



การศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้
ดิน

Effect of Equivalent Ratio on Combustion Characteristics of Underground
Coal Gasification

วัชรภัทร วัฒนาศรีโรจน์
Whacharapat Wattanasrirote

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้
ดิน

Effect of Equivalent Ratio on Combustion Characteristics of Underground
Coal Gasification

วัชรภัทร วัฒนาศรีโรจน์
Whacharapat Wattanasrirote

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของแก๊สซิฟิเคชัน ของถ่านหินใต้ดิน
ผู้เขียน	วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผศ.ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

.....
(ผศ.ดร.อาคม ปะหลามานิต)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อาคม ปะหลามานิต)

.....กรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กวินพัฒน์ สิริกานติโสภณ)
รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผศ.ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(ผศ.ดร.อาคม ปะหลามานิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายวัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้
ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายวัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน
ผู้เขียน	นายวัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่ถูกพบมากที่สุดบนพื้นผิวโลกโดยถ่านหินก่อกำเนิดมาจากการทับถมกันของซากพืชด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวเคมีภายใต้สภาวะความดันและความร้อนที่เหมาะสม การนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์สามารถจำแนกออกตามสถานะ ได้แก่ การนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง การนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงเหลว การนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊ส โดยในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (Equivalent Ratio) ที่ส่งผลต่อกระบวนการแปรรูปถ่านหินที่มีสถานะเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส หรือที่เรียกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ของถ่านหินใต้ดิน (Underground Coal Gasification).

การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินด้วยความร้อนใช้วิธีการติดตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือมวลของถ่านหินด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis : TGA) โดยใช้เครื่อง TA Instruments รุ่น TGA 8000, Perkin Elmer, USA ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ โดยอาศัยแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความร้อนแบบอัตราความร้อนคงที่ (Constant heating rate) 20 C/min ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 – 1000 องศาเซลเซียส โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินด้วยความร้อน คือ เพื่อให้ทราบช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การออกแบบเงื่อนไขการทดลอง จากผลการศึกษาพบว่า ถ่านหินนั้นจะเกิดการสลายตัวสูงสุดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส.

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินด้วยวิธีการทดสอบ เงื่อนไขของการศึกษาคือทำการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7 ตามลำดับ โดยชุดทดลองจะสร้างด้วยคอนกรีตทนไฟขนาดความยาว 210 มิลลิเมตร มีความกว้าง 85 มิลลิเมตร โดยโมเดลสูงขนาด 55 มิลลิเมตร และมีการให้ความร้อนด้วยหัวเผา (Torch) ที่ใช้เชื้อเพลิง LPG ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการจะถูกอ่านค่าด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Gas Analyzer) จากผลการทดสอบพบว่าค่าขององค์ประกอบแก๊สจะลดลง เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นโดยพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.1 จะให้องค์ประกอบแก๊สสูงที่สุด.

การศึกษานี้จะใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้โมเดลเตาปฏิกรณ์รูปทรงครึ่งหอยตั่ว 3 มิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent Ver.2019 R3 ขนาดของแบบจำลอง กว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 680 มิลลิเมตร และสูง 132 มิลลิเมตร โดยกำหนดขนาดของ Element sizing ให้มีขนาด 1.2 mm แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ϵ model ได้ถูกนำมาใช้ สำหรับความสัมพันธ์ทางเคมีแบบ Finite – Rate / Eddy – Dissipation ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับองค์ประกอบแบบแยกธาตุทางเคมี

(Ultimate Analysis) และองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงถ่านหิน โดยเลือกใช้ Coal Calculator รูปแบบของกลไกการเกิดแบบ Two – Step Reaction สำหรับรูปแบบในการคำนวณเลือกใช้วิธีแบบ Semi – Implicit Method for Pressure – Linked ที่ระดับ Second order upwind scheme โดยเลือกให้ค่าความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ของสมการโมเมนตัม (Momentum equation) และสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) รวมทั้งสมการพลังงาน (Energy equation) ให้มีค่าน้อยกว่า 1×10^{-4} จากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิภายในโมเดลจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นในขณะที่องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ได้แก่ออกไซด์ของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กลับมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น.

การเปรียบเทียบผลขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent พบว่า แนวโน้มขององค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีการเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.2 - 0.3 และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีการเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.3 - 0.5 และลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน.

Thesis Title	Effect of equivalent ratio on Combustion Characteristics of Underground Coal Gasification.
Author	Mr.Whacharapat Wattanasrirote
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2022

ABSTRACT

Coal is the most common fuel found on the Earth's surface. The deposition of plant matter forms coal through biochemical decomposition under appropriate pressure and heat conditions. The utilization of coal can be classified according to its status, namely the utilization of coal in the form of solid fuel. The use of coal in the form of liquid fuel. The use of coal in the form of gas fuel. This research aims to study the equivalent ratio's effect on converting solid fuel coal into gaseous fuel. Also known as the gasification process.

The thermal decomposition behavior of coal was studied using thermogravimetric analytical methods to track the change in the weight or mass of coal. Thermogravimetric analysis (TGA) was performed using a TA Instruments model TGA 8000, Perkin Elmer, USA, under atmospheric pressure. by using nitrogen gas at a flow rate of 40 mL/min. and heating at a constant heating rate of 20 C/min in the temperature range of 50 – 1000 degrees Celsius. The objective of studying the thermal decomposition behavior of coal is to determine the appropriate temperature range. for the design of the experimental conditions From the results of the study, it was found that The maximum decomposition of coal is between 300 and 900 °C.

Study of gasification reaction of coal by testing method The conditions of the study were to test the gasification reaction at the equivalence ratio of 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, and 0.7, respectively. The experimental set was built of refractory concrete with a 210 mm length and a width of 85. millimeters. The model is 55 millimeters tall and is heated by a burner (Torch) that uses LPG fuel. A gas analyzer will read the gas product obtained from the process. the gas constituents are reduced. When the equivalence ratio is increased, it is found that at 0.1 the equivalence ratio gives the highest gas component.

This study uses a mathematical calculation method using a 3D hemisphere reactor model using ANSYS Fluent Ver.2019 R3 software. The size of the model is 90 mm wide, 680 mm long, and 132 mm high. The size of the element sizing was set to 1.2 mm. The turbulent flow k- ϵ model was used. For the Finite – Rate / Eddy – Dissipation chemical correlation was analyzed together with the chemical

sequestration (Ultimate Analysis) and the estimated composition (Proximate Analysis) of coal fuel by using the Coal Calculator model. of the two-step reaction mechanism. The semi-implicit method for the pressure-linked second-order upwind scheme was chosen to calculate the difference in the resultant momentum equation. (Momentum equation) and continuity equation (The continuity equation) including energy equation (Energy equation) to be less than 1×10^{-4} . From the study results, it was found that the temperature inside the model would increase with increasing equivalence ratio While the composition of the product gas is The carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) gas components tend to decrease with increasing equivalence ratios.

In the comparison of the results of the experimental product gas composition and the results obtained from mathematical calculations using ANSYS Fluent software, it was found that the trends of carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) gas composition were there is the similar trend by the composition of carbon monoxide gas It increases in the range of the equivalence ratio between 0.2 - 0.3 and decreases as the equivalence ratio increases. while the composition of carbon dioxide increases in the range of the equivalence ratio between 0.3 - 0.5 and decreases as the equivalence ratio increases as well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มักตาร์ แวหะยี และ ผศ.ดร.อาคม ปะหลามานิต อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็น ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และเสนอแนวทางในการศึกษาค้นคว้าด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดมา ทำให้วิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ และ ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำเพิ่มเติมจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2564 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คำแนะนำและการสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือในงานวิจัยนี้จาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

คุณประโยชน์ใดๆ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอมอบแต่ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ ตลอดจนสถานศึกษาที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา และขอมอบแต่ทุกท่านที่มีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์

สารบัญ

รายการ	หน้า
หน้าอำนวยการ	(2)
หนังสือรับรอง	(3)
บทคัดย่อไทย	(5)
บทคัดย่ออังกฤษ	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญภาพ	(13)
รายงานผลงานที่ตีพิมพ์และการประชุมวิชาการ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 บทตรวจเอกสาร	3
1.3 วัตถุประสงค์	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	17
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	17
บทที่ 2 บทนำ	
2.1 บทนำ	18
2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง	18
2.3 การทดสอบการสลายตัวทางความร้อน (TGA & DTG)	20
2.4 การคำนวณหาอัตราส่วนสมมูล	20
2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและการคำนวณหาอัตราส่วนสมมูล	22
2.6 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง	25
2.7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยซอฟต์แวร์ Ansys Fluent	27
2.8 การทดสอบความแม่นยำของจำนวนปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการวิเคราะห์	29
บทที่ 3 ผลและการวิเคราะห์	
3.1 ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของถ่านหิน	30
3.2 ผลการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยแบบจำลองเตาปฏิกรณ์	33
3.3 ผลการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วย CFD	36
3.4 การเปรียบเทียบผลขององค์ประกอบแก๊สระหว่างผลของการทดสอบจริงและ CFD	38
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผลการดำเนินงาน	39
4.2 ข้อเสนอแนะ	39
บรรณานุกรมหรือเอกสารอ้างอิง	42

ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	43
ภาคผนวก ข.	56
ภาคผนวก ค.	78
ภาคผนวก ง.	86
ภาคผนวก จ.	96
ประวัติผู้เขียน	99

สารบัญตาราง

สารบัญตาราง	หน้า
ตารางที่ 1 ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศไทย	1
ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของถ่านหินแต่ละประเภท	6
ตารางที่ 3 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	12
ตารางที่ 4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	16
ตารางที่ 5 ตัวอย่างการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยละเอียด	19
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของถ่านหิน	23

สารบัญญภาพ

สารบัญญภาพ	หน้า
รูปที่ 1 ถ่านพีท	4
รูปที่ 2 ลิกไนต์	4
รูปที่ 3 ซับบิทูมินัส	5
รูปที่ 4 บิทูมินัส	5
รูปที่ 5 แอนทราไซต์	6
รูปที่ 6 องค์ประกอบของโรงผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน	7
รูปที่ 7 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	8
รูปที่ 8 แสดงลักษณะการโตของโพรง UCG ที่ได้จากการทดลองของ Lin Xin และคณะ	10
รูปที่ 9 ถ่านหินและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Ranjeet Mandal และคณะ	11
รูปที่ 10 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลา	11
รูปที่ 11 การเกิดแก๊สเชื้อเพลิงเทียบกับเวลา	12
รูปที่ 12 ลักษณะการไหลภายในอุโมงค์ UCG	13
รูปที่ 13 การเกิดโพรงของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	15
รูปที่ 14 ลักษณะการตกของอนุภาคลงบนพื้นโพรงและการไหลภายในโพรง	15
รูปที่ 15 แสดงตัวอย่างการสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด	20
รูปที่ 16 รูปถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง	22
รูปที่ 17 ไดอะแกรมของชุดทดลอง	26
รูปที่ 18 ภาพชุดทดลอง	26
รูปที่ 19 โมเดลที่ใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์	28
รูปที่ 20 แสดงผลลัพธ์ขององค์ประกอบแก๊สที่ได้จากการเปรียบเทียบปริมาตรควบคุม	29
รูปที่ 21 TGA & DTG ของถ่านหิน	31
รูปที่ 22 กราฟแสดงองค์ประกอบแก๊สที่ ER = 0.1 ถึง ER = 0.7	32
รูปที่ 23 กราฟแสดงค่าความร้อนเทียบกับเวลาที่แต่ละอัตราส่วนสมมูล	36
รูปที่ 24 (ก) แสดง Contour CO ₂ (ข) แสดง Contour CO	37
รูปที่ 25 แสดง Contour ของอุณหภูมิ	37
รูปที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบแก๊สระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Experiment) และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (CFD)	39

รายงานผลงานตีพิมพ์และประชุมวิชาการ

รายงานผลงานตีพิมพ์และประชุมวิชาการจะแบ่งตามลักษณะผลงานซึ่งประกอบด้วย 3 กลุ่ม ดังนี้

การเผยแพร่ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์, อาคม ปะหลามานิต, มัगतาร์ แวะหะยี, 2022. การทบทวนเอกสาร: เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดินและศักยภาพในประเทศไทย. Engineering Journal Chiang Mai University, 29(1), pp.79-99. Indexed by TCI. (ผลงานตีพิมพ์ใน ภาคผนวก ข)

การเผยแพร่ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

Wattanasrirote, Whacharapat, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Maizirwan Mel, and Makatar Wae-hayee. "Experimental and Numerical Investigations of Underground Coal Gasification (UCG) Using Half-teardrop Shape Cavity." Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 101, no. 2 (2022): 172-183. Indexed by Scopus. (ผลงานตีพิมพ์ใน ภาคผนวก ก)

การเผยแพร่ผลงานประชุมวิชาการ

วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์, อาคม ปะหลามานิต, มุสตาฟา ยะภา, มัगतาร์ แวะหะยี. “การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน” งานประชุมวิชาการ การถ่ายทอดผลงานความรู้และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 21, 10 – 11 มีนาคม 2565 จังหวัดเชียงราย ประเทศไทย (ภาคผนวก ค)

สำเนาที่ได้รับการตอบรับจากผู้พิมพ์ผลงาน
ภาคผนวก ก



Whacharapat Wattanasrirote <whacharapat.w@gmail.com>

Request permission to reprint my Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences in my Thesis.

