากพืชจะไม่สามารถผ่านออกไปได้ ถ่านหินที่ได้จึงมีสารระเหยและทำถ่านโค้กได้

2.1.2 องค์ประกอบต่างๆที่มีความเหมาะสมในการเกิดถ่านหิน

การกำเนิดของถ่านหินจะขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆมากมายดังนี้

- ด้านสภาพอากาศ ต้องมีสภาพอากาศที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช และพันธุ์ไม้ต่างๆ ซึ่งมีทั้งพืชใบเลี้ยงคู่ เช่นพืชในตระกูลเฟิร์น และพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เป็นต้น

- พื้นที่ที่มีการทับถมกันนั้น ต้องเป็นบริเวณที่ไม่มีน้ำไหลเข้าออก หรือต้องเป็นบริเวณน้ำนิ่ง และเป็นบริเวณที่มีแก๊สออกซิเจนจำกัด เพื่อไม่ให้เกิดการเน่าสลายของซากพืชก่อนที่จะกลายเป็นถ่านหิน บริเวณที่เหมาะสมในการเกิดถ่านหินนั้นมี 6 บริเวณ คือ

- (1) บริเวณที่ลุ่มชายฝั่ง (Coastal marsh)
- (2) บริเวณดินดอนสามเหลี่ยม (Delta)
- (3) บริเวณทะเลสาบและปากอ่าว (Lagoon and bay)
- (4) บริเวณที่ราบเชิงเขา (Piedmont plain)
- (5) บริเวณที่ราบตะกอนน้ำพา (Alluvial plain)
- (6) บริเวณแอ่งในหุบเขา (Intramontane basin)

- ระดับความลึกของซากพืชที่สะสมอยู่ในแอ่ง ถ้าอยู่ในระดับลึกมากๆ จะทำให้จุลินทรีย์มาทำการย่อยสลายน้อยลง เพราะจุลินทรีย์ไม่สามารถทนต่อความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามระดับความลึกภายในโลกได้ หรือถ้าอยู่ในระดับตื้นเกินไปหรือโผล่ขึ้นมาออกซิเจนอาจทำให้ซากพืชเน่าเปื่อยได้

- การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่เหมาะสมและมีความต่อเนื่อง

- การเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดความกดดันและความร้อนที่เหมาะสมอันจะทำให้ซากพืชแปรสภาพเป็นถ่านหินได้

2.1.3 กระบวนการการเกิดถ่านหิน

กระบวนการการเกิดถ่านหิน สามารถแบ่งได้เป็น กระบวนการแปรเปลี่ยนทางชีวภาพ และ กระบวนการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กระบวนการแปรเปลี่ยนทางชีวภาพ (Biochemical reaction) หรือเรียกกระบวนการก่อตัวใหม่เป็นกระบวนการที่มีจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง ส่งผลให้ซากพืชรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันโดยอยู่ในรูปของสารที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ในที่สุดซากพืชที่ตกตะกอนสะสมกันอยู่นั้นจะกลายเป็นพีท (Peat) กระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพของ

สิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญกล่าวคือ หากซากพืชอยู่ใต้น้ำที่ลึกเกินไปหรือแอ่งที่ลาดชัน จุลินทรีย์จะไม่สามารถทำหน้าที่ย่อยสลายได้ แต่ถ้าหากอยู่ในน้ำที่ตื้นจนเกินไป ออกซิเจนในอากาศจะทำให้ซากพืชเกิดการเน่าเปื่อยได้

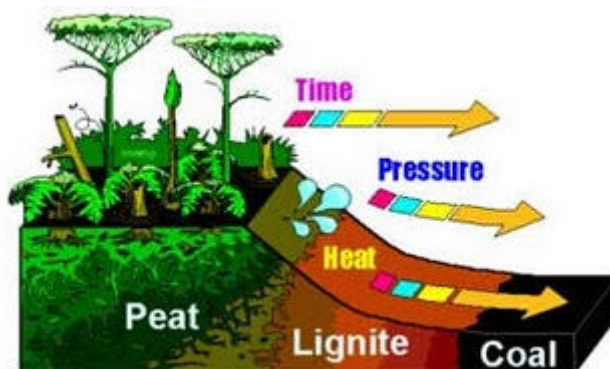
2. กระบวนการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน (Thermal alteration) เมื่อกระบวนการแปรเปลี่ยนทางชีวภาพสิ้นสุดเนื่องจากชั้นพีทถูกปิดทับด้วยตะกอนอื่นๆและจมลงไปเรื่อยๆ ส่งผลให้มีความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้การแปรเปลี่ยนทางชีวภาพต้องหยุดชะงักกลายเป็นการแปรเปลี่ยนทางความร้อนแทน พีทจะมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่านหิน อุณหภูมิถือเป็นตัวสำคัญทั่วไปแล้วความแตกต่างของอุณหภูมิจะมีค่าประมาณ 10-30 องศาเซลเซียสต่อความลึก 1,000 เมตร ความร้อนที่เกิดจากแมกมาใต้ผิวโลกจะเป็นต้นกำเนิดของความร้อน เร่งให้มีการแปรเปลี่ยนสภาพทางความร้อนกลายเป็นถ่านหิน (Coalification) ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านหิน

คุณสมบัติและคุณภาพต่างๆของถ่านหิน ขึ้นกับปัจจัยหลายชนิดดังนี้

1. ชนิดของพืชที่ทับถมกัน
2. การเน่าเปื่อยที่เกิดขึ้นจากการถูกฝังกลบ
3. ปริมาณสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อน
4. สภาพแวดล้อมในขั้นตอนการเกิด เช่น อุณหภูมิและความดัน

จากรูปที่ 2.1 การแปรเปลี่ยนสภาพของซากพืชเป็นถ่านหินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมาย หากซากพืชที่ทับถมกันเป็นเวลานาน อุณหภูมิและความดันในการเกิดถ่านหินมีค่าสูง ถ่านหินที่ได้ก็จะมีคุณภาพดี



รูปที่ 2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านหิน

2.2 ชนิดของถ่านหิน

ถ่านหินสามารถแบ่งได้ 5 ชนิดตามอายุของถ่านหิน ความสมบูรณ์ในการเปลี่ยนสภาพจากซากพืชไปเป็นถ่านหิน และปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน ดังนี้

1. ถ่านพีท (Peat) พีทถือได้ว่าเป็นถ่านหินที่มีอายุน้อยที่สุด สภาพของถ่านพีทอาจมีสภาพเดิมของซากพืชหรือเนื้อไม้อยู่ด้วย เป็นถ่านที่มีคุณภาพต่ำที่สุด
2. ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) ถ่านมีสีน้ำตาลเข้ม มีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 30-70 มีปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) ประมาณร้อยละ 35 เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำในประเทศไทยถ่านหินชนิดนี้สามารถพบได้ที่แม่เมาะจังหวัดลำปาง หรือที่จังหวัดกระบี่ นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้า รวมทั้งในระบบอุตสาหกรรมซีเมนต์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในบ้านเรือน
3. ถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) ถ่านหินชนิดนี้มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำ มีอายุมากกว่าถ่านหินลิกไนต์ ทำให้มีความแข็งมากกว่า มีค่าความร้อนที่สูงกว่า มีความชื้นประมาณร้อยละ 15-30 ปริมาณคาร์บอนคงที่ร้อยละ 70-77 ส่วนมากจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบอุตสาหกรรม เช่น ใช้กับหม้อไอน้ำ หรือนำไปผลิตไฟฟ้า
4. ถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินที่มีเนื้อแน่น มีอายุและค่าความร้อนสูงมากกว่าถ่านหินข้างต้น มีลักษณะเป็นถ่านหินสีดำสนิทเป็นชั้นๆ และมีลักษณะวาว มีปริมาณคาร์บอนคงที่อยู่ที่ประมาณร้อยละ 80-90 มีความชื้นที่ต่ำมากประมาณร้อยละ 2-7 รวมถึงมีสารระเหยสูง ถ่านหินชนิดนี้เหมาะสำหรับนำไปผลิตถ่านโค้กเพื่อใช้ในการถลุงโลหะ หรือแยกเอาแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อนำไปทดแทนเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

5. ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่มีความแข็งมาก อายุมากที่สุด มีสีดำเป็นเงา มีความวาวสูง มีความชื้นที่ต่ำ และมีค่าความร้อนที่สูงมาก ติดไฟยากแลชะมีควันน้อย ปริมาณสารระเหยต่ำ มีปริมาณคาร์บอนคงที่ประมาณร้อยละ 90 ขึ้นไป เหมาะสำหรับการนำไปใช้ให้ความร้อนในบ้าน หรืออุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.2 ชนิดของถ่านหิน ก) ถ่านพีท ข) ถ่านหินลิกไนต์ ค) ถ่านหินซับบิทูมินัส
ง) ถ่านหินบิทูมินัส จ) ถ่านหินแอนทราไซต์

2.3 การวิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติของถ่านหิน

ถ่านหินแต่ละชนิด แต่ละแหล่งที่มา ก็จะมีคุณสมบัติและคุณภาพแตกต่างกันทั้งทางด้านเคมีและด้านกายภาพ การจะบ่งบอกว่าถ่านหินเป็นถ่านหินชนิดหรือประเภทใดจำเป็นจะต้องมีการวิเคราะห์ถ่านหิน การวิเคราะห์ถ่านหินจะช่วยในการจัดลำดับชั้นของถ่านหิน การศึกษาด้านการกำหนดของถ่านหิน รวมถึงตัดสินใจในการเลือกใช้ถ่านหินว่ามีความเหมาะสมคุ้มค่าต่อการใช้งานนั้นๆเพียงใด ตัวอย่างเช่น ถ่านหินลิกไนต์จะเหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ถ่านหินที่มีคุณภาพสูงกว่าเช่น บิทูมินัสนั้นเหมาะสมที่จะใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็กหรืออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นต้น มาตรฐานในการวิเคราะห์ถ่านหินในปัจจุบันมีอยู่หลายมาตรฐานด้วยกันขึ้นอยู่กับประเทศใดเป็นประเทศที่คิดค้น อาทิเช่น ASTM, Australian Standard,

JIS Standard และ DIN Standard เป็นต้น การวิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติของถ่านหินแบ่งออกได้ดังนี้

2.3.1 การวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรม (*Proximate analysis*)

เป็นการวิเคราะห์แบบง่าย ๆ เพื่อหาค่าปริมาณความชื้น สารระเหย ค่าคาร์บอนคงตัว และค่าจี้เถ้า ที่มีอยู่ในถ่านหิน

2.3.1.1 ค่าความชื้น (*Moisture*)

ความชื้นในถ่านหินจะส่งผลให้การเผาไหม้ของถ่านหินมีความยากยิ่งขึ้น กล่าวได้ว่าถ่านหินที่มีความชื้นสูงจะมีค่าความร้อนต่ำ ส่วนถ่านหินที่มีความชื้นต่ำจะมีค่าความร้อนสูง ความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น

ความชื้นที่ผิวหน้าถ่านหิน (*Surface Moisture, Free Moisture, Extraneous Water*) คือ ความชื้นที่อยู่บนผิวหน้าของถ่านหิน เกิดจากการพ่นน้ำ เพื่อป้องกันการลุกไหม้ด้วยตนเอง (*Spontaneous Combustion*) หรือน้ำจากน้ำฝนและน้ำใต้ดิน ความชื้นที่บริเวณผิวของถ่านหินสามารถระเหยออกได้โดย การผึ่งถ่านหิน ไว้ในบรรยากาศจนน้ำหนักคงที่ แสดงว่าความชื้นของถ่านหินสมดุลกับความชื้นของบรรยากาศแล้ว เรียกว่า *Air Drying*

ความชื้นภายในเนื้อถ่านหิน (*Inherent Moisture*) คือ ความชื้นที่อยู่ภายในรูเล็กๆ (*Micropores*) ภายในโครงสร้างของถ่านหิน

ความชื้นที่เกิดจากการระเหยของสารพวกแร่ธาตุในถ่านหิน (*Mineral Matter; Water of Hydration*) เป็นความชื้นที่อยู่ภายในรูพรุนของถ่านหินที่สามารถระเหยออกมาได้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของสารพวกอนินทรีย์ของแร่ธาตุในถ่านหินเช่น ส่วนประกอบของดินเหนียวและหินดินดาน ซึ่งความชื้นชนิดนี้จะต้องใช้ความร้อนที่สูง

ความชื้นที่เกิดจากการสลายตัว (*Decomposition Moisture*) คือ ความชื้นที่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารอินทรีย์ (*Organic Matter*) เช่น *Hydroxyl Unit (-OH group)* ที่จะระเหยเมื่อถูกความร้อนประมาณ 200 – 250 °C ความชื้นที่เกิดจากการสลายตัว เป็นส่วนหนึ่งของสารระเหยและจะวิเคราะห์แยกต่างหากจากการวิเคราะห์ หาปริมาณความชื้นอื่น ๆ

การวิเคราะห์หาความชื้นของถ่านหินสามารถหาได้จากการคำนวณหาปริมาณของถ่านหินที่หายไป หลังจากการอบถ่านหินหรือ การกลั่น (Distillation Method) นำถ่านหินผสมกับพวกสารอินทรีย์ชนิดน้ำ เช่น ไซลีน (Xylene) หรือ โทลูอิน (Toluene) แล้วกลั่นหาปริมาณของน้ำที่ได้รับ การหาค่าความชื้นโดยรวม (Total Moisture) สามารถคำนวณได้จากผลรวมของปริมาณของความชื้นที่ผิวหน้าและความชื้นภายในถ่านหิน โดยไม่คำนึงถึงความชื้นที่เกิดจากการระเหยของสารพวกอินทรีย์วัตถุ และความชื้นที่เกิดจากการสลายตัวของถ่านหิน

$$\text{ความชื้นโดยรวม} = \text{ความชื้นที่ผิวหน้า} + \text{ความชื้นภายในถ่านหิน}$$

2.3.1.2. ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)

สารระเหยเป็นตัวกลางที่ทำให้ถ่านหินเกิดการติดไฟก่อนที่จะเผาไหม้คาร์บอนที่อยู่ในถ่านหิน ถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะทำให้ติดไฟง่าย และลุกไหม้อย่างรวดเร็ว แต่ถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยต่ำจะเกิดการติดไฟยากและลุกไหม้อย่างช้าๆ สามารถหาได้จากน้ำหนักของถ่านหินที่สูญเสียไปหลังจากหักค่าความชื้นของถ่านหินออกไปแล้วทำโดยการอบถ่านหินที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส สารระเหยที่นี้อาจประกอบด้วยมีเทน (CH_4), ไฮโดรเจน (H_2), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น ค่าสารระเหยนี้ใช้ในการแยกประเภทของถ่านหิน การเลือกถ่านหิน และการเลือกชนิดของหัวเผาให้เหมาะสม

2.3.1.3. ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous Residue) ที่ไม่รวม หลังจากที่สารระเหยระเหยออกไปแล้ว ค่านี้เป็นค่าที่ใช้ในการวัดปริมาณสารที่สามารถเผาไหม้ได้ (Solid Combustible Material) และเป็นค่าที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้อีกด้วย

$$\text{ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)} = 100 - \text{ปริมาณความชื้น} - \text{สารระเหย} - \text{ขี้เถ้า}$$

2.3.1.4. ขี้เถ้า (Ash)

คือสารประกอบของโลหะพวกโซเดียม (Na) วานาเดียม (Va) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) เหล็ก (Fe) และซิลิคอน (Si) เป็นเกลืออนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาไหม้ (Non

Combustible Residue) ซึ่งได้นี้ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพวก แร่ธาตุและสารอินทรีย์ แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

- Extraneous หรือ Adventitious Mineral Matter จะประกอบด้วยสารพวกดินเหนียว (Clay), หินดินดาน (Shale), แคลไซต์ (Calcite), ไพไรต์ (Pyrite), มาร์คาไซต์ (Marcasite) หรือส่วนประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในรูปของ Inorganic Sulphate, Chlorides และ Fluorides
- Inherent Ash จะประกอบด้วยสารอนินทรีย์ (Inorganic) ที่รวมตัวอยู่กับสารอินทรีย์ (Organic) ที่เป็นส่วนประกอบของถ่านหินซึ่งเกิดจากพวกพืช (Plant Material)

2.3.2 การวิเคราะห์เชิงธาตุ (Ultimate analysis)

เป็นการวิเคราะห์ถ่านหินอย่างละเอียด จะแสดงผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละโดยมวลของธาตุองค์ประกอบ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), ซัลเฟอร์ (S) และคลอรีน (Cl) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความร้อนจากการเผาไหม้ รวมถึงนำค่าองค์ประกอบที่ได้ไปคูณสมการการเผาไหม้เพื่อทำนายหาปริมาณอากาศที่จำเป็นหรือจะเป็นปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ สำหรับนำไปออกแบบระบบเช่น ขนาดของตัวป้อนอากาศมาตรฐานในการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านหินคือ ANSI/ASTM D 3176-77 และ ASTM D 5373 ผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.3.2.1. ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

ค่าองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน และ ไฮโดรเจนจากการวิเคราะห์แบบละเอียดจะช่วยในการคำนวณหาปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่จำเป็นในการเผาไหม้ของถ่านหินแต่ละชนิด ใช้เป็นเงื่อนไขในการแยกชนิดของถ่านหิน รวมถึงค่าความร้อน (Calorific value) และค่าประสิทธิภาพของเตาเผาโดยคำนวณจากสมมูลมวลและความร้อน ส่วนธาตุไนโตรเจนจะใช้ในการวิเคราะห์และประเมินปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมหลังการเผาไหม้ถ่านหิน การวิเคราะห์ธาตุทั้งสามนั้นสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN Analyser ตามมาตรฐาน ASTM D 5373 โดยการเผาถ่านหินในบรรยากาศ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), แก๊สไนโตรเจนออกไซด์

(NO_x) และน้ำ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะถูกรีดิวส์เป็นแก๊สไนโตรเจน (N₂) จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำจะถูกนำไปหาค่าคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยใช้อินฟราเรด (Infrared cells; IR) เป็นตัวตรวจจับ ส่วนแก๊สไนโตรเจนจะถูกตรวจจับด้วยตัวนำความร้อน (Thermal conductivity cells; TC) แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน ปฏิกิริยาของการเกิดสารประกอบทางเคมีเมื่อนำถ่านหินไปเผาจะสามารถอธิบายได้ดังนี้

- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ธาตุคาร์บอนอิสระและคาร์บอนที่มาจากการสลายตัวของพวกคาร์บอเนต (Carbonate mineral)
- น้ำ (H₂O) เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนในรูปสารอินทรีย์ไฮโดรเจน (Organic hydrogen) ซึ่งรวมค่าความชื้นในโครงสร้างภายในถ่านหินนั้นๆ ด้วย
- แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) และการสลายตัวของไนเตรต

2.3.2.2. ธาตุกำมะถันหรือซัลเฟอร์

ธาตุซัลเฟอร์จะใช้ในการประเมินคุณภาพของถ่านหิน ซัลเฟอร์ที่ปล่อยออกมาหลังจากการเผาไหม้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปซัลเฟอร์จะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ Pyritic Sulfur, Sulphate Sulfur และ Organic Sulfur Pyritic Sulfur (FeS₂, FeS) และ Sulphate Sulfur นี้เราสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้ เมื่อนำค่าที่ได้ไปลบออกจากค่า Total Sulfur เราจะได้ปริมาณ Organic Sulfur การวิเคราะห์ธาตุซัลเฟอร์ตามมาตรฐาน ASTM D 3177 มีหลายวิธีดังนี้

- Eschka method โดยนำส่วนผสมของถ่านหินและส่วนผสมของ Eschka (ส่วนผสมของ Na₂CO₃ + MgO) แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียสในที่ ๆ มีอากาศเพื่อเปลี่ยนซัลเฟอร์ในถ่านหินให้เป็นซัลเฟต
- Bomb Washing Method โดยการล้างออกมาหลังจากการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของถ่านหิน แล้วนำมา ออกซิไดซ์ด้วยตัวออกซิแดนท์ เช่น น้ำโบรมีน (Bromine Water) เพื่อที่จะเปลี่ยนซัลเฟอร์ทั้งหมดให้เป็นซัลเฟต

- High Temperature Combustion Method เป็นการนำถ่านหินไปเผา ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส และใช้โพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide ;H₂O₂) ดูดซับผลิตภัณฑ์ซึ่งจะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ให้เป็นซัลเฟตแล้วหาปริมาณที่ได้รับ
- Infrared Method เป็นการเผา ถ่านหินตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส และตรวจจับไอซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ได้รับด้วยตัวตรวจจับอินฟราเรดซึ่งจะคำนวณและแปลงค่ารายงานออกมาเป็นค่าซัลเฟอร์ทั้งหมด ค่านี้เป็นค่าที่มีความสำคัญต่อการซื้อ-ขาย ค่าของซัลเฟอร์จะใช้เป็นแนวทางในการลดปริมาณซัลเฟอร์ของถ่านหินด้วยการล้าง เนื่องจากมีเพียง Pyritic Sulfur อย่างเดียว เท่านั้นที่สามารถกำจัดออกได้ด้วยการแยกออกโดยใช้ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Separation)

2.3.2.3. ธาตุคลอรีน

คลอรีนในถ่านหินสามารถเกิดปะปนในถ่านหินในรูปของสารอินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ (Organic Matter) คลอรีนในถ่านหินเป็นสาเหตุของการเกิดสนิม (Corrosion) กับอุปกรณ์ที่ใช้ นอกจากนี้คลอรีนในถ่านหินมักถูกคิดว่าเป็นสาเหตุของการเกิดตะกั่ว (Slag) ในเตาเผาที่อุณหภูมิสูง ความจริงแล้วคลอรีนอาจเป็นเพียงตัวกลางที่ร่วมกับแร่ธาตุอื่นๆแล้วสร้างปัญหาโดยตรงมากกว่าตัวคลอรีนเอง เช่น คลอรีน อาจอยู่ในรูปคลอไรด์ของโซเดียมและโพแทสเซียม หรืออื่น ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของการเกิดส่วนผสมยูเทคติก (Eutectic Mixture) เป็นสาเหตุของการเกิดตะกั่วมากกว่าตัวคลอรีนเอง การวิเคราะห์ปริมาณของคลอรีนมีหลายวิธี เช่น Eschka Method , Bomb Calorimeter Method และ High Temperature Combustion Method ซึ่งมีหลักการคล้ายคลึงกันคือ การทำลายโมเลกุลของถ่านหิน และเปลี่ยนคลอรีนให้เป็นคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ตัวอย่างเช่น High Temperature Combustion Method ถ่านหินจะถูกเผาในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิประมาณ 1350 องศาเซลเซียส ไอของคลอรีนที่ออกมาจะถูกดูดซับเอาไว้ และหาปริมาณ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์

2.3.2.4. ธาตุออกซิเจน

เกิดจาก สารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ ความชื้น และแร่ธาตุต่างๆเช่น ดินเหนียว, สารประกอบคาร์บอเนตและซัลเฟต ในสารประกอบอินทรีย์ ออกซิเจนจะรวมอยู่ในรูป ซิลิเกต (Silicates), คาร์บอเนต (Carbonates), ออกไซด์ (Oxides) , สารประกอบพวกซัลเฟต (Sulphates

compounds) และจากในน้ำ สำหรับน้ำจะมาจาก Inherent Moisture และ Water or Hydration ของ Mineral Matter สารประกอบซิลิเกตจะอยู่ในรูปอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminium Silicates) พบได้ใน หินดินดาน (Shale) ที่อยู่ในถ่านหิน ส่วนคาร์บอนेटจะเป็นพวกแคลเซียมคาร์บอนेट (Calcium Carbonate ;CaCO₃) และ ไอออนคาร์บอนेट (Iron Carbonate ;Fe₂CO₃) ในด้านของออกไซด์นี้จะ รวมถึงออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของซัลเฟอร์เช่น แคลเซียมซัลเฟต (Calcium Sulphate ;CaSO₄) และ ไอออนซัลเฟต (Iron Sulphate ;Fe₂SO₄)

การวิเคราะห์ธาตุออกซิเจนสามารถหาได้จาก

$$\% \text{Oxygen} = 100 - (\% \text{C} + \% \text{H} + \% \text{Cl} + \% \text{S} + \% \text{Ash})$$

ถ่านหินที่มีออกซิเจนต่ำ มีความเหมาะสมที่จะทำเป็นถ่านโค้ก (Coke) สำหรับใช้ในการ ถลุงโลหะได้ดีกว่าถ่านหินที่มีปริมาณออกซิเจนสูง สำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และการผลิต เชื้อเพลิงเหลว (Liquefaction) นั้นจะเหมาะกับถ่านหินที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ เนื่องจากถ่านหินที่มี ปริมาณออกซิเจนสูง (ถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ) จะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า และทำให้กลายเป็นไอหรือ ของเหลวได้น้อยกว่าถ่านหินที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ

2.3.3 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Calorific value analysis)

เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนเมื่อนำถ่านหินไปเผาในเครื่องหาค่าพลังงานความ ร้อนหรือบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) สามารถวิเคราะห์ด้วยการวัดค่าการเพิ่มอุณหภูมิ ของน้ำภายใต้ความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน คือ 760 มิลลิเมตรปรอท และ 25 องศาเซลเซียส เรา สามารถแบ่งค่าความร้อนออกเป็นสองประเภทคือ

- ค่าความร้อนรวม หรือ ค่าความร้อนสูง (Gross calorific value หรือ High heating value) เป็นค่าความร้อนที่ได้ทั้งหมดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ปกติแล้วในเชื้อเพลิง จะ มีน้ำปนอยู่ด้วย และเมื่อเผาไหม้ น้ำส่วนนี้จะรวมกับ น้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของ ไฮโดรเจน ซึ่งจะมีความร้อนส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในรูปความร้อนแฝงของการ กลายเป็นไอ ความร้อนแฝงส่วนนี้ ไม่สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้สำหรับค่าความ

ร้อนชนิดนี้ไม่ได้หักค่าความร้อนแฝงส่วนนี้ออก (ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้อยู่ในรูปของน้ำที่เป็นของเหลว)

- ค่าความร้อนสุทธิหรือค่าความร้อนต่ำ (Net heating value หรือ Lower heating value) เป็นค่าความร้อนที่นำไปใช้ในทางปฏิบัติได้ จะเท่ากับค่า ความร้อนโดยรวมลบด้วย ปริมาณความร้อนแฝงของไอน้ำ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าความร้อนสำหรับถ่านหิน ที่มีคุณภาพต่ำ จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น และปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดจาก สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่านหิน ค่าความร้อนของถ่านหินจะมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณ จี๊เถ่าในถ่านหิน ถ่านหินที่มีค่าความร้อนต่ำจะมีปริมาณจี๊เถ่าสูง ถ่านหินที่มีค่าความ ร้อนสูงก็จะมีปริมาณจี๊เถ่าต่ำ

2.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของถ่านหิน

ถ่านหินแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติภายนอกแตกต่างกันเช่น ความแข็ง ความหนาแน่น รวมถึง ถ้ำที่มีคุณสมบัติต่างกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ดัชนีความสามารถในการบด (Hardgrove Grindability Index; HGI) เป็นค่าที่บ่งบอกถึง ความยากง่ายในการบดถ่านหินให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ Hardgrove Machine เป็น เครื่องมือในการทดสอบ ถ่านหินที่มีค่า HGI ที่มีค่าสูง (ใกล้เคียง 100) แสดงว่ามีลักษณะ เปราะ สามารถบดได้ง่าย ส่วนถ่านหินที่มีค่า HGI ต่ำ (ประมาณ 30-45) จะเป็นถ่านหินที่ แข็งและเหนียวทำการบดได้ยาก
- ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) เป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของถ่าน หินต่อความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เราสามารถหาค่าความหนาแน่น สัมพัทธ์ของตัวอย่างถ่านหิน ได้ด้วยการแทนที่น้ำเพื่อหาปริมาตรของถ่านหินนั้น แล้ว นำไปหาความสัมพันธ์กับน้ำหนัก ของถ่านหิน จะได้ความหนาแน่นของถ่านหิน อยู่ในรูป Apparent Relative Density เรายังสามารถใช้ค่า Relative Density ประกอบในการ คำนวณหาปริมาณสำรองของถ่านหินได้เช่นกัน
- เพโตรกราฟี (Petrography) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหิน โดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือ การศึกษาทำได้โดยนำตัวอย่าง ถ่านหิน มาจัดทำ

- เป็น Polished Section หรือ Thin Section แล้วส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อจำแนกชนิด และนับจำนวนของส่วนประกอบในเนื้อถ่านหิน เช่น Vitrinite, Fusinite เป็นต้น หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาด้านการสะท้อนแสง (Reflectance) ของแต่ละองค์ประกอบนั้นๆ การศึกษานี้เหมาะสมสำหรับถ่านหินที่มี Rank สูงเท่านั้น เช่น บิทูมินัส และแอนทราไซต์
- การวิเคราะห์ความหนืดและการหลอมเหลวของถ่านหิน เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของซีเมนต์ของถ่านหินที่อุณหภูมิสูง เพื่อพิจารณาหาถ่านหินที่เหมาะสมที่จะใช้ในเตาเผา (Furnace) โดยจะบันทึกอุณหภูมิที่ซีเมนต์เริ่มหลอมละลาย ซีเมนต์จะถูกทำให้มีรูปร่างคล้ายปิรามิดหรือสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และใส่เข้าไปในเตาเผาพร้อมทั้งสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงผ่านกระจกเตาเผา สำหรับถ่านหินที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ความหนืดจะลดลง และเมื่อถ่านหินที่หลอมเหลว เย็นตัวลงจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นทันที เนื่องจากเกิดการก่อตัวเป็นผลึกแข็ง

2.4 ผลกระทบจากการใช้ประโยชน์จากถ่านหิน

เมื่อมีการใช้ถ่านหินปัญหาที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้คือปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมลพิษที่เกิดขึ้นนี้ประกอบด้วยรูปของละอองธุลี (Particulate matters) และรูปของออกไซด์ของแก๊สต่างๆมากมายเช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นต้น ผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นประกอบไปด้วย

- ฝนกรด (Acid rain) เกิดจากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ซึ่งมาจากการเผาของเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ทุกชนิดเช่นถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ และน้ำมัน เมื่อแก๊สเหล่านี้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับ โมเลกุลของไอน้ำและออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) ซึ่งจะเกาะตัวเข้ากับ โมเลกุลของฝน ผุนหรือหิมะแล้วตกลงสู่พื้นโลก ฝนกรดจะละลายปุ๋ยในดิน ทำให้พืชเติบโตช้า เมื่อไหลลงแหล่งน้ำก็จะทำให้แหล่งน้ำนั้นๆไม่เอื้ออำนวยให้สิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ได้หรือแม้แต่ในเมืองเอง ฝนกรดก็ก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งก่อสร้างต่างๆหรืออาจจะจับตัวรวมกับหมอกก่อให้เกิดหมอกควันพิษ (Smog) ที่ทำอันตรายกับระบบทางเดินหายใจ และอาจรุนแรงถึงชีวิตได้หากมีมากถึงระดับหนึ่ง

- หมอกควัน (Smog) เป็นปัญหาทางด้านสภาพอากาศที่มักเกิดขึ้นในแหล่งชุมชน เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษต่างๆที่มีอยู่ในอากาศกับแสงอาทิตย์ก่อให้เกิดเป็นลักษณะของหมอกควัน สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

หมอกควันแบบซัลฟิวรัส (Sulfurous smog) หรือที่เรียกว่าหมอกเทา (Gray-air smog) เป็นหมอกควันที่พบมากในบรรดาเมืองอุตสาหกรรมที่มีสภาพอากาศหนาวและมีความชื้นสูง เช่น นิวยอร์ก ลอนดอน เป็นต้น สาเหตุมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆมีการใช้ถ่านหินหรือเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์อื่นๆเป็นเชื้อเพลิง แล้วมีการปล่อยของเสียทั้งพวกอนุภาคและแก๊สต่างๆ ออกมา โดยเฉพาะพวกแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หมอกควันประเภทนี้จะยังเห็นได้ชัดเจนมากในช่วงฤดูหนาว เพราะมีการใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นและเป็นช่วงที่มีความชื้นสูง

หมอกควันแบบโฟโตเคมีคัล (Photochemical smog) หรือที่เรียกว่าหมอกน้ำตาล (Brown-air smog) เป็นหมอกควันที่เกิดจากการปล่อยมลพิษจากเครื่องยนต์ต่างๆ หรือ โรงไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเป็นพวกแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และพวกไฮโดรคาร์บอนต่างๆ เมื่อแก๊สเหล่านี้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับแสงอาทิตย์ จะก่อให้เกิดมลพิษได้แก่อโอโซน (Ozone) เป็นต้น หมอกควันลักษณะนี้มักเกิดในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศอบอุ่นถึงแห้ง

- ปรากฏการณ์แก๊สเรือนกระจก (Greenhouse effect) คือปรากฏการณ์ที่ชั้นบรรยากาศโลกกระทำตัวเสมือนมีกระจก ขอมให้รังสีคลื่นสั้นผ่านลงมายังพื้นโลก และส่วนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดจะผ่านชั้นบรรยากาศแล้วทำให้โมเลกุลของแก๊สต่างๆ รวมถึงโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ จะดูดซับเอาพลังงานความร้อนที่โลกปล่อยออกมาไว้ จากนั้นจะคายพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ภายในชั้นบรรยากาศและพื้นผิวโลก ทำให้ความร้อนไม่สามารถออกไปสู่นอกชั้นบรรยากาศของโลกได้ จึงทำให้อุณหภูมิของโลกร้อนขึ้น โดยทั่วไปบรรยากาศจะทำหน้าที่เหมือนกระจกที่ปกคลุมผิวโลกให้เกิดความสมดุล แก๊สที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกประกอบไปด้วย 4 ชนิดหลักๆคือ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน การเผาไหม้ของพวกเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ทุกชนิด นอกจากจะมีการปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนตรัสออกไซด์แล้วยังมีแก๊สจำพวกคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และโอโซนถูกปล่อยออกมาด้วย

ในประเทศไทยได้เกิดปรากฏการณ์ฝนกรดขึ้นที่บริเวณใกล้เคียงกับเหมืองถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เมื่อปี พ.ศ. 2535 ซึ่งเทคโนโลยีในสมัยนั้นยังไม่ทันสมัยและการลงทุนติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ ควบคุมมลภาวะอาจยังไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ประกอบกับแหล่งถ่านหินในประเทศเป็นถ่านหินที่คุณภาพไม่ดีนัก ถึงแม้ภายหลังจะได้รับการบริหารจัดการเป็นอย่างดี ทั้งด้านเทคโนโลยีที่สะอาดและการได้รับความยอมรับในพื้นที่ แต่ก็ยังเป็นที่ยังกังวลของหลายฝ่ายจึงทำให้ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีถ่านหินยังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศไทยจากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้ถ่านหินมีภาพลักษณ์ที่ไม่ดี เป็นผลให้การนำถ่านหินมาใช้ในระบบอุตสาหกรรมถูกต่อต้านโดยประชาชนใกล้เคียงทำให้ประเทศไทยสูญเสียโอกาสในการใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาถูก

2.5 เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean coal technology)

ถ่านหินที่นำมาใช้จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปริมาณสารพิษในแก๊สก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ เทคโนโลยีที่สำคัญในการลดผลกระทบดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นเรียกว่าเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด ในประเทศไทยมีการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพื่อมุ่งเน้นให้โรงงานอุตสาหกรรมหันมาใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้น โดยการมุ่งเน้นงานวิจัยและให้ความรู้ที่ถูกต้องแก่ประชาชนคนทั่วไปเพื่อสร้างภาพลักษณ์ที่ดีในการใช้ถ่านหิน เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดสามารถทำได้ทั้งก่อนการเผาให้ ขณะเผาไหม้ และหลังการเผา สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 เทคโนโลยีก่อนการเผาให้ถ่านหิน

ถือเป็นการปรับระดับถ่านหินเพื่อลดปริมาณซัลเฟอร์และจีเส้า รวมถึงเพิ่มค่าความร้อนให้กับถ่านหินสามารถแบ่งออกได้เป็น

2.5.1.1. การทำความสะอาดโดยวิธีทางกายภาพ (Physical cleaning)

เป็นการกำจัดสิ่งเจือปนประเภทฝุ่นละออง ดิน หิน และสารประกอบกำมะถันอนินทรีย์ ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ เช่น ไพไรติกซัลเฟอร์ (Pyritic sulfur) เป็นต้น มีวิธีการคือนำถ่านหินมาบดให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดของฝุ่นผงแล้วล้างผ่านน้ำ อาศัยหลักการความแตกต่างของความหนาแน่นของถ่านหินกับสารเหล่านี้ จะทำให้สิ่งเจือปนต่างๆ ที่ไม่

ต้องการจะถูกแยกออกจากเนื้อถ่านหิน วิธีนี้จะทำให้ไพโรติกซัลเฟอร์ถูกกำจัดออกได้ประมาณร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังมีวิธีทำความสะอาดถ่านหินทางกายภาพอีกวิธีหนึ่งเรียกว่าการลอยผ่านปล่อง (Column flotation) เป็นการทำความสะอาดถ่านหินอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติทางเคมีของถ่านหินซึ่งมีความสามารถในการยึดติดกับฟองอากาศได้แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อให้ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านผงถ่านหินและน้ำซึ่งบรรจุในอุปกรณ์ที่เรียกว่าปล่อง (Column) ผงถ่านหินจะติดขึ้นไปกับฟองอากาศ ทิ้งให้สิ่งเจือปนต่างๆ รวมทั้งไพโรติกซัลเฟอร์จมอยู่ในบริเวณส่วนล่าง

2.5.1.2. การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี (Chemical cleaning)

เป็นการใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับผงถ่านหิน สารเคมีดังกล่าวจะมีคุณสมบัติในการกำจัดพวกสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพ

2.5.1.3. การทำความสะอาดโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological cleaning)

วิธีนี้เป็นเทคโนโลยีที่ยังค่อนข้างใหม่ ทำโดยใช้สิ่งมีชีวิตเล็กๆจำพวกแบคทีเรียและเชื้อราบางชนิด ซึ่งต้องการกำมะถันเป็นอาหารเข้าไปช่วยในการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน และสามารถนำสิ่งมีชีวิตเหล่านี้มาทำการเพาะเลี้ยงเพื่อสกัดเอาเอนไซม์ที่ใช้สำหรับการย่อยสลายกำมะถันมาใช้ เพื่อเร่งกระบวนการกำจัดกำมะถันในถ่านหินได้

2.5.2 เทคโนโลยีระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน

เป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องสร้างเครื่องมือขึ้นมาเพิ่มเติมในการลดหรือกำจัด แก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นการควบคุมเงื่อนไขในการเผาไหม้ถ่านหิน อาจใช้ถ่านหินหินปูนบดในระหว่างการเผาไหม้ หรือควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ให้ต่ำกว่าการเผาไหม้ทั่วไปส่งผลให้เกิด NO_x น้อยลง

2.5.3 เทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ถ่านหิน

เป็นการกำจัดหรือลดปริมาณซัลเฟอร์ออกไซด์ ผุ่นละออง และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหิน การกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆที่กล่าวมาสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.5.3.1. การกำจัดฝุ่นละออง

เมื่อถ่านหินถูกเผาไหม้จะมีฝุ่นละอองต่างๆ เกิดขึ้นในกระบวนการ ดังนั้นเพื่อเป็นการกำจัดฝุ่นละอองดังกล่าว จะมีการใช้อุปกรณ์สำหรับการดักจับฝุ่นละอองที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปที่ใช้กันอยู่ได้แก่

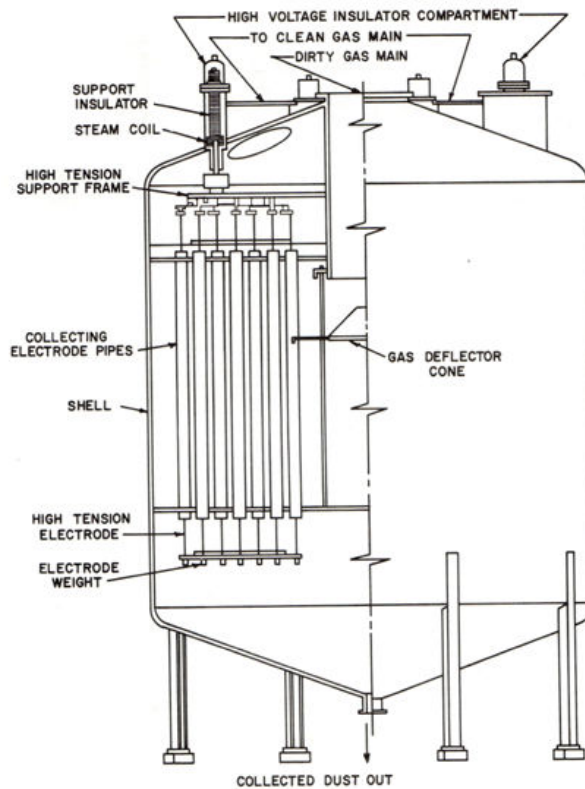
เครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้า (Electrostatic precipitator) เป็นการกำจัดฝุ่นละอองโดยใช้หลักการไฟฟ้าสถิตย์ เมื่อฝุ่นละอองเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าจะทำให้ฝุ่นละอองมีประจุไฟฟ้า และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังดักเก็บ ซึ่งมีประจุไฟฟ้าขั้วตรงข้ามกับฝุ่นละอองๆ ก็จะถูกดูดให้ติดกับแผ่นรวบรวม (Collector plates) ที่อยู่ภายในดักเก็บฝุ่น ระบบนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงมากในการดักจับฝุ่น ดังรูปที่ 2.3

เครื่องแยกฝุ่นแบบลมหมุน (Cyclone Separator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกฝุ่นละอองออกจากแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน โดยใช้หลักของแรงเหวี่ยงเพื่อให้แก๊สที่มีฝุ่นละอองผสมอยู่เกิดการหมุนตัว จะทำให้ฝุ่นละอองที่มีน้ำหนักมากกว่ารวมตัวกันและถูกแยกออกมาดังรูปที่ 2.4

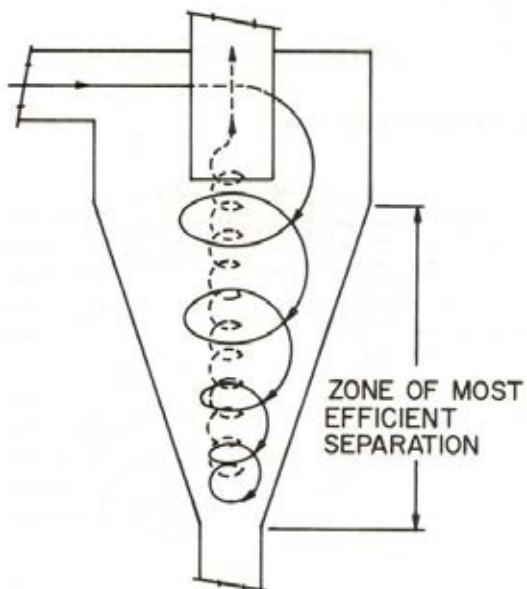
เครื่องกรองฝุ่นแบบถุง (Bag filter) เป็นอุปกรณ์ที่มีถุงกรองเป็นตัวกรองแยกฝุ่นละอองออกจากแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินดังรูปที่ 2.5

2.5.3.2. การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

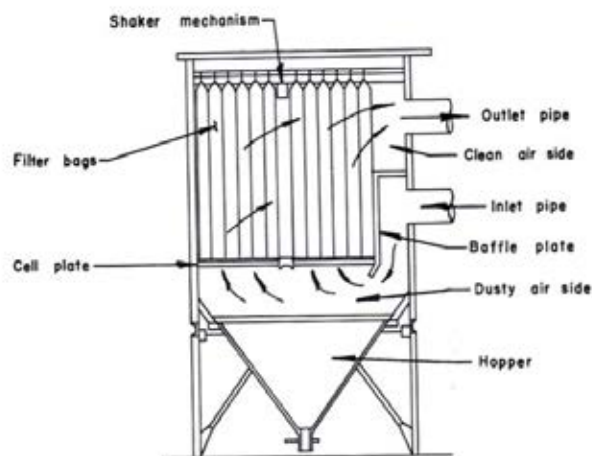
เป็นกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมแก๊สทิ้งหลังการเผาไหม้ ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ หรือ Flue gas desulfurization (FGD) ดังรูปที่ 2.6 โดยการฉีดส่วนผสมของน้ำกับหินปูนเข้าไปทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ในแก๊สทิ้งนั้น ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการรวมตัวและตกตะกอนเป็นยิบซัม ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2.3 เครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้า



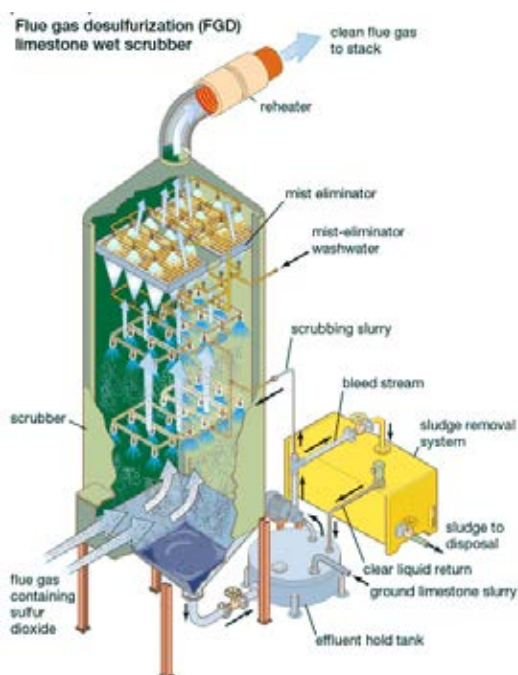
รูปที่ 2.4 เครื่องแยกฝุ่นแบบลมหมุน



รูปที่ 2.5 เครื่องกรองฝุ่นแบบถุง

2.5.3.3. การกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์

เป็นกระบวนการกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาหลังการเผาไหม้ โดยการใช้แอมโมเนียเข้าไปทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ผลของปฏิกิริยาจะเป็นไนโตรเจนและน้ำ การกำจัดกาซไนโตรเจนออกไซด์จะสามารถทำได้ด้วยการนำไปผ่านเครื่องปฏิกรณ์ Selective catalytic reduction (SCR) ดังในรูปที่ 2.8



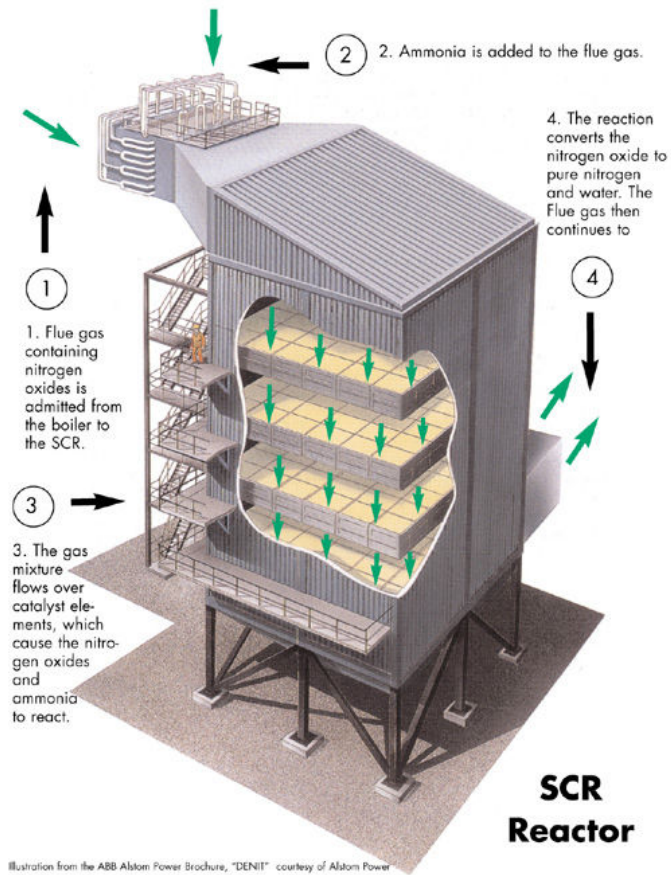
รูปที่ 2.6 เครื่องกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (FGD)

2.6 กระบวนการผลิตแก๊ส (Gasification process)

กระบวนการผลิตแก๊ส เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านไม้ ถ่านหิน แกลบ หรือ ชีวมวลอื่นๆ เป็นต้น ให้กลายเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์, แก๊สไฮโดรเจน, แก๊สมีเทน, พวกละเอียดต่างๆ และยังมีสารพวกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ นอออกมาบ้างเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีสารปนเปื้อนเช่น น้ำมันทาร์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมเนีย เป็นต้น กระบวนการดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical Conversion Process) แก๊สที่ผลิตได้นี้จะเรียกว่าแก๊สเชื้อเพลิงหรือ โพรคิวเซอร์แก๊ส (Producer Gas) ส่วนสารอนินทรีย์ในถ่านหินจะเกิดการสลายตัวและถูกออกซิไดซ์เป็นเถ้า ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้จะต้องไม่มากจนเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ จนทำให้แก๊สที่ออกมาเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ กระบวนการผลิตแก๊สนั้นจะแตกต่างจากกระบวนการการเผาไหม้ตรงที่ว่ากระบวนการการเผาไหม้จะเปลี่ยนพลังงานในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานความร้อนผ่านปฏิกิริยาเคมีที่มีออกซิเจนอย่างเพียงพอถึงมากเกินพอในขณะที่กระบวนการผลิตแก๊สนั้นมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนพลังงานที่สะสมในเชื้อเพลิงให้เป็น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ไม่ใช่การทำลายพันธะเพื่อสร้างความร้อนเหมือนการเผาไหม้ แก๊สเชื้อเพลิงนั้นสามารถนำไปเผาไหม้ในกระบวนการถัดไปได้อย่างง่ายดาย ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สนั้นน้อยกว่าการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ถึง 30%-40%



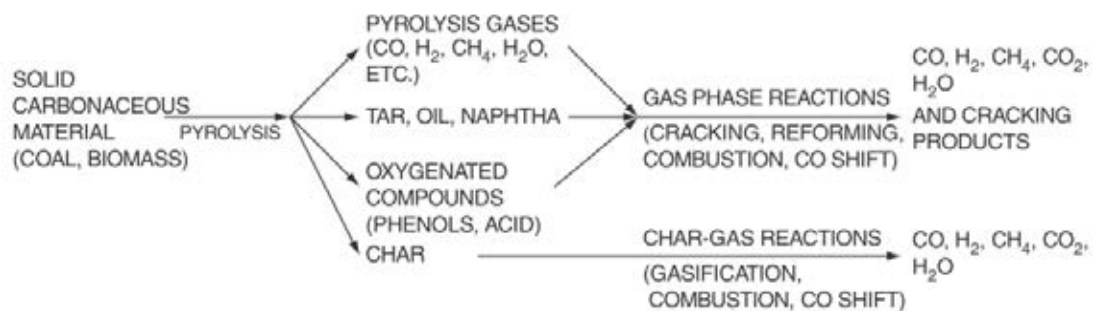
รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอย่างง่าย



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์ Selective catalytic reduction (SCR)

2.6.1 ปฏิกิริยาภายในกระบวนการผลิตแก๊ส

ภายในกระบวนการการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนั้นมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังรูปที่ 2.9 การเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็งให้กลายเป็นแก๊สจะต้องผ่านปฏิกิริยาต่างๆ แบ่งชั้นตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาต่างๆภายในกระบวนการแยกแก๊สเชื้อเพลิง

2.6.1.1. ชั้นการอบแห้งของเชื้อเพลิง (Drying zone)

เป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการการผลิตแก๊สเพื่อให้ความร้อนให้กับถ่านหินเพื่อไล่ความชื้น อุณหภูมิในส่วนนี้จะมากกว่า 100 องศาเซลเซียส ความชื้นส่วนใหญ่จะถูกไล่ออกในขั้นตอนนี้

เชื้อเพลิง + ความร้อน \rightarrow เชื้อเพลิงแห้ง + ไอน้ำ

เมื่อกระบวนการนี้เริ่มขึ้นน้ำหนักของเชื้อเพลิงก็จะลดลง ขนาด และสีของเชื้อเพลิงก็จะเปลี่ยนไป ในลักษณะที่มีสีเข้มขึ้น

2.6.1.2. ชั้นการกลั่นสลายหรือไพโรไลซิส (Devolatilization หรือ Pyrolysis zone)

ถ่านหินเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่มีอากาศและออกซิเจนจะเกิดการระเหยของสารระเหยออกมา ซึ่งจะสลายตัวออกมาทั้ง ของแข็งจะเรียกว่าถ่านชาร์ (Char) ของเหลวเรียกว่าทาร์ (Tar) และแก๊สต่างๆ (H_2O , H_2 , N_2 , O_2 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2S , NH_3 , C_2H_6) ถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการกลั่นสลายนั้นจะมีความว่องไวต่ำกว่าถ่านหินมากซึ่งจะต้องอาศัยเวลาในการทำปฏิกิริยามากยิ่งขึ้น ส่วนของเหลว (Tar) นั้นจะเกิดจากการควบแน่นของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลสูง อุณหภูมิในส่วนของการกลั่นสลายนี้จะเกิดที่ประมาณ 450-700 องศาเซลเซียส

เชื้อเพลิงแห้ง + ความร้อน \rightarrow ถ่านชาร์ + น้ำมันทาร์ + สารระเหย

ในช่วงแรกอุณหภูมิในบริเวณนี้จะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งสูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ และหลังจากเกิดปฏิกิริยานี้แล้วอุณหภูมิของชั้นนี้จะลดลงจึงเริ่มการสะสมความร้อนอีกครั้งเพื่อการเกิดปฏิกิริยาครั้งต่อไป สารระเหยที่ออกมานี้จะขึ้นกับชนิดของถ่านหินรวมถึงขนาดของถ่านหินด้วยเช่นกัน

2.6.1.3. ชั้นการเกิดการเผาไหม้ (Combustion Zone หรือ Oxidation Zone)

ส่วนนี้จะเกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง อุณหภูมิในช่วงนี้อยู่ที่ 900-1,200 องศาเซลเซียสแก๊สออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในเชื้อเพลิง จะแยกเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์และเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ (Combustion reaction) จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนมากเกินไป เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำออกมา



ปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial combustion reaction) เกิดเมื่อมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา

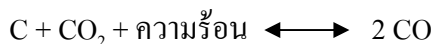


ในชั้นการเผาไหม้จะมีความร้อนที่สูงที่สุดเป็นส่วนที่ทำให้ความร้อนกับชั้นอื่นๆ ความร้อนในชั้นนี้จะทำให้ถ่านชาร์กลายเป็นแอสลัคหรือกากตะกอน (Slag)

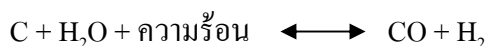
2.6.1.4. ชั้นการรีดักชัน (Reduction zone หรือ Gasification zone)

เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนในถ่าน กับไอน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่ได้จากชั้นการเผาไหม้ในสภาวะปราศจากออกซิเจน เกิดในช่วงอุณหภูมิจะอยู่ที่ 600-700 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาในชั้นนี้จะแบ่งได้เป็น

ปฏิกิริยาคาร์บอกซิแก๊สซิเคชัน (Carboxygasification หรือ Boudouard reaction) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



ปฏิกิริยาสตรีมแก๊สซิเคชัน (Steam gasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ แก๊สที่ได้คือคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้เป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง แก๊สสองชนิดนี้จะนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาสตรีมแก๊สซิเคชันนี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



ปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water gas shift reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์และไอน้ำได้แก๊สผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟต์นี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



ปฏิกิริยาไฮโดรแก๊สซิฟิเคชันหรือเมทานเนชัน (Hydrogasification หรือ Methanation) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนโดยตรง เกิดแก๊สมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกิดช้าลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้มักเกิดขึ้นในอัตราที่น้อย



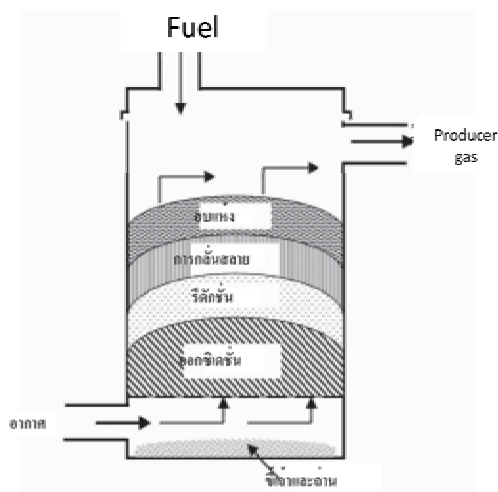
2.6.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier type)

สามารถแบ่งได้เป็นสามชนิดตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตแก๊สดังนี้

2.6.2.1. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเบดนิ่ง (Fixed bed gasifier)

ระบบเบดนิ่งนี้เป็นระบบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินตั้งแต่ยุคแรกๆ มีลักษณะที่ไม่ซับซ้อน เตาแบบเบดนิ่งมีความสะดวกทั้งในด้านการสร้างและการใช้งาน เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะทิศทางการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ คือ

2.6.2.1.1 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้น (Updraft Gasifier)



รูปที่ 2.10 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้น

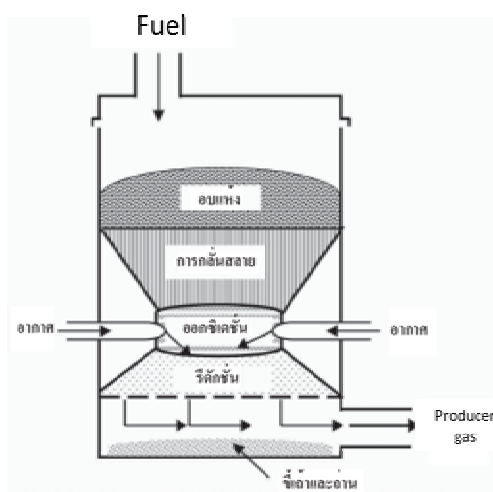
เตาแบบนี้อากาศจะไหลสวนทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงเป็นเตาที่แก๊สเชื้อเพลิงไหลออกมาทางด้านบนของเตา เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาซึ่งต้องมีการเติมเชื้อเพลิง

ตลอดเวลาเพื่อให้ระดับเบดคองที่ ส่วนอากาศและไอน้ำจะป้อนเข้าผ่านตะแกรงทางด้านล่างของเตา ได้บริเวณการเผาไหม้ และไหลขึ้นผ่านชั้นของการเผาไหม้ เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนขึ้น แก๊สที่ได้ คือ CO_2 และ H_2O ซึ่งไหลขึ้นผ่านชั้นรีดักชัน, ชั้นไพโรไลซิส และชั้นการอบแห้งตามลำดับ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดนี้จะมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูง จึงสามารถสร้างเตาให้ ขนาดเล็กลงได้แต่ แก๊สเชื้อเพลิงที่ออกมาจากเตาแบบนี้จะสกปรก เพราะมีพวกสารระเหยที่เกิด จากชั้น ไพโรไลซิสปนออกมาด้วย สารระเหยบางส่วนสามารถควบแน่นได้ในบริเวณที่เย็นจะ กลายเป็นของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันทาร์ทำให้เกิดปัญหาขึ้นเมื่อนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเตา แบบนี้มาใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine : I.C. Engine) เพราะเมื่อ เดินเครื่องไปนาน ๆ แล้วจะเกิดการอุดตันที่หัวฉีด เนื่องจากพวกสารระเหย ดังนั้นหากต้องการนำ แก๊สเชื้อเพลิงจากเตาชนิดนี้มาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน จะต้องมีการกรองที่ดีเพื่อกำจัด สารระเหยและน้ำมันทาร์ นอกจากนี้บริเวณตะแกรงที่ใส่เชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดถ้ำ หลอม (Slag) บนตะแกรง ส่งผลให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเตาแบบนี้ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็น เชื้อเพลิงให้กับกระบวนการที่ต้องการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) เช่น กระบวนการ อบแห้ง กระบวนการทางอุตสาหกรรมบางชนิด เป็นต้น พวกสารระเหยบางชนิดที่เป็นเชื้อเพลิงจะ ออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิงเนื่องจากชั้นการกลั่นสลายหรือชั้นไพโรไลซิสใกล้กับทางออก สาร ระเหยที่ออกมาจะถูกเผาไหม้ได้ง่าย เป็นการเพิ่มค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น นอกจากนี้เตาผลิตแก๊สชนิดนี้ยังมีข้อดีคือ เป็นเตาที่ไม่ซับซ้อน เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้มาก สามารถรองรับถ่านหินที่มีขนาดใหญ่และมีปริมาณความชื้นสูงได้ และที่สำคัญคือเชื้อเพลิงจะอยู่ใน เตาเป็นเวลานานเป็นการประหยัดพลังงาน ทำให้คาร์บอนเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้มาก

2.6.2.1.2. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลง (Downdraft Gasifier)

เตาชนิดนี้อากาศจะไหลตามทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทาง ด้านบนของเตาส่วนอากาศและไอน้ำจะป้อนเข้ากลางเตาผ่านชั้นของการเผาไหม้ เกิดปฏิกิริยา คายความร้อนได้ CO_2 และ H_2O ไหลลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนที่อยู่เหนือตะแกรง เล็กน้อย คือชั้นรีดักชัน ส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนได้แก๊สเชื้อเพลิงออกมาออกมา ทางด้านล่างของเตาในขณะเดียวกันชั้นของการกลั่นสลายและชั้นการอบแห้งจะอยู่ด้านบนภายใน

เตาเผาเหนือบริเวณชั้นการเผาไหม้เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อสารระเหยที่ได้จากชั้นการกลั่น
 สลายไหลผ่านชั้นการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง จะส่งผลทำให้อนุภาคน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัว
 กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงก่อนไหลออกจากเตา ปริมาณน้ำมันทาร์จึงลดลง เหมาะที่จะใช้ในเครื่องยนต์
 สันดาปภายในมากกว่าเตาแบบไหลขึ้นเนื่องจากว่าแก๊สที่ผลิตได้มีความสะอาดกว่า และมีพวกระ
 เหย่น้อย แต่เตาผลิตแก๊สแบบแก๊สไหลลงนี้ จะต้องออกแบบและเลือกใช้วัสดุทนไฟอย่างดี
 เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเตาแบบนี้ จะสูงกว่าเตาผลิตแก๊สแบบแก๊สไหลขึ้นมาก
 ปัญหาสำคัญในการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแบบไหลลงไปใช้ก็คือ จะมีพวกเถ้าถ่าน (Ash) ปน
 ออกมากับแก๊สเชื้อเพลิงด้วย เนื่องจากบริเวณทางออกของแก๊สอยู่ทางด้านล่างของเตาผ่านชั้นการ
 เผาไหม้จึงทำให้เถ้าถ่านที่เหลือจากการเผาไหม้ในชั้นของการเผาไหม้ปลิวออกมากับแก๊สนี้ด้วยจึง
 ทำให้ต้องมีระบบการกรองแก๊ส เช่น ไซโคลน (Cyclone), ตัวกรอง (Filter) ที่มีประสิทธิภาพ

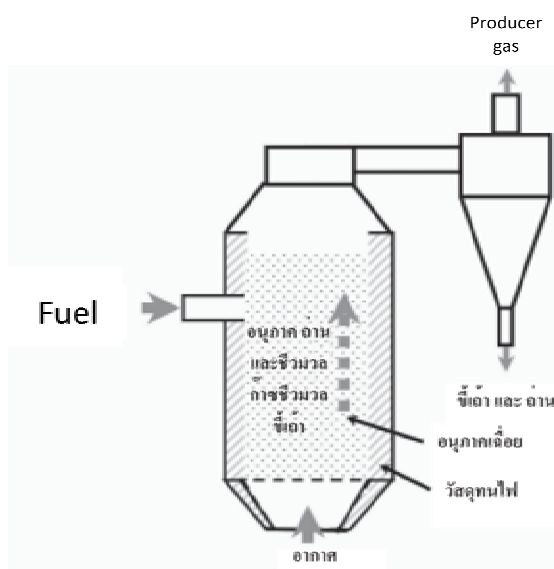


รูปที่ 2.11 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลง

2.6.2.2. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-Bed Gasifier)

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเตาชนิดนี้ จะเป็นปรากฏการณ์แบบฟลูอิดไคซ์ชันเป็น
 ปรากฏการณ์ที่ของแข็งขนาดเล็ก ถูกทำให้อยู่ในสภาพคล้ายของไหลด้วยการพองโดยแก๊สที่ไหล
 ผ่านให้ของแข็งยกตัวขึ้นไปด้านบนด้วยอัตราการไหลค่าหนึ่งที่ต้องสูงเพียงพอหรือมากกว่า
 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ การป้อนอากาศและถ่านหินจะมีลักษณะเป็นแบบสวนทางกัน

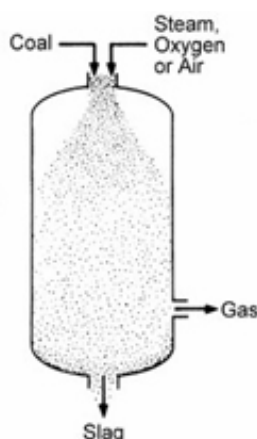
โดยอาจจะมีการถ่ายเทมวลสารและความร้อน เตาประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์กังหันแก๊ส (Gas Turbine Engines) เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะมีความร้อนและฝุ่นเล็กๆสูญเสียบไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากตัวเตามากกว่า แต่มีความสามารถในการเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่อง และมีประสิทธิภาพของเตาสูงกว่า อีกทั้งการถ่ายเทมวลสารและความร้อนเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี และมีสารเคลือบ เช่น ทราายเป็นเบด ทำให้มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่ดี จึงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์รวดเร็ว นอกจากนี้ตัวทราที่เป็นเบดจะช่วยเก็บความร้อนทำให้ตัวเตามีความเสถียรไม่ดับง่าย และเกิดการเผาไหม้ในตัวเตาเผาอย่างทั่วถึง จึงทำให้อุณหภูมิในเตามีค่าเท่ากันและสม่ำเสมอ รวมถึงภายในเตาผลิตแก๊สชนิดนี้สามารถเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ (850 องศาเซลเซียส) ช่วยลดปัญหาหามลพิษเนื่องจากเกิดไนโตรเจนออกไซด์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าต้องมีการย่อยขนาดให้มีขนาดเล็กพอที่จะเกิดฟลูอิดไดซ์ได้ และแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกมาจะมีฝุ่นและเถ้าเป็นจำนวนมากจึงต้องมีระบบกรองและทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้งานเสมอ นอกจากนี้ระบบฟลูอิดไดซ์เบดมักจะออกแบบไว้สำหรับโครงการที่จะจัดสร้างเป็นโรงไฟฟ้าโดยเฉพาะ



รูปที่ 2.12 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด

2.6.2.3. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเอ็นเทรนโฟล์ (Entrained Flow Gasifier)

เป็นการนำส่วนผสมของวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กๆ เป็นผงละเอียดกับอากาศหรือออกซิเจนที่ผสมรวมกับไอน้ำ ไปพร้อมๆกันในทิศทางเดียวกัน ส่วนใหญ่จะมีการป้อนจากทางด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตา ขนาดของวัตถุดิบ และความเร็ว ของแก๊สที่เข้าจะต้องผสมอย่างทั่วถึงและมีปริมาณที่พอดีกัน เตาชนิดนี้ได้รับการพัฒนาจากระบบการเผาไหม้แบบผงละเอียด (Pulverized – Coal) และมีค่าใช้จ่ายในการเตรียมเชื้อเพลิงสูง เตาชนิดนี้จะมีเถ้าและถ่าน (Char) ออกจากเตาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิง จึงจำเป็นต้องมีการแยกออกอีกครั้งหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านหินและอุณหภูมิภายในเตาชนิดนี้จะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆ มีค่าประมาณ 1,260-1,540 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดเถ้าหลอม (Slag) ขึ้นภายในเตา



รูปที่ 2.13 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเอ็นเทรนโฟล์

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

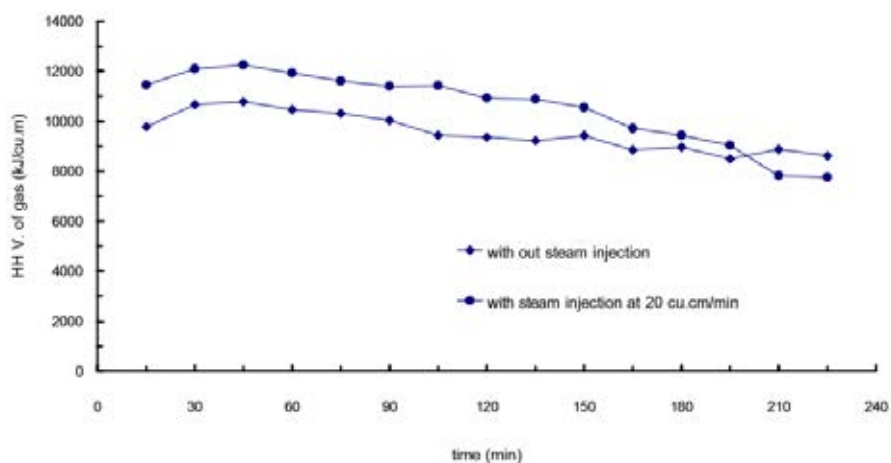
กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องทั้งในทางการทดลอง [1-4] และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์[5-12] งานวิจัยที่ผ่านมาสามารถแบ่งออกได้ตามชนิดของเตาผลิตแก๊สคือ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้น[1,4,5,8,12], เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลง [7,9,10], เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด[2,3,11] และเตาผลิตแก๊สแบบเอ็นเทอร์นโพล์[6] มีนักวิจัยหลายท่านได้นำหลักของสมดุลทางความร้อนและเคมีมาช่วยวิเคราะห์กระบวนการผลิตแก๊สแต่ละชนิด[5-12] ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆได้เป็นอย่างดี

สำหรับประเทศไทยการนำกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้ในการให้ความร้อนโดยตรงนั้น นิยมใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีกากของเสียทางเกษตรกรรมจำนวนมาก แต่การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นก็ยังมีข้อเสียเช่นกันกล่าวคือ เชื้อเพลิงชีวมวลมีความไม่แน่นอนการรวบรวมชีวมวลจากแหล่งต่างๆทำได้ยาก บางชนิดมีเฉพาะบางฤดูกาล และชีวมวลที่ใช้ต้องใช้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่เท่ากันนอกจากนี้ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการควบคุมที่ยุ่งยาก สำหรับเชื้อเพลิงถ่านหินนั้นมีปริมาณสำรองมากที่สุดในโลก ส่งผลให้ราคาของเชื้อเพลิงชนิดนี้มีการปรับตัวขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลชนิดอื่นๆ

3.1 งานวิจัยทางการทดลอง

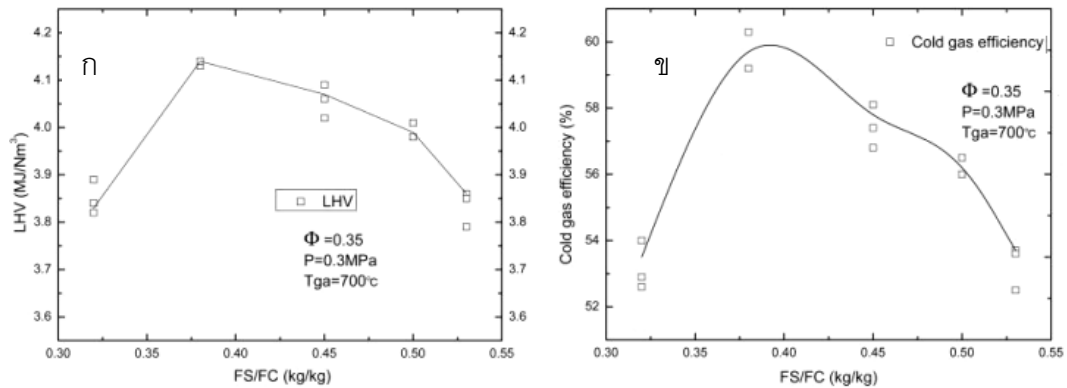
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ผ่านมา การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินมีงานวิจัยที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล อาจเนื่องมาจากภาพลักษณ์ที่ไม่ดีดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 งานวิจัยประเภทการทดลองส่วนใหญ่จะเป็นงานวิจัยเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ งานวิจัยที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

อรรถพล โกละกะและ คณะ [1] ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินลิกไนต์จากแหล่งแม่ละเมา ภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้นโดยมีการป้อนไอน้ำเข้าช่วย และได้ออกแบบเตาที่เน้นเฉพาะบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เตาที่ใช้ทดลองนี้จะไม่มีส่วนของการเผาไหม้หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความร้อนที่ให้กับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจึงมาจากแหล่งภายนอก การทดลองแสดงให้เห็นว่า หากมีการป้อนปริมาณไอน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยา จะทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ออกมา มีปริมาณ CO, H₂ และ CH₄ ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีปริมาณสูงสุด ดังในรูปที่ 3.1

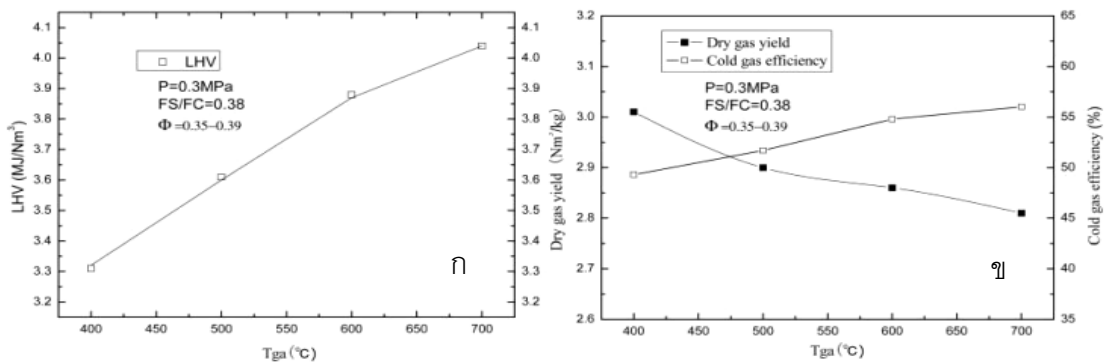


รูปที่ 3.1 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่เวลาต่างๆเมื่อมีการฉีดและไม่ฉีดไอน้ำ

FengDuanและคณะ [2] ได้ทำการทดลองแยกแก๊สเชื้อเพลิงออกจากถ่านหินบิทูมินัส จากเตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้อากาศและไอน้ำเป็นตัวกลาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคุณอรรถพล กล่าวคือ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจะสูงขึ้นหากมีปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมและมีค่าอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาภายในเตาสูง ดังในรูปที่ 3.2 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าหากมีการอุ่นอากาศก่อนเข้าเตาผลิตแก๊สจะสามารถเพิ่มค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงได้สูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และช่วยเพิ่มอัตราการแปลงคาร์บอนได้เล็กน้อยดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินต่อ ก) LHV ข) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส



รูปที่ 3.3 ผลของอุณหภูมิอากาศที่เข้าเตาต่อ ก) LHV ข) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส

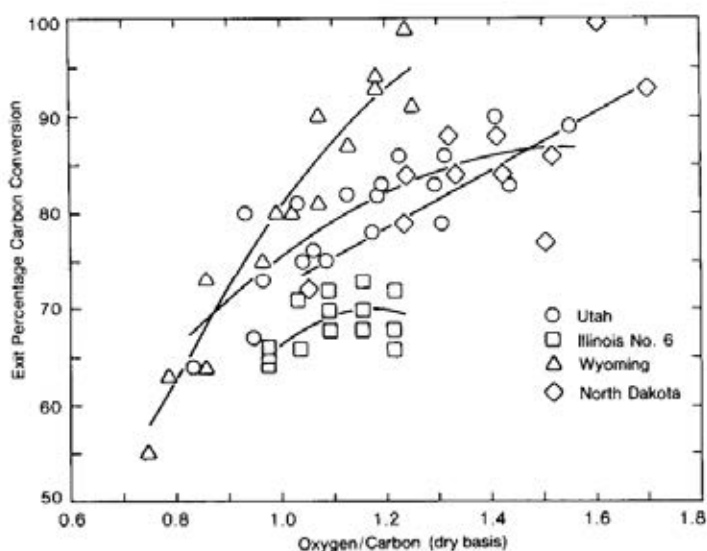
มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และ ชัยวิทย์ เสมอภาค[3] ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินลิกไนต์ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบดในช่วงอุณหภูมิ 750, 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ 1 MJ/Nm^3 ทั้งนี้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นได้มาจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงชนิดเดียวจึงทำให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย

เฉลิมพล ใจหนัก [4] ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินลิกไนต์จากจังหวัดพะเยาและลำปางในเตาแบบเบดคงที่เช่นเดียวกับงานวิจัยของอรุณพล โกละกะตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิที่ใช้ในเตาผลิตแก๊สคือ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส ในความดันหนึ่งบรรยากาศ และสัดส่วนออกซิเจนในอากาศ 40, 60 และ 100 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่สูงที่สุดคือ สัดส่วนออกซิเจนในอากาศ 100% อุณหภูมิสำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ที่ 950 องศาเซลเซียสและให้ค่าความร้อนเท่ากับ

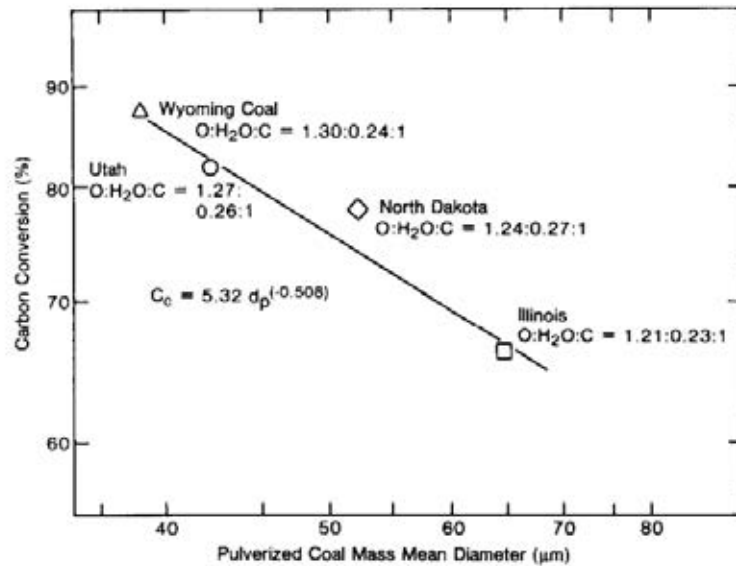
9.34 MJ/Nm³ หากอุณหภูมิทำปฏิกิริยาสูงค่าความร้อนที่ได้ก็จะมากขึ้นแต่จะถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิการหลอมเหลวของเถ้าถ้าอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายของเถ้า เถ้าจะละลายและหลอมตัวติดกับผนังของเตาผลิตแก๊ส ทำให้เกิดการอุดตัน

Brown et al.[13] ได้กล่าวถึงกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินแต่ละชนิด ประกอบด้วย ถ่านหินบิทูมินัสUtah, ถ่านหินบิทูมินัสIllinois No.6, ถ่านหินซับบิทูมินัส Wyoming และถ่านหินลิกไนต์North Dakota งานวิจัยนี้มีจุดที่น่าสนใจคือถ่านหินแต่ละชนิดก็จะมี ความสามารถในการผลิตแก๊สแตกต่างกัน ไม่จำเป็นว่าถ่านหินที่มีเกรดสูงกว่าจะเหมาะสมในการผลิตแก๊สมากกว่าถ่านหินที่มีเกรดต่ำกว่า จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าถ่านหินบิทูมินัส Illinois No.6 มีอัตราการแปลงคาร์บอนที่น้อยกว่าถ่านหินซับบิทูมินัสWyoming และถ่านหินลิกไนต์North Dakota และอัตราการแปลงคาร์บอนจะมีค่ามากขึ้นหากขนาดของถ่านหินมีขนาดเล็ก ดังในรูปที่ 3.5

นอกจากนี้ถ่านหินแต่ละชนิดก็มีเงื่อนไขในการแยกแก๊สที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ถ่านหินชนิด Illinois No.6 บิทูมินัส จะถูกจำกัดอัตราส่วน O/C ในช่วง 1-1.3 หากอยู่นอกช่วงดังกล่าวจะไม่เกิดกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.4 เปรี่เซชันการแปลงของคาร์บอนต่ออัตราส่วน O/C ของถ่านหินชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.5 เปรี่เซ่นการแปลงของคาร์บอนต่อขนาดของถ่านหิน

สุรพงษ์ คล้ายมุข[14] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากผักตบชวาอัดแท่งภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นและไหลลง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นมีค่ามากกว่าเตาชนิดอากาศไหลลงถึง 53% แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนและแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลขึ้นและอากาศไหลลง

Air Flow Rate (m ³ /s)	Combustion Zone Temperature (C°)		Average Combustible Gas From Producer Gas (%)			Higher Heating Value (HHV) (kJ/Nm ³)
	Max.	Avg.	CO	CH ₄	H ₂	
(Updraft Gasifier)						
3.59 x 10 ⁻³	952.3	777.42	33.72	0	0.15	3918.75
4.31 x 10 ⁻³	1041.3	857.56	25.60	4.14	0.66	4545.9
5.03 x 10 ⁻³	1115	916.96	22.18	0.70	0.015	2653.37
(Downdraft Gasifier)						
2.33 x 10 ⁻³	809.1	676.30	11.01	0	0.04	1786.00
3.42 x 10 ⁻³	835.9	683.83	18.43	0	0.03	2135.76
4.66 x 10 ⁻³	926.0	634.83	13.82	0	0.24	1626.95

3.2 งานวิจัยทางด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยประเภทแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็มีอย่างมากมาย หลักของสมดุลทางความร้อนและเคมีได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเตาชนิดอากาศไหลขึ้น เตาชนิดฟลูอิดไคซ์เบดและเตาชนิดเอ็นเทอร์นโพล์ งานวิจัยที่ผ่านมามีดังนี้