2 messages

Whacharapat Wattanasrirote <whacharapat.w@gmail.com>
To: azwadi@akademiabaru.com

Fri, Feb 24, 2023 at 12:41 PM

Dear Editor-in-chief,

Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences.

I would like to request permission to reprint my paper in Thesis.

Whacharapat Wattanasrirote, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Maizirwan Mel, & Makatar Wae-hayee. (2023). *Experimental and Numerical Investigations of Underground Coal Gasification (UCG) Using Half-teardrop Shape Cavity*. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 101(2), 172–183.

Thank you very much for your kindness and warm cooperation.

Nor Azwadi Che Sidik <azwadi@akademiabaru.com>
To: Whacharapat Wattanasrirote <whacharapat.w@gmail.com>

Sat, Feb 25, 2023 at 11:36 AM

Dear Author.,

Permission to reprint the paper is granted.

Thanks

Dr. Nor Azwadi Che Sidik

Founder & Director of Semarak Ilmu Publishing and Akademia Baru Publishing

Top Research Scientist Malaysia (2020)

Malaysia Research Star Award (2018)

The Stanford list of World Top 2% Researcher

Google Scholar:

<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=SGIjs6QAAAAJ>

azwadi@akademiabaru.com

SCOPUS INDEXED CONFERENCE

World Conference on Advanced Technology and Applied Mechanics (WCATAM2022)

18 March 2023, Putrajaya, Malaysia

<https://submit.confbay.com/conf/wcatam2023>

[Quoted text hidden]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นทั้งภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการมาของรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า ส่งผลให้ภาระการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเชื้อเพลิงที่นำมาผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นประกอบด้วย 2 กลุ่มดังนี้ 1.กลุ่มเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล ถ่านหินชนิดลิกไนต์ แก๊สธรรมชาติ 2. กลุ่มพลังงานทดแทน ได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานจากลม รวมถึงเชื้อเพลิงชีวมวล จากข้อมูลสถิติการใช้เชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าของ กฟผ ในช่วงปี พ.ศ. 2559 – 2564 [1] ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเชื้อเพลิงที่มีความต้องการใช้งานอย่างต่อเนื่องคือเชื้อเพลิงถ่านหินชนิดลิกไนต์

ตารางที่ 1 ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2559 - 2564 [1]

ปี	น้ำมันเตา (ล้านลิตร)	น้ำมันดีเซล (ล้านลิตร)	ลิกไนต์ (ล้านตัน)	แก๊สธรรมชาติ (ล้าน ลบ.ฟุต)
2559	73.73	11.95	16.41	370,981.58
2560	25.05	42.73	15.9	305,735.35
2561	7.85	27.35	14.22	297,001.05
2562	25.35	28.23	13.76	303,583.20
2563	28.86	32.24	13.23	324,543.52
2564	98.29	58.83	14.24	300,430.94

ถึงแม้ว่าเชื้อเพลิงถ่านหินจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ก็ยังคงต้องใช้ในการผลิตไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เพราะข้อได้เปรียบของเชื้อเพลิงถ่านหินคือ เป็นเชื้อเพลิงที่ต้นทุนต่ำ มีปริมาณมากสามารถพบได้ในทุกประเทศทั่วโลกและเหมาะสมแก่การใช้ในปริมาณมากๆ ซึ่งทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ข้อจำกัดของถ่านหินคือ กระบวนการนำถ่านหินจากใต้ดินขึ้นมาใช้ประโยชน์ โดยปกติแล้วการนำถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์นั้นต้องผ่านกระบวนการทำเหมืองถ่านหิน โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ [2] วิธีทำเหมืองผิวดิน (Surface Mining) และวิธีทำเหมืองใต้ดิน (Underground Mining) ข้อจำกัดในการทำเหมืองถ่านหินคือ ต้นทุนสูง เพราะต้องใช้แรงงานคนจำนวนมากและเครื่องจักรหนักขนาดใหญ่ ส่งผลกระทบต่อแหล่งชุมชน การขนส่งลำเลียงมีหลายขั้นตอน มลพิษทางสิ่งแวดล้อมและมลพิษทางน้ำเนื่องจากการพาแร่ จำเป็นต้องใช้น้ำในการพา เช่นกรณีของเหมืองถ่านหิน เป็นต้น

โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อเชื้อเพลิงถ่านหิน เพราะเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดสามารถช่วยลดมลพิษของการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ [3]

1. การนำเชื้อเพลิงถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในสภาพเชื้อเพลิงแข็ง (Use as solid) ได้แก่ การเพิ่มองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนในถ่านหิน การแปรสภาพเป็นถ่านโค้ก (Coke manufacture) และการนำผงถ่านหินมาอัดเป็นก้อน (Briquette)

2. การนำเชื้อเพลิงถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในสภาพเชื้อเพลิงเหลว (Use as liquid) ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยมีการผสมถ่านหินกับน้ำ (Coal water mixture) และการกลั่นเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหิน (Coal liquefaction)

3. การนำเชื้อเพลิงถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในสภาพเชื้อเพลิงแก๊ส (Use as gas) ได้แก่ การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหิน (Coal Gasification)

เนื่องจากปัญหาทางด้านข้อจำกัดในการนำถ่านหินที่อยู่ในระดับความลึกสูงมาใช้ประโยชน์ และข้อได้เปรียบในด้านการขนส่งแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษา และพัฒนากระบวนการแปรสภาพของถ่านหินที่อยู่ใต้ดินซึ่งมีสถานะเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) โดยเรียกว่ากระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน (Underground Coal Gasification) โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) และองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งสามารถจุดติดไฟได้รวมถึงค่าความร้อนสุทธิ (Lower Heating Value) ของแก๊สเชื้อเพลิง ที่ดีที่สุดเนื่องจากตัวแปรเหล่านี้คือตัวชี้วัดคุณภาพของเชื้อเพลิงแก๊ส

1.2 บทตรวจเอกสาร

1.2.1 การกำเนิดถ่านหิน

ถ่านหิน (coal) เป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติ เกิดจากการสะสมตัวตามธรรมชาติของซากพืชในแอ่งตะกอนน้ำตื้น ถ่านหินเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งสามารถติดไฟได้ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สารประกอบของคาร์บอน ซึ่งจะมีอยู่ประมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาณ ถ่านหินกำเนิดมาจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของพืชพันธุ์ไม้ต่างๆ ที่สลายตัวและสะสมอยู่ในลุ่มน้ำหรือแอ่งน้ำต่างๆ นับเป็นเวลาหลายร้อยล้านปี เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวโลกเช่น เกิดแผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด หรือมีการทับถมของตะกอนมากขึ้น ทำให้แหล่งสะสมตัวนั้นได้รับความกดดันและความร้อนที่มีอยู่ภายในโลกเพิ่มขึ้นซากพืชเหล่านั้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่านหินชนิดต่างๆ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแปรสภาพของถ่านหินนั้นมีความซับซ้อนแต่สามารถจำแนกได้ชัดเจนซึ่งจำแนกได้เป็น 2 กระบวนการ [4] ดังนี้

1. การกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical Reaction) คือกระบวนการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีโดย จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในธรรมชาติทำการย่อยสลายซากพืชทำให้กลายเป็นสารเนื้อเดียวกัน โดยอยู่ในรูปของสารที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เป็นส่วนใหญ่ ซากพืชที่ตกตะกอนสะสมกันอยู่นั้นจะกลายเป็นพีตซึ่งสิ่งสำคัญที่สุดในกระบวนการนี้คือสภาพแวดล้อม ถ้าซากพืชนั้นอยู่ลึกเกินไปจุลินทรีย์จะไม่สามารถทำงานได้ แต่ถ้าซากพืชอยู่ตื้นเกินไปจุลินทรีย์จะใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายซากพืชเหล่านั้นแทน

2. กระบวนการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal Alteration) หรือ กระบวนการแปรสภาพ (Metamorphism) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากกระบวนการข้างต้น ซึ่งในกระบวนการนี้พีตที่เกิดขึ้นจะแปรสภาพไปเป็นถ่านหิน โดยเมื่อชั้นพีตถูกกดทับด้วยตะกอนมากขึ้นเรื่อยๆ ในระดับความลึกที่เหมาะสม และความร้อนจากภายในโลกที่เพิ่มขึ้นตามระดับความลึกจะเป็นตัวทำหน้าที่ในการหยุดกระบวนการทางชีวเคมี และจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal Alteration) ทำให้พีตมีการแปรสภาพไปเป็นถ่านหิน ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่าการแปรสภาพเป็นถ่านหิน (Coalification).

1.2.2 การแบ่งประเภทของถ่านหิน

การจำแนกชนิดของถ่านหิน [5] นั้นใช้เกณฑ์ของปริมาณคาร์บอน (Carbon contents) ในการจำแนกเท่านั้นโดยไม่คำนึงถึงอายุของถ่านหินหรือแหล่งที่มาของถ่านหิน

1.พีต (Peat) เป็นชั้นแรกในกระบวนการเกิดถ่านหิน ซึ่งมีคุณภาพต่ำสุดในประเภทของถ่านหิน ซากพืช บางส่วนยังสลายตัวไม่หมด มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเข้มมีความและมีความชื้นสูง สารประกอบที่เกิดขึ้นมีปริมาณออกซิเจนสูงแต่มีปริมาณคาร์บอนต่ำเมื่อนำถ่านพีตมาเป็นเชื้อเพลิงต้องผ่าน กระบวนการไล่ความชื้น ค่าความร้อนของถ่านพีตจะมีค่าที่สูงกว่าค่าความร้อนของถ่านไม้ เพื่อให้ ความร้อนในบ้านหรือผลิตไฟฟ้า ข้อดีของถ่านพีตคือมีร้อยละของกำมะถันต่ำกว่าน้ำมันและถ่านหินชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในรูป 1



รูปที่ 1 ถ่านพีต [5]

2.ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่มีซากพืชเหลืออยู่เล็กน้อย มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ผิวสัมผัสมีความแข็งแต่เปราะแตกเป็นผงง่าย มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นในระดับปานกลาง มีปริมาณ คาร์บอนสูงกว่าถ่านพีต เมื่อติดไฟจะมีควันและเถ้ามาก ลิกไนต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนและนิยมใช้เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2



รูปที่ 2 ลิกไนต์ [5]

3.ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) มีสีดำหรือน้ำตาลเข้มปน เนื้อถ่านหินไม่แข็งมากและมีความสะท้อนแสงมันวาว มีความอ่อนตัวและมีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 75-80 ปริมาณกำมะถัน

ต่ำถ่านหินประเภทนี้ส่วนมากใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับถ่านหินชนิดลิกไนต์หรือใช้ในอุตสาหกรรมดังแสดงในรูป 3



รูปที่ 3 ซับิทูมินัส [5]

4.บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น มีลักษณะแข็ง และมักจะประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะเป็นมันวาวมากกว่าถ่านหินชนิดซับิทูมินัส ปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าถ่านหินแอนทราไซต์ ถ่านหินประเภทนี้สามารถแบ่งย่อยได้ เป็น 3 กลุ่มตามความสามารถในการระเหย คือประเภทที่มีความสามารถในการระเหยสูง กลาง และต่ำ ถ่านหินชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้เป็นถ่านหินเพื่อการถลุงโลหะ หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าดังแสดงในรูป 4



รูปที่ 4 บิทูมินัส [5]

5.แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่ถูกจัดอยู่ในลำดับสูงสุด ถือว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด มีลักษณะดำเป็นเงามัน มีความแวววาวสูง มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป มีค่าความร้อนสูง มีปริมาณ ความชื้นต่ำมาก เวลาเผามีควันน้อยแต่จุดไฟติดยาก ส่วนใหญ่มักใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนภายในบ้าน และในอุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น ดังแสดงในรูป 5

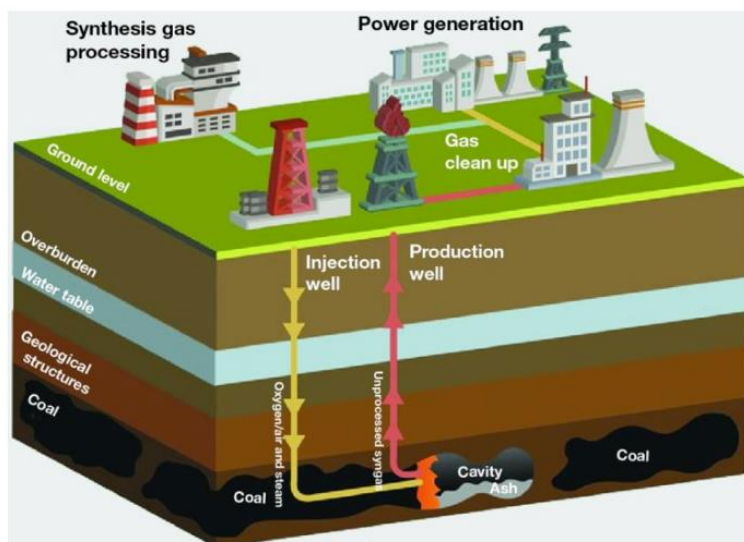


รูปที่ 5 แอนทราไซต์ [5]