Anil Khadse และผู้ร่วมงาน [5] ได้สร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตแก๊สของเชื้อเพลิงชีวมวล 4 ชนิดประกอบด้วย จีเดื้อย ชานอ้อย ต้นSubabulและ แกลบข้าว ภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้นด้วยโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) แบบจำลองใช้สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นหลัก เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาศึกษาจะถูกเขียนในรูปสมการเคมี

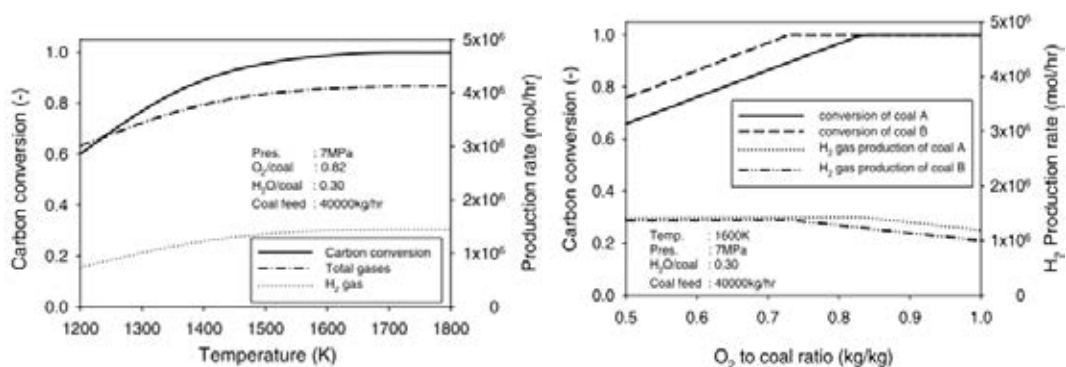


แต่ภายในแบบจำลองจะไม่ได้รวมสมดุลพลังงานเข้าไปด้วย เนื่องจากภายในแบบจำลองไม่ได้รวมผลของความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และค่าความชื้นที่มีอยู่ในชีวมวล นอกจากนี้ชีวมวลที่นำมาศึกษาถูกเขียนในรูป CH_xO_y มีความละเอียดไม่เพียงพอในการอธิบายชีวมวลเนื่องจากชีวมวลจะประกอบด้วยธาตุไนโตรเจนเช่นกัน ผลจากแบบจำลองเมื่อเทียบกับผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านมามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควรดังตารางที่ 3.2 ภายในแบบจำลองยังแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจะมีค่ามากขึ้นหากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น แต่ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจะมีค่าเกือบคงที่หากอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 1100K

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองของ Anil Khadse กับผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านมา (เชื้อเพลิง Subabul wood)

	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄
Experiment (Shashikantha,1988)	12.17	18.24	27.65	2.06
Model Channiwala(1992)	12.85	22.72	27.91	1.58
Present model	18.72	10.46	30.90	5.93

Hiroki Yoshida และผู้ร่วมงาน [6] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองของกระบวนการแยกแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเอ็นเทรนโพล์โดยใช้อากาศและไอน้ำเป็นตัวกลาง ภายในแบ่งจำลองแยกคิดเป็นสองขั้นตอนขึ้นกับสถานะในการทำปฏิกิริยา ขั้นแรกเป็นการคิดระหว่างปฏิกิริยาของแข็งกับแก๊ส เช่น ปฏิกิริยาการเผาไหม้ และปฏิกิริยาคาร์บอกซิแก๊สซิฟิเคชัน (Carboxygasification หรือ Boudouard reaction) ขั้นที่สองเป็นปฏิกิริยาระหว่างสถานะแก๊สกับแก๊สเช่น ปฏิกิริยาเทอร์แก๊สชิฟต์ (Water gas shift reaction) การแยกปฏิกิริยาเป็นสองขั้นตอนนี้เพื่อใช้ในการหาการแปลงของคาร์บอน แต่ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้รวมผลของค่าความร้อนที่สูญเสียไป ผลการศึกษาจากแบบการทดลองได้แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิภายในเตาและอัตราส่วนออกซิเจนต่อถ่านหินกับการแปลงของคาร์บอน หากอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยามากขึ้นการแปลงคาร์บอนและปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงก็จะมากยิ่งขึ้นเนื่องจากผลของปฏิกิริยาคาร์บอกซิแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ในส่วนของอัตราส่วนออกซิเจนหากออกซิเจนมากยิ่งขึ้นก็จะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากยิ่งขึ้นส่งผลให้อัตราการแปลงคาร์บอนสูงขึ้นจนเกือบเท่ากับหนึ่ง ดังในรูปที่ 3.6 ที่น่าสังเกตคือ ผลที่ได้จากแบบจำลองสมดุลทางเคมีและความร้อนจะสามารถอธิบายได้ดียิ่งขึ้นหากเป็นระบบการผลิตแก๊สขนาดใหญ่ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.022 ถึง 1.098



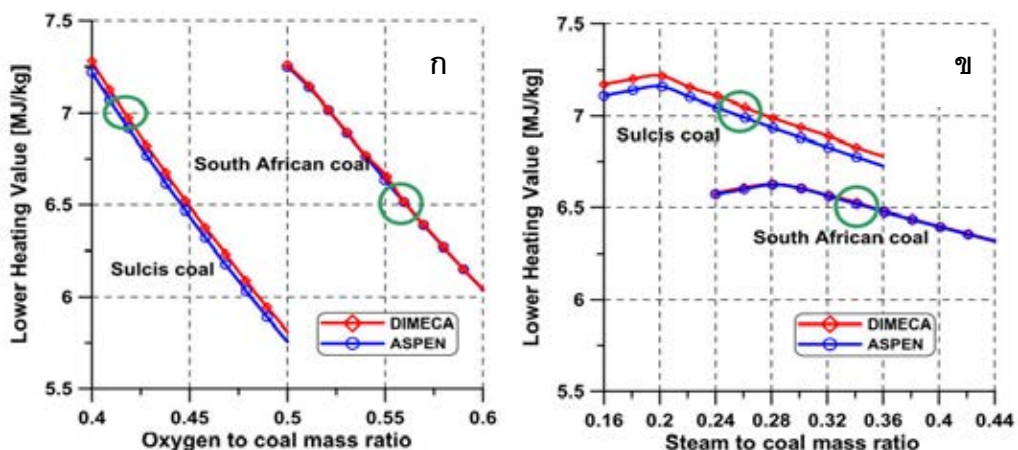
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของการแปลงของคาร์บอนกับ ก) อุณหภูมิภายในเตา ข) อัตราส่วน O₂/Coal

S. Jarungthammachote และ **A. Dutta** [7] ได้ทำการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลง สำหรับใช้กับกากของเสียของเทศบาลในประเทศไทย โดยใช้หลักการของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกและสมดุลทางเคมี กากของเสียที่นำมาศึกษาจะถูกเขียน

ในรูปสมการเคมี $CH_xO_yN_z$ และภายในแบบจำลองนี้มีการปรับปรุงแบบจำลองโดยการนำค่าคงที่มาคูณกับสมการของค่าคงที่สมดุลทำให้ตัวแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้นแต่ยังไม่คำนึงถึงผลของความร้อนที่สูญเสียและค่าการแปลงของคาร์บอน ผลของแบบจำลองได้ศึกษาผลของความชื้นในกากของเสียกับประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส เมื่อกากของเสียมีความชื้นมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้ต้องใช้อากาศในปริมาณที่มากยิ่งขึ้น เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สให้คงที่ ทำให้ปริมาณของแก๊สที่นำมาใช้ประโยชน์ (CO , H_2 และ CH_4) ลดลง รวมถึง ค่าความร้อนและประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ลดลงอีกด้วย จึงควรอบแห้งกากของเสียให้ลดปริมาณความชื้นก่อนเข้าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงผลจากแบบจำลองยังแสดงให้เห็นอีกว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลงสามารถอธิบายได้ด้วยสมดุลทางความร้อนเคมีได้เป็นอย่างดีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง มีค่าระหว่าง 0.8 ถึง 3.917

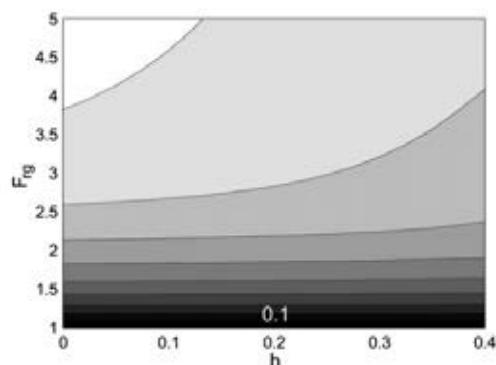
Giorgio Cau, Daniele Cocco และ Vittorio Tola[8] ได้ทำการวิเคราะห์การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินซัลซิส (Sulcis coal) และ ถ่านหินแอฟริกาใต้ (South African coal) ภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้นโดยใช้โปรแกรม DIMECA และ ASPEN PLUS เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ตัวแบบจำลองยังได้รวมผลของความร้อนที่สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม

ผลของแบบจำลองในผลงานวิจัยนี้ได้เน้นว่าถ่านหินแต่ละชนิดจะมีเงื่อนไขในการผลิตแก๊สที่จำกัดแตกต่างกัน ดังในรูปที่ 3.7 อัตราส่วนออกซิเจนต่อถ่านหินของ South African อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.6 และปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่สูงที่สุด นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากหากปริมาณอากาศและไอน้ำเปลี่ยนแปลง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการการผลิตแก๊สในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยแก๊สหลักๆคือ CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , N_2 และ H_2O ส่วนแก๊ส H_2S , COS และ Ar จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย สามารถละทิ้งได้



รูปที่ 3.7 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่อ ก) อัตราส่วนออกซิเจนต่อถ่านหิน ข) อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน

Andres Melgar และผู้ร่วมงาน[9] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจากเปลือกสนสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลลง โดยใช้หลักของสมดุลทางเคมีและความร้อน เพื่อทำนายหาปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง ค่าความร้อน และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สตามกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ เปลือกสนที่นำมาศึกษาจะถูกเขียนอยู่ในรูปสูตรทางเคมีอย่างง่าย $CH_mO_pN_qS_r$ แล้วทำปฏิกิริยากับอากาศและไอน้ำ หลังจากผลของแบบจำลองจะถูกนำไปเทียบกับงานวิจัยและผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.3 แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้รวมผลของความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาและการแปลงของคาร์บอน การใช้งานแบบจำลองจึงยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ผลจากแบบจำลองมีจุดที่น่าสนใจคือ ค่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะมีค่าน้อยลงหากความชื้นในเชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สจะมีค่าสูงก็ต่อเมื่อมีความชื้นที่ต่ำและอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศมีค่าสูง นอกจากนี้ยังให้ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ดังในรูปที่ 3.8 ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง(Root mean square error; RMSE) ในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 1.5



รูปที่ 3.8 ค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (0.1:0.1:0.9) ต่ออัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (F_{rg}) และความชื้นในเชื้อเพลิง (h)

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองของ Andre's Melgar กับแบบจำลองและผลการทดลองของ Jayah TH เชื้อเพลิง Rubber wood ความชื้น 14.7% (F_{rg} คือ อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ)

Producer gas composition (vol%)	Model	Experimental	This work	
CO	18.3	19.1	19.2	19.3
H ₂	16.4	15.5	16.6	17.6
CO ₂	11.1	11.4	11.0	11.1
CH ₄	1.1	1.1	0.2	0.4
N ₂	53.2	52.9	53.0	51.6
F_{rg}	2.3	2.39	2.3	2.4

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการคำนวณหาค่าความร้อน หรือสมมูลพลังงานจะทำได้ยากเนื่องจากถ่านหินแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างของธาตุองค์ประกอบ ประกอบกับ การหาค่า เอนทัลปีของถ่านหินที่ใช้ในการคำนวณได้ยาก จะหาได้จากการคำนวณจากค่าความร้อนสูงของถ่านหินชนิดนั้นๆ ค่าความร้อนสูงของถ่านหินแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้จากอะตอมของธาตุตามสารประกอบในถ่านหิน

S.A. Channiwalal และ P.P. Parikh[15] ได้ทำการวิเคราะห์ถึงค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชนิดของแข็งเช่นถ่านหินและชีวมวล รวมถึง ของเหลว หรือแก๊ส โดยวิเคราะห์ตามธาตุองค์ประกอบต่างๆภายในเชื้อเพลิงซึ่งได้จากการวิเคราะห์เชิงธาตุเชื้อเพลิงที่นำมาศึกษาในงานวิจัยของ S.A. Channiwalal และ P.P. Parikh มีมากกว่า 200 ตัวอย่าง และประกอบไปด้วยถ่านหินถึง 49

ตัวอย่างประกอบด้วยถ่านหินทุกชนิด ตั้งแต่ถ่านหินชั้นแอนทราไซต์จนถึงถ่านหินชั้นลิกไนต์ นอกจากนี้ยังมีการรวบรวมข้อมูลและสมการของค่าความร้อนสูงจากผลงานวิจัยและวารสารต่างๆที่ผ่านมา ในงานวิจัยนี้ได้หาสมการค่าความร้อนสูงเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยอื่นๆสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{HHV} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 0.3491(\% \text{wt C}) + 1.1783(\% \text{wt H}) + 0.1005(\% \text{wt S}) \\ - 0.1034(\% \text{wt O}) - 0.0151(\% \text{wt N}) - 0.0211(\% \text{wt Ash}) \quad (3.1)$$

จากสมการข้างต้นนี้มีขอบเขตการใช้งานคือ $0\% \leq C \leq 92.25\%$, $0.43\% \leq H \leq 25.15\%$, $0\% \leq O \leq 50\%$, $0\% \leq N \leq 5.6\%$, $0\% \leq S \leq 94.08\%$, $0\% \leq \text{Ash} \leq 71.4\%$ และ $4.745 \text{ MJ/kg} \leq \text{HHV} \leq 55.345 \text{ MJ/kg}$ มีค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute error) อยู่ที่ 1.45 เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อจำกัดเช่นกันคือไม่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีพลังงานพันธะต่ำเช่น อะซิทีลีน (C_2H_2) และ เอทิลีน (C_2H_4) รวมถึงเชื้อเพลิงที่ปริมาณต่ำสูง

จะเห็นได้ว่าการใช้หลักของสมดุลทางความร้อนเคมีได้ใช้กันมากมาย และสามารถใช้ได้กับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหลากหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีข้อจำกัดแตกต่างกัน นอกจากนี้การหาเงื่อนไขในการควบคุมการทำงานสำหรับเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจึงเป็นสิ่งจำเป็น และ จากงานวิจัยที่ผ่านมาแบบจำลองต่างๆยังขาดความสะดวกต่อการใช้งาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้สร้างโดยการใช้โปรแกรมซิมูลิงก์ (Simulink) ในแมทแลปซึ่งมีความสะดวกในการป้อนค่าและการอ่านค่าผลลัพธ์ต่างๆ รวมถึงสามารถทำความเข้าใจในตัวแบบจำลองได้ง่ายเพื่อผู้พัฒนาที่สนใจในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แบบจำลองจากงานวิจัยอื่นๆให้มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้กับเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อใช้ในเตาเผาเหล็กสำหรับอุตสาหกรรมเหล็ก

บทที่ 4

แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหิน

ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างมากมายดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา กระบวนการผลิตแก๊สนี้เป็นกระบวนการทางเคมีและความร้อน (Thermochemical process) ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ผ่านมาคือเป็นกระบวนการที่มีการใช้พลังงานความร้อนมาทำให้โครงสร้างทางเคมีของเชื้อเพลิงเกิดการแปรเปลี่ยนรูป การทำลายพันธะ หรือเป็นกระบวนการทางเคมีที่มีความสัมพันธ์กับความร้อน

การสร้างแบบจำลองสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบจำลองศูนย์มิติถึงสามมิติและแบบจำลองทางพลวัตแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดแบบจำลองศูนย์มิติ (0 dimension model) แบบจำลองชนิดนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ป้อนเข้า (Input) กับผลที่ได้ออกมา (Output) ไม่ได้คำนึงถึงปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น ความเร็ว ที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตแก๊สในขณะที่แบบจำลองชนิดอื่น ๆ นั้นจำเป็นต้องทราบขนาดที่แน่นอนของเตาผลิตแก๊สรวมถึงเงื่อนไขในการดำเนินการ (Operating condition) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นตามระยะทางของเตาดังนั้นการวิเคราะห์เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองชนิดศูนย์มิติเพื่อทำนายหาเงื่อนไขในการดำเนินการ รวมถึงสมรรถนะการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงตามทฤษฎีในเงื่อนไขการดำเนินการหนึ่งๆ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตแก๊สนั้นจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆมากมายแสดงได้ตามตาราง 4.1 ปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเตาผลิตแก๊ส เช่น ปฏิกิริยา คาร์บอ กซี แก๊ส ชิ ฟิ เค ชัน (Carboxygasification หรือ Boudouard reaction), ปฏิกิริยา สตรีม แก๊ส ชิ ฟิ เค ชัน (Steam gasification), ปฏิกิริยา วอเตอร์ แก๊ส ชิ ฟิ ค์ (Water gas shift reaction), ปฏิกิริยา สตรีม เมทานันชัน (Steam methanation reaction) และ ปฏิกิริยา ไฮโดรแก๊ส ชิ ฟิ เค ชัน หรือ เมทานันชัน (Hydrogasification หรือ Methanation) ล้วนแต่เป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดไปข้างหน้าและย้อนกลับได้และเกิดในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (ประมาณ 800 - 1,800K) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงเพียงพอที่จะให้ผลใกล้เคียงกับสภาวะสมดุล ซึ่งสภาวะสมดุลคือสภาวะที่ระบบมีสมบัติคงที่แม้จะมีการ

เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

ตารางที่ 4.1 ปฏิกิริยาภายในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ชนิดของการเกิดปฏิกิริยา	สมการเคมีของแต่ละปฏิกิริยา
Oxidation reaction	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{ความร้อน}$ $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{ความร้อน}$ $\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{ความร้อน}$
Pyrolysis*	$\text{CH}_\alpha\text{O}_\beta\text{N}_\gamma\text{S}_\theta \rightarrow y_1\text{C} + y_2\text{CO}_2 + y_3\text{H}_2 + y_4\text{CH}_4 + y_5\text{H}_2\text{O} + y_6\text{H}_2\text{S} + \text{Tar} + \dots + \text{C}_e\text{H}_p\text{O}_\sigma\text{N}_\tau\text{S}_\phi$
Boudouard reaction	$\text{C} + \text{CO}_2 + \text{ความร้อน} \longleftrightarrow 2 \text{CO}$
Steam gasification reaction	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} + \text{ความร้อน} \longleftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$
Water gas shift reaction	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} + \text{ความร้อน} \longleftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
Methanation reaction	$\text{C} + 2\text{H}_2 \longleftrightarrow \text{CH}_4 + \text{ความร้อน}$
Steam methanation reaction	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \longleftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

*ไม่สามารถทราบปฏิกิริยาที่แน่นอน^[16]

4.1 แบบจำลองทางสมดุลเคมีและความร้อน (Thermochemical equilibrium modeling)

4.1.1 สมมุติฐานของแบบจำลอง

แบบจำลองทางสมดุลเคมีและความร้อนนี้จะตั้งอยู่บนสมมุติฐานต่อไปนี้

1. ถ่านหินสามารถแทนด้วยสูตรทางเคมีอย่างง่ายในรูป $\text{CH}_\alpha\text{O}_\beta\text{N}_\gamma\text{S}_\theta$
2. เชื้อเพลิง อากาศ และไอน้ำ ที่ป้อนเข้าเตาถูกผสมเข้ากันเป็นอย่างดี
3. ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตแก๊สประกอบด้วย CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O , N_2 , SO_2 และ C(S)
4. ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตแก๊สมีสมบัติทางกายภาพและความร้อนเหมือนแก๊สอุดมคติ
5. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วเพียงพอ และเวลาในการทำปฏิกิริยานานเพียงพอในการเข้าสู่สภาวะสมดุล
6. ปฏิกิริยาภายในเตาสามารถอธิบายด้วยสมดุลทางความร้อนและเคมี และไม่คำนึงถึงลำดับในการเกิดปฏิกิริยาและการแตกตัวระหว่างปฏิกิริยา
7. ไนโตรเจนเป็นแก๊สเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยา

4.1.2 การจําลองแบบจําลอง

ถ่านหินที่นำมาใช้ในแบบจําลองนี้จะถูกนำมาเขียนอยู่ในรูป $CH_\alpha O_\beta N_\gamma S_\theta$ โดยใช้การวิเคราะห์เชิงธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านหินแต่ละชนิด ซึ่งการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของถ่านหินจะอยู่ในรูปของร้อยละ โดยมวลแบบปราศจากความชื้นและเถ้า (%wt DAF)

$$\alpha = \frac{\%wt H \times MW C}{\%wt C \times MW H} \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{\%wt O \times MW C}{\%wt C \times MW O} \quad (4.2)$$

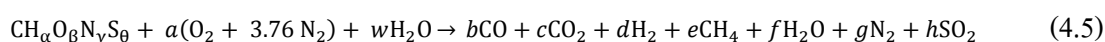
$$\gamma = \frac{\%wt N \times MW C}{\%wt C \times MW N} \quad (4.3)$$

$$\theta = \frac{\%wt S \times MW C}{\%wt C \times MW S} \quad (4.4)$$

เมื่อ MW คือ มวลโมเลกุลของแต่ละธาตุองค์ประกอบในถ่านหิน

α, β, γ และ θ คือ เลขอะตอมของไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) และ ซัลเฟอร์ (S) ต่อเลขอะตอมของคาร์บอน (C)

หลังจากการแทนถ่านหินด้วยสูตรทางเคมีถ่านหินจะเข้าทำปฏิกิริยากับอากาศและไอน้ำแล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมาประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), ไฮโดรเจน (H₂), มีเทน (CH₄), ไอน้ำ (H₂O), ไนโตรเจน (N₂) และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) สามารถเขียนสมการการผลิตแก๊สได้ดังนี้



เมื่อ a คือ โมลของอากาศ

w คือ โมลของไอน้ำที่ใส่ให้กับระบบและที่มีอยู่ในถ่านหิน

b, c, d, e, f, g และ h คือ โมลของผลิตภัณฑ์

ไอน้ำที่เข้าทำปฏิกิริยากับถ่านหินแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือส่วนที่ป้อนเข้าไปเพิ่มกับส่วนที่มีอยู่ในถ่านหิน ปริมาณไอน้ำที่อยู่ในถ่านหินนี้สามารถหาได้จากการวิเคราะห์เชิง

อุตสาหกรรม(Proximate analysis) จะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยมวล ปริมาณของไอน้ำหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความชื้นในถ่านหินโดยมวล (MC, \%wt)} &= \frac{\text{Mass of water}}{\text{Mass of wet coal}} \times 100\% \\ \text{MC} &= \frac{MW_{\text{water}} \times w}{MW_{\text{dry coal}} + (MW_{\text{water}} \times w)} \times 100\% \\ \therefore \text{ปริมาณไอน้ำโดยโมล (w)} &= \frac{MW_{\text{coal}} \times \text{MC}}{MW_{\text{water}} \times (1 - \text{MC})} \quad (4.6) \end{aligned}$$

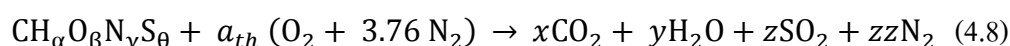
ในส่วนของอากาศ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่แล้วว่ากระบวนการผลิตแก๊สนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อากาศไม่เพียงพอ อากาศจะป้อนให้กับระบบในรูปของอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio; ϕ) นิยามว่าเป็นปริมาณ ไร่หน่วยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดีกับปริมาณอากาศที่ใช้ในการผลิตแก๊ส ค่าอัตราส่วนสมมูลนี้ต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง (Fuel-rich mixture; $\phi < 1$) หมายความว่า ปริมาณอากาศที่ใช้ในการผลิตแก๊สน้อยกว่าอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบบสมบูรณ์

$$\phi = \frac{a}{a_{th}} \quad (4.7)$$

เมื่อ a_{th} คือ โมลของอากาศจากการเผาไหม้ตามทฤษฎี

a คือ โมลของอากาศที่ใช้ในการผลิตแก๊ส

โมลของอากาศจากการเผาไหม้ตามทฤษฎี (a_{th}) หรือการเผาไหม้แบบสมบูรณ์หาได้จากการดุลสมการการเผาไหม้ของถ่านหินผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์จะประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้



จากการดุลอะตอมทั้งสองฝั่งของสมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของถ่านหินจะสามารถหาปริมาณโมลของอากาศในการเผาไหม้ได้ เขียนด้วยชุดสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ดุลคาร์บอนอะตอม (C balance)} \quad 1 = x \quad (4.9)$$

$$\text{ดุลไฮโดรเจนอะตอม (H balance)} \quad \alpha = 2y \quad (4.10)$$

$$\text{ดุลซัลเฟอร์อะตอม (S balance)} \quad \theta = z \quad (4.11)$$

$$\text{ดุลออกซิเจนอะตอม (O balance)} \quad 2a_{th} + \beta = 2x + y + 2z = 2 + \frac{\alpha}{2} + 2\theta \quad (4.12)$$

$$\therefore a_{th} = 1 + \frac{\alpha}{4} + \theta - \frac{\beta}{2} \quad (4.13)$$

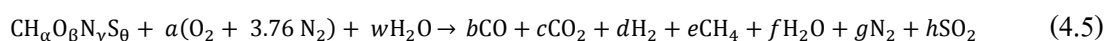
นอกจากนี้การป้อนอากาศให้กับระบบสามารถทำให้อยู่ในรูปอัตราส่วนโดยมวลของอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ได้ด้วยเช่นกันอัตราส่วนโดยมวลอากาศต่อเชื้อเพลิงแสดงด้วยสมการดังนี้

$$A/F = \frac{4.76 \times a \times MW_{air}}{MW_{Coal}} \quad (4.14)$$

เมื่อ MW_{air} มีค่าเท่ากับ 28.85

$$MW_{coal} = MW_C + (\alpha \times MW_H) + (\beta \times MW_O) + (\gamma \times MW_N) + (\theta \times MW_S) \quad (4.15)$$

จากสมการเคมีภายในแบบจำลองจะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าถึง 8 ตัวแปร ประกอบไปด้วย b, c, d, e, f, g, h และอนุกรมในการเกิดปฏิกิริยาดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาสมการเพื่อช่วยในการหาค่าตัวแปรทั้ง 8 ตัวแปร



4.1.3 สมดุลมวล

เราสามารถดุลอะตอมได้จากการดุลอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ทั้งสองฝั่งของสมการได้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{ดุลคาร์บอนอะตอม} \quad 1 \times (\%CC) = b + c + e \quad (4.16)$$

$$\text{ดุลไฮโดรเจนอะตอม} \quad \alpha + 2w = 2d + 4e + 2f \quad (4.17)$$

$$\text{ดุลออกซิเจนอะตอม} \quad \beta + 2a + w = b + 2c + f + 2h \quad (4.18)$$

$$\text{ดุลไนโตรเจนอะตอม} \quad \gamma + 7.52a = 2g \quad (4.19)$$

$$\text{ดุลซัลเฟอร์อะตอม} \quad \theta = h \quad (4.20)$$

เมื่อ %CC คือเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน จะกล่าวในหัวข้อ 4.1.5

ภายในเตาผลิตแก๊สนั้นจะมีปฏิกิริยาในชั้นของรีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ ดังนั้นที่เวลาหนึ่งๆ สภาวะหนึ่งๆ จะเกิดสมดุลทางเคมีเกิดขึ้น ทำให้เราสามารถนำค่าคงที่สมดุลเข้ามาช่วยคำนวณโมลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขสภาวะสมดุลได้ ปฏิกิริยาในส่วนรีดักชันที่เกี่ยวข้องกับเตาผลิตแก๊สนั้นแบ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส และปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับแก๊ส ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับแก๊สจะสามารถนำไปหาค่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนที่เกิดขึ้นที่สภาวะนั้นๆ ส่วนปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊สประกอบด้วยปฏิกิริยาหลักๆ คือปฏิกิริยาสตริมเมทานเนชัน (Steam Methanation reaction) และปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water gas shift reaction) ที่เกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอกซีแก๊สซิฟิเคชันและปฏิกิริยาสตริมแก๊สซิฟิเคชัน [5] ส่วนปฏิกิริยาในชั้นการเผาไหม้ (Oxidation zone) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [6]



ดังนั้นค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant; K) ทั้งสองปฏิกิริยาข้างต้นเขียนได้ดังนี้

ปฏิกิริยาสตริมเมทานเนชัน

$$K_1 = \frac{(P_{\text{CO}}/P_{\text{ref}})(P_{\text{H}_2}/P_{\text{ref}})^3}{(P_{\text{CH}_4}/P_{\text{ref}})(P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{ref}})} = \frac{x_{\text{CO}}x_{\text{H}_2}^3}{x_{\text{CH}_4}x_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right)^2 = \frac{b \times d^3}{e \times f \times N_{\text{tot}}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right)^2 \quad (4.21)$$

ปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊สชิฟต์

$$K_2 = \frac{(P_{\text{CO}_2}/P_{\text{ref}})(P_{\text{H}_2}/P_{\text{ref}})}{(P_{\text{CO}}/P_{\text{ref}})(P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{ref}})} = \frac{x_{\text{CO}_2} \times x_{\text{H}_2}}{x_{\text{CO}} \times x_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{c \times d}{b \times f} \quad (4.22)$$

ค่าคงที่สมดุลคำนวณได้จากค่าของพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG_T^0) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆจะดำเนินไปในทิศทางที่มีค่าฟังก์ชันกิบส์ที่ลดลง และปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลเมื่อค่าฟังก์ชันกิบส์มีค่าต่ำสุด ($dG_{T,p} \leq 0$) นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิหรือความดันมีการเปลี่ยนแปลง สภาวะสมดุลก็จะเปลี่ยนแปลงไปโดยจะปรับตัวเข้าสู่สมดุลที่สภาวะที่มีค่าฟังก์ชันกิบส์ต่ำที่สุดใหม่ที่อุณหภูมิและความดันใหม่ ปฏิกิริยาเคมีที่สภาวะหนึ่งๆจะไม่สามารถดำเนินไป

ในทิศทางที่ทำให้ค่าฟังก์ชันกิบส์มีค่าเพิ่มขึ้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลและฟังก์ชันกิบส์เขียนได้ดังนี้

$$K = \exp\left(\frac{-\Delta G_T^0}{R_u T}\right) \quad (4.23)$$

เมื่อ R_u คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Universal gas constant) เท่ากับ $8.314 \frac{(\text{m}^3)(\text{Pa})}{(\text{K})(\text{mol})}$

T คือ อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาผลิตแก๊ส

เพราะฉะนั้น เขียนค่าคงที่สมดุลในรูปของพลังงานอิสระกิบส์และ โมลของผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

$$K_1 = \frac{b \times d^3}{e \times f \times N_{\text{tot}}^2} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right)^2 = \exp\left(\frac{-[\bar{g}_{f,\text{CO}}^0 + 3\bar{g}_{f,\text{H}_2}^0 - \bar{g}_{f,\text{CH}_4}^0 - \bar{g}_{f,\text{H}_2\text{O}}^0]}{R_u T}\right) \quad (4.24)$$

$$K_2 = \frac{c \times d}{b \times f} = \exp\left(\frac{-[\bar{g}_{f,\text{H}_2}^0 + \bar{g}_{f,\text{CO}_2}^0 - \bar{g}_{f,\text{CO}}^0 - \bar{g}_{f,\text{H}_2\text{O}}^0]}{R_u T}\right) \quad (4.25)$$

ค่าพลังงานอิสระกิบส์ $\bar{g}_{f,\text{CH}_4}^0$, \bar{g}_{f,H_2}^0 , $\bar{g}_{f,\text{CO}_2}^0$, $\bar{g}_{f,\text{CO}}^0$ และ $\bar{g}_{f,\text{H}_2\text{O}}^0$ หาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ จะเห็นได้ว่าค่าคงที่สมดุลนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน

4.1.4 สมดุลพลังงาน

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อพิจารณากระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว พลังงานรวมของระบบและสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบเป็นศูนย์ กล่าวคือพลังงานรวมที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับพลังงานรวมที่ออกจากระบบ หากไม่คำนึงถึงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เปลี่ยนไป สมดุลพลังงานสามารถเขียนได้ว่า

$$Q_{\text{in}} + W_{\text{in}} + H_{\text{in}} = Q_{\text{out}} + W_{\text{out}} + H_{\text{out}} \quad (4.26)$$

เมื่อ H คือ เอนทัลปีหรือพลังงานของสารที่มีไหล

เนื่องจากกระบวนการผลิตแก๊สไม่มีงานเข้ามาเกี่ยวข้อง W_{in} และ W_{out} มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าความร้อนที่เข้าระบบ (Q_{in}) เท่ากับศูนย์ ส่วนค่าเอนทัลปีที่เข้าระบบและออกจากระบบคือเอนทัลปีของสารตั้งต้นรวมกับสารตัวกลาง (H_{react}) และเอนทัลปีของสารผลิตภัณฑ์ (H_{prod}) ตามลำดับ

ถ้าระบบไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเลย ($Q_{out} = 0$) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะมีค่าสูงสุด ซึ่งจะเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิเปลวไฟ อะเดียแบติก (Adiabatic flame) จากสมการ (4.26) จะได้

$$H_{\text{reac}} = H_{\text{prod}} \quad (4.27)$$

แต่หากมีความร้อนที่สูญเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมสมการที่ (4.26) เขียนเป็น

$$H_{\text{reac}} = H_{\text{prod}} + Q_{\text{loss}} \quad (4.28)$$

$$\sum_{i=\text{reac}} N_i \bar{h}_i = \sum_{j=\text{prod}} N_j \bar{h}_j + Q_{\text{loss}} \quad (4.29)$$

เมื่อ N_i และ N_j คือจำนวน โมลของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ตามลำดับต่อหนึ่งโมลของถ่านหิน เอนทัลปีของส่วนประกอบทางเคมีที่สถานะใดๆที่กำหนดคนั้นจะเท่ากับผลรวมของค่าเอนทัลปีของการก่อเกิด ($\bar{h}_{f,i}^o(T_{ref})$) ของส่วนประกอบนั้นที่สถานะมาตรฐานกับค่าเอนทัลปีสัมผัส ($\bar{h}_i(T) - \bar{h}_i^o(T_{ref})$) ของส่วนประกอบนั้นๆ เทียบกับสถานะมาตรฐาน ($\bar{h}_i^o(T_{ref})$) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^o(T_{ref}) + [\bar{h}_i(T) - \bar{h}_i^o(T_{ref})] \quad (4.30)$$

เปอร์เซ็นต์ความร้อนที่สูญเสียคือค่าความร้อนที่สูญเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อค่าความร้อนที่เข้าสู่ระบบเขียนได้ดังนี้

$$\% \text{ Heat loss} = \frac{H_{\text{reac}} - H_{\text{prod}}}{H_{\text{reac}}} \times 100\% \quad (4.31)$$

ค่าเอนทัลปีการก่อเกิดของถ่านหิน ($\bar{h}_{f,\text{Coal}}^o(298\text{K})$) คำนวณได้จากค่าความร้อนสูง[15] ขึ้นอยู่กับอะตอมของธาตุสารประกอบในถ่านหินจากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของถ่านหินมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{HHV} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = & 0.3491(\% \text{wt C}) + 1.1783(\% \text{wt H}) + 0.1005(\% \text{wt S}) \\ & - 0.1034(\% \text{wt O}) - 0.0151(\% \text{wt N}) - 0.0211(\% \text{wt Ash}) \quad (4.32) \end{aligned}$$

จากสมการข้างต้นนี้มีขอบเขตคือ $0\% < C < 92.25\%$, $0.43\% < H < 25.15\%$, $0\% < O < 50\%$, $0\% < N < 5.6\%$, $0\% < S < 94.08\%$, $0\% < \text{Ash} < 71.4\%$ และ $4.745\text{MJ/kg} < \text{HHV} < 55.345\text{ MJ/kg}$ โดยมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 1.45 เปอร์เซ็นต์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ [16] สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{LHV} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = \text{HHV} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) - 9 h_{\text{fg,H}_2\text{O}} (\% \text{wt H}) \quad (4.33)$$

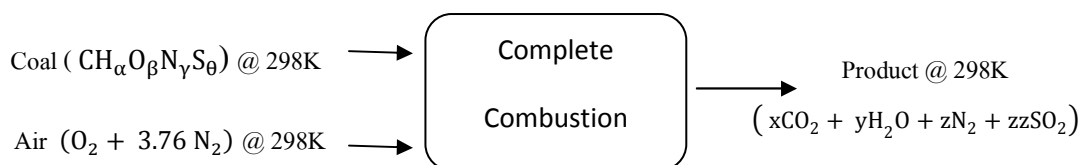
เมื่อค่า $h_{\text{fg,H}_2\text{O}}$ คือค่าเอนทัลปีของการระเหยของน้ำที่ความดัน 101.325 kPa เท่ากับ 2.258 MJ/kg

%wt H คือ อัตราส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในการวิเคราะห์เชิงธาตุ

หลังจากนั้นค่าความร้อนต่ำจะนำไปหาค่าเอนทัลปีของถ่านหินได้โดยผ่านกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 4.1 ถ่านหินกับอากาศจะมีสถานะเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 298K และความดัน 1 บรรยากาศก่อนเข้ากระบวนการเผาไหม้ เขียนสมการได้เป็น

$$\bar{h}_{\text{f,Coal}}^{\circ} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) = \text{LHV}_{\text{coal}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) + \sum_{\substack{i=\text{product} \\ \text{under complete} \\ \text{combustion}}} (n_i \bar{h}_{\text{f,i}}^{\circ}) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) \quad (4.34)$$

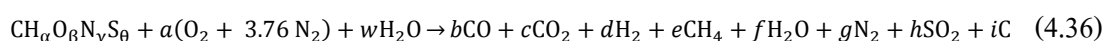
$$\bar{h}_{\text{f,Coal}}^{\circ} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) = \text{LHV}_{\text{coal}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) + (-393522x - 241826y - 296842zz) \quad (4.35)$$



รูปที่ 4.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ของถ่านหิน

4.1.5 เปอร์เซ็นต์การแปลงของคาร์บอน

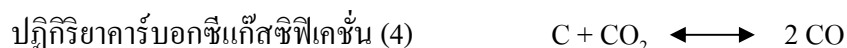
จากสมการสมดุลมวล สมการที่ 4.16 เห็นได้ว่ามีพจน์ของการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน (%CC) อยู่ การแปลงของคาร์บอนนี้หาจากการตัดแปลงสมการการผลิตแก๊ส โดยเพิ่มพจน์ของ C อะตอมลงในสมการ (4.5) สมการเคมีเมื่อรวมผลของการแปลงของคาร์บอนสามารถเขียนสมการเคมีได้ดังนี้



จะเห็นว่า มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพิ่มอีกหนึ่งตัวคือ i ดังนั้นจึงต้องเขียนสมมูลมวลของคาร์บอนอะตอมใหม่ดังนี้

$$\text{ดุลคาร์บอนอะตอม} \quad 1 = b + c + e + i \quad (4.37)$$

ค่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนหาได้จากปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับแก๊ส ประกอบด้วย ปฏิกิริยาเมทานเนชั่น (Methanation reaction) ปฏิกิริยาสตริมแก๊สซิฟิเคชั่น (Steam gasification reaction) และปฏิกิริยาคาร์บอกซิแก๊สซิฟิเคชั่น (Carboxygasification หรือ Boudouard reaction) สองปฏิกิริยาหลังเกิดจากการแยกปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟิเคชั่น สามารถเขียนปฏิกิริยาและสมการค่าคงที่สมดุลของทั้งสามปฏิกิริยาได้ดังนี้



ปฏิกิริยาสตริมแก๊สซิฟิเคชั่น

$$K_3 = \frac{(P_{\text{CO}}/P_{\text{ref}})(P_{\text{H}_2}/P_{\text{ref}})}{(P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{ref}})} = \frac{x_{\text{CO}} \times x_{\text{H}_2}}{x_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) = \frac{b \times d}{f \times N_{\text{tot}}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) \quad (4.38)$$

ปฏิกิริยาคาร์บอกซิแก๊สซิฟิเคชั่น

$$K_4 = \frac{(P_{\text{CO}}/P_{\text{ref}})^2}{(P_{\text{CO}_2}/P_{\text{ref}})} = \frac{x_{\text{CO}}^2}{x_{\text{CO}_2}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) = \frac{b^2}{c \times N_{\text{tot}}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) \quad (4.39)$$

ปฏิกิริยาเมทานเนชั่น

$$K_5 = \frac{P_{\text{CH}_4}/P_{\text{ref}}}{(P_{\text{H}_2}/P_{\text{ref}})^2} = \frac{x_{\text{CH}_4}}{x_{\text{H}_2}^2} \left(\frac{P_{\text{ref}}}{P} \right) = \frac{e \times N_{\text{tot}}}{d^2} \left(\frac{P_{\text{ref}}}{P} \right) \quad (4.40)$$

และเขียนค่าคงที่สมดุลในรูปของพลังงานอิสระกิบส์และโมลของผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

$$K_3 = \frac{b \times d}{f \times N_{\text{tot}}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) = \exp \left(\frac{-[\bar{g}_{\text{f,CO}}^0 + \bar{g}_{\text{f,H}_2}^0 - \bar{g}_{\text{f,H}_2\text{O}}^0]}{R_u T} \right) \quad (4.41)$$

$$K_4 = \frac{b^2}{c \times N_{\text{tot}}} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) = \exp \left(\frac{-[2\bar{g}_{\text{f,CO}}^0 - \bar{g}_{\text{f,CO}_2}^0]}{R_u T} \right) \quad (4.42)$$

$$K_5 = \frac{e^{\times N_{\text{tot}}}}{d^2} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) = \exp \left(\frac{-[\bar{g}_{f,\text{CH}_4}^0 - 2 \bar{g}_{f,\text{H}_2}^0]}{R_u T} \right) \quad (4.43)$$

ดังนั้นจะมีตัวแปรทั้งหมด 8 ตัวแปร ประกอบไปด้วย b, c, d, e, f, g, h และ i และสมการทั้งหมด 8 สมการประกอบไปด้วยสมการมวล 5 สมการ และสมการค่าคงที่สมดุลอีก 3 สมการ ขั้นตอนการคำนวณแสดงได้ในหัวข้อ 4.2 หลังจากได้โมลของคาร์บอนอะตอมมาแล้วจะสามารถนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์การแปลงของคาร์บอนได้ด้วยความสัมพันธ์

$$\% \text{Carbon conversion (\%CC)} = (1 - i) \times 100\% \quad (4.44)$$

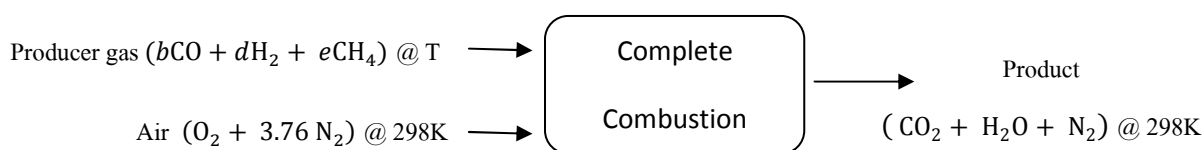
4.1.6 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์, ไฮโดรเจน, มีเทน, ไอน้ำ, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะถูกแยกเอาแก๊สเชื้อเพลิงออกมาประกอบไปด้วยแก๊สหลักๆคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทนอีกเล็กน้อย ส่วนแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกนำไปคำนวณหาปริมาณมลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มานี้นำมาหาค่าความร้อนได้จากสมการ

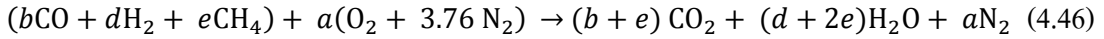
$$\text{LHV}_{\text{Producer gas}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kmol}_{\text{coal}}} \right) = 282.933b + 802.303e + 241.827d \quad (4.45)$$

เมื่อ b, e และ d คือโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทนและไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงตามลำดับ

แต่ในงานวิจัยนี้เนื่องจากว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ออกมาจากเตาผลิตแก๊สนั้นจะมีอุณหภูมิที่สูงและถูกนำไปใช้งานต่อในการให้ความร้อนกับเหล็ก ดังนั้นแก๊สเชื้อเพลิงที่ร้อนจะส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิงมีปริมาณที่สูง ค่าความร้อนเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงในรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 การเผาไหม้สมบูรณ์ของแก๊สเชื้อเพลิง



$$LHV_{\text{Producer gas}} = [b\bar{h}_{\text{CO}}(T) + d\bar{h}_{\text{H}_2}(T) + e\bar{h}_{\text{CH}_4}(T)] - [(b + e)\bar{h}_{f,\text{CO}_2}^o(T_{\text{ref}}) + (d + 2e)\bar{h}_{f,\text{H}_2\text{O}}^o(T_{\text{ref}})] \quad (4.47)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^o(T_{\text{ref}}) + [\bar{h}_i(T) - \bar{h}_{f,i}^o(T_{\text{ref}})] \quad (4.48)$$

4.1.7 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สหรือประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส หรือประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ (First law thermodynamic efficiency or Cold gas efficiency) แสดงได้จากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานที่ออกจากเตาผลิตแก๊สกับค่าพลังงานที่เข้าเตาผลิตแก๊ส

$$\eta_{\text{cold gas}} = \frac{LHV_{\text{Producer gas}}}{LHV_{\text{coal}}} \quad (4.49)$$

4.1.8 ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์

เป็นประสิทธิภาพที่บ่งบอกถึงคุณภาพของพลังงานหรือศักยภาพในการทำงานของระบบ และการสูญเสียพลังงานออกไปเนื่องมาจากความผันกลับไม่ได้ของระบบสามารถแสดงด้วย ความสัมพันธ์ของเอกซ์เซอจี (Exergy) ที่เข้าและออกจากระบบดังนี้

$$\eta_{II} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{E_{\text{Producer gas}}}{E_{\text{coal}} + E_{\text{gasifying agent}}} \quad (4.50)$$

ค่าเอกซ์เซอจีสามารถแบ่งพลังงานออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆคือ เอกซ์เซอจีทางกายภาพ (Physical exergy) และเอกซ์เซอจีทางเคมี (Chemical exergy) ในงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นค่าเอกซ์เซอจีเขียนได้ว่า

$$E = E_{\text{Chemical}} + E_{\text{physical}} \quad (4.51)$$

ค่า E_{chemical} หรือเอกซ์เซอจีทางเคมี คือ ความสามารถในการทำงานสูงสุดที่สารตั้งต้นถูกป้อนในสภาวะสิ่งแวดล้อมและถูกปล่อยออกมาที่สภาวะตาย (Dead state) หรือสภาวะที่สารกายอยู่ในสมดุลทางอุณหภาพ ทางกล ทางเคมี และสิ่งแวดล้อมหาได้จาก

$$\bar{e}_{\text{Chemical,mix}} = \sum_i x_i \bar{e}_{\text{Chemical},i} + R_u T_o \sum_i x_i \ln x_i \quad (4.52)$$

เมื่อ x_i คืออัตราส่วนโดยโมลของสาร i และค่า $\bar{\epsilon}_{\text{Chemical},i}$ ของแก๊สต่างๆ แสดงได้ในตารางที่ 4.2

ค่า E_{physic} หรือเอ็กซ์เซอจีทางกายภาพ คือ ความสามารถในการทำงานสูงสุดที่สารตั้งต้นสามารถทำได้ เมื่อเทียบกับสิ่งแวดล้อม (T_{ref} และ P_{ref}) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\bar{\epsilon}_{\text{Physical},\text{mix}} = \sum_i x_i [(\bar{h}_i - \bar{h}_{\text{ref}}) - T_o(\bar{s}_i - \bar{s}_{\text{ref}})] \quad (4.53)$$

T_{ref} และ P_{ref} คืออุณหภูมิและความดันที่สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 25°C และ 101.325 kPa

h_o และ s_o คือเอนทัลปีและเอนโทรปีที่อุณหภูมิและความดันที่สภาวะมาตรฐาน

ตารางที่ 4.2 ค่าเอ็กซ์เซอจีทางเคมีที่สภาวะมาตรฐาน (Standard chemical exergy) ของแก๊สแต่ละชนิด ($T_{\text{ref}} = 298.15\text{K}$ และ $P_{\text{ref}} = 101.325 \text{ kPa}$) [17]

Substance	Standard chemical exergy $\bar{\epsilon}_{\text{Chemical}}$ (kJ/kmol)
CO	275,430
CO ₂	20,140
H ₂	238,490
H ₂ O (g)	11,710
CH ₄	836,510
N ₂	720
SO ₂	303,500
O ₂	3,970
C (s)	410,820

ในกรณีของถ่านหินค่าเอ็กซ์เซอจี[17] หาได้จากความสัมพันธ์

$$\epsilon_{\text{coal}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = \varphi_{\text{dry}} [LHV + (MC)(h_{fg,w})] + [\epsilon_s^o - LHV_s^o] S \quad (4.54)$$

ค่า h_{fg,H_2O} คือค่าเอนทัลปีของการระเหยของน้ำที่ความดัน 101.325 kPa มีค่าเท่ากับ 2,258 MJ/kg, S คือสัดส่วนโดยมวลของซัลเฟอร์ในถ่านหินหรือ %wt S สำหรับซัลเฟอร์, ε_S^O เท่ากับ 18,676 kJ/kg, LHV_s มีค่าเท่ากับ 9,259 kJ/kg และค่า φ_{dry} หาได้จาก อัตราส่วนโดยมวลของ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C), ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ ไนโตรเจนต่อคาร์บอน (N/C) จากการวิเคราะห์เชิงธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

สำหรับ $O/C < 0.667$ [17]

$$\varphi_{dry} = 1.0437 + 0.1882 \left(\frac{H}{C}\right) + 0.061 \left(\frac{O}{C}\right) + 0.0404 \left(\frac{N}{C}\right) \quad (4.55)$$

สำหรับ $2.67 > O/C > 0.667$ [17]

$$\varphi_{dry} = \frac{1.0438 + 0.1882 \left(\frac{H}{C}\right) - 0.2509 \left[1 + 0.7256 \left(\frac{H}{C}\right)\right] + 0.0383 \left(\frac{N}{C}\right)}{1 - 0.3035 \left(\frac{O}{C}\right)} \quad (4.56)$$

จากสมการ (4.45) สมการเอกซ์เซอซีของถ่าน เขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ว่า [17]

$$\varepsilon_{coal} \left(\frac{kJ}{kg}\right) = \varphi_{dry} [LHV + 2258(MC)] + 9417(\%wt S) \quad (4.57)$$

4.1.9 การปล่อยมลพิษ

ค่ามลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศในงานวิจัยให้เป็นปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สามารถหาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในหน่วยหนึ่งในล้านส่วน (ppm) จากสมการ

$$SO_2 \text{ emission (ppm)} = X_{SO_2} \times 10^6 = \frac{h}{N_{tot}} \times 10^6 \quad (4.58)$$

เมื่อ X_{SO_2} คืออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

4.1.10 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้เพื่อทดแทนน้ำมันเตา

การหาค่าปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการให้ความร้อนกับเหล็กสามารถนำมาคิดโดยเริ่มจากการหาค่าความร้อนที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนกับเหล็ก ซึ่งภายในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง การหาค่าความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้จึงหาจาก

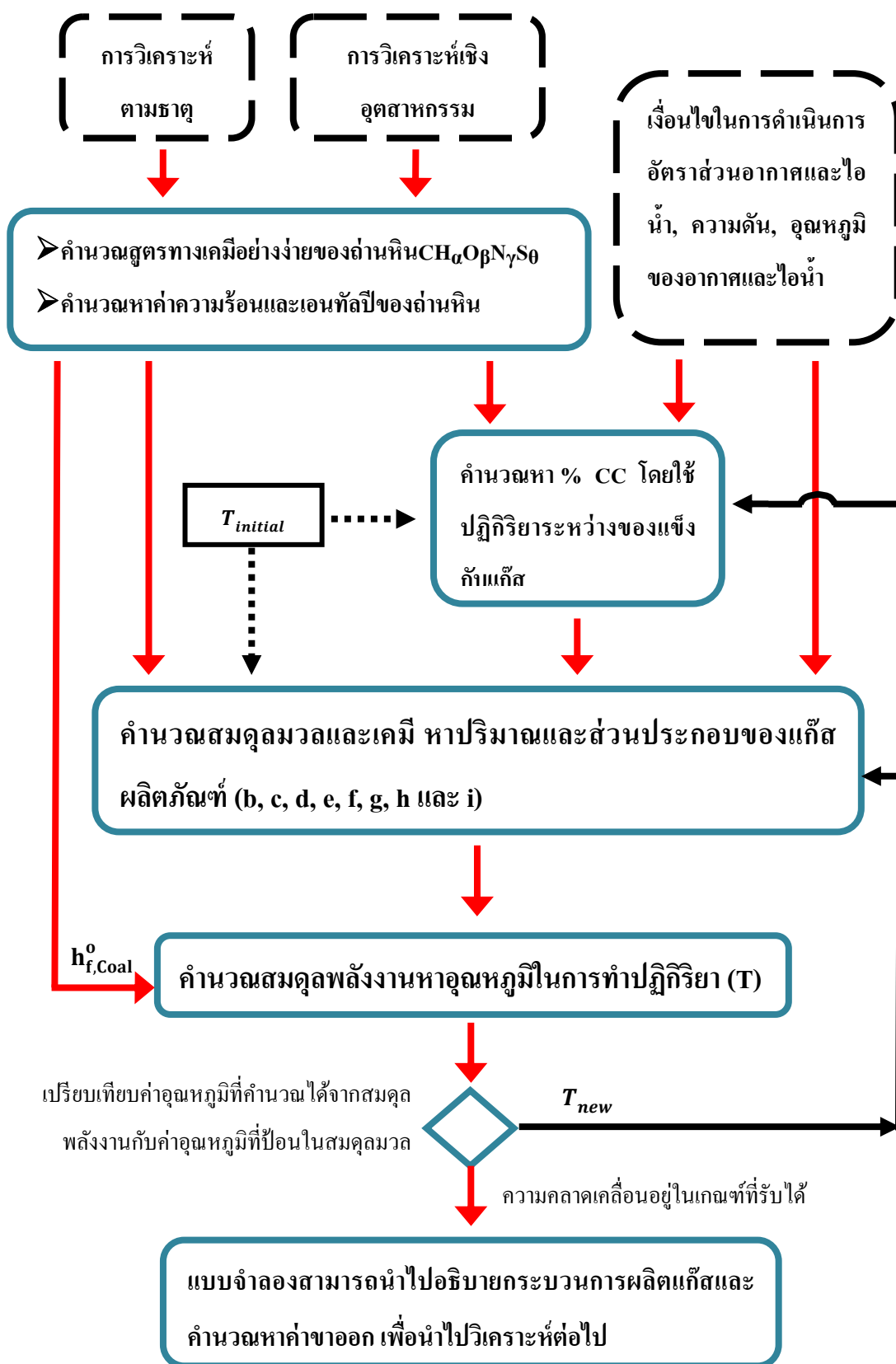
$$\text{ค่าความร้อนทั้งหมด (MJ)} = \text{ปริมาณน้ำมันเตาที่ต้องใช้ (Liter)} \times \text{ค่าความร้อนของน้ำมันเตา (MJ/liter)} \quad (4.59)$$

จากแบบจำลองสมดุลทางเคมีและความร้อน สามารถหาค่าความร้อนต่อการใช้ถ่านหินหนึ่ง กิโลกรัมได้จาก

$$\text{จำนวนถ่านหินที่ต้องใช้ (kg)} = \frac{\text{ค่าความร้อนทั้งหมด (MJ)}}{\text{ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ต่อถ่านหิน 1 กิโลกรัม} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)} \quad (4.60)$$

4.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Calculation procedure)

แบบจำลองสมดุลทางเคมีและความร้อนนี้ประกอบด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า 9 ตัวแปร คือ ส่วนประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ (b, c, d, e, f, g, h, i) และอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา (T) การคำนวณเริ่มจากการคำนวณสูตรทางเคมีอย่างง่าย ค่าความร้อนของถ่านหิน (กรณีที่ไม่ทราบค่า) และค่าเอนทัลปีของถ่านหิน ($\bar{h}_{f, \text{Coal}}^0$) แล้วสมมติค่าอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาภายในเตาเริ่มต้น นำไปหาค่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนจากปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและแก๊ส เพื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไปคำนวณหาโมลของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นนำโมลของผลิตภัณฑ์มาเข้าสมดุลพลังงานหาอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา คำนวณเข้าไปมาเรื่อยๆจนได้อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาแล้ว นำโมลของผลิตภัณฑ์อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามาหาค่าความร้อน ประสิทธิภาพทางความร้อน ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ และนำไปวิเคราะห์ตามหลักเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองที่สามารถแก้สมการทั้ง 9 สมการและมีสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นไปพร้อมๆกันได้ วิธีการสร้างแบบจำลองแสดงด้วยรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลอง

4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองนี้ใช้โปรแกรมซิมูลิงค์ (Simulink) ในแมทแล็บ (MATLAB) เป็นโปรแกรมที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง แบบจำลองนี้มีจุดประสงค์หลักคือการนำมาช่วยในการหาปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ รวมถึงประสิทธิภาพในการผลิตแก๊ส เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าในการเปลี่ยนมาใช้ถ่านหินด้วยกระบวนการผลิตแก๊สหรือกระบวนการผลิตแก๊สแทนที่การใช้น้ำมันเตา เนื่องจากการใช้ถ่านหินแต่ละชนิดรวมถึงสถานะในการผลิตแก๊สต่างกันได้แก๊สเชื้อเพลิงออกมาแตกต่างกัน การมีเครื่องมือที่ช่วยในการพิจารณาเบื้องต้นหาความเหมาะสมถึงสถานะในการดำเนินการรวมถึงความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์จึงเป็นสิ่งสำคัญ

แบบจำลองสมดุลทางความร้อนและเคมีนี้ ผู้จัดทำต้องการที่จะสร้างแบบจำลองที่ง่ายสำหรับคนทั่วไปใช้และมีความสะดวกในการป้อนค่าตัวแปรต่างๆ ตัวแปรที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย อัตราส่วนอากาศและไอน้ำที่ป้อนให้กับระบบการผลิตแก๊ส ชนิดของถ่านหินที่ใช้ อุณหภูมิของอากาศ เพื่อใช้ศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่มากที่สุด แล้วศึกษาถึงความคุ้มค่าในการเปลี่ยนระบบจากการใช้น้ำมันเตาในเตาเผาเหล็กมาเป็นการใช้ถ่านหิน

บทที่ 5

วิธีการใช้งานและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองที่สร้างขึ้นได้ถูกออกแบบให้มีการใช้งานที่สะดวก มีรูปแบบที่ง่ายในการป้อนค่าขาเข้า (Input) และการแสดงผลของค่าขาออก (Output) รวมถึงมีเอกสารแสดงวิธีการใช้งานของแบบจำลองช่วยให้ผู้ที่สนใจในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสามารถนำแบบจำลองนี้มาใช้เพื่อศึกษาหาผลหรือความสำคัญของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้ ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการใช้งานของแบบจำลอง การป้อนค่าและการอ่านค่าขาออก ที่ได้จากแบบจำลอง รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยจะนำผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยต่างๆก่อนหน้ามาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยแบ่งเป็นแต่ละชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ประกอบด้วย เตาชนิดอากาศไหลขึ้น เตาชนิดอากาศไหลลง เตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด และเตาแบบเอ็นเทรนโพล์ แล้วนำมาวิเคราะห์หาเงื่อนไขและขอบเขตในการใช้งานของแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อนำไปหาเงื่อนไขในการดำเนินการภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับถ่านหินที่นำมาศึกษาในบทต่อไป

The screenshot shows a software interface for a coal gasification model. It is divided into three main sections: INPUT, Double click to RUN, and OUTPUT.

- INPUT:**
 - Coal Analysis:** Includes fields for Ultimate analysis (%wt,daf) for Carbon (C), Hydrogen (H), Oxygen (O), Nitrogen (N), and Sulfur (S); and Proximate analysis (%wt,daf) for Ash, Moisture content, and Heating value (MJ/kg).
 - Operating Condition:** Includes fields for Air to coal ratio, Equivalent Ratio, Steam to coal ratio, Heat loss (%), Inlet air Temp (K), Inlet Steam Temp (K), and Pressure (kPa).
- Double click to RUN:** A central area with a coal image and a 'RUN' button. Below it are input fields for Price Coal (Baht/kg), Price Fuel oil (Baht/liter), HV Fuel oil (kJ/liter), Fuel oil consumption (liter/ton steel), Reheating furnace capacity (ton steel/hr), Coal consumption (ton/hr), and Money Saving (Baht/hr).
- OUTPUT:** Shows results for Product (%mol) (CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂), Carbon conversion (%), Reaction temperature (K), LHV Hot PG (MJ/kg), Hot gas efficiency (%), Second law efficiency (%), SO₂ emission (ppm), and Wetgas/Coal (m³/kg). A HELP button is also present.

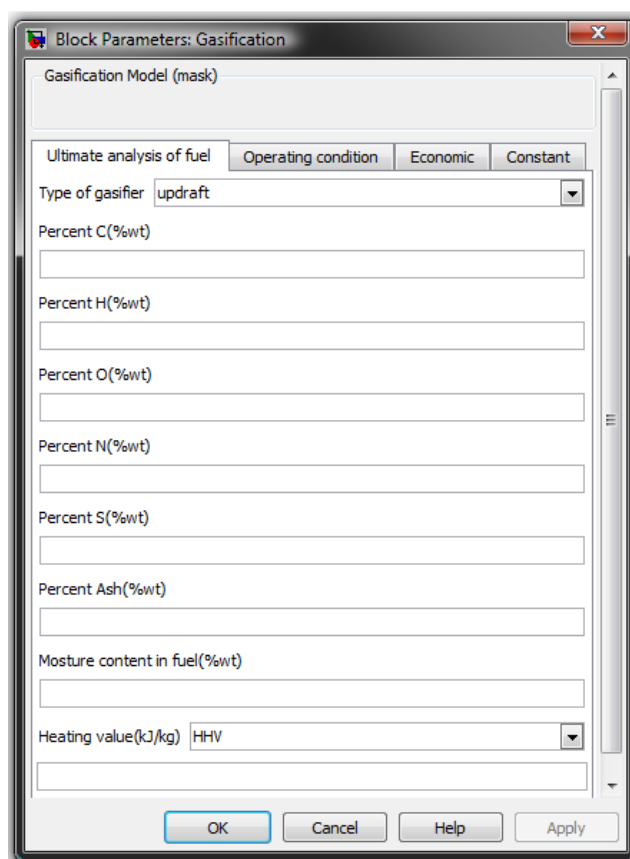
รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลอง ก) ส่วนการป้อนค่าขาเข้าของแบบจำลอง ข) ส่วนแสดงค่าขาเข้าที่ป้อน ค) ส่วนของการดำเนินแบบจำลอง ง) ส่วนแสดงผลขาออกของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จ) ส่วนแสดงผลขาออกด้านเศรษฐศาสตร์ ฉ) ส่วนของวิธีการใช้งาน

5.1 ส่วนประกอบของแบบจำลอง

แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ส่วนประกอบด้วยกันคือ ส่วนการป้อนค่าขาเข้าของแบบจำลอง (ก), ส่วนแสดงค่าขาเข้าที่ป้อน (ข), ส่วนของการดำเนินแบบจำลอง (ค), ส่วนแสดงผลขาออกของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (ง), ส่วนแสดงผลขาออกด้านเศรษฐศาสตร์ (จ), และส่วนของวิธีการใช้งาน (ฉ) แสดงในรูปที่ 5.1

5.1.1 ส่วนการป้อนค่าขาเข้าของแบบจำลอง

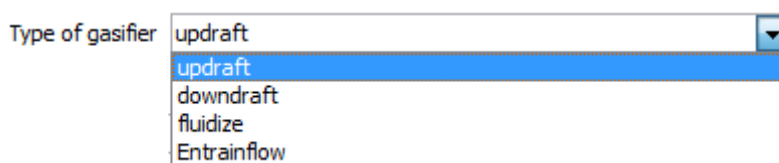
การป้อนค่าขาเข้านี้สามารถทำได้โดยการดับเบิ้ลคลิกแบบจำลองส่วน ก) ในรูปที่ 5.1 หน้าต่างการป้อนค่าขาเข้าจะแสดงออกมาโดยการป้อนค่าสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้



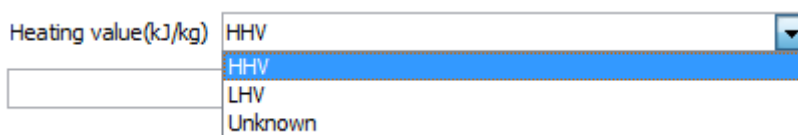
รูปที่ 5.2 หน้าต่างการป้อนค่าในส่วนของคุณสมบัติของถ่านหิน

ส่วนที่ 1 แสดงได้ในรูปที่ 5.2 แสดงหน้าต่างการป้อนค่าคุณสมบัติของถ่านหิน ประกอบด้วยการวิเคราะห์เชิงธาตุ (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรม

(Proximate analysis) การป้อนค่าเริ่มจากระบบชนิดของเตาผลิตแก๊ส (แสดงในรูปที่ 5.3) เนื่องจากเตาแต่ละชนิดมีเงื่อนไขในการดำเนินการที่ต่างกัน เปอร์เซ็นต์โดยมวลของธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน, ซัลเฟอร์, เถ้า และความชื้น ตามลำดับ รวมถึงค่าความร้อนของถ่านหิน ซึ่งการป้อนค่าความร้อนนี้สามารถป้อนได้ 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยเลือกได้ว่าเป็นค่าความร้อนสูง ค่าความร้อนต่ำ หรือกรณีที่ไม่มีทราบค่า



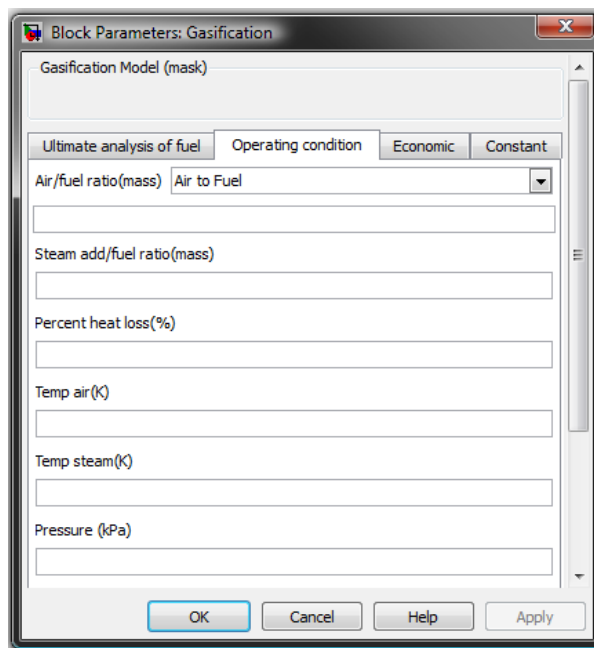
รูปที่ 5.3 หน้าต่างการเลือกชนิดของเตาผลิตแก๊ส



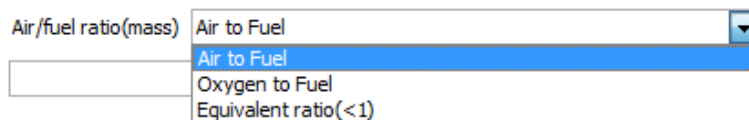
รูปที่ 5.4 หน้าต่างการเลือกชนิดของค่าความร้อนที่ใช้ในแบบจำลอง

ส่วนที่ 2 แสดงหน้าต่างการป้อนค่าเงื่อนไขในการดำเนินการแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณอากาศที่ป้อนให้กับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง, อัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำต่อถ่านหิน, เปอร์เซ็นต์ความร้อนที่สูญเสีย, ค่าเปอร์เซ็นต์ของความร้อนที่สูญเสีย (ถ้ามี), อุณหภูมิของอากาศและไอน้ำที่เข้าทำปฏิกิริยากับถ่านหิน และความดันภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยส่วนของปริมาณอากาศสามารถเลือกได้เช่นกันว่าเป็นอัตราส่วนโดยมวลของอากาศกับถ่านหิน อัตราส่วนของแก๊สออกซิเจนที่ป้อนต่อถ่านหินหรืออัตราส่วนสมมูลดังรูปที่ 5.6

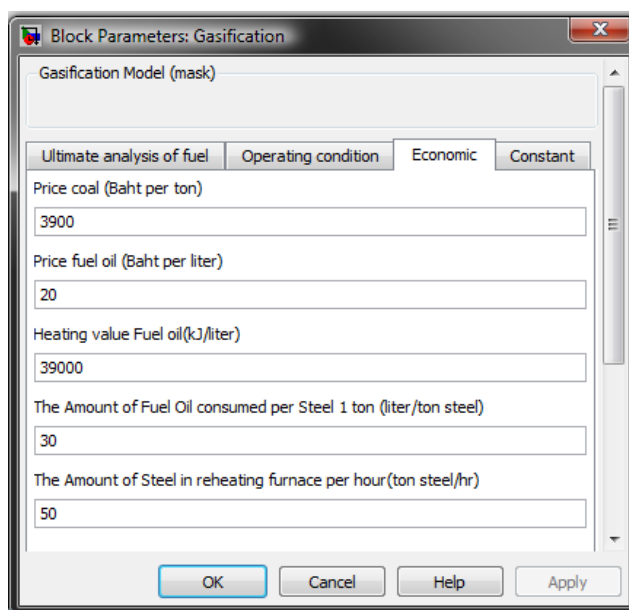
ส่วนที่ 3 แสดงหน้าต่างการป้อนค่าราคาของถ่านหินและน้ำมันเตา เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหาความคุ้มค่าและค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้เมื่อใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหิน มาทดแทนน้ำมันเตาในระบบดั้งเดิม นอกจากนี้เนื่องจากน้ำมันเตายังมีหลายระดับ แต่ละระดับปริมาณความร้อนก็จะแตกต่างกัน จึงจำเป็นจะต้องป้อนค่าความร้อน ปริมาณของน้ำมันเตาที่ใช้ และปริมาณของเหล็กภายในเตาเผาเหล็ก เพื่อหาค่าพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในระบบดั้งเดิม หน้าต่างการป้อนค่าในส่วนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.5 หน้าต่างการป้อนค่าในส่วน เงื่อนไขในการดำเนินการ

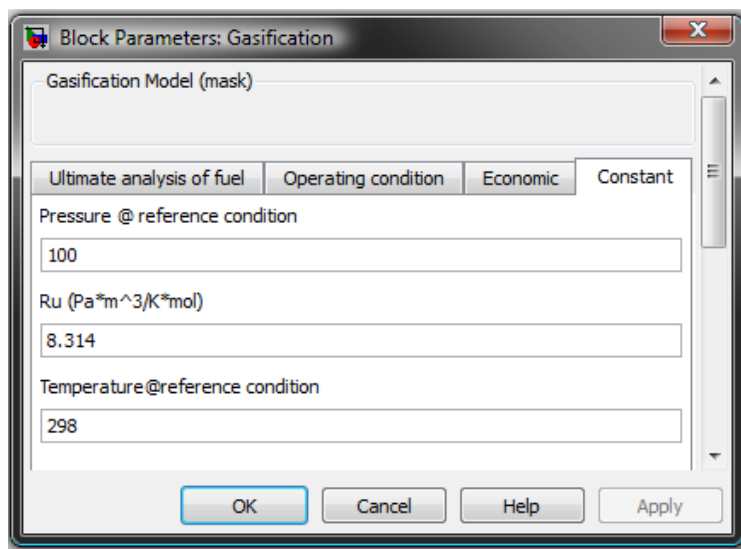


รูปที่ 5.6 หน้าต่างการเลือกชนิดของปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการผลิตแก๊ส



รูปที่ 5.7 หน้าต่างการป้อนค่าด้านเศรษฐศาสตร์

ส่วนที่ 4 เป็นหน้าต่างการป้อนค่าของค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.8 ประกอบด้วยค่าความดันที่สภาวะอ้างอิง (P_{ref}) ค่าอุณหภูมิที่สภาวะอ้างอิง (T_{ref}) และค่าคงที่ของแก๊ส (R_u) ซึ่งในแบบจำลองได้กำหนดความดันและอุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 101.325kPa และ 298 K ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ $8.314 \frac{(m^3)(Pa)}{(K)(mol)}$




รูปที่ 5.8 หน้าต่างการป้อนค่าคงที่ต่างๆภายในแบบจำลอง

5.1.2 ส่วนแสดงค่าขาเข้าที่ป้อน

ส่วนแสดงค่าขาเข้าจะแสดงค่าต่างๆที่ถูกป้อนในส่วนที่แล้วเพื่อใช้ในการตรวจสอบสิ่งที่ได้ป้อนลงไป ประกอบด้วยส่วนคุณสมบัติของเชื้อเพลิง และเงื่อนไขในการดำเนินการ แสดงในส่วน ข) ในรูปที่ 5.1

5.1.3 ส่วนของการดำเนินแบบจำลอง

หลังจากที่ป้อนค่าต่างๆลงในหน้าต่างการป้อนค่า เมื่อต้องการสั่งให้แบบจำลองแสดงผลที่ได้จากการคำนวณออกมาสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. การดับเบิลคลิกที่ข้อความ “Double click to RUN” ในส่วน ค) ในรูปที่ 5.1
2. การกดปุ่มคีย์ลัด Ctrl+F5
3. การกดปุ่ม  ในหน้าต่างแบบจำลอง

หากสิ่งที่ป้อนค่านี้นอกขอบเขตในการดำเนินการ จะมีหน้าต่างป๊อปอัพปรากฏขึ้น เพื่อให้กลับไปแก้ไขค่าที่ต้องป้อนใหม่ให้อยู่ในขอบเขตที่แบบจำลองสามารถทำงานได้ ซึ่งหน้าต่างเดือนให้กลับไปแก้ไขค่าที่ป้อน มีหลายกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 กรณีป้อนค่าการวิเคราะห์เชิงธาตุมากกว่าหรือน้อยกว่า 100%

กรณีที่ 2 กรณีป้อนค่าการวิเคราะห์เชิงธาตุเป็นลบ

กรณีที่ 3 กรณีป้อนค่าอัตราส่วนสมมูลมากกว่าหนึ่ง

กรณีที่ 4 กรณีความชื้นและเถ้าของถ่านหินมากเกินไปขอบเขตของแบบจำลอง

5.1.4 ส่วนแสดงผลขาออกของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

แสดงได้ในส่วน ง) ในรูปที่ 5.1 จะเป็นส่วนแสดงค่าขาออกที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง ค่าขาออกประกอบด้วย องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล, ค่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอน, อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา, ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง, ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์, ค่าการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm) และปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ต่อถ่านหินหนึ่งกิโลกรัม

5.1.5 ส่วนแสดงผลขาออกด้านเศรษฐศาสตร์

แสดงได้ในส่วน จ) ในรูปที่ 5.1 เป็นส่วนที่แสดงค่าขาเข้าและขาออกด้านเศรษฐศาสตร์ ประกอบไปด้วยราคาของถ่านหินและน้ำมันเตา ค่าความร้อนของน้ำมันเตา ปริมาณน้ำมันเตาที่ต้องใช้ในระบับดั้งเดิม และปริมาณของเหล็กภายในเตาเผาเหล็ก ค่าขาออกในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยปริมาณถ่านหินที่ต้องใช้เพื่อทดแทนระบับดั้งเดิม และค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้เมื่อใช้แก๊สเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนน้ำมันเตา

5.1.6 ส่วนของวิธีการใช้งาน

เมื่อมีข้อสงสัยในการใช้งานของแบบจำลองสามารถดับเบิลคลิกที่ “HELP” ดังแสดงในส่วน ฉ) รูปที่ 5.1 หลังจากนั้นจะมีเอกสารวิธีการใช้งานของแบบจำลองปรากฏออกมา

5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองในงานวิจัยนี้จะใช้รากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error; RMSE) เป็นการเฉลี่ยค่าความผิดพลาดของค่าที่ได้จากแบบจำลองแล้วมาหารากที่สอง สามารถใช้วัดค่าความแม่นยำและระดับของความเหมาะสมของการประมาณค่าพารามิเตอร์ จะมีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ที่ต้องการวัดความผิดพลาดในหน่วยของข้อมูลเดียวกัน ค่า RMSE ที่ต่ำจะแสดงถึงค่าความแม่นยำที่สูงหรือค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองและผลการทดลองต่ำ ในงานวิจัยนี้ หากค่า RMSE น้อยกว่า 2.5 จะถือว่าแบบจำลองสามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สได้ ค่านี้มาจากการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ก่อนหน้านี้ [7, 9, 18] และเป็นค่าที่ทำให้ความแตกต่างขององค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงไม่มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถเขียนสมการ RMSE ได้ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\text{Exp}_i - \text{Model}_i)^2}{n}}$$

เมื่อ n คือจำนวนข้อมูลที่ใช้สอบเทียบ

Exp_i และ Model_i คือ ข้อมูลจากผลการทดลองและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้นำไปสอบเทียบกับผลการทดลองและผลจากแบบจำลองในงานวิจัยต่างๆก่อนหน้านี้ [6, 17, 19-24] โดยจะแยกตามชนิดของเตาผลิตแก๊ส ประกอบด้วย เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดเอ็นเทรนโพล์ [6] เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดฟลูอิดไคซ์เบด [23, 24] เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลลง [17, 19] และเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลขึ้น [20, 21, 22] ดังต่อไปนี้

5.2.1 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเอ็นเทรน โพล์

จากตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบเอ็นเทรนโพล์ เมื่อใช้ถ่านหินบิทูมินัสและป้อนค่าขาเข้าที่เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง ค่า RMSE มีค่าอยู่ระหว่าง 0.67 ถึง 1.9 แบบจำลองจึงสามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงภายในเตาได้ เนื่องจาก เตาชนิดนี้มีเงื่อนไขในการดำเนินการที่มีความดันและอุณหภูมิที่สูงกว่าเตาชนิด

อื่นๆ ส่งผลให้ปฏิกิริยาต่างๆภายในเตามีโอกาสเข้าสู่สมดุลทางความร้อนเคมีมาก นอกจากนี้จากตารางที่ 5.1 ยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่คิดค่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอน 100% (Model CC 100%) หรือแบบจำลองที่ไม่คิดค่าคาร์บอนของแข็งในระบบ มีค่า RMSE ที่น้อยกว่าแบบจำลองที่คิดการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนในระบบ (ค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.7) เนื่องมาจากว่าเตาชนิดนี้จำเป็นต้องใช้ถ่านหินที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดทำให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่สูง (เห็นได้จากงานวิจัย [6, 25]) แต่ก็จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมเชื้อเพลิงสูงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองที่คิดการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนทั่วไป และหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ภายในเตาผลิตแก๊สแบบเอ็นทรนโพล์

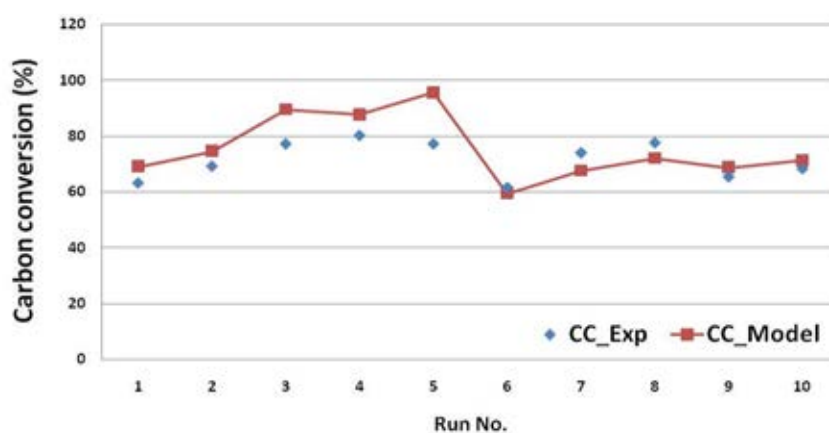
Dry gas composition (% by vol)	Illinois No.6			Illinois No.6			Wyodak		
	Exp	Model	Model CC 100%	Exp	Model	Model CC 100%	Exp	Model	Model CC 100%
CO	51.9	50.19	52.4	56.1	52.8	55.7	53.5	53.35	53.9
CO ₂	5.2	3.302	4.1	3.3	2.302	2.8	4.6	3.477	4.0
H ₂	37.3	38.19	34.8	37.2	38.61	34.9	35.7	35.55	34.3
CH ₄	0.1	1.135	0.4	0.1	0.72	0.2	0.1	0.95	0.4
H ₂ O	5.5	7.184	7.8	3.4	5.573	5.9	6.2	6.664	7.4
RMSE	-	1.51	1.6	-	1.93	1.5	-	0.67	0.9

Dry gas composition (% by vol)	Wyodak			Illinois		
	Exp	Model	Model CC 100%	Exp	Model	Model CC 100%
CO	47.7	49.53	48.2	48.5	48.08	49.2
CO ₂	6.7	5.195	6.3	6.2	4.309	5.5
H ₂	34.2	34.48	33.5	35.7	37.31	34.3
CH ₄	0.0	1.218	0.4	0.0	1.39	0.5
H ₂ O	11.4	9.576	11.6	9.6	8.9	10.2
RMSE	-	1.45	0.5	-	1.32	0.8

5.2.2 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด

จากตารางที่ 5.2 เมื่อค่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนนั้นน้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ค่า RMSE นั้นจะมีค่าสูงเกินกว่า 2.5 แบบจำลองที่สร้างขึ้นจึงไม่สามารถอธิบายองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนที่ต่ำหมายถึงการผลิตแก๊สที่ไม่ดี ไม่มีประสิทธิภาพ ปริมาณคาร์บอนของแข็งเหลืออยู่ภายในเตามาก ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตานั้นต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทำให้ปฏิกิริยาภายในเตามีโอกาสน้อยที่จะเกิดสมดุลทางความร้อนและเคมี ค่า RMSE ของแบบจำลองกับผลการทดลองเมื่อใช้เตาชนิดฟลูอิดไดซ์เบดนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 1.41 ถึง 2.13 ซึ่งมากกว่าเตาผลิตแก๊สแบบเอ็นเทรนโพล์ เนื่องจากมีอุณหภูมิและความดันในการดำเนินการที่ต่ำกว่า ในสถานะจริงเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบดนี้ถ่านหินจะมีพื้นที่สัมผัสอากาศสูงทำให้คาร์บอนของแข็งแปรเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้มาก รวมถึงมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ทำให้เตาชนิดนี้สามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยสมดุลทางความร้อนและเคมี