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของถ่านหินแต่ละประเภท [5]

ประเภทของถ่าน หิน	ปริมาณขององค์ประกอบ (ร้อยละโดยมวล)					
	C	H	O	N	S	ความชื้น
1.พีต	50-60	5-6	35-40	2	1	75-80
2. ลิกไนต์	60-75	5-6	20-30	1	1	50-70
3. ซับบิทูมินัส	75-80	5-6	15-20	1	1	25-30
4. บิทูมินัส	80-90	4-6	10-15	1	5	5-10
5. แอนทราไซต์	90-98	2-3	2-3	1	1	2-5

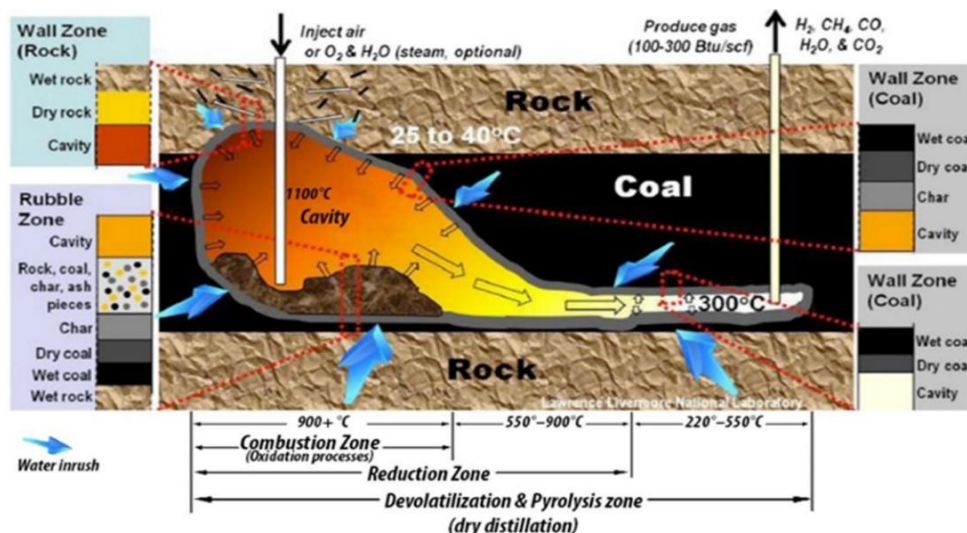
1.2.3 กระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน



รูปที่ 6 องค์ประกอบของโรงผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน [6]

รูปที่ 6 และ รูปที่ 7 แสดงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน โดยออกซิแดนซ์คือสารที่จะเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีกับถ่านหินซึ่งอาจจะเป็น อากาศ, ไอน้ำ, หรือออกซิเจน ถูกฉีดเข้าจากท่อด้านบน (Injection well) แล้วไหลลงสู่โพรงของถ่านหินด้านล่าง จากนั้นจะทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับถ่านหินที่อยู่ใต้ดินแล้วสร้างผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) และจะถูกส่งขึ้นมาบนผิวดินทางท่อผลิตภัณฑ์ (Production well) สำหรับปฏิกิริยาย่อย (Sub - reaction) ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันประกอบด้วยดังนี้ [7]

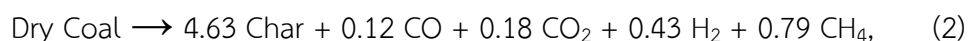
(1) ชั้นไล่ความชื้น (Drying) โดยส่วนใหญ่แล้ว ถ่านหินที่อยู่ชั้นใต้ดินจะมีความชื้นสูง ซึ่งความชื้นที่อยู่ในถ่านหินจะระเหยออกมาโดยเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโพรง ส่งผลทำให้ถ่านหินมีรูพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียความชื้น สามารถแสดงสมการได้ดังนี้



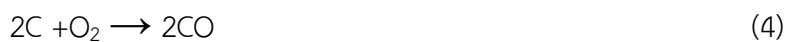
รูปที่ 7 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน [7]



(2) ชั้นไพโรไลซิส (Pyrolysis) เมื่อถ่านหินแห้งหลังจากที่ได้รับความร้อน ต่อไปจะเกิดเป็นชั้นไพโรไลซิส ซึ่งจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ $350^\circ - 400^\circ\text{C}$ ถ่านจะเกิดขึ้นจากการปล่อยสารระเหย (Hydrocarbons, CH_4 , H_2 , H_2O , CO , CO_2) สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

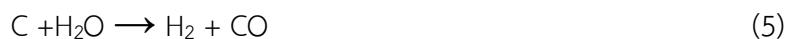


(3) ชั้นออกซิเดชัน (Oxidation) ถ่าน (C) และสารระเหย (Volatiles) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

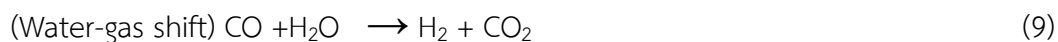


ลำดับที่ 3 และ 4 คือปฏิกิริยาคายความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหิน ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นภายในโพรงใกล้เคียงบริเวณสารออกซิแดนท์ที่ถูกฉีดลงไป

(4) ชั้นแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นปฏิกิริยาการทำให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง สามารถแสดงสมการได้ดังนี้



นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สมีเทนและไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิง สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

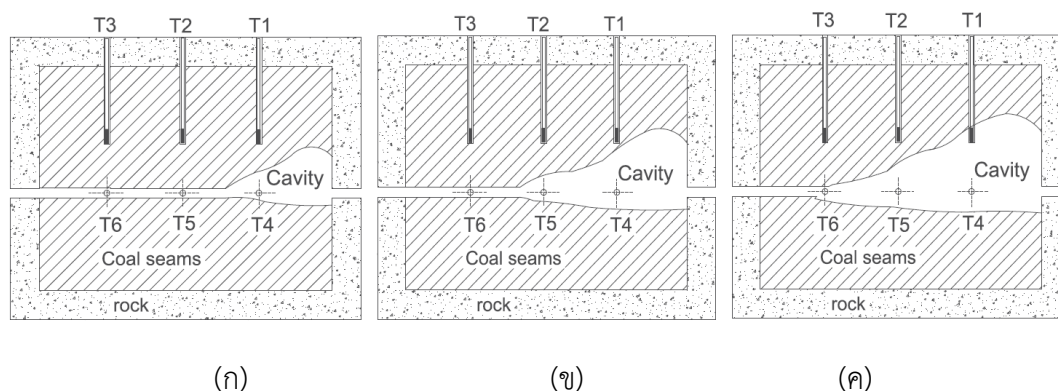


กระบวนการโดยรวมของ UCG มีการคายความร้อนในปริมาณที่มาก ทำให้อุณหภูมิในช่วงการเผาไหม้มักจะสูงเกิน 900°C อย่างไรก็ตาม แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างการไหลออกจากโพรง ทำให้อุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 300°C สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ใน UCG คือ สัดส่วนของสารออกซิแดนซ์ต่อไอน้ำ (O₂/Steam ratio) ความดันในการทำงาน มวลและความสมดุลของพลังงานในโพรง เป็นต้น

1.2.3 การทบทวนวิธีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

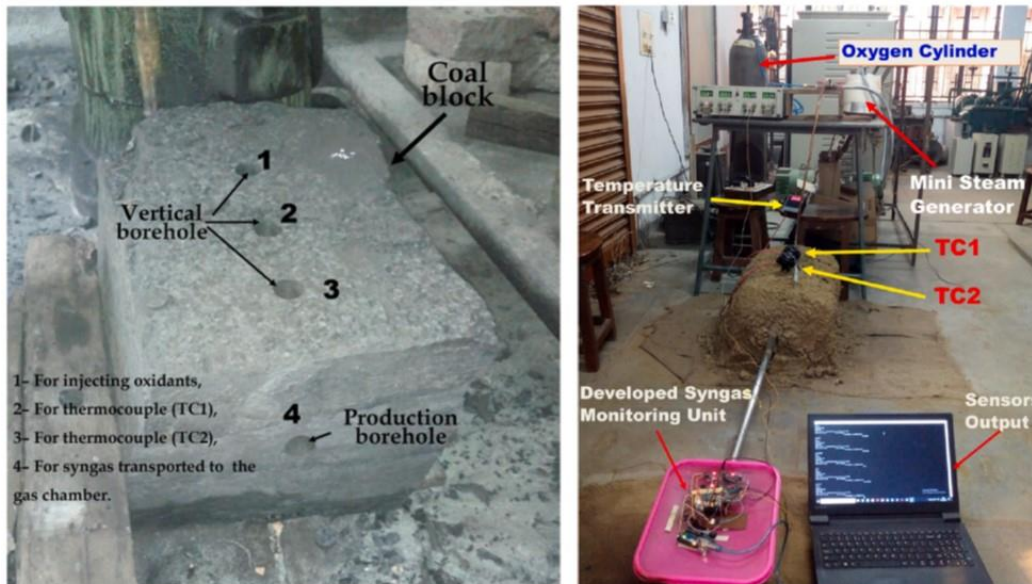
1.การศึกษาด้วยการสร้างชุดทดลอง (Experiment)

Lin Xin และคณะ [8] ได้จำลองการขยายตัวและการก่อตัวของโพรงในระยะเริ่มต้นของการเผาไหม้ โดยได้ใช้ถ่านหินที่พบอยู่ภายในประเทศจีนซึ่งเป็นถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (Anthracite) ถ่านหินนั้นเดิมจะมีสภาพเป็นผงโดยได้นำไปผ่านกระบวนการอัดภายใต้ความดัน 14 MPa ภายในโมลและผสมด้วยกาวหรือตัวเชื่อมประสานประมาณ 5wt% เพื่อผสมเนื้อของผงถ่านหินเข้าด้วยกันจนกลายเป็นบล็อกถ่านหิน (Coal block) ขนาด 30 cm x 30 cm x 23 cm หลังจากได้บล็อกถ่านหินแล้วได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมด 6 จุด และใช้ออกซิแดนซ์ (Oxidizer) เป็นแก๊สออกซิเจน โดยแบ่งการทดลองไว้สามช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นการให้ความร้อน มีการพ่นออกซิเจนที่ 0.4 L/min และได้มีการให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน (Heating tube) ลักษณะโพรงดังแสดงในรูปที่ 8(ก) ช่วงที่ 2 คือช่วงที่นำขดลวดความร้อนออก ลักษณะโพรงแสดงในรูปที่ 8(ข) และช่วงสุดท้ายคือช่วงที่หยุดการจ่ายออกซิเจนให้กับระบบ ลักษณะโพรงแสดงในรูปที่ 8(ค) จากการทดลองพบว่า จุดที่ใกล้ตำแหน่งของการเริ่มการเผาไหม้มากที่สุดคือตำแหน่งที่ 1 จะมีอุณหภูมิสูงที่สุด และมีขนาดของความโตของโพรงมากที่สุด

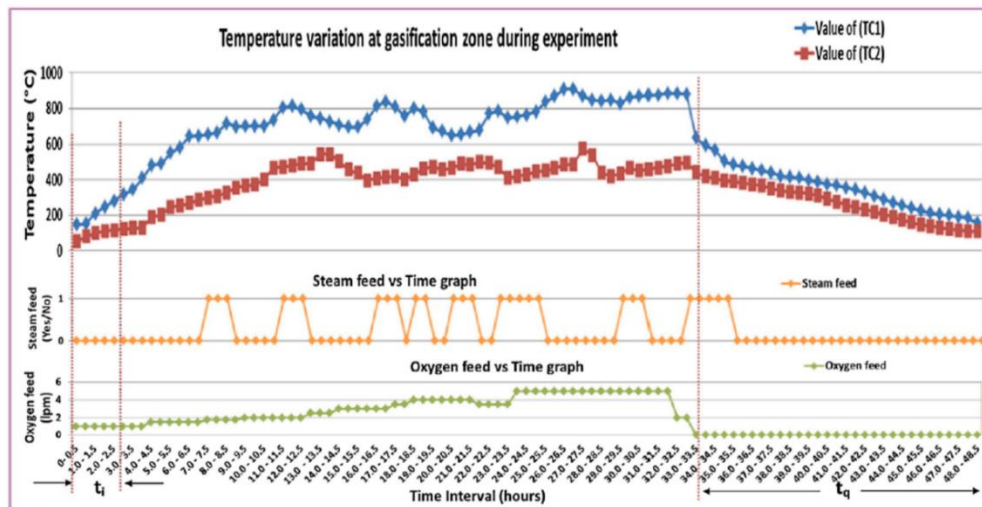


รูปที่ 8 แสดงลักษณะการโตของโพรง UCG ที่ได้จากการทดลองของ Lin Xin และคณะ [8]

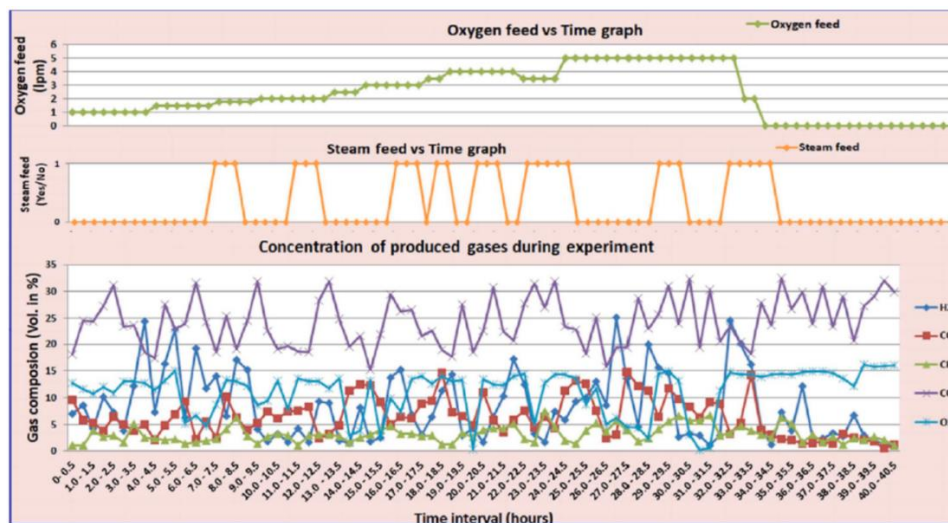
Ranjeet Mandal และคณะ [9] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน โดยติดตามผลแบบ Real time ในการทดลองได้สร้างชุดทดลองขนาด Laboratory scale ซึ่งได้ใช้ถ่านหินจากเหมืองแร่ในประเทศอินเดีย สำหรับบล็อกถ่านหินที่นำมาทดลองมีขนาด 45 cm x 35 cm x 28 cm โดยได้ทำการเจาะรูตามแนวตั้ง (Vertical borehold) ความลึกที่ 10 cm และเจาะรูตามแนวนอน (Horizontal borehold) ยาว 32 cm ซึ่งรูที่เจาะตามแนวนอน (Horizontal bore hold) จะเชื่อมกับรูแนวตั้ง (Vertical borehold) ทั้ง 3 รูดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) โดยหลุมแนวตั้งใช้สำหรับฉีดออกซิแดนท์ (Injection Oxidant) และหลุมแนวนอนสำหรับเป็นรูทางออกของผลิตภัณฑ์ บล็อกถ่านหินจะถูกนำไปเคลือบด้วยดินเหนียวและต่อท่อสแตนเลสเพื่อนำแก๊สผลิตภัณฑ์มาเก็บไว้ในถังแก๊สดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) ในระหว่างกระบวนการทดลองได้ฉีดออกซิแดนท์เข้าไปอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษากระบวนการเกิดแก๊สเอาไว้ และมีการฉีดพ่นไอน้ำ (Steam) เข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของแก๊สผลิตภัณฑ์ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราส่วนของ CO/H₂ ให้กับแก๊สผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองของ Ranjeet Mandal และคณะ [13] แสดงในรูปที่ 10 และ 11 พบว่า ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองในช่วงของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าช่วงแก๊สซิฟิเคชัน ช่วงไพโรไลซิสและช่วงของชั้นลดความชื้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 10 สำหรับผลของการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันนั้นได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H₂) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สไนโตรเจน (N₂) ดังแสดงในรูปที่ 11 แต่จากการทดลองสังเกตได้ว่าในช่วงที่เริ่มมีการหยุดฉีดออกซิแดนท์ส่งผลต่อคุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (H₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีเทน (CH₄) ที่ได้ลดลง



(ก) ถ่านหิน (ข) ชุดการทดลอง และอุปกรณ์ที่ใช้
รูปที่ 9 ถ่านหินและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Ranjeet Mandal และคณะ [9]



รูปที่ 10 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลา [9]



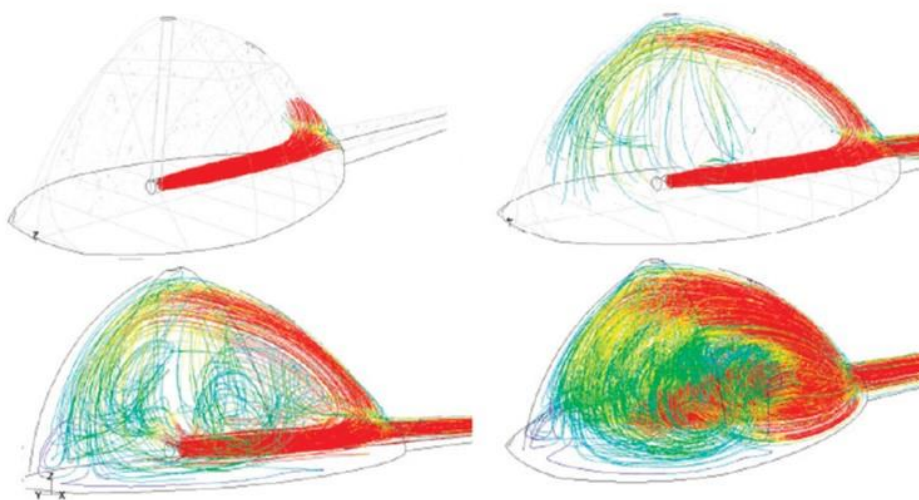
รูปที่ 11 การเกิดแก๊สเชื้อเพลิงเทียบกับเวลา [9]

Kashyap และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าที่สูง (High ash coal) โดยตั้งสมมุติฐานว่าหากเคลื่อนย้ายหลุมเจาะ (Injection well) จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาของถ่านหินชนิดที่มีเถ้าสูงนั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเพียงใด ในการทดลองได้มีการแบ่งชุดทดลองออกเป็น 5 ชุดโดยชุดที่ 1 ถึง 4 จะเป็นการทำปฏิกิริยาแบบชั้นเดียว และชุดการทดลองที่ 5 จะเป็นปฏิกิริยาแบบ 2 ชั้นตอน มีการใช้ออกซิไดซ์เซอร์ ที่แตกต่างกันในแต่ละชุดทดลองได้แก่ชุดทดลองที่ 1 และชุดทดลองที่ 2 จะใช้ออกซิเจน ชุดทดลองที่ 3 จะเป็นอากาศ ชุดทดลองที่ 4 จะเป็นออกซิเจนที่มีปริมาณความเข้มข้นสูง และในชุดทดลองที่ 5 จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ 2 ชั้นตอน ผลจากการทดลองแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ชุดทดลองที่ 4 ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด ซึ่งเป็นกรณีการฉีดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูง

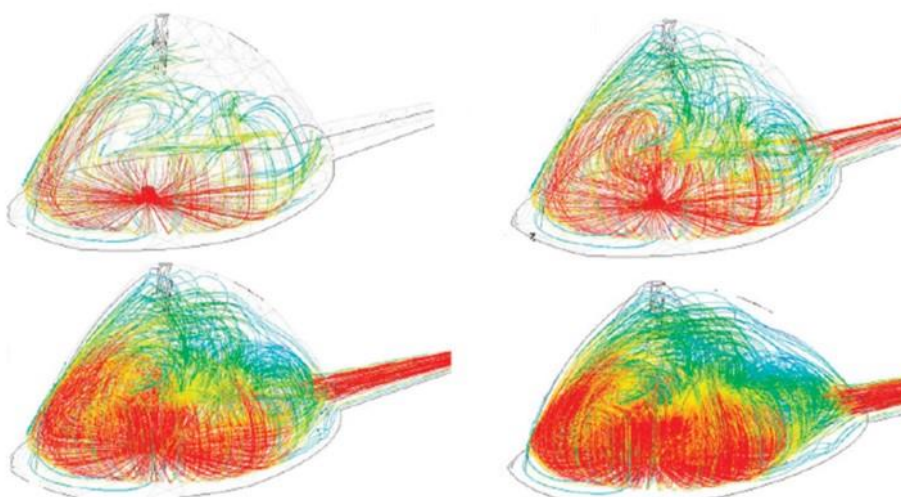
ตารางที่ 3 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง [10]

Experiment No.	Gasification agent	Average syngas calorific value (KJ/mol)
1	ออกซิเจน	153.9
2	ออกซิเจน	123.2
3	อากาศ	77.9
4	ออกซิเจนที่มีความเข้มข้น	192.9
5	คาร์บอน-ออกซิเจน	191.1

2. การศึกษาด้วยการสร้างชุดทดลองและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
(Experiment and Simulation)



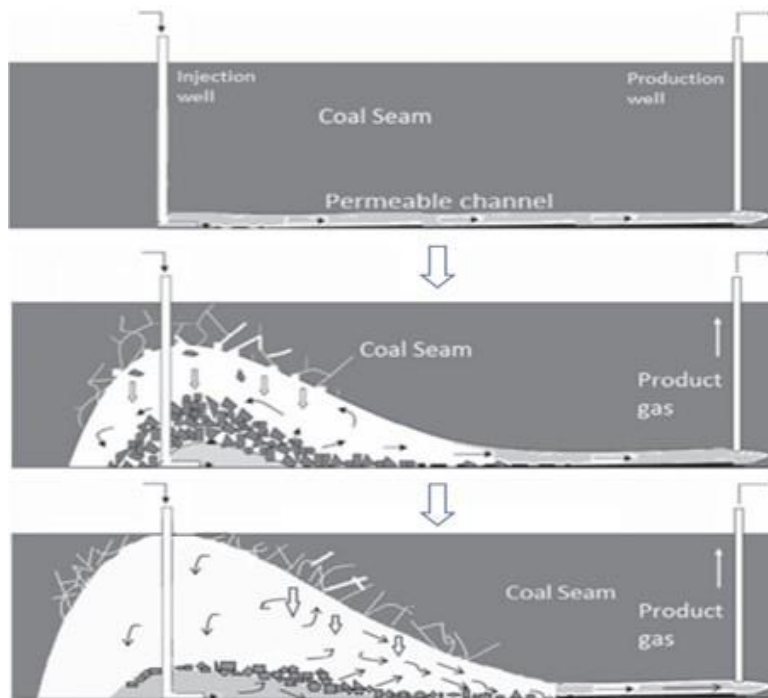
(ก) ฉีดออกซิแดนทีในแนวนอน (Horizontal Injection)



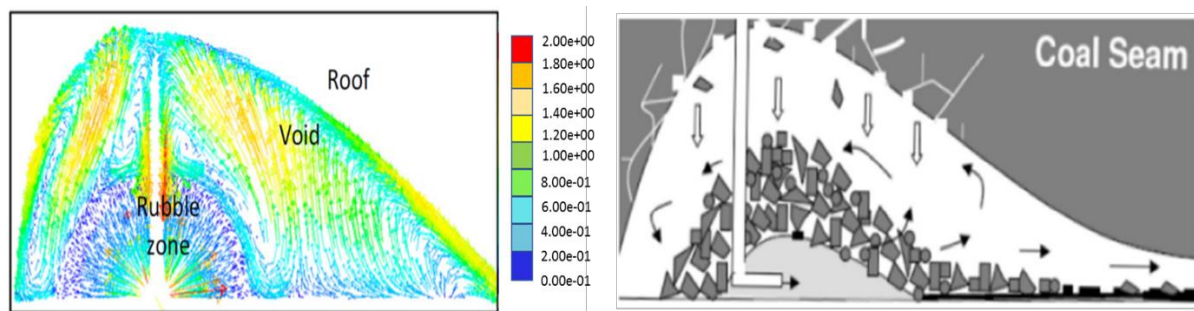
(ข) ฉีดออกซิแดนทีในแนวตั้ง (Vertical Injection)
รูปที่ 12 ลักษณะการไหลภายในอุโมงค์ UCG [11]

Sateesh และคณะ [11] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลที่ส่งผลต่อการโตของโพรงในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน โดยใช้วิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD) และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับเงื่อนไขขอบเขตคือความเร็วทางเข้าที่ 4 m/s และเลือกใช้แก๊สออกซิเจน (Oxygen) เป็นออกซิแดนซ์ มีการกำหนดให้อุณหภูมิของโพรงคงที่ 1273 k และความดันทางออกที่ 5 atm โดยใช้โมเดลการไหลแบบปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$ model ในการศึกษาได้กำหนดขนาดของโพรงโดยแบ่งตามระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 5 ขนาด ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลได้มีการแบ่งออกเป็นสองลักษณะ แบบแรกคือ ฉีดออกซิแดนซ์ในแนวนอน (Horizontal Injection) และแบบที่สองคือ ฉีดออกซิแดนซ์ในแนวตั้ง (Vertical Injection) โดยผลที่ได้จากการศึกษากรณีฉีดออกซิแดนซ์ในแนวนอน (Horizontal Injection) แสดงในรูปที่ 12(ก) และฉีดออกซิแดนซ์ในแนวตั้ง (Vertical Injection) แสดงในรูปที่ 12(ข) พบว่าการฉีดออกซิแดนซ์ในแนวตั้งมีผลต่อการกระจายของออกซิแดนซ์ทุกทิศทางมากกว่ากรณีฉีดออกซิแดนซ์ในแนวนอน