จากรูปที่ 5.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนจากผลการทดลองและแบบจำลอง จากกราฟแสดงให้เห็นว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเนื่องมาจากแบบจำลองมีสมมุติฐานที่ว่าระบบจะเข้าสู่สมดุลความร้อนเคมี และ กระบวนการผลิตแก๊สมีเวลาเพียงพอที่จะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งในความเป็นจริงอาจจะไม่ได้เกิดขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การแปลงคาร์บอนจากแบบจำลองมีค่ามากกว่าผลการทดลองจริง แต่อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่คำนวณได้จากแบบจำลองก็มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลอง



รูปที่ 5.9 เปอร์เซ็นต์การแปลงคาร์บอนจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบดในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด

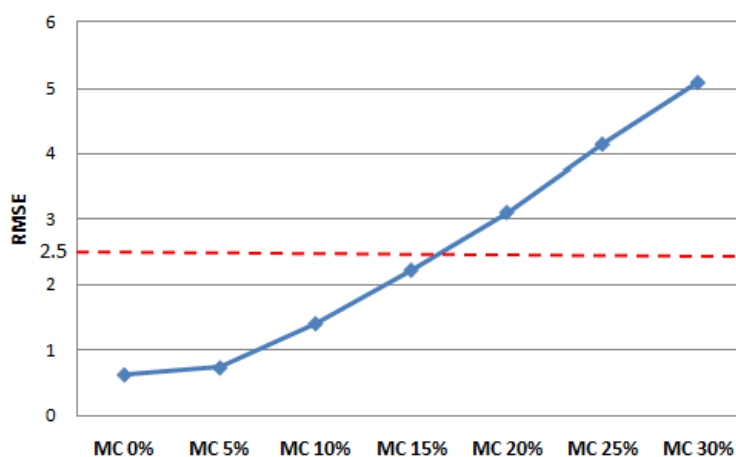
Dry gas composition (% by vol)	Datong coal [23]				Uinta coal [23]					
	Run No.1		Run No.2		Run No.3		Run No.4		Run No.5	
	Exp	Model	Exp	Model	Exp	Model	Exp	Model	Exp	Model
CO	19.90	20.85	22.50	21.59	22.60	23.57	23.90	25.26	19.20	21.08
CO ₂	9.10	7.78	7.10	7.47	6.50	6.25	5.80	4.79	9.00	8.51
H ₂	15.80	12.92	14.70	12.78	14.20	13.35	14.70	12.69	16.20	14.19
CH ₄	0.20	2.64	0.00	2.42	0.10	2.26	0.10	1.84	0.30	2.93
N ₂	55.10	55.80	55.70	55.74	56.60	54.57	55.60	55.43	55.30	53.28
CC(%)	63.00	69.00	69.00	74.37	77.00	89.32	80.00	87.41	77.00	95.00
RMSE	1.86		1.45		1.45		1.41		1.94	

Dry gas composition (% by vol)	Highvale coal [24]									
	Run No.6		Run No.7		Run No.8		Run No.9		Run No.10	
	Exp	Model	Exp	Model	Exp	Model	Exp	Model	Exp	Model
CO	10.2	9.67	9.1	12.31	10.1	13.61	12	12.67	13.2	13.39
CO ₂	15.7	14.97	15	13.43	14.2	12.67	13.1	13.21	12.3	12.8
H ₂	8	5.06	5.6	5.41	5.6	5.58	8.5	5.44	8.4	5.56
CH ₄	1	2.38	0.5	1.93	0.5	1.73	0.8	1.88	0.8	1.76
N ₂	65.1	67.92	69.8	66.93	69.6	66.42	65.6	66.8	65.3	66.5
CC(%)	61.4	59.32	73.8	67.39	77.4	71.9	65.2	68.65	68.1	71.1
RMSE	1.97		2.15		2.29		1.5		1.46	

5.2.3 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลลง

จากตารางที่ 5.3 เป็นการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่ได้กับผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของการแยกแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงชีวมวล (ขี้เลื่อย) ค่า RMSE มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้และน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องมาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่ได้คิดการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนทำให้มีปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงที่สูงกว่าผลการทดลอง นอกจากนี้เมื่อความชื้นที่สูงแบบจำลองจะไม่สามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากความชื้นที่มีค่าสูงจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สต่ำ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าและเวลาในการทำปฏิกิริยานาน

จำกัดกับสมมติฐานของแบบจำลอง จากรูปที่ 5.9 ความชื้นที่มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวลในการวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรม จะให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE มากกว่า 2.5 ถือว่าไม่สามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สได้



รูปที่ 5.10 ผลของค่า RMSE ต่อความชื้นของเชื้อเพลิง

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง

Dry gas composition (% by vol)	Average from 10 test [17]	Syngas model from Altafini [17]	GasifEQ model From Mountouris [19]	This Model
CO	20.14	19.7	23.45	20.44
CO ₂	12.06	10.15	9.16	11.92
H ₂	14	20.06	19.8	12.74
CH ₄	2.31	0	0.01	4.435
N ₂	50.79	50.1	47.57	50.46
RMSE	0	3.04	3.70	1.12

5.2.4 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลขึ้น

จากตารางที่ 5.4 เห็นได้ว่าผลจากแบบจำลองสำหรับเตาชนิดนี้ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าเตาชนิดอื่นๆ เนื่องจากในสภาวะจริงปฏิกิริยาภายในเตาชนิดอากาศไหลขึ้นนี้จะเข้าสู่จุดสมดุลช้ากว่าเตาชนิดอื่นๆ เพราะจะมีสารระเหยและเถ้าที่หลุดออกไปกับแก๊สเชื้อเพลิงมาก ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง อุณหภูมิภายในเตาจึงไม่สม่ำเสมอ แม้ว่าจะเตาชนิดนี้จะมีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าเตาชนิดอื่นๆ แต่ค่า RMSE ยังอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ สามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สได้ดีพอสมควร นอกจากนี้จากการนำแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยต่างๆ ถ่านหินที่มีค่าซีเถ้ามากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะให้ค่า RMSE ที่สูงไม่สามารถหาค่าประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ออกมาได้

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองในเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น

Dry gas Composition (% by vol)	Jetson [20]		Elkhon [20]		Illinois NO.6[20]		Piney [21]		Stahlman [21]		Fushan [22]	
	EXP	Model	EXP	Model	EXP	Model	EXP	Model	EXP	Model	EXP	Model
CO	24.70	24.78	27.60	25.07	22.9	21.52	20.91	19.45	13.57	14.52	26.81	22.68
CO ₂	5.67	5.77	5.10	4.65	7.50	6.87	9.07	7.83	12.73	11.50	5.37	5.652
H ₂	17.20	18.40	17.90	19.61	16.30	19.43	14.44	16.05	12.56	11.49	16.54	19.25
CH ₄	1.60	3.03	1.60	3.07	1.70	4.47	1.13	3.48	1.30	3.24	3.1	3.964
N ₂	49.60	48.02	46.50	47.60	49.70	47.41	54.44	53.19	59.85	59.25	47.71	48.45
RMSE	1.09		1.61		2.18		1.63		1.24		2.27	

เนื่องจากแบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานหลักที่ว่า ปฏิกิริยาภายในเตาจะต้องเข้าสู่สมดุลทางความร้อนเคมี แม้ว่าในสภาวะจริงจะไม่เกิดขึ้นก็ตาม จึงมีข้อจำกัดในการใช้งานแบบจำลองอยู่มากพอสมควร เพื่อให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับสมดุลทางความร้อนเคมีมากที่สุด จากการศึกษาและสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองต่างๆ ทำให้สามารถระบุขอบเขตได้ว่า การผลิตแก๊สนั้นๆควรมีการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนที่มากกว่า 60% ระบบการผลิตแก๊สนั้นๆควรจะเป็นระบบที่ใหญ่ มีอัตราการผลิตแก๊สที่สูงและมีประสิทธิภาพ ค่าความชื้นของถ่านหินควรมีค่าน้อยกว่า 15% และปริมาณเถ้าของถ่านหินต้องน้อยกว่า 10% ถ่านหินที่ควรนำมา

ศึกษาจึงควรเป็นถ่านหินบิทูมินัสหรือแอนทราไซค์เพราะถ่านหินทั้งสองชนิดนั้นมีปริมาณถ่านและ
ความชื้นที่ต่ำ รวมถึงมีค่าคาร์บอนคงที่ที่สูง

แบบจำลองในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี โดย
ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในเตาผลิตแก๊สชนิดเอ็นเทรนโพล์น้อยที่สุด รองลงมาคือ เตาผลิตแก๊สชนิด
ฟลูอิดไคซ์เบด และเตาผลิตแก๊สชนิดอากาศไหลขึ้นตามลำดับ แม้ว่าเตาผลิตแก๊สชนิดอากาศไหล
ขึ้นจะมีค่า RMSE สูงกว่าเตาชนิดอื่นๆ แต่อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ จึงสามารถนำหลักของสมดุลทาง
ความร้อนและเคมีไปทำนายหาค่าขาออกของแบบจำลองได้ โดยต้องอยู่ในขอบเขตการผลิตแก๊ส
ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาเงื่อนไขในการดำเนินการ รวมถึงปริมาณถ่านหินที่ต้อง
ใช้ ในการเปลี่ยนระบบมาใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหินมาทดแทนน้ำมันเตาในระบบดั้งเดิม

บทที่ 6

ผลการจำลองกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของถ่านหินและการวิจารณ์ผล

แบบจำลองที่สร้างขึ้นมานี้มีจุดประสงค์คือทำนายองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพื่อหาค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ รวมถึงปริมาณของถ่านหินที่ต้องใช้ แล้วนำมาวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการเปลี่ยนระบบจากการใช้น้ำมันเตาในระบบดั้งเดิม มาเป็นการใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหินภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้น ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลของอากาศและไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตแก๊สจากถ่านหินปิทิวมินัส ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ค่าประสิทธิภาพทางความร้อน ค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ เงื่อนไขในการดำเนินการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินและการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อมีการเปลี่ยนระบบ

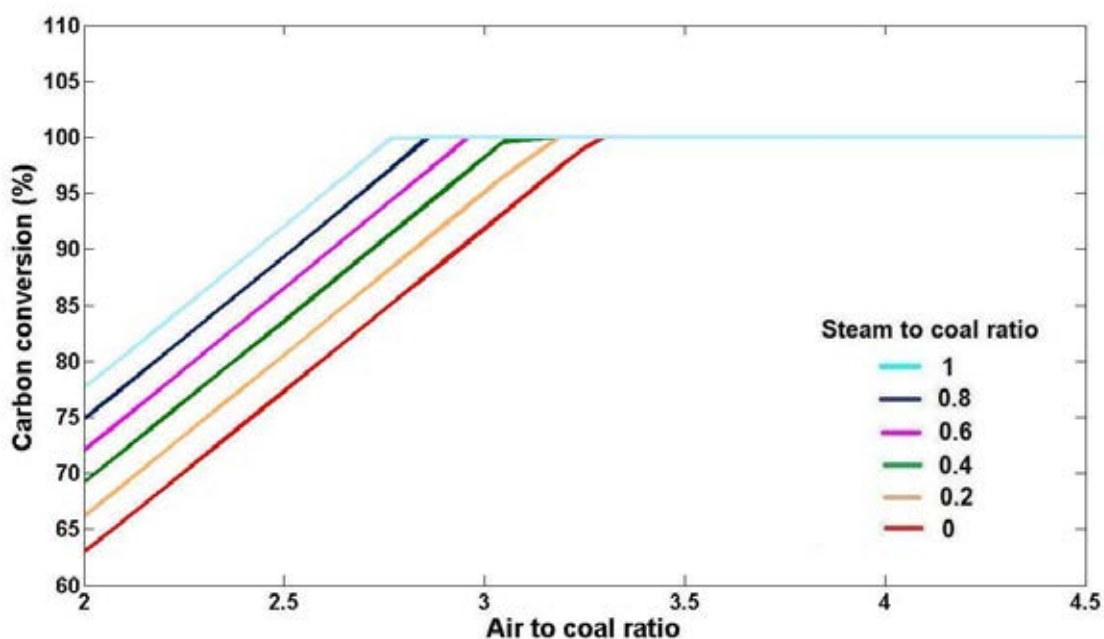
ถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมักนิยมถ่านหินชนิดปิทิวมินัส เนื่องจากเป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูง ติดไฟไม่ยาก และราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ประกอบกับถ่านหินที่มีอยู่ในประเทศไทยมีค่าความร้อนที่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศโดยตลาดนำเข้าหลักอยู่ที่ประเทศอินโดนีเซียถ่านหินที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ถ่านหินชนิดปิทิวมินัสจากประเทศอินโดนีเซีย มีชื่อทางการค้าว่าถ่านหินอินโดมินโค (Indominco coal) นับเป็นถ่านหินที่มีการนำเข้าเป็นปริมาณมากอันดับต้นๆของประเทศไทย มีการวิเคราะห์เชิงธาตุและการวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรมดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การวิเคราะห์เชิงธาตุและอุตสาหกรรมของถ่านหินอินโดมินโค

ถ่านหินอินโดมินโค (Indominco Coal) [26]			
การวิเคราะห์เชิงธาตุ (%wt daf)		การวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรม (%wt)	
C	66.96	ความชื้น	10.23
H	5.6	สารระเหย	41.01
O	22.28	คาร์บอนคงตัว	46.0
N	1.38	เถ้า	2.76
S	3.78	HHV(kJ/kg)	26115

6.1 เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนจะสูงขึ้นเรื่อยๆตามอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC) จนมีค่าเท่ากับ 100 เปรอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าไม่เหลือคาร์บอนของแข็งในระบบแล้ว และการเพิ่มปริมาณไอน้ำให้กับระบบจะช่วยทำให้คาร์บอนของแข็งหมดลงเร็วยิ่งขึ้นเห็นได้จากกราฟที่อัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำต่อถ่านหิน (SC) เท่ากับหนึ่ง คาร์บอนของแข็งจะหมดลงที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC) เท่ากับ 2.75 แต่ถ้าไม่มีการป้อนไอน้ำเพิ่มเข้าไป (SC = 0) คาร์บอนจะหมดลงที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินเท่ากับ 3.3 ปริมาณอากาศและปริมาณไอน้ำที่สูงจะช่วยให้ คาร์บอนของแข็งทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาสตริมแก๊สซิฟิเคชัน ($C+H_2O \rightleftharpoons CO+H_2$) ได้มาก ทำให้เหลือคาร์บอนของแข็งในระบบน้อยลงหรือเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนสูงขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 6.1 เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2: 0.5: 4.5) และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0: 0.2: 1)

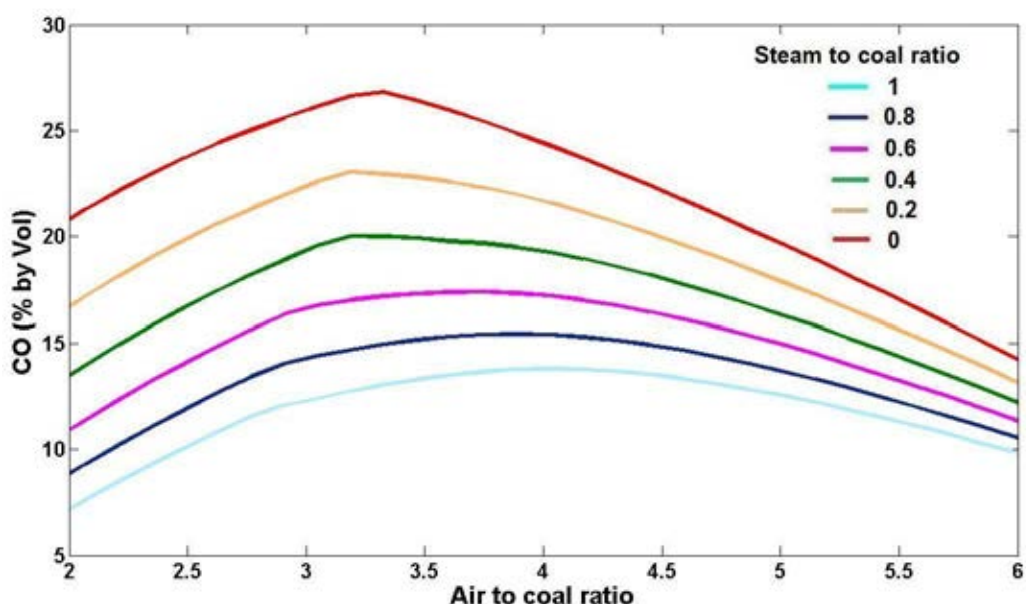
6.2 แก๊สเชื้อเพลิงต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ

แก๊สเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยแก๊สหลักๆ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) สามารถพิจารณาผลของอากาศและไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงแต่ละชนิดได้ดังนี้

6.2.1 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

จากรูปที่ 6.2 เมื่อยังมีคาร์บอนของแข็งเหลือในระบบอยู่ (อัตราส่วนอากาศต่ำกว่า 3.3 ดูจากรูปที่ 6.1) อากาศที่มากขึ้นทำให้แก๊ส CO มากยิ่งขึ้นเนื่องมาจากคาร์บอนของแข็งที่มีจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและ คาร์บอนซีแก๊สซิฟิเคชัน ($C+CO_2 \rightleftharpoons 2CO$) ได้ดียิ่งขึ้น ทำให้มีแก๊ส CO มากยิ่งขึ้น แต่เมื่อค่าคาร์บอนของแข็งในระบบหมดลงแล้ว อากาศที่มากขึ้นส่งผลให้การผลิตแก๊สเป็นไปในทางการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทำให้แก๊ส CO ลดลง

ส่วนการเพิ่มปริมาณไอน้ำให้กับระบบ จะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเวอเตอร์แก๊สชิฟต์ ($CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$) ดำเนินไปข้างหน้า ตามกฎของเลอชาเตอลิเย (Le chatelier's principle) แก๊ส CO จึงลดลง แก๊ส H_2 และ CO_2 มากขึ้น

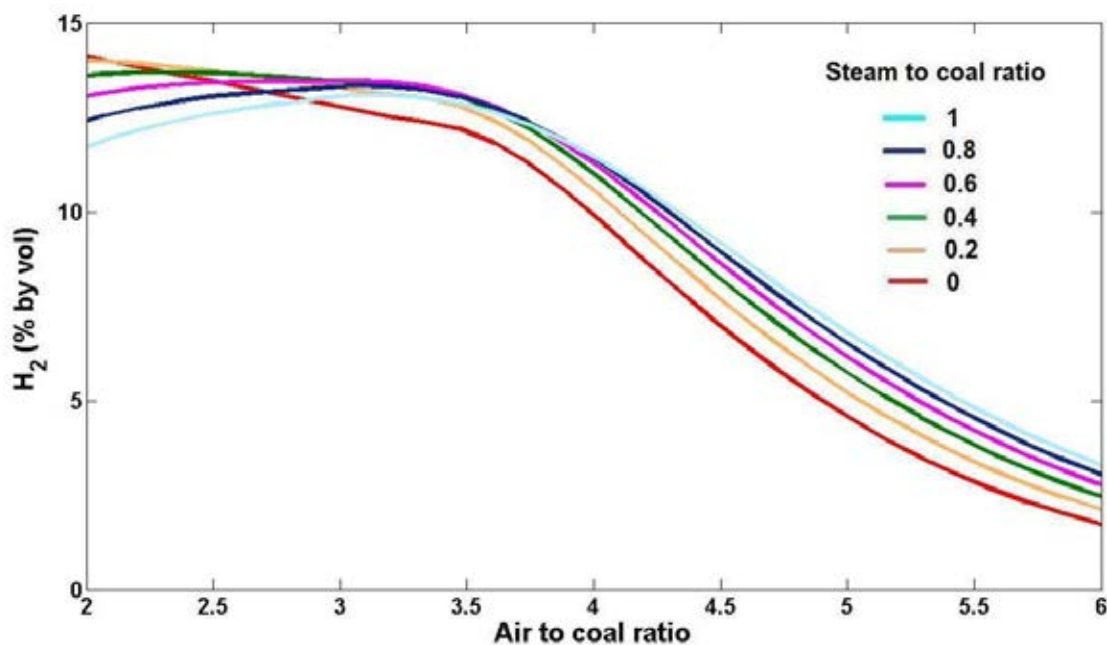


รูปที่ 6.2 เปรอ์เซ็นต์โดยโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2: 0.5: 6) และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0: 0.2: 1)

6.2.2 แก๊สไฮโดรเจน (H_2)

จากรูปที่ 6.3 ที่อัตราส่วนอากาศต่อแก๊ส H_2 จะมีปริมาณน้อยเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยามะทานะชัน ($C+2H_2 \rightleftharpoons CH_4$) แก๊ส H_2 จะกลายเป็นมีเทนแต่เมื่อคาร์บอนของแข็งในระบบหมดลงไปแล้วแก๊ส H_2 จะลดลง เนื่องจากแก๊ส H_2 จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์ ($CO+H_2O \rightleftharpoons CO_2+H_2$) ปริมาณอากาศที่มากขึ้นทำให้การเผาไหม้เป็นไปในทางการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ปริมาณแก๊ส CO_2 เพิ่มขึ้นจึงทำให้ปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์ย้อนกลับ

แต่ถ้าหากไอน้ำในระบบมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้แก๊ส H_2 มีค่ามากขึ้นเนื่องจากสมดุลในปฏิกิริยาออกเตอร์แก๊สซิฟต์เลื่อนไปข้างหน้าแต่ถ้าระบบยังมีคาร์บอนของแข็งอยู่ปริมาณแก๊ส H_2 จะน้อยลง เนื่องจากปฏิกิริยาสตริมแก๊สซิฟเคชัน ($C+H_2O \rightleftharpoons CO+H_2$) และปฏิกิริยามะทานะชัน ($C+2H_2 \rightleftharpoons CH_4$) กล่าวคือที่อัตราส่วนอากาศน้อย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะต่ำ สองโมลไฮโดรเจนจะถูกทำปฏิกิริยามะทานะชัน ในขณะที่ได้จากปฏิกิริยาสตริมแก๊สซิฟเคชันเพียงหนึ่งโมล

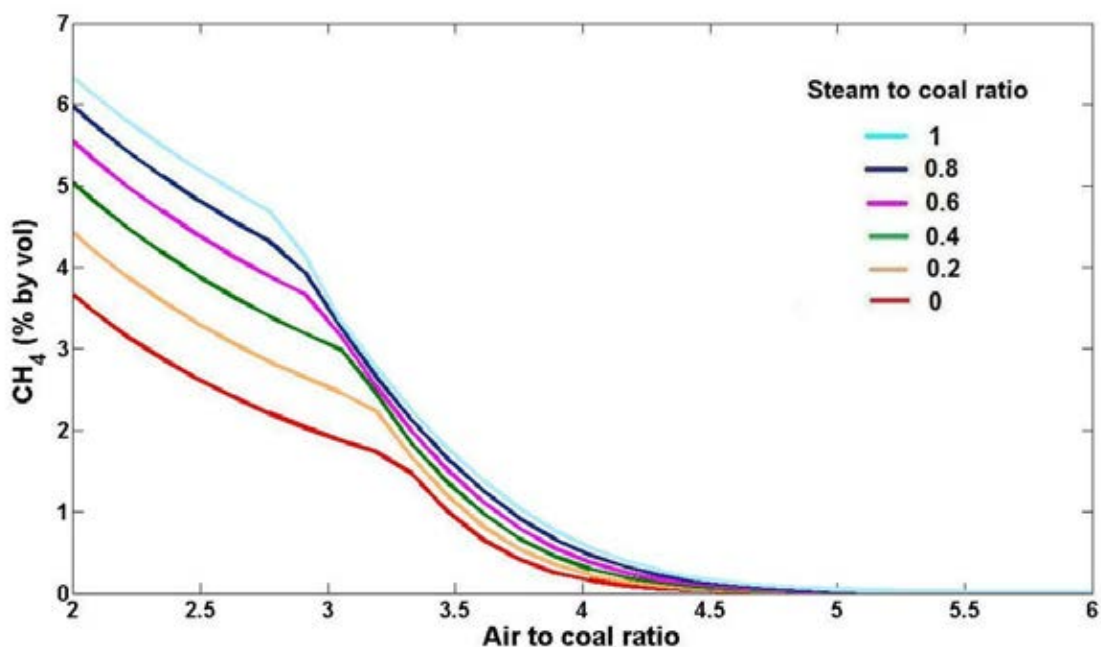


รูปที่ 6.3 เปอร์เซนต์โดยโมลของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 :0.5:6) และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0:0.2:1)

6.2.3 แก๊สมีเทน (CH_4)

จากรูปที่ 6.4 เนื่องจากปฏิกิริยามทานะชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (อุณหภูมิต่ำเกิดได้ดี) ที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินน้อย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาภายในเตาผลิตแก๊สจะต่ำ ทำให้มีปริมาณแก๊ส CH_4 มาก และเมื่อค่าคาร์บอนของแข็งในระบบหมดไปแล้ว ปริมาณแก๊ส CH_4 ก็จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาที่สำคัญที่ทำให้เกิดแก๊ส CH_4 ในปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส คือ ปฏิกิริยาสตริมเมทานะชัน ($CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$) เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน อากาศที่มากทำให้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 1,200 เคลวิน ปฏิกิริยาสตริมเมทานะชันเกิดได้ดี ปริมาณแก๊ส CH_4 จึงเพิ่มขึ้น (ความชันของกราฟลดลง)

ปริมาณไอน้ำในระบบที่มากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาออกเทอร์แก๊สซิปต์ดำเนินไปข้างหน้าตามกฎของเลอชาเตอลิเยแก๊ส H_2 และ CO_2 มากขึ้น ปริมาณ H_2 ที่มากขึ้นนี้ส่งผลให้ปฏิกิริยามทานะชันดำเนินไปข้างหน้าด้วยเช่นกัน แก๊ส CH_4 จึงมากขึ้น

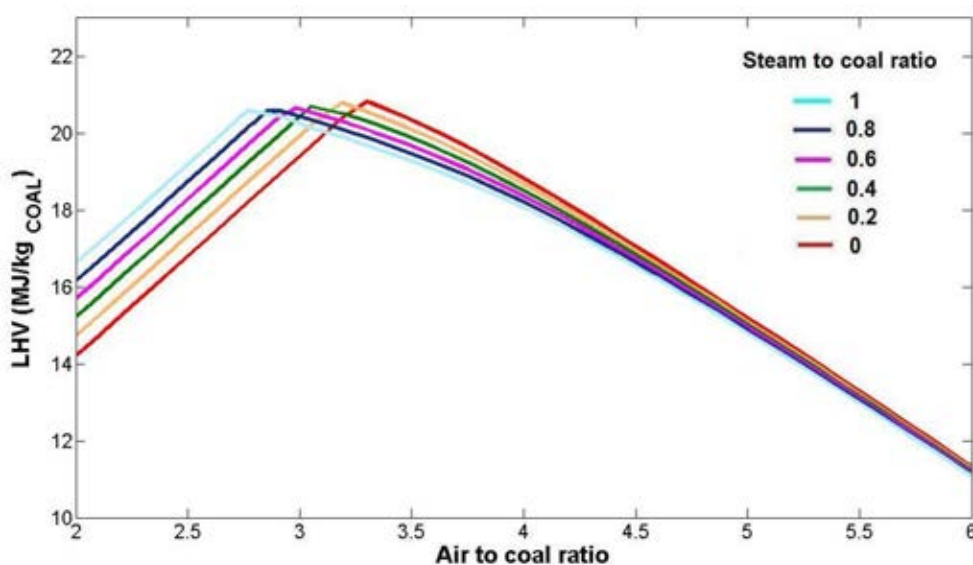


รูปที่ 6.4 เปรอ์เซ็นต์โดยโมลของแก๊สมีเทน (CH_4) ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2 :0.5:6) และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0:0.2:1)

6.3 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ

จากรูปที่ 6.5 ค่าความร้อนในงานวิจัยนี้จะคิดจากแก๊ส CO, H₂ และ CH₄ ค่าความร้อนจะมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินที่ทำให้ ปริมาณคาร์บอนของแข็งหมดพอดี ที่ปริมาณอากาศนี้ จะทำให้ได้ปริมาณแก๊ส CO มากที่สุด และปริมาณของแก๊ส CO นี้จะมีอัตราส่วนมากกว่าแก๊สชนิดอื่นๆ

ผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนต่อค่าความร้อนจะอธิบายได้เป็นสองกรณี คือกรณีที่ไม่มีคาร์บอนของแข็งเหลือในระบบแล้ว และกรณีที่ยังเหลือคาร์บอนของแข็งในระบบอยู่ ในกรณีที่ไม่มีคาร์บอนของแข็งในระบบ ปริมาณไอน้ำที่มากขึ้นจะทำให้แก๊ส CO ต่ำลง และ H₂ สูงขึ้น ตามปฏิกิริยาอวเทอร์แก๊สซิฟิเคชัน ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$) ซึ่งปริมาณของแก๊ส CO จะมากกว่าแก๊ส H₂ เกือบเท่าตัว ดังนั้นค่าความร้อนจึงขึ้นกับแก๊ส CO เป็นสำคัญ ในกรณีที่ยังเหลือคาร์บอนของแข็งในระบบอยู่ ปริมาณของแก๊ส CH₄ นั้นแม้มีอยู่น้อยแต่ปริมาณค่าความร้อนสูงกว่าแก๊สสองตัวข้างต้น (CO และ H₂) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊ส H₂ และ CH₄ มีค่ามากกว่าแก๊ส CO ค่าความร้อนกรณีนี้จึงมีค่ามากขึ้นตามปริมาณไอน้ำที่มากขึ้น (สอดคล้องกับแก๊ส CH₄) ตามปฏิกิริยาเมทานอน ($\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$)

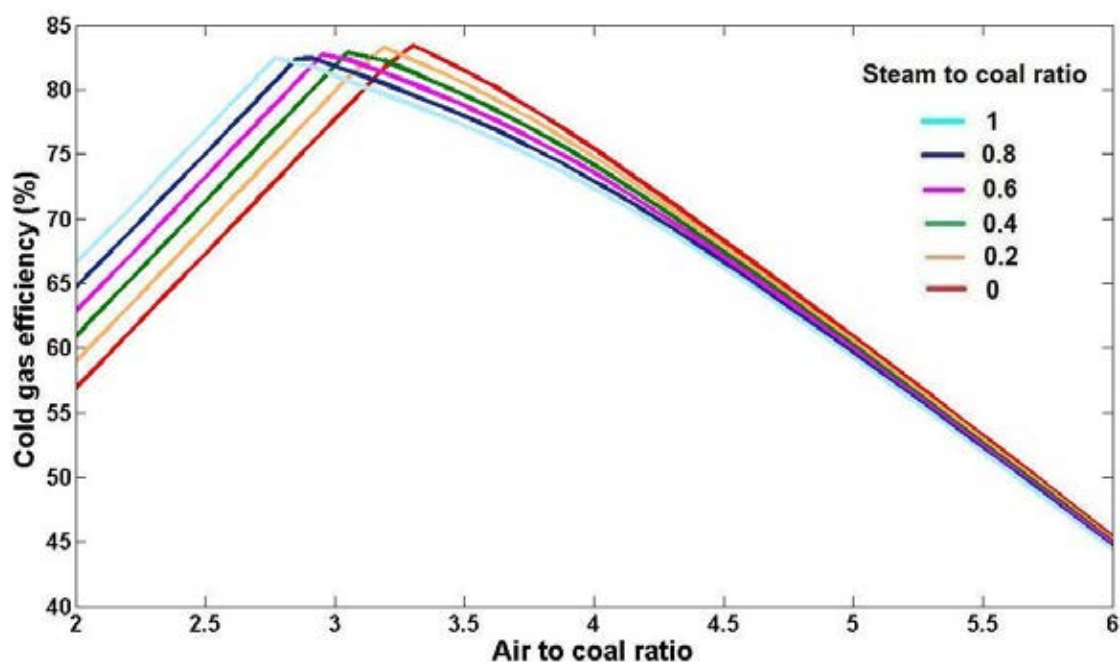


รูปที่ 6.5 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/kg_{coal}) ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2: 0.5: 6) และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0: 0.2: 1)

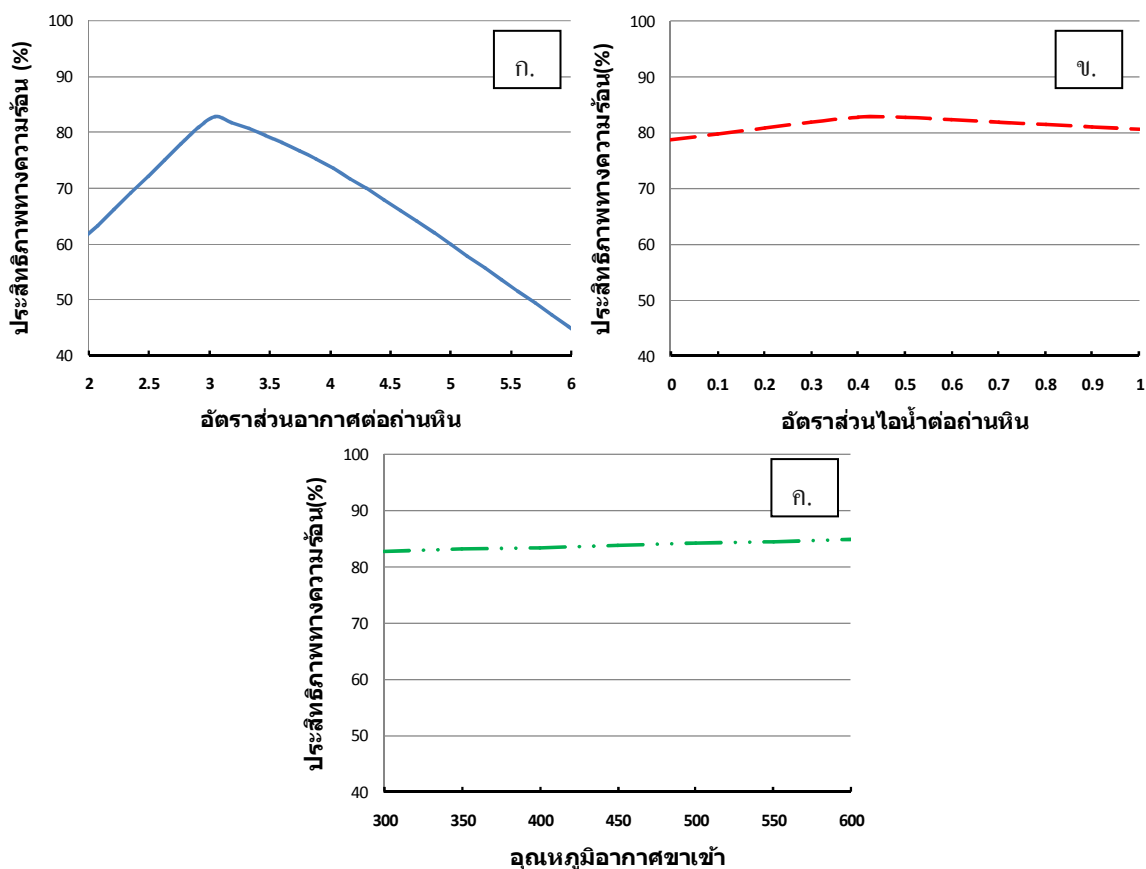
6.4 ค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 6.6 ค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สหรือประสิทธิภาพทางความร้อนต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ จะสอดคล้องกับค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงคือมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินที่ทำให้ปริมาณคาร์บอนของแข็งหมดพอดีซึ่งได้อธิบายในหัวข้อที่ 6.3

จากรูปที่ 6.7 เป็นการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยต่ออัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินและอุณหภูมิของอากาศขาเข้า นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพจะมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณอากาศและไอน้ำหนึ่งๆดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา อากาศที่ป้อนให้กับระบบการผลิตแก๊สหากมีการอุ่นอากาศก็เข้าเตา อุณหภูมิที่สูงจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้นและเป็นการช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสูงขึ้น



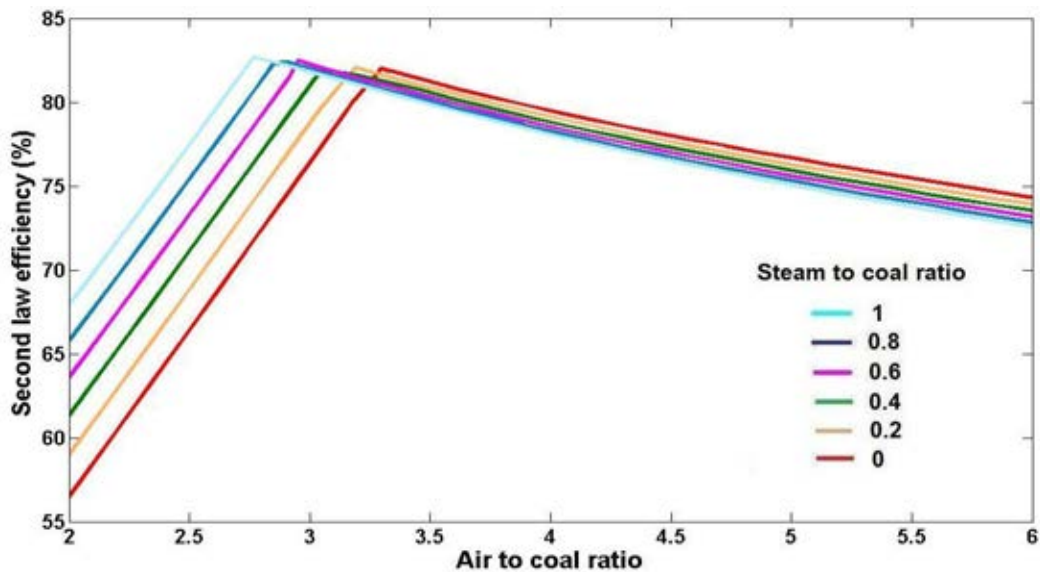
รูปที่ 6.6 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (%) ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2: 0.5: 6) และอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0: 0.2: 1)



รูปที่ 6.7 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (ก) อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (ข) อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (ค) อุณหภูมิอากาศขาเข้า (K)

6.5 ค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่อการป้อนอากาศและไอน้ำ

ค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ในงานวิจัยนี้คือค่าเอกซ์เซอียที่ออกจากระบบต่อค่าเอกซ์เซอียที่เข้าสู่ระบบ หรือค่าความสามารถในการทำงานสูงสุดของแก๊สเชื้อเพลิงต่อค่าความสามารถในการทำงานสูงสุดของสิ่งที่ป้อนเข้าไปซึ่งประกอบด้วยเชื้อเพลิงถ่านหิน และตัวกลาง (อากาศและไอน้ำ) ค่าความสามารถในการทำงานของแก๊สเชื้อเพลิงนี้ (เอกซ์เซอียที่ออกจากระบบ) จะน้อยกว่าของถ่านหินร่วมกับสารตัวกลาง (เอกซ์เซอียที่เข้าสู่ระบบ) เนื่องมาจากการสลายพันธะ และปฏิกิริยาเคมีต่างๆภายในกระบวนการผลิตแก๊ส



รูปที่ 6.8 ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ (%) ต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน (AC, 2: 0.5: 6) และ อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (SC, 0: 0.2: 1)

จากรูปที่ 6.8 ค่าประสิทธิภาพข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์จะมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณอากาศที่ทำให้ค่าคาร์บอนของแข็งหมดลงพอดีเช่นเดียวกับค่าความร้อนและประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส อัตราส่วนอากาศที่ต่ำระบบจะมีคาร์บอนของแข็งเหลืออยู่ทำให้คุณภาพของพลังงานต่ำลง ในขณะที่อากาศที่มากขึ้นคาร์บอนของแข็งจะหมดลง ค่าเอกซ์เซอจีเคมีคัล (Chemical exergy) ของแก๊สเชื้อเพลิง (CO , H_2 , CH_4) ลดลง แม้ว่าค่าเอกซ์เซอจีฟิสิกส์คัล (Physical exergy) จะเพิ่มมากขึ้นแต่ก็เพิ่มในอัตราที่น้อยกว่าการลดลงของเอกซ์เซอจีเคมีคัล ทำให้เอกซ์เซอจีของระบบน้อยลง (สามารถดูเพิ่มเติมในภาคผนวก ข.)