Samdani และคณะ [12] ได้ศึกษาการขยายตัวของโพรงและพฤติกรรมของอนุภาคที่ตกลงมาสู่ด้านล่างของโพรง โดยสร้างแบบจำลองโมเดลในระยะเฟสแรกของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันภายใต้เงื่อนไขดังนี้ อัตราส่วนของไอน้ำและออกซิเจน (Steam/O₂ ratio) มีค่าเท่ากับ 3.57 ระยะเวลาในการจำลองการเกิดปฏิกิริยา (Simulation time) 10 ชั่วโมง ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินชนิดลิกไนต์ (Lignite) การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของถ่านหินได้จากต้องวิเคราะห์ทั้งแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์แบบประมาณการ (Approximate analysis) เงื่อนไขสภาวะความดันที่ใช้ในการศึกษาคือ 4.8 atm ระยะห่างระหว่างหลุม 0.5 m ขนาดของอนุภาคที่ตกลงมาสู่พื้นล่างของโพรงคือ 5 mm ในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ Ansys fluent ในความเป็นจริงแล้วการเกิดของโพรงในปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินนั้นยากต่อการสร้างแบบจำลอง และยากต่อการคิดวิเคราะห์มากดังนั้นเพื่อง่ายต่อการคิดวิเคราะห์จึงต้องจำลองรูปทรงแบบ Resident-time distribution (RTD) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ปรัชญาการจำลองของอนุภาคเมื่อตกลงมาสู่พื้นของโพรงและทิศทางการไหลของอากาศดังแสดงในรูป 13 และ 14 หลังจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ทำให้ได้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิเทียบกับปริมาตรของแต่ละช่วงเวลา และผลของการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์เทียบกับระยะเวลา



รูปที่ 13 การเกิดโพรงของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของถ่านหินใต้ดิน [12]



รูปที่ 14 ลักษณะการตกของอนุภาคลงบนพื้นโพรงและการไหลภายในโพรง [12]

ตารางที่ 4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน

ผู้วิจัย (ปี)	จุดประสงค์ของงานวิจัย	วิธีการศึกษา	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	Gasification agent	เงื่อนไขการทดลอง
Sateesh Daggupati และคณะ (2011) [11]	ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรง (Cavity) ระหว่างการพ่นแบบแนวนอน(Horizontal Injection) และการพ่นแบบแนวตั้ง (Vertical Injection)	Simulations & Experiments	Nitrogen gas ,Helium gas	Oxygen	Velocity inlet: 4 m/s Cavity temperature: 1273 K Outlet pressure: 5 atm
Lin Xin และคณะ (2019) [8]	ศึกษาการขยายตัวและการก่อตัวของโพรง (Cavity)ในช่วงระยะเริ่มต้นของกระบวนการเผาไหม้	Experiments	Coal (Anthracite)	Oxygen	O ₂ flow rate: 0.4 (L/min)
Ranjeet Mandal และคณะ (2020) [9]	ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันตามเวลาจริงของ UCG	Experiments	Coal	Oxygen, Steam	O ₂ flow rate: 1-5 (L/min) Stream feed: Pulse Value
Ganesh Samdani และคณะ (2016) [12]	ศึกษาการขยายตัวของโพรง(Cavity) โดยสนใจพฤติกรรมของอนุภาคที่ตกลงมาสู่ด้านล่างของโพรง(Cavity)ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเตา	Simulations & Experiments	Coal	Oxygen, Steam	Stream/O ₂ ratio: 3.57 Molar flow rate: 3.2×10^{-3} kmol/m ² s
Swarnotpal Kashyap และคณะ (2019) [10]	ศึกษาลักษณะการพ่น(Injection well) แบบเคลื่อนที่และแปรเปลี่ยนไปตามระยะเวลา จะส่งผลในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ในถ่านหินที่มีปริมาณถ้ำสูงได้	Experiments	Coal	Oxygen, Carbon dioxide, Air, Humidified Oxygen	O ₂ flow rate: 1 (L/min), Air flow rate: 1 (L/min), Humidified O ₂ flow rate: 1 (L/min)

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas)
2. เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ภายในโพรงของแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินโดยใช้วิธีการจำลองการไหลด้วยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล (CFD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบผลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) เพื่อใช้ในการออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน
2. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยและพัฒนาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่อยู่ใต้ดินโดยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากรณีโพรงของแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินในช่วงเฟสแรก
2. ศึกษาโดยใช้ถ่านหินที่พบในประเทศไทยชนิดลิกไนต์แล้วนำมาบดให้มีขนาดเล็ก 0.5-3.0 มิลลิเมตร
3. ในการทดลองควบคุมให้ความดันอยู่ในช่วงความดันบรรยากาศ

บทที่ 2

บทนำ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงขั้นตอนการศึกษาและหลักการของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะเริ่มโดยการนำเชื้อเพลิงถ่านหินไปทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบธาตุทางเคมี ซึ่งจะเรียกขั้นตอนนี้ว่าการวิเคราะห์แบบประมาณ (Approximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate Analysis) ซึ่งในการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีนี้จะให้ค่าที่แตกต่างกันโดยจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านหินด้วยวิธีทางเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงเงื่อนไขขอบเขตช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิง โดยเงื่อนไขการทดลองได้แก่ ปริมาณเชื้อเพลิงถ่านหินต่ออากาศ และ ขอบเขตของอุณหภูมิ จะถูกนำไปใช้ต่อในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ด้วยซอฟต์แวร์ Ansys Fluent

2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง

2.2.1 การวิเคราะห์โดยประมาณ (Approximate Analysis) [13]

องค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณตามมาตรฐาน ASTM D7582 หลักการวิเคราะห์คือ นำถ่านหินมาชั่งน้ำหนักและบดให้ละเอียด หลังจากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการอบเพื่อไล่ความชื้น ออกอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วงประมาณ 105 – 110 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักใหม่อีกครั้งหนึ่งจะพบว่า น้ำหนักส่วนที่สูญเสียไปจะเป็นน้ำหนักของน้ำหรือความชื้น (moisture) ในเชื้อเพลิงถ่านหิน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 900 องศาเซลเซียส ในกระบวนการนี้ น้ำหนักของเชื้อเพลิงจะลดลงไปบางส่วนซึ่งในส่วนที่ลดลงไปจะเป็นส่วนของสารระเหย (volatile) ต่อมาให้ความร้อนเพื่อให้ได้ส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้อีกโดยใช้อุณหภูมิในช่วง 750 – 900 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่หายไป

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของคาร์บอนที่เสถียร (fixed carbon) หรือหาได้จากสมการ (10) ผลลัพธ์สุดท้ายที่เหลือจากกระบวนการคือเถ้า (Ash)

$$FC + VM + M + A = 1.0 = 100 \%wt. \quad (10)$$

เมื่อ FC คือ คาร์บอนเสถียร (Fixed Carbon)

VM คือ สารระเหย (Volatile Matter)

M คือ ความชื้น (Moisture)

A คือ เถ้า (Ash)

2.2.2 การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate Analysis)

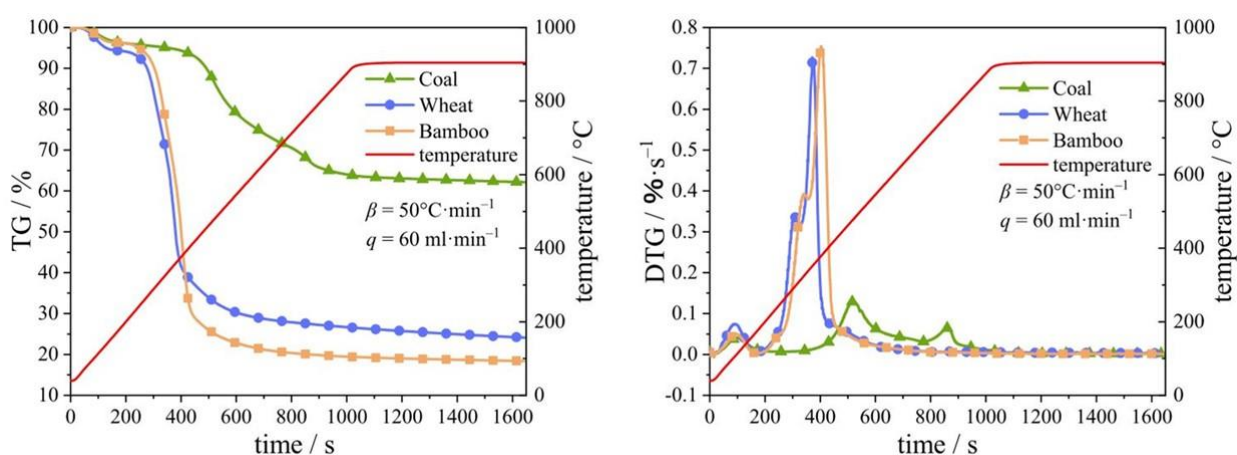
การวิเคราะห์แบบละเอียดคือการหาองค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิงแข็ง โดยองค์ประกอบที่พบได้ในเชื้อเพลิงถ่านหินสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1. องค์ประกอบหลัก (C, H, O) และ 2. องค์ประกอบรอง (N, S, CL) โดยองค์ประกอบเหล่านี้สามารถพบได้ในพืชและเชื้อเพลิงชีวมวล จากข้อมูลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของธาตุ ไนโตรเจน (N) ของเชื้อเพลิงถ่านหินจะมีมากกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลดังแสดงในตารางที่ 5 โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้ องค์ประกอบของธาตุไนโตรเจน (N) จะรวมตัวกับธาตุออกซิเจน (O₂) และกลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นแก๊สพิษอีกด้วย

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยละเอียด [14]

Sample	Nitrogen (wt.%)	Carbon (wt.%)	Hydrogen (wt.%)	Oxygen (wt.%)	Sulphur (wt.%)
Empty fruit bunch	0.249	48.715	7.858	48.179	ND
Palm kernel shell	0.043	57.909	12.60	49.994	ND
Lignite Coal	1.6	56.4	4.2	26.0	0.4

2.3 การทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของถ่านหินด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis : TGA)

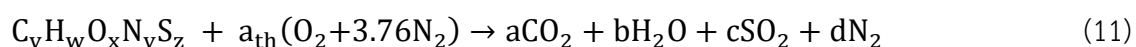
การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินด้วยความร้อนใช้วิธีการติดตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือมวลของตัวอย่างด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis : TGA) โดยใช้เครื่อง TA Instruments รุ่น TGA 8000, Perkin Elmer, USA ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ โดยอาศัยแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่ออนาที และให้ความร้อนแบบอัตราความร้อนคงที่ (Constant heating rate) 20 C/min ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 – 1000 องศาเซลเซียส รูปที่ 15 แสดงตัวอย่างการสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด



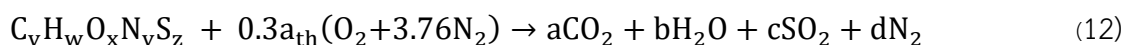
รูปที่ 15 แสดงตัวอย่างการสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด [15]

2.4 การคำนวณหาอัตราส่วนสมมูล

สมการเผาไหม้



สมการแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงถ่านหิน



อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

$$A/F_{Ratio} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (13)$$

เมื่อ A/F_{Ratio} คือ ค่าสัดส่วนมวลอากาศต่อมวลเชื้อเพลิง

m_{air} คือ มวลอากาศ (kg)

m_{fuel} คือ มวลเชื้อเพลิง (kg)

$$m_{\text{air}} = (NM)_{\text{air}} \quad (14)$$

เมื่อ

m_{air} คือ มวลอากาศ (kg)

N_{air} คือ จำนวนโมลของอากาศ (kmol)

M_{air} คือ องค์กรประกอบโดยโมลของอากาศ (kg/kmol)

$$m_{\text{fuel}} = (NM)_c + (NM)_H + (NM)_O + (NM)_N + (NM)_S \quad (15)$$

เมื่อ

m_{fuel} คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)

N_c คือ จำนวนโมลของธาตุคาร์บอน (kmol)

M_c คือ องค์กรประกอบโดยโมลของธาตุคาร์บอน (kg/kmol)

N_H คือ จำนวนโมลของธาตุไฮโดรเจน (kmol)

M_H คือ องค์กรประกอบโดยโมลของธาตุไฮโดรเจน (kg/kmol)

N_O คือ จำนวนโมลของธาตุออกซิเจน (kmol)

M_O คือ องค์กรประกอบโดยโมลของธาตุออกซิเจน (kg/kmol)

N_N คือ จำนวนโมลของธาตุไนโตรเจน (kmol)

M_N คือ องค์กรประกอบโดยโมลของธาตุไนโตรเจน (kg/kmol)

N_S คือ จำนวนโมลของธาตุซัลเฟอร์ (kmol)

M_S คือ องค์กรประกอบโดยโมลของธาตุซัลเฟอร์ (kg/kmol)

อัตราส่วนสมมูล

$$ER = \frac{A/F_{\text{actual}}}{A/F_{\text{stoichiometric}}} \quad (16)$$

เมื่อ

ER คือ ค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

A/F_{actual} คือ ค่าอัตราส่วนมวลอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้

$A/F_{\text{stoichiometric}}$ คือ ค่าอัตราส่วนมวลอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ตามทฤษฎี

2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและการคำนวณหาอัตราส่วนสมมูล

ในการทดลองนี้ได้นำถ่านหินที่สามารถพบได้ในประเทศไทยมาทำการศึกษาซึ่งลักษณะทางกายภาพของถ่านหินนั้นได้แสดงในรูปที่ 16 ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) และผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ได้แสดงในตารางที่ 6 และสามารถสรุปสูตรทางเคมีของค่าเฉลี่ยของถ่านหินโดยทั่วไปคือ $\text{CH}_{0.512}\text{O}_{0.243}\text{N}_{0.013}\text{S}_{0.025}$ [16, 17]



รูปที่ 16 รูปถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของถ่านหิน (ภาคผนวก จ)

พารามิเตอร์	เครื่องมือ	ค่า	หน่วย
คาร์บอน : C	CHNS/O Analyzer	48.655	%wt.
ไฮโดรเจน : H	CHNS/O Analyzer	4.178	%wt.
ไนโตรเจน : N	CHNS/O Analyzer	1.508	%wt.
ออกซิเจน : O	CHNS/O Analyzer	31.519	%wt.
ซัลเฟอร์ : S	CHNS/O Analyzer	3.298	%wt.
ปริมาณความชื้น	ASTM D7582	13.17	%wt.
ปริมาณคาร์บอนเสถียร	ASTM D7583	33.07	%wt.
ปริมาณสารระเหย	ASTM D7584	42.00	%wt.
ปริมาณซัลเฟอร์	ASTM D7585	11.77	%wt.