ส่วนปริมาณไอน้ำ จะมีอิทธิพลมากต่อค่าเอกซ์เซอจีเมื่อยังมีคาร์บอนของแข็งในระบบ ไอน้ำจะช่วยเพิ่มอัตราการแปรเปลี่ยนของคาร์บอนทำให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้น แต่เมื่อคาร์บอนของแข็งหมดลงไปแล้ว ปริมาณไอน้ำที่เพิ่มจะมีผลน้อย เนื่องจากไอน้ำที่เพิ่มขึ้นจะลดค่าเอกซ์เซอจีเคมีคอลลงในอัตราส่วนเท่าๆกับการเพิ่มของค่า เอกซ์เซอจีฟิสิกคอลล ค่าเอกซ์เซอจีเคมีคอลลลดลงเนื่องจาก การเพิ่มไอน้ำจะเป็นการลดปริมาณของแก๊ส CO และเพิ่มปริมาณแก๊ส CO_2 และ H_2 ตามปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟ ซึ่งแก๊ส CO_2 และ H_2 มีค่าเอกซ์เซอจีที่ต่ำกว่าแก๊ส CO ส่วนค่าเอกซ์เซอจีฟิสิกส์คัลที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ (สามารถดูเพิ่มเติมในภาคผนวก ข.)

6.6 เงื่อนไขการดำเนินการสำหรับถ่านหินที่นำมาศึกษา

สภาวะหรือเงื่อนไขที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับถ่านหินชนิดนี้หาได้จากผลของแบบจำลองจากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของถ่านหินอินโดมินโคขึ้นกับปัจจัยหลักๆคือ อัตราส่วนอากาศและไอน้ำต่อถ่านหิน

ปริมาณอากาศช่วงที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สควรมีค่าระหว่างอัตราส่วนอากาศ 2.6 ถึง 3.3 หรืออัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.3 - 0.38 ที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินนี้ทำให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนของแข็งมากกว่าร้อยละ 80 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ที่ 17.5 ถึง 20 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของถ่านหิน มีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 70 ถึง 80 และค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์อยู่ที่ร้อยละ 68 ถึง 82

ส่วนอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินที่เหมาะสมจะขึ้นกับปริมาณอากาศที่ใช้ในการผลิตแก๊สและชนิดของแก๊สเชื้อเพลิงที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินเท่ากับ 3.2 ควรจะมีการป้อนอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.2 เข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาภายในเตา เพื่อให้ได้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่สูงที่สุด (20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) หรือถ้ากระบวนการผลิตแก๊สนี้ต้องการเชื้อเพลิงที่สะอาด เพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ปริมาณไอน้ำที่มากขึ้นก็จะช่วยลดปริมาณแก๊ส CO และเพิ่มปริมาณแก๊ส H₂

6.7 การวิเคราะห์ตามหลักเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ตามหลักเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้ จะคิดจากค่าลงทุน (Capital cost) ที่ประกอบด้วยค่าอุปกรณ์หลักๆคือเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและหัวเผาแก๊ส รวมถึงระบบสนับสนุนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วยระบบลำเลียงถ่านหิน ระบบทำความสะอาดแก๊สที่ออกจากเตา ค่าการดูแลรักษา (Maintenance cost) และ ค่าดำเนินงาน (Operating cost) มูลค่าผลตอบแทนจะคิดจากจำนวนเงินที่ประหยัดได้เมื่อใช้เชื้อเพลิงถ่านหินมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตา การดำเนินการสำหรับถ่านหินอินโดมินโคคิดที่อัตราส่วนอากาศและไอน้ำที่เงื่อนไขในหัวข้อที่ 6.6 จะได้ปริมาณถ่านหินที่ต้องใช้ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง เท่ากับ

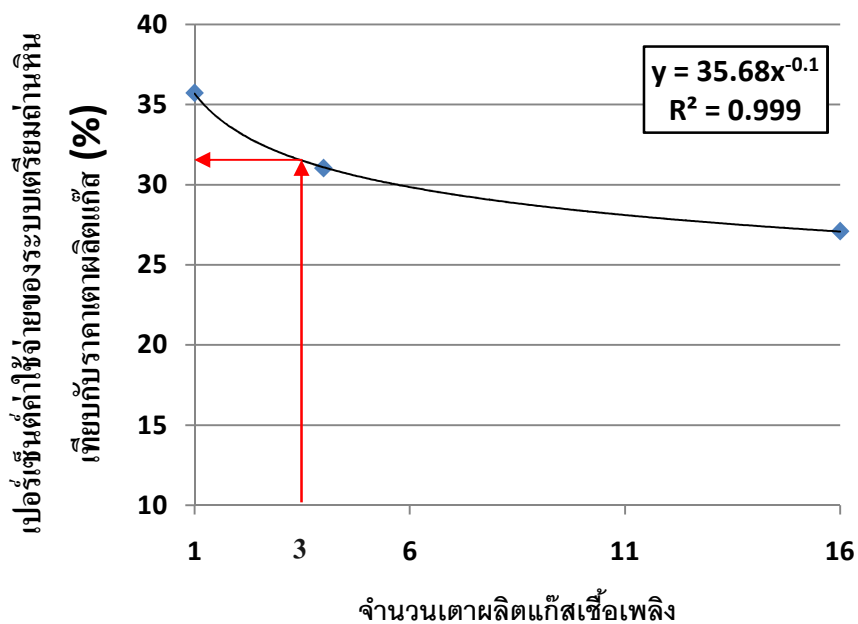
3,133.37 ถึง 3,581 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยคิดจากค่าความร้อนที่ต้องใช้ทั้งหมดภายในเตาเผาเหล็ก และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ต่อถ่านหินหนึ่งกิโลกรัม (วิธีการคำนวณดูได้จาก ภาคผนวก ก.) หลังจากได้ปริมาณถ่านหินที่ต้องใช้ทั้งหมดเพื่อทดแทนน้ำมันเตาภายในเตาเผาเหล็ก จะสามารถนำไปหาขนาดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้ การวิเคราะห์ทางหลักเศรษฐศาสตร์แบบเป็น ส่วนๆ ได้ดังนี้

ค่าลงทุนในส่วนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier cost)

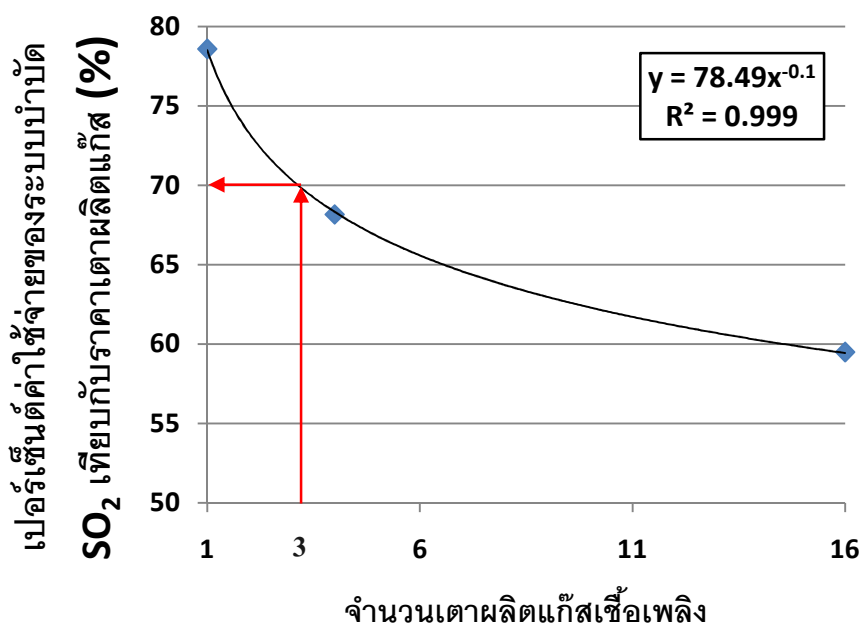
ขนาดของเตาผลิตแก๊สได้จากการนำปริมาณถ่านหินที่ต้องใช้ โดยใช้เตาผลิตแก๊สของบริษัทในประเทศไทยบริษัทหนึ่ง เนื่องจากการบริการหลังการขาย รวมถึงราคาเตาผลิตแก๊สของ ประเทศจีนเมื่อรวมภาษีอากรแบบซีไอเอฟ (Cost Insuranced Freigh discharging port; C.I.F.) จะมี ราคาที่สูงกว่าเตาผลิตแก๊สของประเทศไทยเมื่อเทียบที่เตาขนาดเดียวกัน เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ ต้องใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 3 เมตร มีค่าความร้อนที่สามารถผลิตได้ต่อชั่วโมง เท่ากับ 26,108 เมกะจูลต่อชั่วโมง (ข้อมูลของผู้ขาย) ดังนั้นต้องใช้เตาผลิตแก๊สขนาดนี้จำนวนทั้งสิ้น สามตัว เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดอากาศไหลขึ้นหนึ่งตัวมีมูลค่า 3,500,000 บาท โดยให้ค่าติดตั้ง และระบบควบคุมเท่ากับ 35% และ 50% ของราคาเตาตามลำดับ

ค่าลงทุนในส่วนของหัวเผาแก๊ส (Burner cost)

เนื่องจากในระบบเดิมใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาเหล็ก การเปลี่ยนมาใช้แก๊ส เชื้อเพลิงจึงมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนหัวเผามาเป็นหัวเผาแก๊ส ค่าลงทุนในส่วนหัวเผาทั้งสิ้น 18 หัว มีมูลค่า 13,000,000 บาทประกอบด้วย Preheating zone 4 หัว (10MMBtu/hour/burner), Heating zone 4 หัว (10MMBtu/hour/burner) และ Soaking zone 10 หัว (3MMBtu/hour/burner) ส่วนค่า ติดตั้ง และค่าระบบควบคุมเท่ากับ 5,000,000 และ 9,000,000 บาทตามลำดับ (ข้อมูลของผู้ขาย)



รูปที่ 6.9 เปอร์เซ็นต์ค่าใช้จ่ายในการเตรียมถ่านหินเทียบกับค่าใช้จ่ายในส่วนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง [21]



รูปที่ 6.10 เปอร์เซ็นต์ค่าใช้จ่ายของระบบบำบัดแก๊ส SO₂ เทียบกับค่าใช้จ่ายในส่วนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง [21]

ค่าลงทุนในส่วนสนับสนุนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ค่าลงทุนในส่วนนี้ได้อ้างอิงจากรายงานการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินอเมริกา[21] ที่ชนิดและขนาดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเดียวกัน ค่าลงทุนในส่วนนี้แบ่งได้เป็นสองส่วนด้วยกัน คือ ระบบเตรียมถ่านหินก่อนเข้าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และระบบการบำบัดแก๊ส เช่น ระบบการลำเลียงถ่านหิน ระบบการบดถ่านหิน และระบบการบำบัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยคิดเป็น 32 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ตามลำดับ ค่านี้ได้จากการหาเส้นแนวโน้มของข้อมูล แสดงได้ในรูปที่ 6.9 และ 6.10 ตามลำดับ (สามารถดูเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ค.)

ค่าการดูแลรักษา (Maintenance cost)

ในงานวิจัยนี้คิดค่าการดูแลรักษาของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ ร้อยละ 3 ต่อปีของค่าการลงทุนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยอ้างอิงมาจากรายงานวิจัยที่ได้วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์สำหรับเตาขนาด 3 เมตรเช่นกัน [21] คิดเป็นมูลค่า 315,000 บาทต่อปี

ค่าการดำเนินงาน (Operating cost)

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วย ค่าการผลิตไอน้ำและค่าไฟฟ้าต่างๆ ขึ้นกับปริมาณของถ่านหินที่นำมาผลิตแก๊ส คิดเป็นร้อยละ 10 ของค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้ (ข้อมูลของผู้ขาย) คิดเป็นมูลค่า 2,355,891.44 ถึง 2,692,447.36 บาทต่อปี (ดูเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ค.)

มูลค่าผลตอบแทน

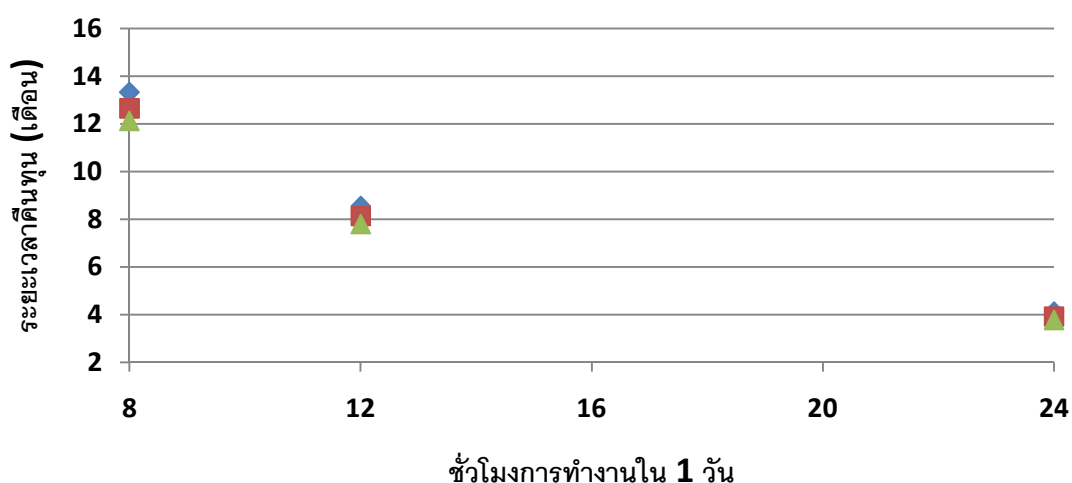
ผลตอบแทนในงานวิจัยนี้คือจำนวนเงินที่สามารถประหยัดได้ในส่วนของเชื้อเพลิงเมื่อใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหินเพื่อทดแทนน้ำมันเตา คิดเป็น 20,956.67 ถึง 22,551 บาทต่อชั่วโมง (ดูเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ค.)

ความคุ้มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้จะอธิบายด้วย ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าลงทุนของโครงการคำนวณได้จาก

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี}}$$

ระยะเวลาคืนทุนจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆไม่ว่าจะเป็นเวลาในการดำเนินงานของเตาผลิตแก๊สและเตาเผาเหล็ก เจริญใจในการดำเนินการภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง รวมถึงราคาของถ่านหินและน้ำมันเตา

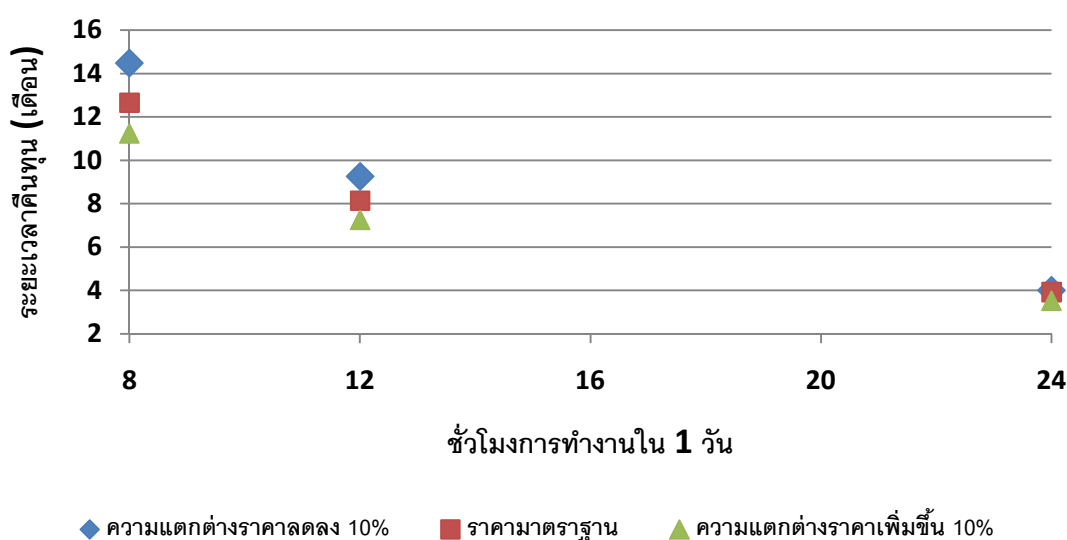
ระยะเวลาคืนทุนเมื่อพิจารณา เวลาในการดำเนินงานที่ 8, 12 และ 24 ชั่วโมงต่อวัน หรือที่ภาระงานเท่ากับ 33%, 50% และ 100% ตามเงื่อนไขการดำเนินการที่ให้ค่าความร้อนแก๊สเชื้อเพลิงมากที่สุด (20 เมกะจูลต่อชั่วโมง) ปานกลาง (18.75 เมกะจูลต่อชั่วโมง) และน้อยที่สุด (17.5 เมกะจูลต่อชั่วโมง) และให้ระยะเวลาการใช้งานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ 10 ปี สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6.11



◆ Min operate (17.5MJ/kg_coal) ■ Avg condition (18.75 MJ/kg_coal) ▲ Max operate(20MJ/kg_coal)

รูปที่ 6.11 ระยะเวลาคืนทุนของการเปลี่ยนระบบจากน้ำมันเตาเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาเหล็ก ขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง ตามเงื่อนไขในการดำเนินการและชั่วโมงการทำงาน

จากรูป 6.11 ระยะเวลาคืนทุนจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการดำเนินงานเป็นสำคัญ หากเวลาในการทำงานมากก็จะคืนทุนได้เร็ว โดยมีระยะเวลาคืนทุนอย่างช้าที่สุดเท่ากับ 13 เดือนและอย่างรวดเร็วที่สุด 4 เดือน นอกจากนี้ราคาของถ่านหินและน้ำมันเตาก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อระยะเวลาคืนทุน จากรูปที่ 6.12 เมื่อเปรียบเทียบกรณีความแตกต่างของราคาถ่านหินและน้ำมันเตามากขึ้น 10% (ราคาน้ำมันเตาส่งขึ้น 5% และราคาถ่านหินต่ำลง 5%) และความแตกต่างของราคาถ่านหินและน้ำมันเตาน้อยลง 10% (ราคาน้ำมันเตาต่ำลง 5% และราคาถ่านหินสูงขึ้น 5%) เทียบกับกรณีพื้นฐาน (ราคาเฉลี่ย ณ ไตรมาส แรกของปี 2555) ที่ใช้เงื่อนไขในการดำเนินการที่ให้ค่าความร้อนปานกลาง (18.75 MJ/kg) จะแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของความแตกต่างของราคาของถ่านหินและน้ำมันเตามีผลต่อระยะเวลาคืนทุนมากกว่าเงื่อนไขในการดำเนินการ



รูปที่ 6.12 ระยะเวลาคืนทุนของการเปลี่ยนระบบจากน้ำมันเตาเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง ตามความแตกต่างของราคาของเชื้อเพลิงถ่านหินกับน้ำมันเตาและชั่วโมงการทำงาน

แม้ว่าระบบการผลิตแก๊สจะมีค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า แต่มีข้อเสียเช่นกันคือ จำเป็นต้องมีพื้นที่กว้างขวางเพียงพอสำหรับสำรองถ่านหินไว้ใช้ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และแก๊สไอเสียจะสกปรกเนื่องจากถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์ที่มากกว่าน้ำมันเตา รวมถึงการใช้ถ่านหินมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนั้นก็มีภาพลักษณ์ที่เสียหายในสายตาหรือความคิดของคนทั่วไปทำให้ถูกต่อต้าน ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงลงได้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักของสมดุลความร้อนเคมีเข้ามาวิเคราะห์ ผลของแบบจำลองสามารถนำไปทำนายหาค่าโมลของผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้เป็นอย่างดี ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัย และข้อเสนอแนะต่างๆ

7.1 สรุปผลงานวิจัย

1. แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถอธิบายกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนในเตาผลิตแก๊สชนิดเอ็นเทรนโพล์น้อยที่สุด รองลงมาคือ เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไคซ์เบด และเตาผลิตแก๊สชนิดอากาศไหลขึ้นตามลำดับ แม้ว่าเตาผลิตแก๊สชนิดอากาศไหลขึ้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าเตาชนิดอื่นๆ แต่ก็ให้ค่า RMSE ที่ไม่เกิน 2.5

2. แบบจำลองสมดุลทางความร้อนในงานวิจัยนี้มีขอบเขตการใช้งาน คือ ระบบผลิตแก๊สนั้นๆจำเป็นต้องเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่มีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่สูง มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 60 ในแง่ของเชื้อเพลิง ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงต้องไม่มากกว่าร้อยละ 15 ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงถ่านหินน้อยกว่าร้อยละ 10 และเชื้อเพลิงถ่านหินที่นำมาใช้ควรเป็นถ่านหินชนิดบิทูมินัสหรือแอนทราไซต์ เพื่อให้ระบบเข้าใกล้สภาวะสมดุลทางความร้อนเคมีมากที่สุด

3. กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะขึ้นกับอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินเป็นสำคัญ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพทางความร้อนจะมีปริมาณมากที่สุดที่อัตราส่วนอากาศและไอน้ำต่อถ่านหิน ที่ทำให้คาร์บอนของแข็งหมดลงพอดี

4. ผลจากแบบจำลองเมื่อใช้ถ่านหินบิทูมินัส อินโดมินโค จากประเทศอินโดนีเซีย พบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินควรอยู่ระหว่าง 2.6 ถึง 3.3 หรือเทียบเป็นอัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.3 ถึง 0.38 ที่อัตราส่วนอากาศนี้จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนของแข็งมากกว่าร้อยละ 80 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 17.5 ถึง 20 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของถ่านหิน มีค่า

ประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 70 ถึง 80 และค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์อยู่ที่ร้อยละ 68 ถึง 82 ส่วนอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินที่เหมาะสมจะขึ้นกับอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินที่ใช้ และชนิดของแก๊สเชื้อเพลิงที่ต้องการ

5. หากเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมงได้มีการเปลี่ยนระบบจากการใช้น้ำมันเตา มาเป็นการใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหินอินโดมินโค จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงได้ถึงชั่วโมงละ 20,957 ถึง 22,550 บาท และมีระยะเวลาคืนทุนอย่างช้า 13 เดือน โดยระยะเวลาคืนทุนนี้คิดจากการให้เตาผลิตแก๊สและเตาเผาเหล็กทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ปีละ 365 วัน และจะน้อยลงหากเวลาในการดำเนินงานมากยิ่งขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. หลังจากที่ได้ขนาดที่แน่นอนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแล้ว ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปแบบการไหลของแก๊สต่างๆภายในเตา การสลายตัวของถ่านหิน น้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มเข้าไปเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 หรือ 3 มิติ หรือจะเป็นการทดลอง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

2. ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตารางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง จึงควรใช้สมการคุณสมบัติต่างๆของแก๊ส เช่นสมการเอนทัลปีตามอุณหภูมิ มาช่วยในการคำนวณแทนที่ตารางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้กับแบบจำลอง และควรลองศึกษาผลของแก๊สจริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

3. แม้ว่าระยะเวลาคืนทุนของระบบการผลิตแก๊สจะต่ำ แต่ก็มีข้อเสียเช่นกันคือจำเป็นต้องมีพื้นที่ในการสำรองถ่านหิน และในประเทศไทย ถ่านหินมีภาพลักษณ์ที่ไม่ดีในความคิดของคนทั่วไปทำให้ถูกมองข้ามไป

รายการอ้างอิง

- [1] Golaka, A., Pairintra, R. and Hirunlabh, J. Study on coal steam gasification in up draft gasifier. Journal of Kasetsart University 38 (2000): 369-375.
- [2] Duan, F., Jin, B., Huang, H., Li, B., Wu, Y. and Zhang, M. Results of Bituminous Coal Gasification upon Exposure to a Pressurized Pilot-Plant Circulating Fluidized-Bed (CFB) Reactor. Energy Fuels 24 (2010): 3150-3158.
- [3] Tangtrakul, M. and Samerpark, C. A study of gasification of low quality coal for energy conservation. MENETT 18 (2004): 720-725.
- [4] Jainak, C. A study of gasification of low quality coal for energy conservation. Mater thesis, Department of Mining and Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2004.
- [5] Khadse, A., Parulekar, P., Aghalayam, P. and Ganesh, A. Equilibrium Model for Biomass Gasification. Advances in Energy Research (2006): 106 - 112.
- [6] Yoshida, H. et al. Two-stage Equilibrium Model for a Coal Gasifier to Predict the Accurate Carbon Conversion in Hydrogen Production. Fuel 87(2008): 2186–2193.
- [7] Jarungthammachote, S. and Dutta, A.. Thermodynamic Equilibrium Model and Second Law Analysis of a Downdraft Waste Gasifier. Energy 32 (2007): 1660-1669.
- [8] Cau, G., Cocco, C. and Tola, V. Computer Simulation and Performance Evaluation of Fixed-bed Coal Gasifiers. Second International conference on Clean Coal Technology for our Future, 2005
- [9] Melgar, A., Perez, J.F., Laget, H. and Horillo, A. Thermochemical Equilibrium Modelling of a Gasifying Process. Energy Conversion and Management 48 (2007): 59–67.
- [10] Huang, H.J. and Ramaswamy, S. Modeling Biomass Gasification Using Thermodynamic Equilibrium Approach. Apply Biochem Biotechnol 154 (2009): 193–204.

- [11] Li, X., Grace, J.R., Watkinson, A.P., Lim, C.J. and Ergudenler, A. Equilibrium Modeling of Gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier. Fuel 80 (2001): 195-207.
- [12] Tola, V. and Cau, G. (2007). Process analysis and performance evaluation of updraft coal gasifier. In Proceedings of the 3rd. international conference on clean coal technologies for our future, Italy, 2007
- [13] Brown, B.W., Smoot, L.D. and Hedman, P.O. Effect of coal type on entrained gasification. Fuel 65 (1985): 673-678.
- [14] Klaimulk, S. A comparison of producer gas from compressed hyacinth of up draft and down draft furnances. Master thesis, Department of Energy Technology, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2001.
- [15] Channiwala, S.A. and Parikh, P.P. A Unified Correlation for Estimating HHV of Solid, Liquid and Gaseous Fuels, Fuel 81(2002) :1051-1063.
- [16] Santos, M. Solid fuels combustion and gasification, 2ed, Marcel Dekker, Inc, 2004.
- [17] Altafini, C.R., Wander, P.R. and Barreto, R.M. Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model. Energy Conversion and Management 44 (2003): 2763–2777.
- [18] Vaezi, M., Passandideh-fard, M. and Moghiman, M. On a Numerical Model for Gasification of Biomass Materials. Journal of Fuel and Combustion (2007): 76-82.
- [19] Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D. Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis. Energy Conversion and Management 47 (2006):1723–1737.
- [20] Hobbs, M.L., Radulovic, P.T. and Smoot L.D. Prediction of effluent compositions for fixed-bed coal gasifiers. Fuel 71 (1992): 1177- 1194.
- [21] Thimsen, D., Maurer, R.E. Liu, B.Y.H, Pui, D. and Kittelson, D. Fixed-bed gasification research using u.s. coals, Vol 19, executive summary. A minerals and materials contract report, 1985.

- [22] Lian-young, W., Jin-ju, C., Yan-hua, Z., Hong, T. and Han-qiao, L. High Temperature Air Gasification of Coal by a Fixed Bed Gasifier. Power and Energy Engineering Conference (2010).
- [23] Sugiyama, S., et al. Gasification performance of coals using high temperature air. Energy 30 (2005): 399–413.
- [24] Li, X., Grace, J.R., Watkinson, A.P. Lim, C.J. and Ergudendenler, A. Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier. Fuel 80 (2001): 195-207.
- [25] Nguyen, T.D.B, Lim, Y., Song, B., Kim S., Joo, Y. and Ahn, D. Two-stage equilibrium model applicable to the wide range of operating conditions in entrained-flow coal gasifiers. Fuel 89 (2010): 3901–3910.
- [26] Kim, J., Pudasainee, D. Yoon, Y., Son, S. and Seo, Y. Studies on speciation changes and mass distribution of mercury in a bituminous coal-fired power plant by combining field data and chemical equilibrium calculation. Ind. Eng. Chem. Res. 49 (2010): 5197-5203.
- [27] Govind, R. and Shah, J. Modeling and simulation of an entrained flow coal gasifier. AIChE Journal 30 (1984): 79-92.
- [28] Higman, C. and Burgt, M.V.D. Gasification, 2 ed., Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2008.
- [29] Welford, G.B., et al. Gasifier Developments and the Air Blown Gasification Cycle, Mitsui Babcock Energy Ltd., 2000.
- [30] Prins, M.J. and Ptasinski, K.J. Energy and exergy analyses of the oxidation and gasification of carbon. Energy 30 (2005): 982–1002.
- [31] เขาวชิร อชวังกุล. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล, ใน การอบรมความรู้เรื่องการผลิตก๊าซชีวภาพและเทคโนโลยีก๊าซซิฟิเออร์ 17 มิถุนายน 2553 , กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, 2553.
- [32] Jayah, T.H., Aye, L., Fuller, R.J. and Stewart, D.F. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. Biomass and Bioenergy 25 (2003): 459 – 469.

- [33] Prins, M.J., Ptasiński, K.J., Janssen, F.J.J.G. Thermodynamics of gas-char reactions: first and second law analysis. Chemical Engineering Science 58 (2003): 1003 – 1011.

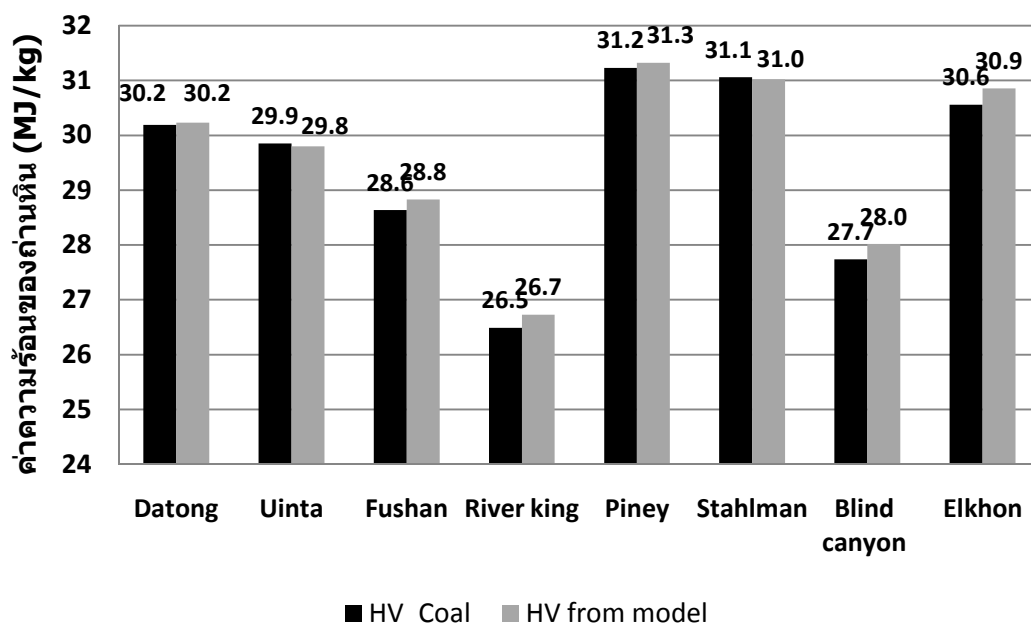
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

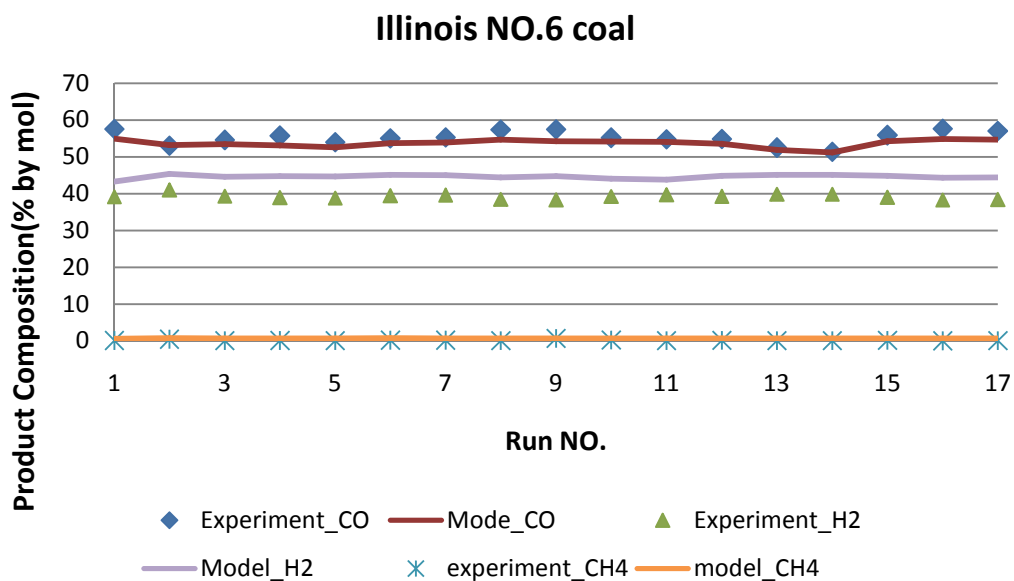
การตรวจสอบความถูกต้องและขอบเขตการจำลอง(เพิ่มเติม)

ในภาคผนวก ก. จะแสดงถึงผลการตรวจสอบความถูกต้องเพิ่มเติมที่ไม่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5 เพื่อหาเงื่อนไขและขอบเขตการใช้งานของแบบจำลอง

จากรูปที่ ก.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนจริงของถ่านหินกับค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลอง เห็นได้ว่าค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนจริงของถ่านหิน ดังนั้นสมการของ S.A. Channiwala และ P.P. Parikh [15] สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนของถ่านหินได้ในกรณีที่ไม่ทราบค่าความร้อนของถ่านหิน จากสมการข้างต้นนี้มีขอบเขตคือ $0\% < C < 92.25\%$, $0.43\% < H < 25.15\%$, $0\% < O < 50\%$, $0\% < N < 5.6\%$, $0\% < S < 94.08\%$, $0\% < \text{Ash} < 71.4\%$ และ $4.745\text{MJ/kg} < \text{HHV} < 55.345\text{ MJ/kg}$



รูปที่ ก.1 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจริงของถ่านหินกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการของ S.A. Channiwala และ P.P. Parikh



รูปที่ ก.2 ผลจากแบบการทดลองและแบบจำลองของถ่านหินบิทูมินัส Illinois No.6 [27] ภายในเตาเอ็นเทรนโพล์

รูปที่ ก.2 แสดงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินบิทูมินัส Illinois No.6 ภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเอ็นเทรนโพล์ ผลจากแบบจำลองจะให้ค่าแก๊สเชื้อเพลิง H_2 มากกว่าความเป็นจริง เนื่องจากสมมุติฐานของแบบจำลองที่ว่า ระบบเข้าสู่สมดุลทางความร้อนเคมี และมีเวลาในการทำปฏิกิริยาเพียงพอ แต่ถึงอย่างไรก็ตามค่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากแบบจำลองก็มีแนวโน้มเดียวกับที่ได้ออกจากการทดลอง

ตาราง ก.1 เป็นผลจากแบบจำลองและการทดลองของระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินบิทูมินัส High vale ภายในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด เห็นได้ว่าการรันครั้งที่ 4, 7 และ 8 ให้ผลค่าความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า 2.5 ทำให้ผลจากแบบจำลองไม่สามารถอธิบายระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากในการทดลองนั้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่น้อยกว่าร้อยละ 60 ซึ่งเป็นเงื่อนไขการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ไม่ดี เหลือคาร์บอนของแข็งอยู่มาก อาจเป็นเพราะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ไม่เพียงพอ ส่งผลระบบมีโอกาสน้อยที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งขัดแย้งกับสมมุติฐานของแบบจำลอง

ตาราง ก.1 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของถ่านหิน Highvale ภายในเตา
ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด [24]

Gas composition (% by vol)	Highvale Coal [24]							
	Run No.1	Run No.2	Run No.3	Run No.4	Run No.5	Run No.6	Run No.7	Run No.8
EXP								
CO	10.2	9.1	10.1	13.4	12	13.2	13.6	9.7
CO ₂	15.7	15	14.2	13.3	13.1	12.3	13	15.5
H ₂	8	5.6	5.6	10.4	8.5	8.4	9.9	8.8
CH ₄	1	0.5	0.5	1	0.8	0.8	1	1
N ₂	65.1	69.8	69.6	61.9	65.6	65.3	62.5	65.1
CC (%)	61.4	73.8	77.4	56.2	65.2	68.1	58.8	51.1
Model								
CO	9.671	12.31	13.61	5.255	12.67	13.39	6.219	4.577
CO ₂	14.97	13.43	12.67	17.56	13.21	12.8	17	17.96
H ₂	5.06	5.405	5.577	4.089	5.439	5.561	4.409	4.286
CH ₄	2.378	1.931	1.725	3.352	1.875	1.756	3.093	3.436
N ₂	67.92	66.93	66.42	69.74	66.8	66.5	69.28	69.74
CC (%)	59.32	67.39	71.9	48.42	68.65	71.1	50.53	46.56
RMSE	1.97	2.15	2.29	6.19	1.57	1.46	5.49	4.0

ตาราง ก.2 เป็นตารางเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองของถ่านหินชนิดต่างๆ ภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลขึ้น จะเห็นว่า Absoloka, Benton, Kemmerrer, Leucite , Rosebud , Utah และ Bind canyon มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่า 2.5 เนื่องจากถ่านหินทั้ง 5 ชนิดนี้ มีปริมาณความชื้นและซีถ้าอยู่ปริมาณมาก ทำให้ไม่สามารถนำแบบจำลองมาใช้ทำนายองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจาก ความชื้นและซีถ่านนี้มีผลอย่างมากต่อการผลิตแก๊ส ทำให้อุณหภูมิภายในเตาต่ำกว่าที่ควรจะเป็น และมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี ทำให้ปฏิกิริยาภายในเตาไม่เข้าสู่สภาวะที่สมดุล และเวลาในการทำปฏิกิริยานานยิ่งขึ้น

ตาราง ก.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองของถ่านหินชนิดต่างๆภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น

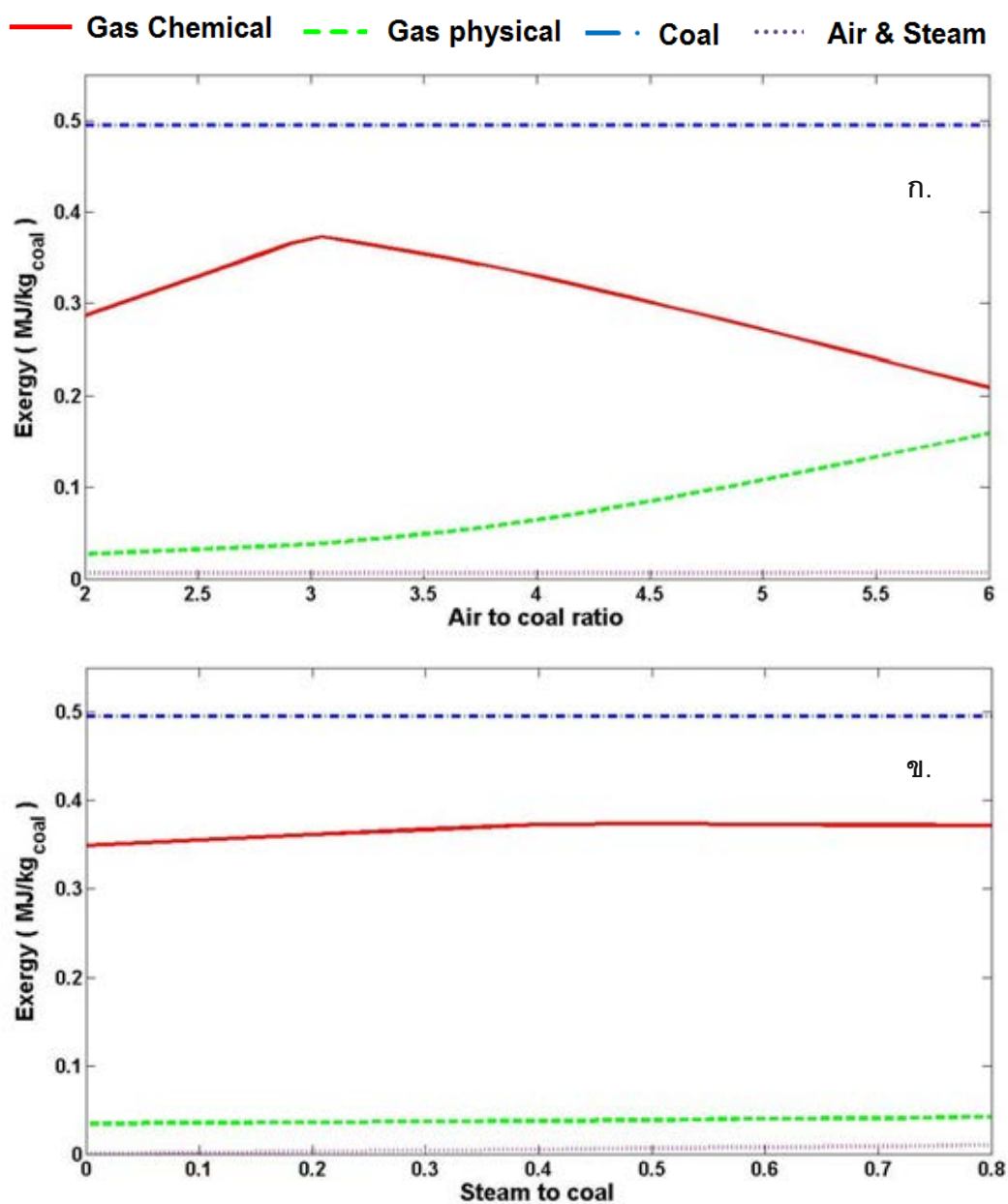
Proximate and Ultimate analysis (% by wt)	REF[20]						
	Sub-bitu Absoloka	Lignite Benton	Bitu Jetson	Bitu Elkhon	Bitu Illinois NO6	Sub-bitu Kemmerrer	Sub-bitu Leucite
C	76.3	73.7	81.4	82.5	78.5	77.5	78.1
H	5.1	6.2	5.1	5.7	5.7	5.6	5
O	17.4	18.2	10.2	9.3	10.2	14.7	14.4
N	0.8	1	1.8	1.6	1.4	1.2	1.9
S	0.4	0.9	1.6	0.9	4.2	1	0.6
Ash	6.3	6.4	4.3	4.7	9.3	5.7	9
MC	23.5	32.8	6.3	4.6	10.3	16.8	17.4
Exp(% by vol)							
CO	30.8	23	24.7	27.6	22.9	29.5	30.3
CO ₂	4.06	10.1	5.67	5.1	7.5	4.96	4.9
H ₂	17.9	20.2	17.2	17.9	16.3	16.3	18.2
CH ₄	1.38	1.7	1.6	1.6	1.7	1.79	1.63
N ₂	44.9	43.6	49.6	46.5	49.7	46.3	44
Model(% by vol)							
CO	20.11	9.389	24.78	25.07	21.52	21.64	21.11
CO ₂	10.83	17.8	5.77	4.65	6.87	8.28	9.165
H ₂	18.46	17.47	18.40	19.61	19.43	19.24	18.99
CH ₄	6.556	14.98	3.03	3.07	4.47	5.431	5.72
N ₂	44.04	40.36	48.02	47.60	47.71	45.41	45.01
RMSE	6.13	9.37	1.09	1.61	2.18	4.37	4.92

Proximate and Ultimate analysis (% by wt)	REF[20]		REF[21]				REF[22]
	Sub-bitu Rosebud	Bitu Utah	Bitu Stahlman	Bitu Piney	Bitu blnd canyon	Bitu Jetson	Bitu Fushan
C	78.7	80.3	74.2	73.6	66.52	71.9	73.91
H	4.9	6.2	5	5.2	5.09	4.2	5.59
O	14	11.7	6.6	5.6	11.4	8.7	10.69
N	1.1	1.2	1.5	1.3	0.96	1.6	1.32
S	1.3	0.6	1	3	0.52	1.4	0.63
Ash	11.8	11.1	3.2	9.4	11.1	5.2	7.87
MC	21.3	6.1	8.1	1.9	6.4	7.1	3.5
Exp(% by vol)							
CO	30	27	13.57	20.91	27.18	24.86	26.81
CO ₂	4.47	6.25	12.73	9.07	6.34	5.71	5.37
H ₂	16.4	18.3	12.56	14.44	18.42	17.31	16.54
CH ₄	1.6	1.93	1.30	1.13	1.85	1.61	3.1
N ₂	46.5	45.3	59.85	54.44	46.20	50.52	47.71
Model(% by vol)							
CO	20.61	21.85	14.52	19.45	0.10	21.25	22.68
CO ₂	9.652	6.447	11.50	7.83	16.81	8.093	5.652
H ₂	18.6	20.73	11.49	16.05	1.52	15.46	19.25
CH ₄	5.981	4.917	3.24	3.48	12.15	3.231	3.964
N ₂	45.16	46.05	59.25	53.19	69.36	51.96	48.45
RMSE	5.31	2.90	1.24	1.63	18.82	2.32	2.27

ภาคผนวก ข.