สูตรทางเคมีของถ่านหิน ($\text{CH}_{0.512}\text{O}_{0.243}\text{N}_{0.013}\text{S}_{0.025}$) จะถูกนำมาใช้แทนในสมการการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังสมการที่ 11 เพื่อหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ หลังจากนั้นค่าปริมาณอากาศและสูตรทางเคมีของถ่านหินที่ได้ไปแทนในสมการปฏิกิริยาแก๊สซิฟิกเคชั่นดังสมการที่ 12 ซึ่งจะทำให้ทราบค่าปริมาณอากาศที่ถูกควบคุมที่ 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศที่เผาไหม้สมบูรณ์ โดยปริมาณอากาศที่ถูกควบคุมนั้นจะทำให้เกิดองค์ประกอบแก๊สที่เป็นผลลัพธ์จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Syngas)

สูตรทางเคมีอย่างง่ายของถ่านหิน

$$N_c = \frac{48.655}{12} = 4.054$$

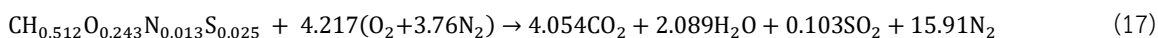
$$N_H = \frac{4.178}{2} = 2.089$$

$$N_o = \frac{31.519}{32} = 0.984$$

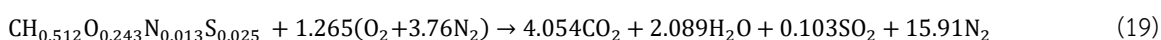
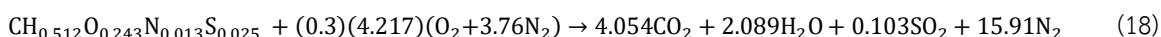
$$N_N = \frac{1.508}{28} = 0.053$$

$$N_s = \frac{3.298}{32} = 0.103$$

หลังจากหาสัดส่วนโมลจากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของถ่านหินจึงลดทอนด้วยอัตราส่วน 4.054 เพื่อให้ได้สูตรโมเลกุลอย่างง่ายของถ่านหินดังสมการ $\text{CH}_{0.512}\text{O}_{0.243}\text{N}_{0.013}\text{S}_{0.025}$ ปฏิกริยาการเผาไหม้สมบูรณ์



ปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชัน



หลังจากการดุลสมการเคมีจะสามารถหามวลอากาศที่ใช้จริงตามทฤษฎี $m_{\text{air stoichiometric}}$ จากสมการที่ 14 เมื่อแทนค่าจำนวนโมลอากาศ N_{air} และองค์ประกอบโดยโมลของอากาศ M_{air} จะได้ว่า มวลอากาศที่เป็นไปตามทฤษฎีคือ 582.139 กิโลกรัม

$$m_{\text{air stoichiometric}} = (NM)_{\text{air stoichiometric}} = (4.217 \times 4.76 \text{ kmol}) \left(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) = 582.139 \text{ kg} \quad (20)$$

เมื่อต้องการควบคุมปริมาณอากาศให้ลดลงเพื่อให้สอดคล้องกับปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชัน $m_{\text{air actual}}$ จะสามารถหามวลอากาศได้โดยการแทนโมลอากาศที่ผ่านการดุลสมการที่ปรับให้สอดคล้องกับปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชัน N_{air} และองค์ประกอบโดยโมลของอากาศ M_{air} จะได้ว่า มวลอากาศที่เป็นไปตามหลักการเกิดแก๊สซิฟิเคชันคือ 174.641 กิโลกรัม

$$m_{\text{air actual}} = (NM)_{\text{air actual}} = (1.265 \times 4.76 \text{ kmol}) \left(29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) = 174.641 \text{ kg} \quad (21)$$

การหามวลของเชื้อเพลิง m_{fuel} หาได้จากการนำโมลของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและองค์ประกอบโดยโมลของเชื้อเพลิง ได้แก่ คาร์บอน (Carbon) ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen) ธาตุออกซิเจน (Oxygen) ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen) และ ธาตุซัลเฟอร์ (Sulfur) มาแทนในสมการที่ 15 จะได้ว่า มวลของเชื้อเพลิงคือ 89.158 กิโลกรัม

$$\begin{aligned} m_{\text{fuel}} &= (NM)_c + (NM)_H + (NM)_O + (NM)_N + (NM)_S \quad (22) \\ &= (4.054 \times 12)_c + (2.089 \times 2)_H + (0.985 \times 2 \times 16)_O + (0.054 \times 2 \times 14)_N + (0.103 \times 32)_S \\ &= 89.158 \text{ kg} \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เป็นไปตามทฤษฎีการเผาไหม้สมบูรณ์ $A/F(\text{stoichiometric})$ นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 13 โดยการแทนค่า มวลอากาศที่ใช้จริงตามทฤษฎี $m(\text{air stoichiometric})$ และมวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ m_{fuel} หลังจากแทนค่าจะได้ผลลัพธ์คือ 6.529

หรือสามารถอธิบายว่า ในการใช้เชื้อเพลิง 6.529 กิโลกรัมต่อปริมาณอากาศที่จำเป็นต้องใช้ 1 กิโลกรัม เพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

$$A/F_{\text{stoichiometric}} = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} = \frac{582.139}{89.158} = 6.529 \quad (23)$$

การคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 30 เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนที่เป็นไปตามทฤษฎีการเผาไหม้สมบูรณ์ A/F_{actual} นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 24 โดยการแทนค่า มวลอากาศที่ใช้จริง $m_{\text{air actual}}$ และมวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ m_{fuel} หลังจากแทนค่าจะได้ผลลัพธ์คือ 1.958 หรือสามารถอธิบายว่า ในการใช้เชื้อเพลิง 1.958 กิโลกรัมต่อปริมาณอากาศที่จำเป็นต้องใช้ 1 กิโลกรัมเพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

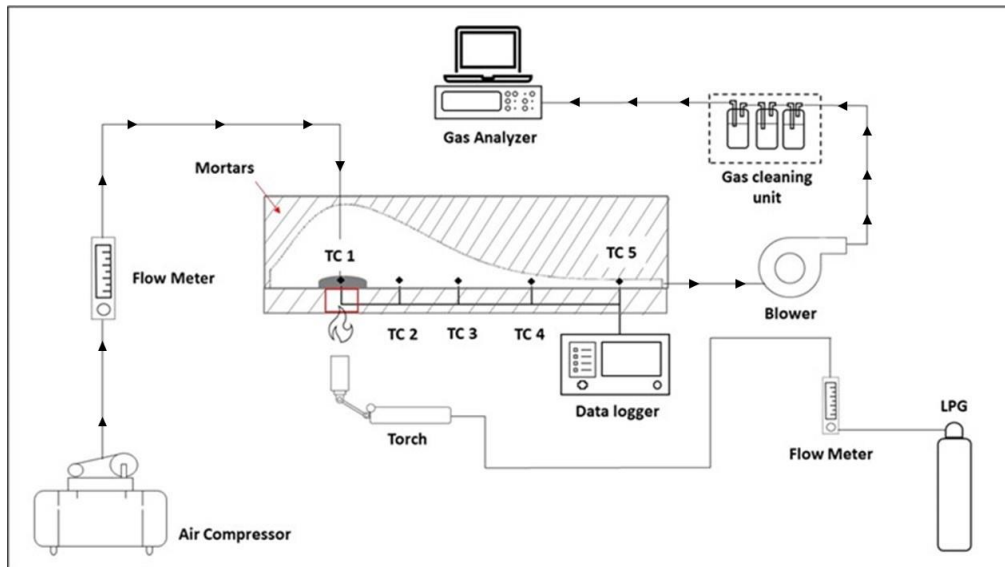
$$A/F_{\text{actual}} = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} = \frac{174.641}{89.158} = 1.958 \quad (24)$$

นำค่า A/F_{actual} และค่า $A/F_{\text{stoichiometric}}$ มาคำนวณหาอัตราส่วนสมมูล จากการแทนค่าในสมการที่ 16 จะอธิบายได้ว่า ปริมาณอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จริงนั้นมีค่าอยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี

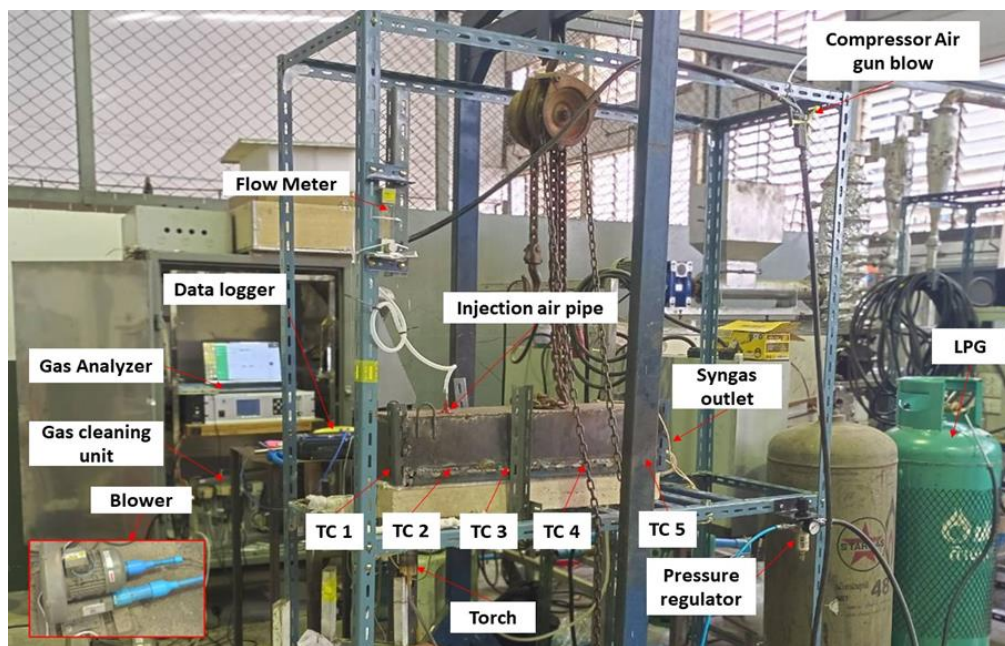
$$ER = \frac{A/F_{\text{actual}}}{A/F_{\text{stoichiometric}}} = \frac{1.958}{6.529} = 0.3 \quad (25)$$

2.6 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

ลักษณะของเตาปฏิกรณ์รูปทรงโพรงแก๊สซิฟิเคชันได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายรูปทรงครึ่งหยดน้ำ (Half tear drop) กว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 680 มิลลิเมตร และสูง 132 มิลลิเมตร [7] ส่วนภายนอกของเตาที่มาประกบกันซึ่งหล่อขึ้นรูปด้วยคอนกรีตทนไฟโดยมีขนาดความยาวที่ 800 มิลลิเมตรและมีความกว้างที่ 210 มิลลิเมตร และโมเดลจะมีความสูงที่ 190 มิลลิเมตร ท่อทางเข้าของตัวทำปฏิกิริยา (Injection hole) ได้ถูกเจาะบริเวณส่วนบนของโพรง สำหรับท่อทางออกของแก๊สผลิตภัณฑ์ (Production hole) ได้ถูกเจาะบริเวณด้านหน้าของโพรง บริเวณด้านข้างของโพรงได้มีการเจาะรูเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล type k จำนวน 5 จุดได้แก่ TC_1 , TC_2 , TC_3 , TC_4 , TC_5 ตำแหน่งแต่ละจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิจะห่างกันเป็นระยะ 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูป 17



รูปที่ 17 ไดอะแกรมของชุดทดลอง



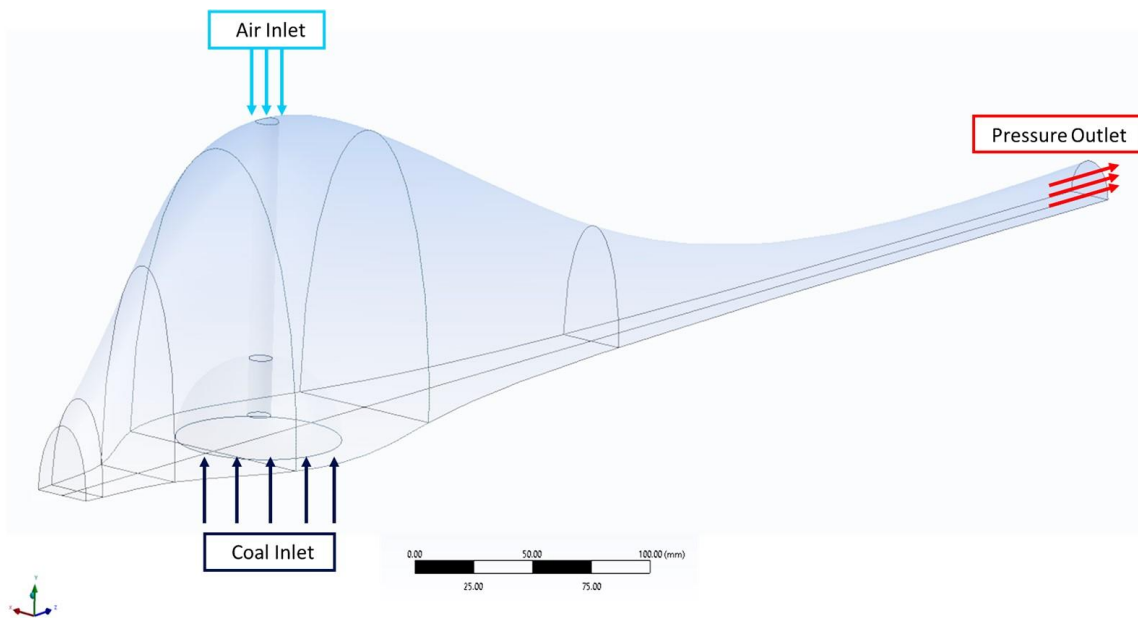
รูปที่ 18 ภาพชุดทดลอง

รูป 18 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 1. Blower ทำหน้าที่ช่วยดูดแก๊สผลิตภัณฑ์ออกมาจากโพรงแก๊สซีพิกเคชั่น 2. Gas cleaning unit ทำหน้าที่ทำความสะอาดแก๊สผลิตภัณฑ์เบื้องต้นก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องวัดแก๊ส 3. Gas Analyzer 3. Data logger .ใช้เพื่อการเก็บค่าของอุณหภูมิทั้ง 5 จุดภายในโพรง 4. Flow Meter ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศเข้าสู่โพรงเพื่อให้เป็นไปตามอัตราส่วนสมมูล 5. Torch

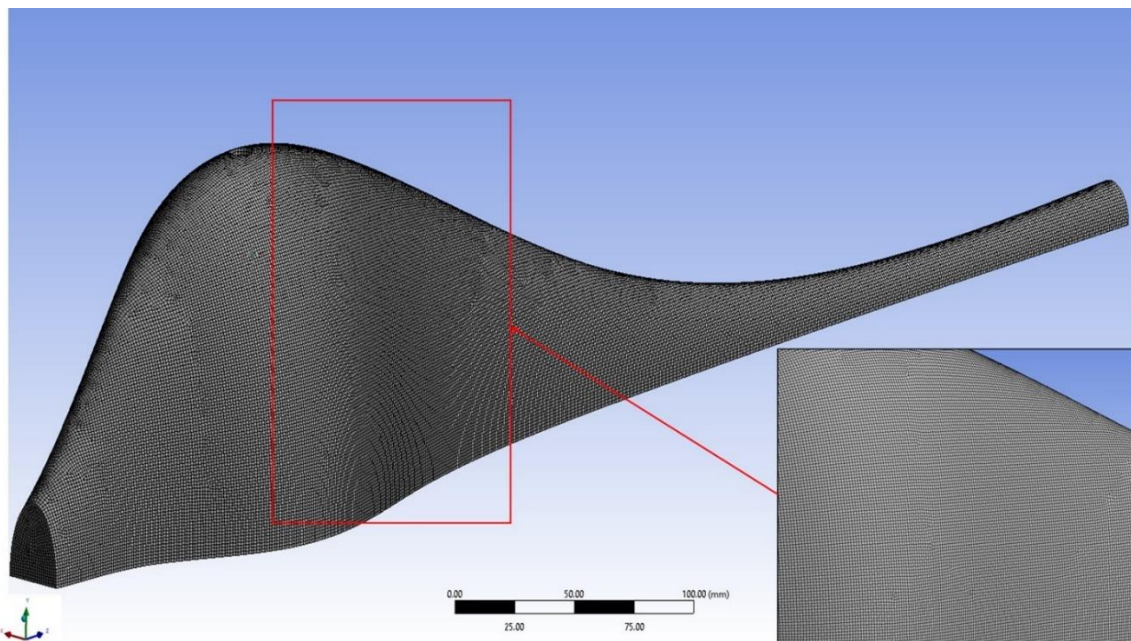
ทำหน้าที่เป็นแหล่งให้ความร้อนแก๊ส 6. Pressure regulator ทำหน้าที่ลดความดันของอากาศที่มาจาก Air compressor 7. Thermocouple Type K ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิในช่วงที่ต้องการไม่เกิน 1,400 องศาเซลเซียส 8. LPG Cylinder 9. Air Compressor ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายอากาศ

2.7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยซอฟต์แวร์ Ansys Fluent

ในการออกแบบโมเดลโพรงได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS DesignModeler ขนาดของโมเดลโพรง กว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 680 มิลลิเมตร และสูง 132 มิลลิเมตร โดยกำหนดชื่อ (Create Name selection) ให้ส่วนของทางเข้าอากาศคือ Air Inlet และทางออกของแก๊สผลิตภัณฑ์คือ Pressure Outlet สำหรับส่วนของถ่านหินได้กำหนดชื่อ Coal Inlet ดังแสดงในรูป 19 ส่วนขั้นตอนการกำหนดปริมาตรควบคุมได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Meshing โดยกำหนดขนาดของ Element sizing ให้มีขนาด 1.2 mm สำหรับการศึกษาระบบการเผาไหม้โดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) โดยเลือกใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 2019 R3 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k - \epsilon$ model ได้ถูกนำมาใช้ สำหรับความสัมพันธ์ทางเคมีแบบ Finite - Rate / Eddy - Dissipation ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับองค์ประกอบแบบแยกธาตุทางเคมี (Ultimate Analysis) และองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงถ่านหินโดยเลือกใช้ Coal Calculator รูปแบบของกลไกการเกิดแบบ Two - Step Reaction สำหรับรูปแบบในการคำนวณจะเลือกใช้วิธีแบบ Semi - Implicit Method for Pressure - Linked ที่ระดับ Second order upwind scheme โดยเลือกให้ค่าความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ของสมการโมเมนตัม (momentum equation) และสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) รวมทั้งสมการพลังงาน (energy equation) ให้มีค่าน้อยกว่า 1×10^{-4}



(ก)

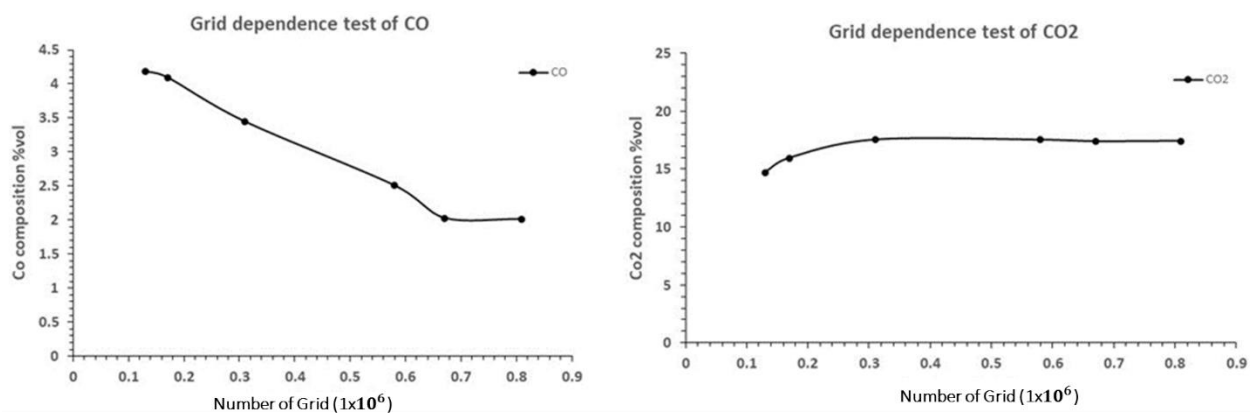


(ข)

รูปที่ 19 (ก) กำหนดรูปทรงทางเลขาคณิตและช่องทางการไหลของโพรงถ่านหิน (ข) การสร้างกริด

2.8 การทดสอบความละเอียดของจำนวนกริดคณิตศาสตร์ (Grid dependency test)

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับจำนวนของกริดระหว่างจำนวน 0.1×10^6 – 0.8×10^6 หน่วย ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 20 พบว่าจำนวน 0.67×10^6 หน่วย ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากจำนวนกริดเท่ากับ 0.8×10^6 หน่วย ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้จำนวนกริดที่ 0.67×10^6 คือ ใช้เวลาในการคำนวณไม่นานเมื่อเทียบกับกรณี 0.8×10^6 หน่วย และช่วยประหยัดการใช้ทรัพยากรของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์



รูปที่ 20 แสดงผลลัพธ์ขององค์ประกอบแก๊สที่ได้จากการเปรียบเทียบจำนวนกริด

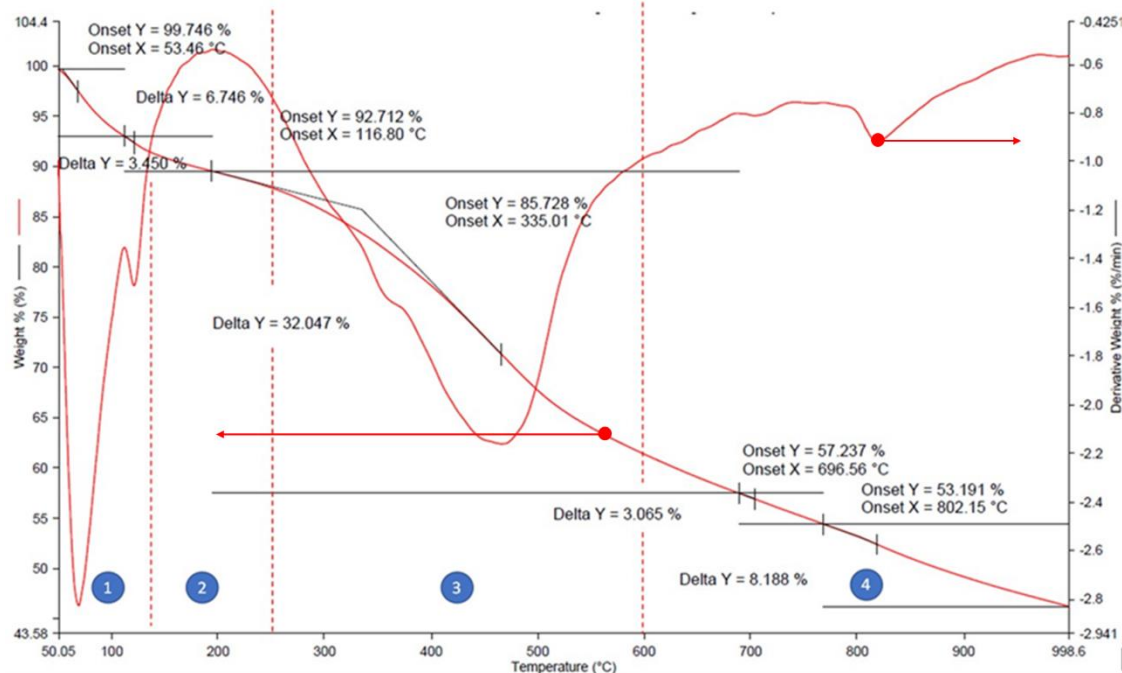
บทที่ 3

ผลการศึกษา

3.1 ผลการศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหินด้วยวิธีเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis : TGA)

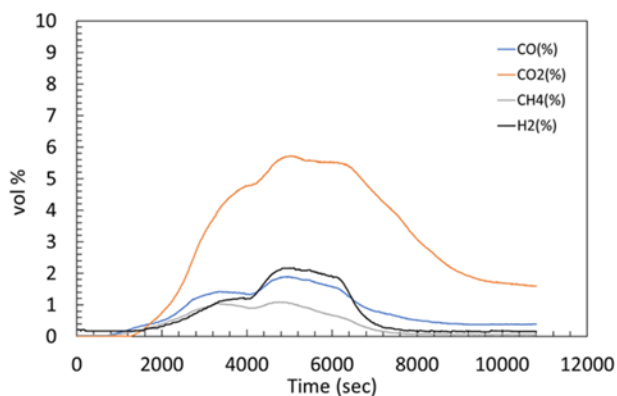
ในการศึกษาพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง TA Instruments รุ่น TGA 8000, Perkin Elmer, USA โดยการให้ความร้อนแบบคงที่ (Constant heating rate) ที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และ อัตราการไหลของไนโตรเจน (N₂) ที่ 40 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่ง รายงานผลการทดลองดังกล่าวได้ถูกรายงานใน ภาคผนวก ค.