ผลของค่าเอกซ์เซอียต่ออัตราส่วนอากาศและไอน้ำ

ในภาคผนวก ข. จะอธิบายถึงผลของค่าเอกซ์เซอียขาเข้าและขาออกของระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินอินโดมินโค ที่ได้จากแบบจำลอง โดยแบ่งตามการป้อนอากาศและไอน้ำ



รูปที่ ข.1 ค่าเอกซ์เซอียของแก๊สผลิตภัณฑ์ ถ่านหิน และสารตัวกลาง (อากาศและไอน้ำ)

ก) อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน ข) อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน

ค่าเอกซ์เซอจี คือ ศักยภาพในการทำงาน หรืองานใช้ประโยชน์สูงสุดที่ระบบผลิตได้ในระหว่างกระบวนการ โดยระบบดำเนินไปในทางที่ผันกลับได้จนกระทั่งสถานะของระบบเหมือนหรือสมดุลกับสถานะแวดล้อม ค่าเอกซ์เซอจีของของไหลในที่นี้คือแก๊สผลิตภัณฑ์และสารตัวกลางจะขึ้นกับองค์ประกอบและอุณหภูมิกับความดัน ซึ่งแบ่งได้เป็น เอกซ์เซอจีทางเคมีและเอกซ์เซอจีทางกายภาพ

เอกซ์เซอจีทางเคมี (Chemical exergy) เป็นความสามารถในการทำงานสูงสุดที่องค์ประกอบของสารตั้งต้นนั้นๆ ที่ถูกป้อนในสถานะสิ่งแวดล้อมและถูกปล่อยออกมาที่สถานะตาย (Dead state) หรือสถานะที่สารภายในสมดุลทางอุณหภาพ ทางกล ทางเคมี และสิ่งแวดล้อม

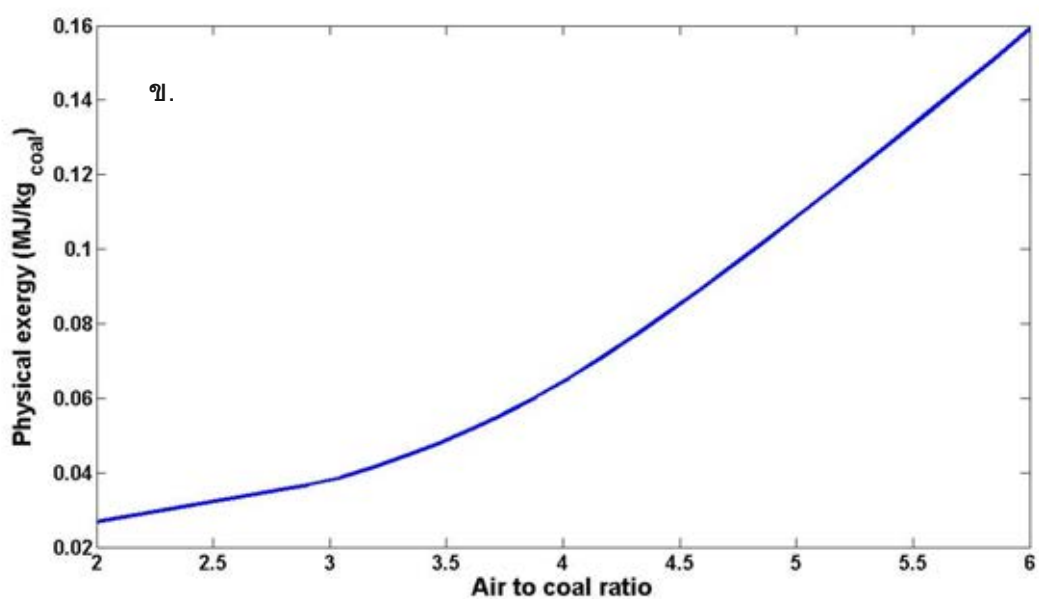
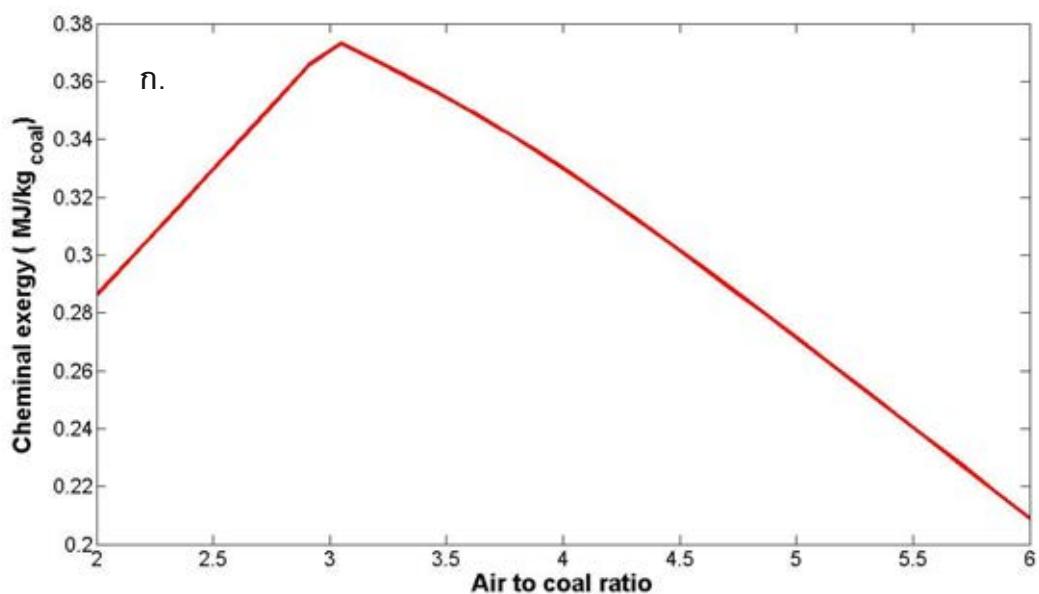
เอกซ์เซอจีทางกายภาพ (Physical exergy) เป็นความสามารถในการทำงานสูงสุดที่องค์ประกอบของสารตั้งต้นนั้นๆ สามารถทำได้ เมื่อเทียบกับสิ่งแวดล้อม (T_{ref} และ P_{ref}) สามารถคำนวณได้จากค่าเอนทัลปี และ เอนโทรปีดังสมการในบทที่ 4

จากรูปที่ ข.1 แสดงให้เห็นว่าค่าเอกซ์เซอจีของแก๊สผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่ออัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน โดยค่าเอกซ์เซอจีที่มีผลต่อระบบคือเอกซ์เซอจีของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่ประกอบด้วยเอกซ์เซอจีของแก๊ส CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O , N_2 และ SO_2 เอกซ์เซอจีของถ่านหินมีค่าคงที่ตลอดอัตราส่วนอากาศที่ป้อน และเอกซ์เซอจีของสารตัวกลาง (อากาศและไอน้ำ) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเอกซ์เซอจีของแก๊สผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ ข.2 แสดงค่าเอกซ์เซอจีทางเคมีและทางกายภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ตามอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน เอกซ์เซอจีทางเคมีจะมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินที่ทำให้คาร์บอนของแข็งหมดลงพอดี ที่อัตราส่วนอากาศน้อยค่าเอกซ์เซอจีทางเคมีจะน้อยลงเพราะมีคาร์บอนของแข็งเหลือในระบบอยู่มากทำให้ได้ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่น้อยลง หากอัตราส่วนอากาศมากค่าเอกซ์เซอจีทางเคมีก็จะลดน้อยลงเช่นกัน เนื่องมาจากปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ CO , H_2 และ CH_4 มีปริมาณลดลง ซึ่งแก๊สทั้งสามตัวนี้มีค่าเอกซ์เซอจีทางเคมีที่สถานะมาตรฐาน (Standard chemical exergy) สูงกว่าผลิตภัณฑ์ตัวอื่นๆ ในกรณีของเอกซ์เซอจีทางกายภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหินเนื่องจากแก๊สผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ค่าเอนทัลปีขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

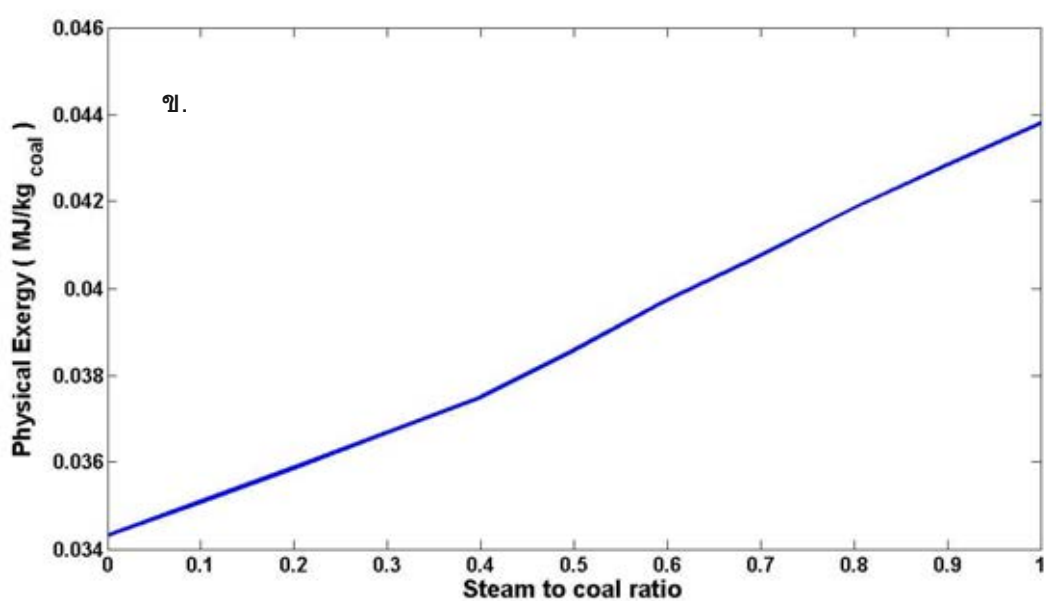
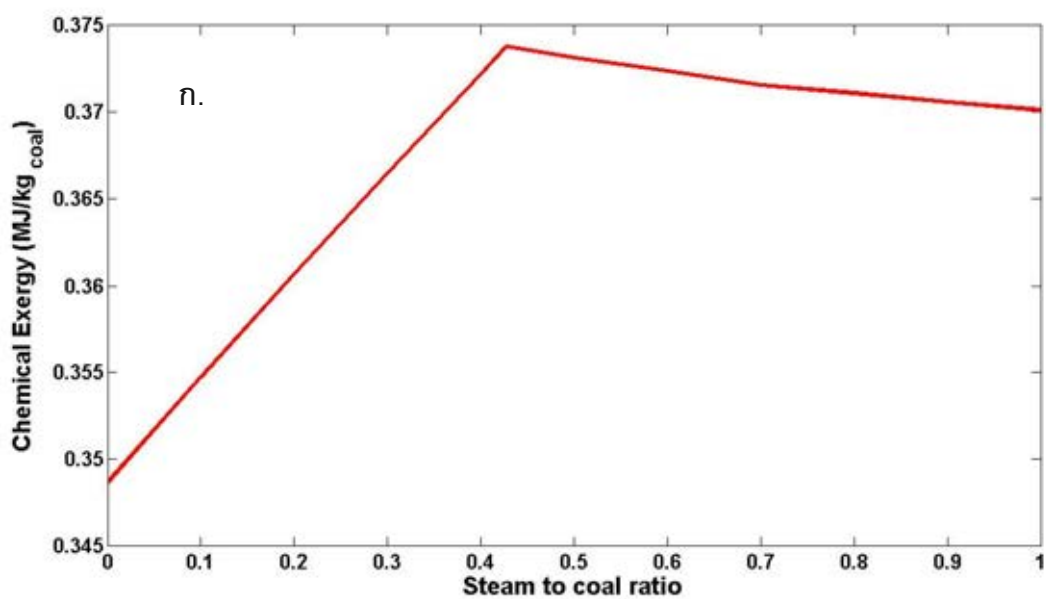
จากรูป ข.3 แสดงค่าเอกซ์เซอจีทางเคมีและทางกายภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ตามอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน ค่าเอกซ์เซอจีทางเคมีจะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินที่ทำให้คาร์บอน

ของแข็งหมดพอดีเช่นกันกับอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน และจะลดลงตามปริมาณคาร์บอนของแข็งที่มากขึ้น หลังจากคาร์บอนของแข็งหมดลงแล้วที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินที่มากขึ้น ค่าเอกซ์เซอียทางเคมีก็จะลดลงเช่นกัน แต่ลดในสัดส่วนที่น้อย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไอน้ำเป็นการลดแก๊สเชื้อเพลิงบางชนิด คือแก๊ส CO แต่เป็นการเพิ่มปริมาณแก๊ส H₂ อย่างไรก็ตามเอกซ์เซอียทางเคมีที่สภาวะมาตรฐาน (Standard chemical exergy) ของแก๊ส CO มีค่าที่มากกว่าแก๊ส H₂ ทำให้เอกซ์เซอียทางเคมีของแก๊สผลิตภัณฑ์ลดลง ในกรณีของเอกซ์เซอียทางกายภาพ ค่าเอกซ์เซอียจะมีค่าที่มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์เป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามค่าเอกซ์เซอียทางกายภาพมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าเอกซ์เซอียทางเคมี เพราะอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากนัก ต่างจากอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน



รูปที่ ข.2 ค่าเอกซ์เซอจีของแก๊สผลิตภัณฑ์ตามอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน

ก) เอกซ์เซอจีทางเคมี ข) เอกซ์เซอจีทางกายภาพ



รูปที่ ข.3 ค่าเอ็กซ์เซอจีของแก๊สผลิตภัณฑ์ตามอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน

ก) เอ็กซ์เซอจีทางเคมี ข) เอ็กซ์เซอจีทางกายภาพ

ภาคผนวก ค.

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิง

ในภาคผนวก ค. จะเป็นการคำนวณปริมาณถ่านหินที่ต้องใช้และค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้เมื่อมีการใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหินมาทดแทนน้ำมันเตาที่ใช้ในระบบเก่า ภายในเตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง ที่โรงงานแห่งหนึ่ง

การคิดหาปริมาณถ่านหินที่ต้องใช้เพื่อทดแทนน้ำมันเตาในเตาเผาเหล็ก

เตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง

ปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ต่อหนึ่งตันเหล็ก 30 ลิตร/ตันเหล็ก

ปริมาณน้ำมันเตาทั้งหมดที่ใช้ในหนึ่งชั่วโมง $50 \times 30 = 1,500$ ลิตร/ชั่วโมง

ค่าความร้อนน้ำมันเตาชนิด C 41.78 เมกะจูล/ลิตร

∴ ค่าความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ $1,500 \times 41.78 = 62,667.35$ เมกะจูล/ชั่วโมง

จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นสำหรับถ่านหินอินโดนีเซีย เมื่อใช้เงื่อนไขที่แนะนำจะได้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ 17.5 ถึง 20 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของถ่านหินดังนั้นจะหาจำนวนถ่านหินที่ต้องใช้เพื่อทดแทนความร้อนที่ใช้ในระบบเก่าได้เท่ากับ

$$\text{ปริมาณการใช้ถ่านหิน } \left(\frac{kg}{hr} \right) = \frac{\text{ค่าความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ในเตาเผาเหล็ก (MJ)}}{\text{ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านหิน 1 กิโลกรัม } \left(\frac{MJ}{kg} \right)}$$

➤ ที่เงื่อนไขที่ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมากที่สุด (20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

$$\therefore \text{ปริมาณการใช้ถ่านหิน } \left(\frac{kg}{hr} \right) = \frac{62,667.35 \text{ MJ}}{20 \frac{MJ}{kg}} = 3,133.37 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

➤ ที่เงื่อนไขที่ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงปานกลาง (18.75 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

$$\therefore \text{ปริมาณการใช้ถ่านหิน } \left(\frac{kg}{hr} \right) = \frac{62,667.35 \text{ MJ}}{18.75 \frac{MJ}{kg}} = 3,342.26 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

➤ ที่เงื่อนไขที่ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงน้อยที่สุด (17.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

$$\therefore \text{ปริมาณการใช้ถ่านหิน} \left(\frac{kg}{hr} \right) = \frac{62,667.35 \text{ MJ}}{17.5 \frac{MJ}{kg}} = 3,581 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้เมื่อใช้แก๊สเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตา

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงได้ใช้ราคาของน้ำมันเตาอ้างอิงจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน ราคาของถ่านหินอ้างอิงจากข้อมูลของบริษัทบ้านปูตามดัชนี BJI หรือ Barlow Jonker Index ซึ่งเป็นดัชนีราคาของถ่านหินที่ใช้ให้ความร้อนในเตาของอาเซียน ราคาของถ่านหินและน้ำมันเตาที่นำมาคำนวณนี้เป็นราคาเฉลี่ยในไตรมาสที่ 1 ของปี 2555

เตาเผาเหล็กขนาด 50 ตันต่อชั่วโมง

ราคาน้ำมันเตา	22.47	บาท/ลิตร
ปริมาณการใช้น้ำมันเตา	1,500	ลิตร/ชั่วโมง
ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงของน้ำมันเตา	$22.47 \times 1,500 = 33,705$	บาท/ชั่วโมง
ราคาถ่านหิน	3.56	บาท/กิโลกรัม

➤ ที่เงื่อนไขที่ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมากที่สุด (20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ปริมาณการใช้ถ่านหิน	3,133.37	กิโลกรัม/ชั่วโมง
ค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงของถ่านหิน	$3.56 \times 3,133.37 = 11,154.79$	บาท/ชั่วโมง
∴ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้	$33,705 - 11,154 = 22,551$	บาท/ชั่วโมง

➤ ที่เงื่อนไขที่ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงปานกลาง (18.75 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ปริมาณการใช้ถ่านหิน	3,342.26	กิโลกรัม/ชั่วโมง
ค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงของถ่านหิน	$3.56 \times 3,342.26 = 11,898.44$	บาท/ชั่วโมง
∴ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้	$33,705 - 11,898.44 = 21,807$	บาท/ชั่วโมง

➤ ที่เงื่อนไขที่ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงน้อยที่สุด (17.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ปริมาณการใช้ถ่านหิน	3,581	กิโลกรัม/ชั่วโมง
ค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงของถ่านหิน	$3.56 \times 3,581 = 12,748.33$	บาท/ชั่วโมง
∴ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้	$33,705 - 12,748 = 20,957$	บาท/ชั่วโมง

การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนเมื่อมีการเปลี่ยนระบบจากการใช้น้ำมันตามมาเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหินภายในเวลาเฉลี่ยหลักขนาด 50 ต้นต่อชั่วโมง

การหาระยะเวลาคืนทุนสำหรับการใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหินเพื่อทดแทนน้ำมันเตาขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งเวลาในการดำเนินงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและเตาเผาเหล็กหรือภาระการทำงาน และ เงื่อนไขในการดำเนินการ ตัวอย่างการหาระยะเวลาคืนทุนสามารถแสดงได้ดังนี้

การวิเคราะห์ตามหลักเศรษฐศาสตร์ตั้งอยู่บนสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและเตาเผาเหล็กมีชั่วโมงการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือภาระการทำงานเท่ากับร้อยละ 33 ในหนึ่งวัน และทำงานทั้งหมด 365 วันต่อปี
2. ให้อายุการใช้งานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ 10 ปี
3. อัตราดอกเบี้ยคงที่ร้อยละ 8
4. คิดที่เงื่อนไขการดำเนินการที่ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงน้อยที่สุด เท่ากับ 17.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม
5. ราคาของน้ำมันเตาและถ่านหินอ้างอิงจากราคาเฉลี่ยในไตรมาสแรกของปี พ.ศ. 2555

ค่าใช้จ่ายส่วนของถ่านหินเท่ากับ $12,748.33 \text{ บาท/ชม.} \times 8 \text{ ชม./วัน} \times 365 \text{ วัน/ปี} = 37,225,123.6 \text{ บาท}$

ค่าลงทุนในส่วนตัวเตาเชื้อเพลิง $3 \times 3,500,000 = 10,500,000 \text{ บาท}$

• ค่าลงทุนในส่วนค่าติดตั้งดำเนินการ $35\% \times 10,500,000 = 3,675,000 \text{ บาท}$

• ค่าลงทุนในส่วนระบบควบคุม $50\% \times 10,500,000 = 5,250,000 \text{ บาท}$

$10,500,000 + 3,675,000 + 5,250,000 =$

รวมค่าลงทุนในส่วนเตาผลิตแก๊ส $19,425,000 \text{ บาท}$

ค่าลงทุนในส่วนของหัวเผา $13,000,000 \text{ บาท}$

• ค่าลงทุนในส่วนค่าติดตั้งดำเนินการ $5,000,000 \text{ บาท}$

• ค่าลงทุนในส่วนระบบควบคุม $9,000,000 \text{ บาท}$

$13,000,000 + 5,000,000 + 9,000,000 =$

รวมค่าลงทุนในส่วนหัวเผา $27,000,000 \text{ บาท}$

ค่าลงทุนในส่วนสนับสนุนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

- การเตรียมถ่านหิน $0.32 \times 10,500,000 = 3,360,000 \text{ บาท}$

- การบำบัดแก๊ส $0.7 \times 10,500,000 = 7,350,000 \text{ บาท}$

ค่าลงทุนเริ่มต้น (เตาเชื้อเพลิง+หัวเผา+ส่วน $19,425,000 + 27,000,000 + 3,360,000$

สนับสนุน) $+ 7,350,000 = 57,135,000 \text{ บาท}$

ค่าดำเนินการในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง $0.1 \times 37,225,123.26 = 3,722,512 \text{ บาท/ปี}$

ค่าดูแลรักษาเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง $0.03 \times 10,500,000 = 315,000 \text{ บาท}$

ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ $20,957 \times 8 \times 365 = 61,193,475.53 \text{ บาท/ปี}$

จากตาราง ค.1 ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปีมีค่าเท่ากับผลตอบแทนสุทธิตลอดปีที่ 1 ถึง 10 คือ 514,739,640 บาท หากด้วยจำนวนปี คือ 10 ปี มีค่าเท่ากับ 51,473,964 บาท ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนเมื่อใช้ถ่านหินจำนวน 3,581 กิโลกรัมต่อชั่วโมงหรือค่าความร้อนเท่ากับ 17.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัมถ่านหิน คำนวณได้ดังนี้

ตาราง ก.1 ค่าใช้จ่าย ผลตอบแทน ผลตอบแทนสุทธิ และมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ เมื่อใช้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความร้อนเท่ากับ 17.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัมถ่านหิน (หน่วย: บาท)

ปี(n)	ค่าลงทุน เริ่มต้น	ค่าการ ดำเนินการ	ค่าดูแล รักษา	ผลตอบแทน	ผลตอบแทน สุทธิ	PWF(8%)	NPV
1	57,135,000	3,722,512		61,193,476	335,964	0.926	311,103
2		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.857	48,982,661
3		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.794	45,381,835
4		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.735	42,009,634
5		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.681	38,923,211
6		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.63	36,008,257
7		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.583	33,321,927
8		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.54	30,864,221
9		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.5	28,577,982
10		3,722,512	315,000	61,193,476	57,155,964	0.463	26,463,211
รวม	57,135,000	37,225,120	2,835,000	611,934,760	514,739,640		330,844,042

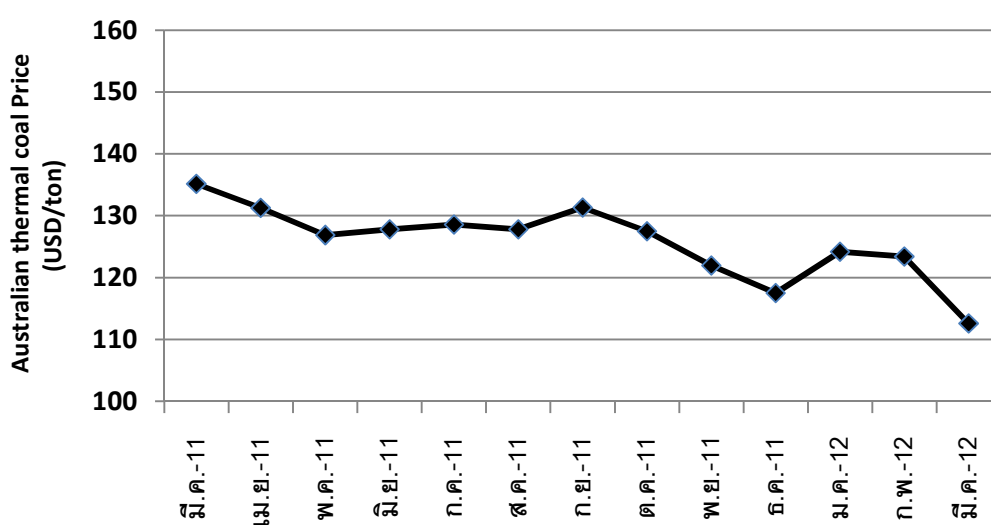
หมายเหตุ: ค่า PWF คือตัวประกอบมูลค่าเงินปัจจุบัน และ PV คือมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{57,135,000}{51,473,964} = 1.11 \text{ ปี} \approx 13.3 \text{ เดือน}$$

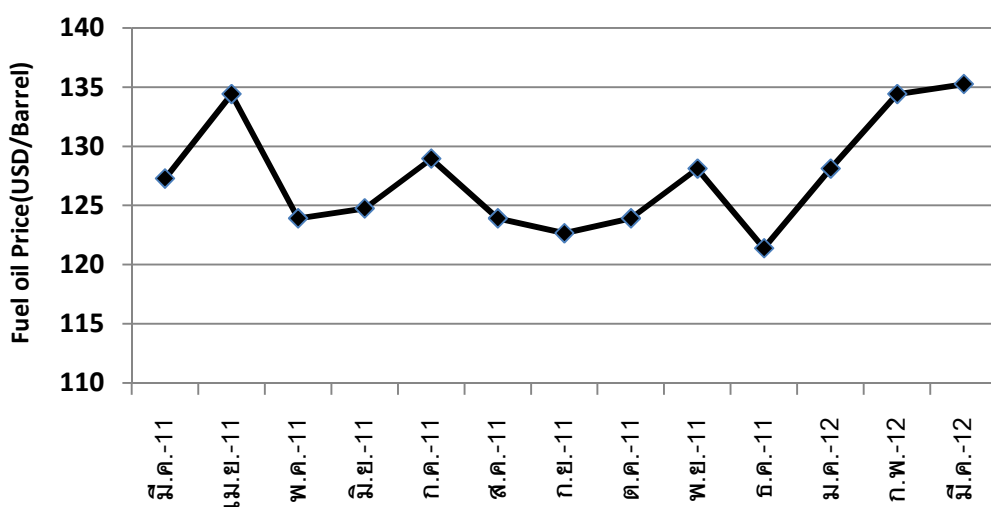
และมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 330,844,042 บาท ค่าดังกล่าวนี้คือมูลค่าผลตอบแทนสุทธิในอนาคต เมื่อคิดการปรับเวลาเป็นปัจจุบันแล้ว มูลค่าดังกล่าวยังแสดงถึงว่า นอกจากการลงทุนนั้นจะได้ผลตอบแทนจากการใช้ทุน หรืออัตราดอกเบี้ยเท่ากับร้อยละ 8 แล้ว ยังคงมีรายได้ไปอีกถึง 330,844,042 บาทในรูปของมูลค่าปัจจุบันหลังจากที่ได้จ่ายคืนเป็นค่าลงทุนและค่าดอกเบี้ยที่เกิดขึ้นแล้ว

การเปลี่ยนแปลงราคาของถ่านหินและน้ำมันเตาในช่วงหนึ่งปี

จากรูปที่ ค.1 และ ค.2 แสดงราคาของถ่านหินและน้ำมันเตาในช่วง 1 ปี ถ่านหินมีแนวโน้มราคาที่ลดลง ในขณะที่ราคาของน้ำมันเตาจะมีความแปรปรวน จากกราฟราคาของเชื้อเพลิงทั้งสองแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของราคาถ่านหินและน้ำมันเตามีโอกาสที่จะลดลง ทำให้ระยะเวลาคืนทุนลดน้อยลงได้



รูปที่ ค.1 ราคาของถ่านหินในช่วงหนึ่งปีที่ผ่านมา



รูปที่ ค.2 ราคาของน้ำมันเตาในช่วงหนึ่งปีที่ผ่านมา

ภาคผนวก ง.

ผลจากแบบจำลองของกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของถ่านหินอินโดมินโค

ในภาคผนวก ก. จะแสดงผลจากแบบจำลองของกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงตามอัตราส่วนอากาศต่อถ่านหิน และอัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหิน (ตาราง ก.2 – ก.12) โดยผลจากแบบจำลองประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์โดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ (Gas composition, % by vol) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (LHV, MJ/kg_{coal}) ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์หรือประสิทธิภาพทางความร้อน (Cold gas eff, %) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนของแข็ง (%CC) ค่าการปลดปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂, ppm) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp, K) และประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Second law eff, %) โดยถ่านหินอินโดมินโคที่นำมาศึกษามีการวิเคราะห์เชิงธาตุและการวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรมดังตาราง ก.1

ตาราง ง.1 การวิเคราะห์เชิงธาตุและอุตสาหกรรมของถ่านหินอินโดมินโค

ถ่านหินอินโดมินโค (Indominco Coal) [26]			
การวิเคราะห์เชิงธาตุ (%wt daf)		การวิเคราะห์เชิงอุตสาหกรรม (%wt)	
C	66.96	ความชื้น	10.23
H	5.6	สารระเหย	41.01
O	22.28	คาร์บอนคงตัว	46.0
N	1.38	เถ้า	2.76
S	3.78	HHV(kJ/kg)	26115

ตาราง ง.2 ค่าขาออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0 (SC = 0)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO ₂ (ppm)	Reaction Temp (K)	Second law Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	20.30	5.94	14.17	3.85	47.20	8.55	13.85	55.44	60.90	11300.56	973.10	55.13
0.24	2.07	21.28	5.57	14.01	3.48	47.86	7.80	14.57	58.32	64.90	10611.94	980.07	57.87
0.25	2.21	22.17	5.24	13.84	3.16	48.45	7.15	15.29	61.22	68.92	10004.94	986.59	60.62
0.27	2.35	22.98	4.92	13.65	2.88	49.00	6.57	16.02	64.13	72.95	9465.69	992.73	63.39
0.28	2.49	23.72	4.63	13.47	2.63	49.50	6.06	16.75	67.05	76.99	8983.34	998.56	66.17
0.30	2.63	24.40	4.36	13.28	2.41	49.95	5.60	17.47	69.96	81.04	8549.36	1004.11	68.95
0.31	2.77	25.03	4.11	13.09	2.21	50.38	5.18	18.20	72.88	85.09	8156.68	1009.42	71.75
0.33	2.91	25.61	3.88	12.90	2.03	50.77	4.81	18.93	75.80	89.15	7799.60	1014.53	74.55
0.35	3.05	26.15	3.66	12.71	1.88	51.14	4.47	19.66	78.72	93.22	7473.44	1019.47	77.35
0.36	3.19	26.64	3.46	12.53	1.73	51.48	4.16	20.39	81.64	97.28	7174.33	1024.25	80.16
0.38	3.33	26.82	3.31	12.39	1.47	51.88	4.13	20.77	83.16	100.00	6927.52	1038.42	81.85
0.39	3.47	26.40	3.27	12.21	1.01	52.46	4.66	20.43	81.80	100.00	6762.25	1074.14	81.32
0.41	3.61	25.94	3.25	11.83	0.66	53.09	5.23	20.06	80.30	100.00	6621.04	1113.67	80.81
0.43	3.75	25.43	3.27	11.26	0.41	53.79	5.84	19.65	78.66	100.00	6500.96	1156.66	80.32
0.44	3.89	24.89	3.32	10.54	0.25	54.53	6.47	19.21	76.89	100.00	6397.94	1202.52	79.84
0.46	4.03	24.30	3.41	9.75	0.15	55.29	7.10	18.74	75.03	100.00	6306.55	1249.51	79.40
0.47	4.17	23.69	3.52	8.91	0.09	56.07	7.72	18.26	73.09	100.00	6222.88	1296.94	78.96
0.49	4.31	23.06	3.67	8.08	0.06	56.83	8.30	17.76	71.10	100.00	6143.35	1343.49	78.55
0.51	4.45	22.41	3.85	7.28	0.04	57.59	8.84	17.25	69.08	100.00	6066.34	1389.12	78.15
0.52	4.59	21.74	4.05	6.52	0.02	58.33	9.33	16.74	67.04	100.00	5990.36	1433.24	77.77
0.54	4.73	21.06	4.29	5.81	0.01	59.04	9.78	16.23	64.97	100.00	5914.90	1475.99	77.39
0.55	4.87	20.37	4.55	5.15	0.01	59.74	10.18	15.71	62.88	100.00	5839.48	1517.31	77.02
0.57	5.01	19.66	4.84	4.55	0.01	60.41	10.53	15.18	60.78	100.00	5763.83	1557.14	76.67
0.59	5.14	18.94	5.16	4.00	0.00	61.06	10.83	14.65	58.66	100.00	5688.01	1595.77	76.32
0.60	5.28	18.20	5.51	3.51	0.00	61.70	11.09	14.12	56.52	100.00	5611.81	1632.94	75.98
0.62	5.42	17.44	5.89	3.06	0.00	62.31	11.30	13.58	54.37	100.00	5535.45	1668.95	75.64
0.63	5.56	16.68	6.28	2.67	0.00	62.90	11.47	13.04	52.20	100.00	5459.02	1703.86	75.31
0.65	5.70	15.90	6.70	2.32	0.00	63.48	11.60	12.49	50.02	100.00	5382.59	1737.50	74.99
0.66	5.84	15.12	7.14	2.01	0.00	64.03	11.69	11.95	47.83	100.00	5306.44	1770.14	74.68
0.68	5.98	14.33	7.60	1.74	0.00	64.57	11.75	11.39	45.62	100.00	5230.74	1801.81	74.36
0.70	6.12	13.54	8.06	1.51	0.00	65.10	11.79	10.84	43.40	100.00	5155.60	1832.34	74.06

ตาราง ง.3 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.1 (SC = 0.1)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO ₂ (ppm)	Reaction Temp (K)	Second law Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	18.09	7.21	14.14	4.25	45.16	11.15	14.11	56.50	62.53	11129.71	964.05	56.40
0.24	2.07	19.11	6.83	14.05	3.87	45.89	10.26	14.83	59.39	66.54	10454.55	971.05	59.12
0.25	2.21	20.04	6.48	13.93	3.54	46.55	9.47	15.56	62.28	70.55	9859.33	977.55	61.87
0.27	2.35	20.89	6.15	13.79	3.24	47.16	8.77	16.28	65.19	74.59	9330.45	983.65	64.62
0.28	2.49	21.68	5.84	13.65	2.98	47.71	8.14	17.01	68.11	78.63	8857.26	989.40	67.39
0.30	2.63	22.41	5.55	13.49	2.75	48.22	7.58	17.74	71.04	82.69	8431.31	994.86	70.17
0.31	2.77	23.09	5.28	13.34	2.54	48.70	7.07	18.47	73.97	86.75	8045.76	1000.07	72.95
0.33	2.91	23.71	5.02	13.18	2.35	49.14	6.61	19.20	76.89	90.81	7695.19	1005.05	75.74
0.35	3.05	24.29	4.78	13.02	2.18	49.55	6.19	19.94	79.81	94.87	7374.88	1009.85	78.54
0.36	3.19	24.83	4.56	12.86	2.02	49.93	5.80	20.67	82.74	98.94	7081.04	1014.47	81.34
0.38	3.33	25.16	4.36	12.73	1.78	50.33	5.63	21.16	84.72	100.00	6829.04	1024.59	83.37
0.39	3.47	24.51	4.23	12.55	1.10	51.03	6.58	20.30	81.28	100.00	6713.69	1070.35	81.13
0.41	3.61	24.19	4.12	12.16	0.74	51.66	7.13	19.94	79.84	100.00	6575.01	1106.64	80.62
0.43	3.75	23.81	4.05	11.60	0.48	52.35	7.71	19.55	78.25	100.00	6456.16	1146.26	80.13
0.44	3.89	23.38	4.03	10.90	0.30	53.08	8.32	19.12	76.54	100.00	6353.98	1188.94	79.66
0.46	4.03	22.89	4.05	10.11	0.19	53.84	8.92	18.66	74.72	100.00	6263.69	1233.26	79.21
0.47	4.17	22.37	4.11	9.29	0.11	54.61	9.51	18.19	72.81	100.00	6181.37	1278.32	78.78
0.49	4.31	21.82	4.21	8.46	0.07	55.38	10.07	17.70	70.85	100.00	6103.69	1323.12	78.36
0.51	4.45	21.24	4.34	7.66	0.04	56.13	10.58	17.20	68.85	100.00	6028.55	1367.10	77.96
0.52	4.59	20.64	4.50	6.89	0.03	56.87	11.06	16.69	66.82	100.00	5954.76	1410.05	77.57
0.54	4.73	20.02	4.70	6.17	0.02	57.59	11.49	16.18	64.77	100.00	5881.33	1451.58	77.20
0.55	4.87	19.39	4.93	5.50	0.01	58.29	11.87	15.66	62.69	100.00	5808.12	1491.98	76.82
0.57	5.01	18.74	5.18	4.89	0.01	58.97	12.21	15.14	60.60	100.00	5734.62	1530.92	76.47
0.59	5.14	18.07	5.47	4.33	0.00	59.63	12.50	14.61	58.49	100.00	5660.92	1568.66	76.12
0.60	5.28	17.38	5.78	3.81	0.00	60.27	12.75	14.08	56.36	100.00	5586.98	1605.27	75.77
0.62	5.42	16.68	6.11	3.35	0.00	60.89	12.95	13.54	54.22	100.00	5512.73	1640.55	75.44
0.63	5.56	15.97	6.48	2.94	0.00	61.50	13.12	13.00	52.06	100.00	5438.40	1674.82	75.11
0.65	5.70	15.25	6.86	2.57	0.00	62.08	13.24	12.46	49.89	100.00	5364.08	1708.05	74.78
0.66	5.84	14.52	7.26	2.24	0.00	62.64	13.33	11.92	47.71	100.00	5289.85	1740.13	74.46
0.68	5.98	13.78	7.68	1.95	0.00	63.19	13.39	11.37	45.51	100.00	5215.99	1771.31	74.15
0.70	6.12	13.03	8.11	1.70	0.00	63.73	13.43	10.82	43.31	100.00	5142.63	1801.59	73.84

ตาราง 3.4 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดมิโนโค ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.2 (SC = 0.2)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO2 (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	16.15	8.27	14.02	4.61	43.28	13.66	14.37	57.52	64.11	10979.87	955.53	57.62
0.24	2.07	17.19	7.90	13.98	4.23	44.08	12.63	15.09	60.41	68.12	10315.91	962.63	60.34
0.25	2.21	18.14	7.54	13.92	3.89	44.80	11.72	15.81	63.31	72.14	9730.57	969.18	63.08
0.27	2.35	19.03	7.21	13.83	3.58	45.46	10.90	16.54	66.22	76.18	9210.45	975.30	65.82
0.28	2.49	19.85	6.89	13.73	3.31	46.06	10.17	17.27	69.14	80.22	8745.07	981.04	68.58
0.30	2.63	20.61	6.59	13.61	3.06	46.62	9.51	18.00	72.07	84.28	8326.09	986.46	71.35
0.31	2.77	21.31	6.30	13.49	2.84	47.14	8.92	18.73	75.00	88.34	7946.81	991.61	74.13
0.33	2.91	21.97	6.03	13.36	2.65	47.62	8.38	19.47	77.94	92.42	7601.77	996.53	76.91
0.35	3.05	22.59	5.78	13.22	2.46	48.07	7.88	20.20	80.87	96.49	7286.49	1001.24	79.70
0.36	3.19	23.07	5.53	13.11	2.23	48.51	7.55	20.79	83.24	100.00	7009.31	1008.71	82.03
0.38	3.33	22.96	5.27	13.03	1.67	49.08	8.00	20.50	82.07	100.00	6829.75	1035.89	81.49
0.39	3.47	22.80	5.05	12.80	1.19	49.67	8.48	20.18	80.80	100.00	6671.79	1066.04	80.96
0.41	3.61	22.59	4.87	12.40	0.82	50.31	9.00	19.83	79.40	100.00	6534.73	1099.63	80.45
0.43	3.75	22.32	4.74	11.86	0.54	50.99	9.54	19.45	77.86	100.00	6416.42	1136.35	79.96
0.44	3.89	21.98	4.66	11.18	0.35	51.71	10.11	19.03	76.19	100.00	6314.44	1176.16	79.49
0.46	4.03	21.59	4.62	10.41	0.22	52.46	10.69	18.59	74.41	100.00	6224.73	1218.03	79.03
0.47	4.17	21.15	4.64	9.60	0.14	53.23	11.25	18.12	72.54	100.00	6143.24	1260.85	78.60
0.49	4.31	20.67	4.69	8.78	0.09	53.99	11.78	17.64	70.61	100.00	6067.03	1303.97	78.18
0.51	4.45	20.16	4.78	7.98	0.05	54.75	12.28	17.14	68.63	100.00	5993.41	1346.36	77.78
0.52	4.59	19.62	4.91	7.21	0.03	55.49	12.73	16.64	66.62	100.00	5921.43	1388.05	77.39
0.54	4.73	19.06	5.07	6.49	0.02	56.21	13.14	16.13	64.57	100.00	5849.92	1428.53	77.01
0.55	4.87	18.48	5.26	5.82	0.01	56.92	13.51	15.61	62.51	100.00	5778.57	1467.87	76.64
0.57	5.01	17.88	5.48	5.19	0.01	57.60	13.83	15.09	60.43	100.00	5707.15	1506.12	76.27
0.59	5.14	17.26	5.74	4.62	0.01	58.27	14.11	14.57	58.33	100.00	5635.35	1543.02	75.93
0.60	5.28	16.62	6.01	4.09	0.00	58.92	14.35	14.04	56.21	100.00	5563.36	1578.89	75.58
0.62	5.42	15.98	6.32	3.61	0.00	59.54	14.55	13.51	54.08	100.00	5491.12	1613.66	75.24
0.63	5.56	15.31	6.65	3.19	0.00	60.15	14.70	12.97	51.93	100.00	5418.67	1647.28	74.91
0.65	5.70	14.64	7.00	2.80	0.00	60.74	14.83	12.43	49.77	100.00	5346.22	1679.98	74.58
0.66	5.84	13.95	7.37	2.45	0.00	61.32	14.91	11.89	47.60	100.00	5273.84	1711.69	74.26
0.68	5.98	13.25	7.75	2.15	0.00	61.87	14.97	11.34	45.41	100.00	5201.66	1742.37	73.95
0.70	6.12	12.55	8.16	1.87	0.00	62.41	15.00	10.79	43.21	100.00	5129.90	1772.21	73.64

ตาราง 3.5 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.3 (SC = 0.3)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO ₂ (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	14.44	9.17	13.82	4.94	41.56	16.07	14.62	58.52	65.64	10847.23	947.43	58.82
0.24	2.07	15.48	8.80	13.84	4.55	42.40	14.91	15.34	61.40	69.65	10192.67	954.67	61.53
0.25	2.21	16.45	8.46	13.83	4.20	43.17	13.89	16.06	64.30	73.68	9615.70	961.33	64.25
0.27	2.35	17.35	8.12	13.79	3.89	43.88	12.97	16.79	67.21	77.72	9103.05	967.50	66.99
0.28	2.49	18.19	7.80	13.73	3.61	44.52	12.15	17.52	70.14	81.77	8644.37	973.27	69.74
0.30	2.63	18.97	7.50	13.65	3.36	45.12	11.40	18.25	73.07	85.83	8231.42	978.71	72.51
0.31	2.77	19.70	7.21	13.56	3.13	45.68	10.72	18.98	76.00	89.90	7857.59	983.84	75.27
0.33	2.91	20.38	6.93	13.46	2.93	46.20	10.11	19.72	78.94	93.98	7517.47	988.73	78.05
0.35	3.05	21.02	6.67	13.35	2.74	46.68	9.55	20.45	81.89	98.06	7206.65	993.40	80.83
0.36	3.19	21.32	6.36	13.30	2.32	47.20	9.50	20.66	82.72	100.00	6967.40	1007.98	81.87
0.38	3.33	21.31	6.04	13.20	1.75	47.78	9.91	20.38	81.58	100.00	6791.14	1033.35	81.34
0.39	3.47	21.25	5.77	12.96	1.28	48.39	10.35	20.06	80.33	100.00	6635.23	1061.43	80.81
0.41	3.61	21.13	5.53	12.58	0.90	49.03	10.83	19.72	78.97	100.00	6499.06	1092.65	80.29
0.43	3.75	20.95	5.35	12.05	0.61	49.71	11.33	19.35	77.47	100.00	6380.93	1126.92	79.80
0.44	3.89	20.69	5.22	11.40	0.40	50.42	11.86	18.95	75.85	100.00	6278.71	1164.16	79.33
0.46	4.03	20.39	5.14	10.66	0.26	51.16	12.40	18.51	74.11	100.00	6189.15	1203.77	78.87
0.47	4.17	20.01	5.11	9.87	0.16	51.92	12.93	18.05	72.28	100.00	6108.05	1244.47	78.44
0.49	4.31	19.60	5.12	9.06	0.10	52.68	13.43	17.58	70.37	100.00	6032.75	1285.81	78.01
0.51	4.45	19.15	5.18	8.27	0.07	53.43	13.91	17.09	68.41	100.00	5960.54	1326.82	77.61
0.52	4.59	18.66	5.27	7.50	0.04	54.17	14.34	16.59	66.42	100.00	5890.01	1367.18	77.22
0.54	4.73	18.16	5.40	6.77	0.03	54.90	14.74	16.08	64.39	100.00	5820.32	1406.75	76.83
0.55	4.87	17.62	5.57	6.09	0.02	55.61	15.09	15.57	62.34	100.00	5750.63	1445.08	76.46
0.57	5.01	17.07	5.76	5.46	0.01	56.30	15.40	15.05	60.26	100.00	5680.99	1482.47	76.10
0.59	5.14	16.50	5.98	4.88	0.01	56.97	15.67	14.53	58.17	100.00	5611.07	1518.73	75.74
0.60	5.28	15.91	6.23	4.34	0.01	57.62	15.89	14.00	56.07	100.00	5540.83	1553.86	75.40
0.62	5.42	15.31	6.50	3.85	0.00	58.25	16.08	13.47	53.94	100.00	5470.41	1588.06	75.05
0.63	5.56	14.69	6.80	3.41	0.00	58.86	16.23	12.94	51.81	100.00	5399.74	1621.17	74.72
0.65	5.70	14.05	7.12	3.01	0.00	59.46	16.35	12.40	49.65	100.00	5328.98	1653.29	74.39
0.66	5.84	13.41	7.46	2.65	0.00	60.04	16.43	11.86	47.49	100.00	5258.28	1684.56	74.07
0.68	5.98	12.76	7.82	2.33	0.00	60.61	16.49	11.32	45.31	100.00	5187.73	1714.89	73.75
0.70	6.12	12.10	8.20	2.04	0.00	61.15	16.51	10.77	43.12	100.00	5117.45	1744.29	73.44

ตาราง 3.6 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.4 (SC = 0.4)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO2 (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	12.93	9.92	13.57	5.23	39.97	18.38	14.86	59.49	67.13	10728.87	939.65	59.98
0.24	2.07	13.96	9.58	13.65	4.84	40.86	17.11	15.58	62.37	71.14	10082.32	947.08	62.68
0.25	2.21	14.93	9.24	13.69	4.49	41.66	15.99	16.30	65.27	75.17	9512.48	953.87	65.40
0.27	2.35	15.84	8.91	13.69	4.18	42.41	14.98	17.03	68.18	79.22	9006.26	960.15	68.13
0.28	2.49	16.68	8.60	13.67	3.89	43.09	14.06	17.76	71.11	83.28	8553.37	965.98	70.88
0.30	2.63	17.48	8.30	13.63	3.64	43.72	13.24	18.49	74.04	87.35	8145.66	971.46	73.63
0.31	2.77	18.22	8.01	13.57	3.40	44.31	12.49	19.23	76.98	91.42	7776.58	976.62	76.40
0.33	2.91	18.92	7.73	13.50	3.19	44.86	11.80	19.96	79.92	95.50	7440.80	981.50	79.17
0.35	3.05	19.58	7.46	13.42	2.99	45.37	11.17	20.70	82.87	99.59	7133.92	986.16	81.94
0.36	3.19	20.03	7.17	13.38	2.66	45.89	10.89	21.11	84.51	100.00	6879.66	996.28	81.62
0.38	3.33	19.81	6.71	13.30	1.84	46.56	11.79	20.26	81.10	100.00	6757.63	1030.31	81.19
0.39	3.47	19.83	6.39	13.06	1.36	47.17	12.18	19.95	79.88	100.00	6603.08	1056.63	80.67
0.41	3.61	19.78	6.12	12.69	0.98	47.82	12.61	19.62	78.55	100.00	6467.35	1085.83	80.15
0.43	3.75	19.67	5.90	12.19	0.68	48.49	13.07	19.26	77.10	100.00	6349.08	1117.95	79.66
0.44	3.89	19.50	5.73	11.57	0.45	49.19	13.56	18.86	75.51	100.00	6246.31	1152.88	79.18
0.46	4.03	19.26	5.61	10.86	0.30	49.93	14.06	18.44	73.81	100.00	6156.39	1190.30	78.72
0.47	4.17	18.95	5.54	10.09	0.19	50.67	14.55	17.99	72.01	100.00	6075.47	1229.11	78.28
0.49	4.31	18.60	5.52	9.30	0.12	51.43	15.03	17.52	70.14	100.00	6000.71	1268.69	77.86
0.51	4.45	18.20	5.54	8.51	0.08	52.18	15.49	17.03	68.20	100.00	5929.67	1308.40	77.44
0.52	4.59	17.77	5.61	7.75	0.05	52.92	15.90	16.54	66.22	100.00	5860.36	1347.48	77.05
0.54	4.73	17.31	5.71	7.03	0.03	53.65	16.28	16.04	64.20	100.00	5792.14	1385.99	76.66
0.55	4.87	16.82	5.84	6.34	0.02	54.36	16.61	15.53	62.16	100.00	5724.11	1423.50	76.29
0.57	5.01	16.31	6.01	5.71	0.01	55.05	16.91	15.01	60.10	100.00	5656.03	1460.01	75.93
0.59	5.14	15.79	6.20	5.12	0.01	55.72	17.17	14.49	58.02	100.00	5587.86	1495.65	75.56
0.60	5.28	15.24	6.42	4.57	0.01	56.38	17.38	13.97	55.92	100.00	5519.25	1530.10	75.22
0.62	5.42	14.68	6.67	4.08	0.00	57.01	17.56	13.44	53.81	100.00	5450.45	1563.64	74.88
0.63	5.56	14.10	6.94	3.62	0.00	57.63	17.71	12.91	51.68	100.00	5381.50	1596.33	74.54
0.65	5.70	13.50	7.23	3.21	0.00	58.23	17.82	12.37	49.54	100.00	5312.31	1627.93	74.21
0.66	5.84	12.90	7.55	2.83	0.00	58.82	17.90	11.83	47.38	100.00	5243.14	1658.69	73.89
0.68	5.98	12.28	7.88	2.50	0.00	59.39	17.95	11.29	45.21	100.00	5174.11	1688.66	73.56
0.70	6.12	11.66	8.23	2.20	0.00	59.94	17.97	10.75	43.03	100.00	5105.26	1717.73	73.25

ตาราง ๖.7 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.5 (SC = 0.5)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO2 (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	11.58	10.55	13.28	5.50	38.50	20.59	15.10	60.44	68.58	10622.50	932.13	61.12
0.24	2.07	12.60	10.23	13.41	5.11	39.42	19.23	15.82	63.32	72.60	9982.85	939.77	63.81
0.25	2.21	13.56	9.91	13.50	4.76	40.26	18.01	16.54	66.22	76.64	9419.19	946.74	66.52
0.27	2.35	14.47	9.60	13.55	4.44	41.03	16.91	17.27	69.13	80.69	8918.52	953.14	69.25
0.28	2.49	15.31	9.30	13.56	4.15	41.75	15.92	18.00	72.05	84.75	8470.67	959.07	71.99
0.30	2.63	16.11	9.00	13.56	3.89	42.41	15.02	18.73	74.99	88.82	8067.54	964.61	74.74
0.31	2.77	16.87	8.72	13.53	3.66	43.03	14.20	19.46	77.93	92.90	7702.64	969.82	77.49
0.33	2.91	17.58	8.44	13.49	3.44	43.60	13.45	20.20	80.88	96.99	7370.67	974.74	80.26
0.35	3.05	18.13	8.12	13.47	3.11	44.16	13.01	20.68	82.79	100.00	7091.28	983.46	82.15
0.36	3.19	18.32	7.68	13.45	2.47	44.78	13.31	20.42	81.76	100.00	6900.54	1004.35	81.59
0.38	3.33	18.44	7.29	13.34	1.91	45.39	13.62	20.14	80.65	100.00	6728.35	1026.92	81.06
0.39	3.47	18.52	6.95	13.11	1.44	46.02	13.96	19.84	79.45	100.00	6574.68	1051.72	80.53
0.41	3.61	18.54	6.64	12.76	1.05	46.66	14.34	19.52	78.15	100.00	6439.06	1079.17	80.02
0.43	3.75	18.49	6.39	12.29	0.74	47.33	14.76	19.16	76.73	100.00	6320.42	1109.41	79.52
0.44	3.89	18.38	6.19	11.70	0.50	48.03	15.20	18.78	75.18	100.00	6216.86	1142.27	79.04
0.46	4.03	18.20	6.03	11.02	0.34	48.75	15.66	18.36	73.52	100.00	6126.25	1177.62	78.58
0.47	4.17	17.95	5.93	10.28	0.22	49.49	16.13	17.92	71.75	100.00	6045.28	1214.68	78.13
0.49	4.31	17.65	5.88	9.50	0.14	50.24	16.58	17.46	69.90	100.00	5970.73	1252.58	77.71
0.51	4.45	17.31	5.87	8.73	0.09	50.99	17.01	16.98	67.99	100.00	5900.47	1290.93	77.29
0.52	4.59	16.93	5.91	7.98	0.06	51.73	17.40	16.49	66.02	100.00	5832.28	1328.86	76.90
0.54	4.73	16.51	5.98	7.25	0.04	52.45	17.76	15.99	64.02	100.00	5765.28	1366.28	76.51
0.55	4.87	16.07	6.09	6.57	0.03	53.16	18.08	15.48	62.00	100.00	5698.83	1403.05	76.13
0.57	5.01	15.60	6.23	5.93	0.02	53.86	18.36	14.97	59.95	100.00	5632.17	1438.70	75.76
0.59	5.14	15.11	6.40	5.34	0.01	54.53	18.61	14.46	57.87	100.00	5565.47	1473.56	75.40
0.60	5.28	14.60	6.60	4.78	0.01	55.19	18.82	13.93	55.79	100.00	5498.54	1507.54	75.05
0.62	5.42	14.08	6.82	4.28	0.01	55.83	18.99	13.41	53.68	100.00	5431.22	1540.43	74.71
0.63	5.56	13.54	7.07	3.81	0.00	56.45	19.13	12.88	51.56	100.00	5363.75	1572.53	74.37
0.65	5.70	12.98	7.34	3.39	0.00	57.06	19.23	12.34	49.42	100.00	5296.16	1603.80	74.03
0.66	5.84	12.41	7.63	3.01	0.00	57.65	19.31	11.81	47.27	100.00	5228.41	1634.06	73.71
0.68	5.98	11.83	7.94	2.66	0.00	58.22	19.35	11.27	45.11	100.00	5160.76	1663.57	73.39
0.70	6.12	11.24	8.26	2.34	0.00	58.78	19.37	10.72	42.94	100.00	5093.31	1692.36	73.07

ตาราง ๖.๘ ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.6 (SC = 0.6)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO ₂ (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	10.38	11.08	12.96	5.74	37.13	22.70	15.33	61.39	70.01	10526.25	924.80	62.23
0.24	2.07	11.38	10.79	13.14	5.35	38.08	21.25	16.05	64.25	74.03	9892.66	932.70	64.92
0.25	2.21	12.33	10.49	13.28	5.00	38.95	19.96	16.77	67.15	78.07	9334.40	939.86	67.62
0.27	2.35	13.22	10.20	13.36	4.68	39.75	18.78	17.50	70.06	82.12	8838.59	946.42	70.34
0.28	2.49	14.07	9.91	13.42	4.40	40.49	17.72	18.23	72.98	86.19	8395.15	952.47	73.07
0.30	2.63	14.87	9.62	13.45	4.13	41.18	16.75	18.96	75.92	90.27	7996.04	958.10	75.81
0.31	2.77	15.63	9.34	13.45	3.89	41.82	15.87	19.70	78.86	94.36	7634.83	963.37	78.57
0.33	2.91	16.34	9.07	13.44	3.67	42.42	15.06	20.43	81.81	98.45	7306.24	968.34	81.32
0.35	3.05	16.77	8.67	13.47	3.16	43.03	14.91	20.56	82.33	100.00	7062.60	981.86	82.02
0.36	3.19	17.01	8.21	13.45	2.54	43.65	15.15	20.31	81.31	100.00	6873.71	1001.82	81.47
0.38	3.33	17.19	7.80	13.34	1.99	44.28	15.41	20.03	80.21	100.00	6702.69	1023.27	80.93
0.39	3.47	17.31	7.43	13.12	1.52	44.91	15.70	19.74	79.03	100.00	6549.53	1046.77	80.41
0.41	3.61	17.38	7.11	12.79	1.12	45.56	16.03	19.42	77.75	100.00	6413.75	1072.68	79.89
0.43	3.75	17.40	6.82	12.35	0.80	46.23	16.40	19.07	76.36	100.00	6294.58	1101.27	79.39
0.44	3.89	17.33	6.60	11.79	0.56	46.92	16.80	18.69	74.85	100.00	6190.06	1132.25	78.91
0.46	4.03	17.21	6.42	11.14	0.38	47.64	17.22	18.29	73.22	100.00	6098.55	1165.71	78.45
0.47	4.17	17.02	6.29	10.43	0.25	48.37	17.65	17.86	71.49	100.00	6017.27	1201.13	77.99
0.49	4.31	16.77	6.21	9.68	0.16	49.11	18.07	17.40	69.67	100.00	5942.66	1237.41	77.57
0.51	4.45	16.47	6.18	8.92	0.11	49.85	18.47	16.93	67.77	100.00	5872.83	1274.34	77.15
0.52	4.59	16.13	6.19	8.17	0.07	50.58	18.85	16.44	65.83	100.00	5805.67	1311.25	76.75
0.54	4.73	15.76	6.24	7.46	0.05	51.31	19.19	15.95	63.85	100.00	5739.70	1347.60	76.36
0.55	4.87	15.36	6.32	6.77	0.03	52.02	19.50	15.44	61.83	100.00	5674.48	1383.46	75.98
0.57	5.01	14.93	6.44	6.13	0.02	52.71	19.77	14.93	59.79	100.00	5609.30	1418.46	75.61
0.59	5.14	14.47	6.59	5.53	0.01	53.39	20.00	14.42	57.73	100.00	5543.95	1452.57	75.25
0.60	5.28	14.00	6.76	4.98	0.01	54.05	20.20	13.90	55.65	100.00	5478.48	1485.94	74.89
0.62	5.42	13.51	6.96	4.46	0.01	54.69	20.37	13.38	53.55	100.00	5412.66	1518.35	74.54
0.63	5.56	13.01	7.18	3.99	0.00	55.32	20.50	12.85	51.44	100.00	5346.57	1549.87	74.20
0.65	5.70	12.48	7.43	3.56	0.00	55.93	20.60	12.32	49.31	100.00	5280.38	1580.64	73.87
0.66	5.84	11.95	7.70	3.17	0.00	56.52	20.67	11.78	47.17	100.00	5214.07	1610.59	73.54
0.68	5.98	11.40	7.99	2.81	0.00	57.10	20.71	11.24	45.02	100.00	5147.71	1639.64	73.22
0.70	6.12	10.84	8.29	2.48	0.00	57.66	20.72	10.70	42.85	100.00	5081.52	1668.01	72.90

ตาราง ๓.๑ ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.7 (SC = 0.7)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO2 (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	9.32	11.52	12.62	5.96	35.86	24.72	15.57	62.33	71.42	10,438.57	917.65	63.34
0.24	2.07	10.29	11.26	12.85	5.57	36.83	23.20	16.28	65.18	75.43	9,810.42	925.82	66.01
0.25	2.21	11.21	10.99	13.03	5.23	37.72	21.83	17.00	68.07	79.48	9,256.94	933.20	68.70
0.27	2.35	12.10	10.72	13.15	4.91	38.54	20.59	17.73	70.97	83.53	8,765.43	939.92	71.41
0.28	2.49	12.93	10.44	13.24	4.62	39.30	19.46	18.46	73.90	87.61	8,325.89	946.12	74.14
0.30	2.63	13.73	10.17	13.31	4.36	40.01	18.43	19.19	76.83	91.69	7,930.34	951.86	76.87
0.31	2.77	14.48	9.90	13.34	4.11	40.67	17.49	19.93	79.78	95.78	7,572.39	957.21	79.62
0.33	2.91	15.20	9.64	13.36	3.89	41.29	16.62	20.66	82.73	99.88	7,246.82	962.25	82.37
0.35	3.05	15.72	9.28	13.40	3.47	41.90	16.22	20.99	81.81	100.00	6,986.43	972.51	81.71
0.36	3.19	15.81	8.66	13.40	2.60	42.59	16.94	20.20	80.87	100.00	6,850.40	998.95	81.35
0.38	3.33	16.03	8.24	13.30	2.06	43.22	17.15	19.93	79.78	100.00	6,680.17	1,019.46	80.82
0.39	3.47	16.20	7.86	13.10	1.59	43.86	17.39	19.64	78.62	100.00	6,527.22	1,041.81	80.29
0.41	3.61	16.31	7.52	12.79	1.19	44.51	17.67	19.32	77.36	100.00	6,391.10	1,066.37	79.77
0.43	3.75	16.37	7.22	12.37	0.87	45.18	17.99	18.98	76.00	100.00	6,271.14	1,093.41	79.27
0.44	3.89	16.35	6.97	11.85	0.61	45.86	18.35	18.61	74.52	100.00	6,165.67	1,122.79	78.79
0.46	4.03	16.27	6.77	11.24	0.42	46.57	18.73	18.21	72.93	100.00	6,073.10	1,154.50	78.32
0.47	4.17	16.13	6.62	10.55	0.28	47.29	19.12	17.79	71.23	100.00	5,991.07	1,188.23	77.87
0.49	4.31	15.93	6.52	9.82	0.19	48.03	19.51	17.34	69.43	100.00	5,916.39	1,223.12	77.43
0.51	4.45	15.68	6.46	9.08	0.12	48.76	19.89	16.88	67.56	100.00	5,846.74	1,258.67	77.02
0.52	4.59	15.38	6.45	8.35	0.08	49.49	20.25	16.39	65.64	100.00	5,780.33	1,294.52	76.60
0.54	4.73	15.05	6.47	7.64	0.06	50.22	20.57	15.90	63.67	100.00	5,715.30	1,329.89	76.22
0.55	4.87	14.68	6.54	6.96	0.04	50.92	20.86	15.40	61.67	100.00	5,651.13	1,364.82	75.83
0.57	5.01	14.29	6.63	6.32	0.02	51.62	21.12	14.90	59.64	100.00	5,587.35	1,399.22	75.45
0.59	5.14	13.87	6.76	5.72	0.02	52.30	21.35	14.38	57.59	100.00	5,523.24	1,432.60	75.09
0.60	5.28	13.43	6.91	5.16	0.01	52.96	21.54	13.87	55.51	100.00	5,459.05	1,465.29	74.74
0.62	5.42	12.98	7.09	4.64	0.01	53.60	21.69	13.34	53.43	100.00	5,394.70	1,497.29	74.38
0.63	5.56	12.50	7.29	4.16	0.01	54.23	21.82	12.82	51.32	100.00	5,329.92	1,528.26	74.04
0.65	5.70	12.01	7.52	3.72	0.00	54.84	21.91	12.29	49.20	100.00	5,265.01	1,558.51	73.71
0.66	5.84	11.51	7.76	3.32	0.00	55.43	21.98	11.76	47.07	100.00	5,200.03	1,588.08	73.37
0.68	5.98	10.99	8.03	2.95	0.00	56.02	22.01	11.22	44.92	100.00	5,134.97	1,616.81	73.05
0.70	6.12	10.46	8.31	2.62	0.00	56.58	22.03	10.68	42.76	100.00	5,069.96	1,644.76	72.73

ตาราง ง.10 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิสที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.8 (SC = 0.8)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO ₂ (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	8.36	11.89	12.27	6.16	34.67	26.65	15.80	63.27	72.82	10358.10	910.62	64.43
0.24	2.07	9.30	11.66	12.54	5.78	35.65	25.06	16.51	66.11	76.83	9734.97	919.09	67.08
0.25	2.21	10.21	11.42	12.75	5.43	36.56	23.63	17.23	68.98	80.86	9185.83	926.70	69.76
0.27	2.35	11.07	11.16	12.92	5.12	37.40	22.33	17.95	71.88	84.92	8698.18	933.62	72.46
0.28	2.49	11.89	10.91	13.05	4.83	38.18	21.14	18.68	74.80	89.00	8262.11	939.97	75.18
0.30	2.63	12.68	10.65	13.14	4.56	38.91	20.05	19.41	77.73	93.09	7869.74	945.84	77.91
0.31	2.77	13.43	10.40	13.20	4.32	39.59	19.06	20.15	80.68	97.18	7514.71	951.29	80.65
0.33	2.91	14.05	10.05	13.27	3.94	40.25	18.45	20.58	82.41	100.00	7221.78	960.08	82.36
0.35	3.05	14.40	9.54	13.34	3.26	40.92	18.55	20.35	81.46	100.00	7016.89	977.38	81.80
0.36	3.19	14.71	9.06	13.32	2.66	41.57	18.68	20.09	80.45	100.00	6830.13	995.82	81.24
0.38	3.33	14.96	8.63	13.23	2.12	42.21	18.84	19.83	79.37	100.00	6660.41	1015.51	80.70
0.39	3.47	15.16	8.24	13.05	1.66	42.86	19.03	19.54	78.22	100.00	6507.44	1036.86	80.18
0.41	3.61	15.31	7.89	12.76	1.26	43.51	19.27	19.23	76.98	100.00	6370.82	1060.22	79.66
0.43	3.75	15.41	7.58	12.37	0.93	44.17	19.54	18.89	75.65	100.00	6249.95	1085.88	79.16
0.44	3.89	15.44	7.31	11.88	0.67	44.86	19.85	18.53	74.20	100.00	6143.48	1113.82	78.67
0.46	4.03	15.40	7.09	11.30	0.46	45.56	20.19	18.14	72.63	100.00	6049.73	1143.92	78.20
0.47	4.17	15.30	6.92	10.64	0.32	46.27	20.55	17.72	70.96	100.00	5966.76	1176.06	77.75
0.49	4.31	15.14	6.79	9.94	0.21	47.00	20.91	17.28	69.20	100.00	5891.82	1209.63	77.30
0.51	4.45	14.93	6.72	9.22	0.14	47.73	21.26	16.82	67.35	100.00	5822.12	1243.85	76.89
0.52	4.59	14.67	6.68	8.50	0.10	48.45	21.60	16.35	65.45	100.00	5756.09	1278.52	76.47
0.54	4.73	14.37	6.69	7.80	0.06	49.17	21.91	15.86	63.50	100.00	5692.01	1313.07	76.08
0.55	4.87	14.04	6.73	7.12	0.04	49.88	22.18	15.36	61.51	100.00	5628.76	1347.10	75.69
0.57	5.01	13.68	6.81	6.48	0.03	50.57	22.43	14.86	59.49	100.00	5566.03	1380.70	75.32
0.59	5.14	13.30	6.91	5.88	0.02	51.25	22.64	14.35	57.45	100.00	5503.28	1413.58	74.95
0.60	5.28	12.89	7.05	5.32	0.01	51.91	22.82	13.83	55.38	100.00	5440.27	1445.61	74.59
0.62	5.42	12.46	7.20	4.80	0.01	52.55	22.97	13.31	53.30	100.00	5377.13	1477.00	74.24
0.63	5.56	12.02	7.39	4.31	0.01	53.18	23.09	12.79	51.21	100.00	5313.76	1507.65	73.89
0.65	5.70	11.56	7.60	3.87	0.00	53.79	23.18	12.26	49.09	100.00	5250.05	1537.39	73.55
0.66	5.84	11.08	7.82	3.46	0.00	54.39	23.24	11.73	46.97	100.00	5186.27	1566.48	73.22
0.68	5.98	10.60	8.07	3.08	0.00	54.97	23.28	11.20	44.83	100.00	5122.48	1594.93	72.89
0.70	6.12	10.10	8.33	2.74	0.00	55.54	23.29	10.66	42.67	100.00	5058.62	1622.53	72.57

ตาราง ง.11 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.9 (SC = 0.9)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO2 (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	7.51	12.20	11.90	6.35	33.55	28.49	16.04	64.23	74.22	10283.67	903.70	65.53
0.24	2.07	8.42	12.00	12.21	5.97	34.55	26.85	16.74	67.04	78.21	9665.31	912.48	68.15
0.25	2.21	9.29	11.78	12.47	5.62	35.47	25.36	17.46	69.89	82.24	9120.21	920.35	70.81
0.27	2.35	10.14	11.55	12.67	5.31	36.33	24.01	18.18	72.78	86.30	8636.07	927.48	73.50
0.28	2.49	10.94	11.31	12.83	5.02	37.13	22.77	18.91	75.69	90.37	8203.15	933.99	76.21
0.30	2.63	11.72	11.07	12.95	4.76	37.87	21.63	19.64	78.62	94.46	7813.64	940.00	78.93
0.31	2.77	12.46	10.83	13.04	4.51	38.57	20.58	20.37	81.56	98.56	7461.23	945.57	81.67
0.33	2.91	12.98	10.39	13.15	3.97	39.26	20.25	20.48	82.00	100.00	7202.98	957.90	82.26
0.35	3.05	13.36	9.88	13.22	3.31	39.93	20.30	20.24	81.05	100.00	6998.85	974.68	81.69
0.36	3.19	13.69	9.40	13.22	2.71	40.60	20.38	19.99	80.04	100.00	6812.59	992.49	81.14
0.38	3.33	13.97	8.97	13.14	2.18	41.25	20.48	19.73	78.98	100.00	6643.12	1011.47	80.60
0.39	3.47	14.20	8.58	12.97	1.72	41.90	20.63	19.44	77.84	100.00	6489.93	1031.92	80.07
0.41	3.61	14.38	8.22	12.71	1.32	42.55	20.81	19.14	76.61	100.00	6352.70	1054.23	79.56
0.43	3.75	14.51	7.90	12.35	0.99	43.22	21.04	18.81	75.30	100.00	6230.83	1078.64	79.05
0.44	3.89	14.58	7.61	11.89	0.72	43.89	21.31	18.45	73.87	100.00	6123.31	1105.29	78.55
0.46	4.03	14.57	7.38	11.34	0.51	44.59	21.61	18.07	72.34	100.00	6028.28	1133.92	78.09
0.47	4.17	14.51	7.20	10.72	0.35	45.29	21.93	17.66	70.70	100.00	5944.23	1164.58	77.63
0.49	4.31	14.40	7.05	10.04	0.24	46.01	22.26	17.22	68.96	100.00	5868.78	1196.85	77.18
0.51	4.45	14.22	6.96	9.34	0.16	46.73	22.59	16.77	67.14	100.00	5798.92	1229.83	76.76
0.52	4.59	13.99	6.90	8.64	0.11	47.45	22.90	16.30	65.26	100.00	5733.08	1263.36	76.35
0.54	4.73	13.73	6.89	7.94	0.07	48.17	23.20	15.82	63.32	100.00	5669.74	1297.07	75.94
0.55	4.87	13.43	6.91	7.27	0.05	48.87	23.46	15.32	61.35	100.00	5607.30	1330.25	75.56
0.57	5.01	13.10	6.97	6.64	0.03	49.56	23.69	14.82	59.34	100.00	5545.51	1363.05	75.18
0.59	5.14	12.75	7.05	6.04	0.02	50.24	23.90	14.31	57.31	100.00	5483.97	1395.39	74.81
0.60	5.28	12.37	7.17	5.47	0.02	50.90	24.07	13.80	55.25	100.00	5422.11	1426.83	74.45
0.62	5.42	11.98	7.31	4.95	0.01	51.54	24.21	13.28	53.18	100.00	5360.10	1457.63	74.10
0.63	5.56	11.56	7.48	4.46	0.01	52.17	24.32	12.76	51.09	100.00	5297.95	1487.82	73.74
0.65	5.70	11.13	7.67	4.01	0.01	52.79	24.40	12.24	48.99	100.00	5235.49	1517.20	73.40
0.66	5.84	10.68	7.88	3.59	0.00	53.39	24.46	11.71	46.87	100.00	5172.84	1545.82	73.07
0.68	5.98	10.22	8.11	3.21	0.00	53.97	24.49	11.17	44.73	100.00	5110.15	1573.84	72.74
0.70	6.12	9.75	8.35	2.86	0.00	54.54	24.50	10.64	42.59	100.00	5047.50	1601.25	72.41

ตาราง ง.12 ค่าออกของแบบจำลองของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลขึ้นจากถ่านหินอินโดนิเซีย ที่อัตราส่วนไอน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 1 (SC = 1)

Equi	AC	Gas composition (% by vol)						LHV (MJ/kg _{coal})	Cold gas Eff (%)	%CC	SO2 (ppm)	Reaction Temp (K)	Secondlaw Eff (%)
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O						
0.22	1.93	6.75	12.46	11.53	6.52	32.50	30.25	16.28	65.19	75.62	10214.54	896.85	66.62
0.24	2.07	7.62	12.28	11.88	6.14	33.51	28.56	16.98	67.98	79.59	9600.59	905.98	69.22
0.25	2.21	8.46	12.09	12.17	5.80	34.45	27.03	17.69	70.81	83.61	9059.32	914.11	71.86
0.27	2.35	9.28	11.88	12.40	5.49	35.32	25.62	18.40	73.68	87.66	8578.46	921.46	74.53
0.28	2.49	10.07	11.67	12.59	5.20	36.13	24.34	19.13	76.58	91.73	8148.44	928.16	77.23
0.30	2.63	10.83	11.45	12.74	4.94	36.89	23.15	19.86	79.51	95.82	7761.54	934.32	79.94
0.31	2.77	11.56	11.22	12.86	4.69	37.60	22.06	20.59	82.44	99.93	7411.50	940.02	82.67
0.33	2.91	12.08	10.79	13.00	4.14	38.29	21.70	20.68	82.78	100.00	7156.73	952.25	82.16
0.35	3.05	12.40	10.18	13.08	3.35	39.00	21.99	20.14	80.65	100.00	6983.54	971.76	81.60
0.36	3.19	12.75	9.70	13.09	2.76	39.67	22.02	19.89	79.65	100.00	6797.48	989.01	81.04
0.38	3.33	13.06	9.27	13.02	2.24	40.33	22.08	19.63	78.59	100.00	6628.05	1007.37	80.50
0.39	3.47	13.31	8.87	12.87	1.78	40.98	22.18	19.35	77.46	100.00	6474.49	1027.03	79.97
0.41	3.61	13.51	8.51	12.63	1.38	41.64	22.32	19.05	76.25	100.00	6336.55	1048.38	79.46
0.43	3.75	13.67	8.18	12.30	1.05	42.30	22.50	18.72	74.95	100.00	6213.63	1071.69	78.95
0.44	3.89	13.77	7.89	11.87	0.77	42.97	22.73	18.37	73.56	100.00	6104.93	1097.13	78.45
0.46	4.03	13.80	7.65	11.36	0.55	43.66	22.98	18.00	72.05	100.00	6008.64	1124.45	77.98
0.47	4.17	13.77	7.45	10.77	0.39	44.36	23.27	17.59	70.43	100.00	5923.40	1153.72	77.52
0.49	4.31	13.69	7.29	10.12	0.27	45.07	23.57	17.17	68.73	100.00	5847.09	1184.64	77.07
0.51	4.45	13.54	7.17	9.44	0.18	45.78	23.88	16.72	66.93	100.00	5777.07	1216.55	76.64
0.52	4.59	13.35	7.11	8.75	0.12	46.50	24.17	16.25	65.07	100.00	5711.24	1248.97	76.23
0.54	4.73	13.12	7.07	8.07	0.08	47.21	24.44	15.77	63.15	100.00	5648.28	1281.68	75.82
0.55	4.87	12.86	7.08	7.41	0.06	47.91	24.69	15.28	61.19	100.00	5586.72	1314.20	75.43
0.57	5.01	12.56	7.12	6.78	0.04	48.59	24.91	14.78	59.19	100.00	5525.75	1346.23	75.05
0.59	5.14	12.23	7.19	6.18	0.03	49.27	25.11	14.28	57.17	100.00	5465.16	1377.86	74.68
0.60	5.28	11.88	7.29	5.61	0.02	49.93	25.27	13.77	55.13	100.00	5404.53	1408.90	74.31
0.62	5.42	11.51	7.41	5.09	0.01	50.57	25.40	13.25	53.06	100.00	5343.58	1439.12	73.96
0.63	5.56	11.12	7.56	4.59	0.01	51.20	25.51	12.73	50.98	100.00	5282.50	1468.78	73.61
0.65	5.70	10.72	7.73	4.14	0.01	51.82	25.59	12.21	48.88	100.00	5221.28	1497.85	73.26
0.66	5.84	10.29	7.93	3.72	0.00	52.42	25.64	11.68	46.77	100.00	5159.72	1526.05	72.93
0.68	5.98	9.86	8.14	3.33	0.00	53.01	25.67	11.15	44.64	100.00	5098.09	1553.64	72.60
0.70	6.12	9.41	8.37	2.97	0.00	53.58	25.67	10.62	42.50	100.00	5036.47	1580.67	72.27

ภาคผนวก จ.**บทความที่ได้รับการตีพิมพ์**

นริศ วงศ์ทยานุวัตร, พงษ์ธร จริญญากรณ์ และ ณัฐเดช เพ็องวรวงษ์, “แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินสำหรับเตาเผาเหล็ก”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 (ME-NETT 25), 19 ถึง 21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่, เลขที่บทความ ETM19

นริศ วงศ์ทยานุวัตร, พงษ์ธร จริญญากรณ์ และ ณัฐเดช เพ็องวรวงษ์, “แบบจำลองสมดุลทางความร้อนเคมีของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 (E-NETT 8), 2 ถึง 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม, เลขที่บทความ AP54

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์



นายนิศ วงศ์ทยานุวัตร เกิดเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ. 2531 ที่ จังหวัดกรุงเทพฯ เป็นลูกคนโตจากพี่น้องสองคน สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ ในปี พ.ศ. 2548 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง ด้วยเกรดเฉลี่ยสะสม 3.74 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาด้วยเกรดเฉลี่ย 3.94 ในปีการศึกษา 2554