จากผลการศึกษาพบว่า พฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของถ่านหินสามารถแบ่งออกเป็น 4 โซน ดังแสดงในรูป 21 โซนที่ 1 ถ่านหินเริ่มมีการสูญเสียความชื้นออกมาร้อยละ 7.5 ของน้ำหนัก ต่อจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นส่งผลให้พฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินเข้าสู่ โซนที่ 2 พบว่า ถ่านหินยังคงมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องในอัตราที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ช่วงโซนที่ 3 พบว่าเริ่มเกิดการสลายตัวอย่างรุนแรงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 °C ถึง 600 °C และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ร้อยละ 25 ของน้ำหนัก

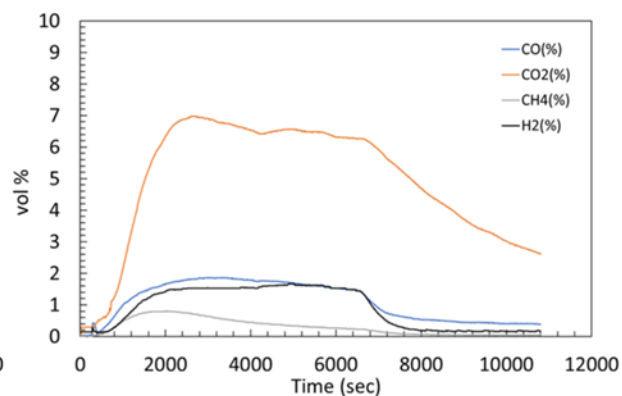


รูปที่ 21 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน (TGA & DTG) ของถ่านหิน

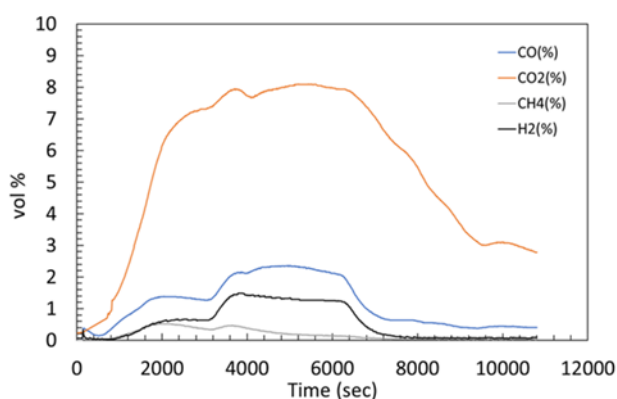
จากการศึกษาสรุปได้ว่าผลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนแสดงให้เห็นว่า ถ่านหินนั้นจะเกิดการสลายตัวของแร่ธาตุเมื่ออุณหภูมิสูงประมาณ 300 ถึง 900 องศาเซลเซียสแต่ในช่วงที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาจะมีค่าการสลายตัวสูงมากอย่างมีนัยสำคัญเพราะ ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดการสลายตัวได้ยากกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ โดยค่าความร้อน (LHV) และปริมาณคาร์บอน (C) ที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลรวมถึงปริมาณความชื้น (Moisture) ที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งจากการศึกษานี้ทำให้ทราบถึงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่กระบวนการออกแบบเตาไพโรไลซิสสำหรับถ่านหินและยังช่วยหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินได้ ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำไพโรไลซิสและการทำแก๊สซิฟิเคชันจะอยู่ในช่วง 300 – 900 องศาเซลเซียส



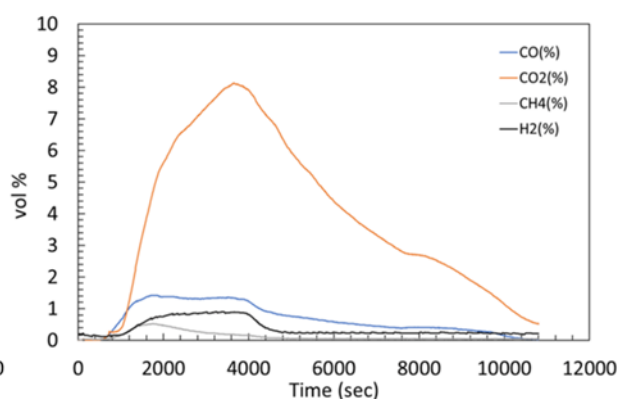
(ก) ER 0.1



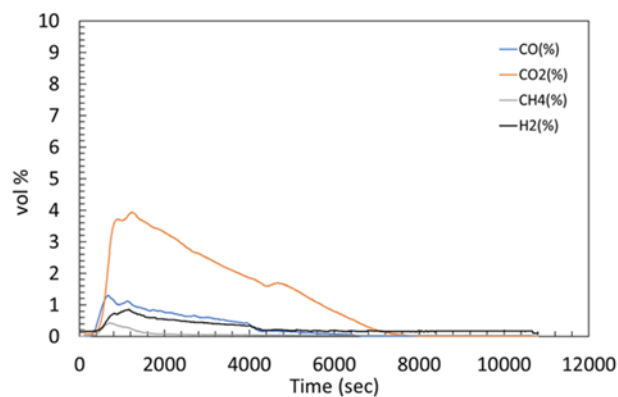
(ข) ER 0.2



(ค) ER 0.3



(ง) ER 0.5



(จ) ER 0.7

รูปที่ 22 (ก), (ข), (ค), (ง), (จ) ผลการทดลองผลิต Syngas แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบแก๊สเทียบกับเวลาที่อัตราส่วนสมมูล ER = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7 ตามลำดับ.

3.2 ผลการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินด้วยแบบจำลองเตาปฏิกรณ์รูปทรงโพรงถ่านหินใต้ดิน

ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินภายในโพรงคอนกรีตทนไฟซึ่งได้จำลองมาจากพฤติกรรมของการขยายตัวของโพรงถ่านหินใต้ดิน ขนาด $210 \times 85 \times 55$ มิลลิเมตร โดยมีท่อทางเข้าของอากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับถ่านหินที่เตรียมไว้ภายในโพรง และท่อทางออกของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สมีเทน (CH₄) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) ในส่วนของการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยใช้เวลา 1 ชั่วโมงในแต่ละช่วงของกระบวนการ โดยช่วงที่ 1 (ช่วง 0 – 3600 วินาที) คือช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ ในช่วงนี้จะมีการป้อนอากาศเข้าสู่ภายในโพรงโดยอัตราการไหลของอากาศ (Mass flow rate) ได้ถูกตั้งให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการทดลองพร้อมทั้งให้ความร้อนจากภายนอกแก่ผนังถ่านหินที่ได้วางไว้บนแผ่นเหล็กที่ถูกหล่อติดไว้บริเวณฐานของโพรงซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำความร้อนไปสู่ถ่านหินเพื่อให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ภายในโพรง ซึ่งอุณหภูมิในขั้นตอนนี้จะสูงถึง 800 องศาเซลเซียส เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2 (ช่วง 3600 – 7200 วินาที) ของกระบวนการจะทำการหยุดให้ความร้อนจากภายนอกแต่ยังคงจ่ายอากาศเข้าไปเพื่อปล่อยให้กระบวนการดำเนินต่อด้วยตัวเอง เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 3 (7200 – 10800 วินาที) ของกระบวนการจะทำการหยุดจ่ายอากาศเพื่อต้องการให้ระบบค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงและเป็นการจบกระบวนการ ซึ่งรายงานผลการทดลองดังกล่าวได้ถูกรายงานใน ภาคผนวก ก.

จากการศึกษาในเงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.1 ในช่วงที่ 1 (ช่วง 0 – 3600 วินาที) ของกระบวนการคือช่วงที่มีการให้ความร้อนและจ่ายอากาศเข้าสู่ภายในโพรงเพื่อให้เกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันพบว่าองค์ประกอบของแก๊สทุกชนิดประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สมีเทน (CH₄) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มีการเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่ 1200 วินาทีของกระบวนการ โดยเฉพาะแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นสูงกว่าแนวโน้มขององค์ประกอบแก๊สอื่นๆ ที่เวลา 2500 วินาทีของกระบวนการ แนวโน้มการเกิดขึ้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแนวโน้มการเกิดขึ้นของแก๊สมีเทน (CH₄) มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ลดลง และกลับมากครั้งที่อีกครั้งในช่วง 3000 – 3600 วินาทีของกระบวนการ ส่วนแนวโน้มการเกิดองค์ประกอบแก๊สมีเทนยังคงเป็นการเพิ่มขึ้นแบบคงที่และต่อเนื่อง ในช่วงที่ 2 (ช่วง 3600 – 7200 วินาที) ของกระบวนการเป็นช่วงที่หยุดให้ความร้อนจากภายนอกแก่ระบบ พบว่าหลังจากการเพิ่มขึ้นแบบเฉียบพลันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เวลา 4800 วินาทีของกระบวนการ พบว่าองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงสุดคือ 5.72 vol% ในเวลาเดียวแนวโน้มการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบแก๊สชนิดอื่นๆ ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H₂) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สมีเทน กลับพบว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นแบบคงที่ และค่าสูงสุดของ แก๊สไฮโดรเจน (H₂) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊ส

มีเทน คือ 2.17, 1.89 และ 1.09 vol% ตามลำดับ ที่เวลา 6400 วินาทีของกระบวนการพบว่าแนวโน้มของแนวโน้มการเกิดขึ้นขององค์ประกอบแก๊สทุกชนิดมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนจบกระบวนการ ดังแสดงในรูป.22(ก)

ในเงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.2 พบว่าองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มีแนวโน้มที่คงที่และมีความผันผวนน้อย โดยค่าสูงสุดขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนที่พบคือ 6.97 และ 1.67 vol% ตามลำดับ องค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH₄) มีการเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 600 – 1200 วินาทีแรกหลังจากนั้นก็มีความผันผวนที่ลดลงทันที ค่าสูงสุดที่พบคือ 0.8 vol% ในขณะที่องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในช่วงเวลา 600 – 2400 วินาที และมีค่าสูงสุดขององค์ประกอบคือ 6.97 vol% เมื่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเข้าสู่ช่วงที่ 3 ของกระบวนการซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบพบว่าแนวโน้มขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และองค์ประกอบของแก๊สมีเทนลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูป.22(ข)

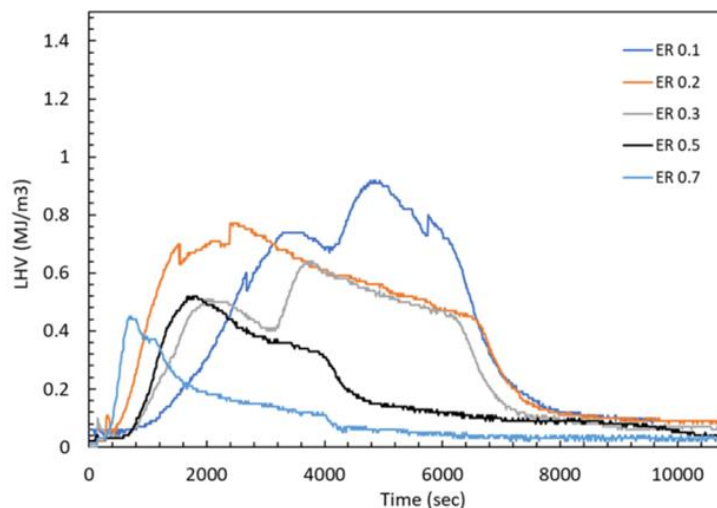
ในเงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.3 พบว่าองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน (H₂) นั้นมีลักษณะแนวโน้มคล้ายกันคือในช่วงแรกของกระบวนการ (0-3600 วินาที) ซึ่งเป็นช่วงที่มีการให้ความร้อนพร้อมกับการจ่ายอากาศเข้าไปสู่ระบบโดยช่วงวินาทีที่ 600 - 1800 องค์ประกอบของแก๊สทั้งสองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหลังจากนั้นก็กลับมามีแนวโน้มที่คงที่และกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงวินาทีที่ 3000 – 3600 ดังแสดงในรูป 22(ค) ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่จะหยุดให้ความร้อนแก่ระบบ ในขณะที่องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ยังคงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการและองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH₄) มีการผันผวนเล็กน้อยซึ่งค่าสูงสุดที่ได้คือ 0.52 vol% ในช่วงที่ 2 ของกระบวนการ (3600 - 7200 วินาที) องค์ประกอบแก๊สทุกชนิดมีแนวโน้มที่เสถียร เมื่อหยุดจ่ายอากาศเข้าสู่โพร่งแก๊สซิฟิเคชันพบว่าองค์ประกอบของแก๊สมีเทนมีอัตราการลดลงเพียงเล็กน้อย ขณะที่องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน (H₂) กลับมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างทันที

ในเงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.5 พบว่าองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีค่าสูงสุดคือ 8.13 vol% ที่เวลา 3600 วินาที ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการให้ความร้อน ทันทีที่หยุดให้จากภายนอกและปล่อยให้กระบวนการดำเนินต่อด้วยตนเองกลับพบว่าแนวโน้มขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 22(ง) ในขณะที่องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มีแนวโน้มที่คงที่ในช่วงที่มีการให้ความร้อนแก่ระบบและค่าสูงสุดที่พบคือ 1.42 และ 0.9 vol% ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อหยุดให้ความร้อนแก่ระบบเพื่อให้ระบบดำเนินต่อไปด้วยตนเองกลับพบว่าองค์ประกอบของแก๊สทั้ง

สองกลับลดลงอย่างทันทีเช่นกัน องค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในช่วง 600 - 1800 วินาทีของกระบวนการให้ความร้อนซึ่งค่าสูงสุดที่พบคือ 0.52 vol% เมื่อกระบวนการดำเนินเข้าสู่ระยะที่ 2 และระยะที่ 3 ตามลำดับกลับพบว่าแนวโน้มของแก๊สมีเทนไม่มีความผันผวนและยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนจบกระบวนการ

ในเรื่องนี้ขอการศึกษาที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.7 พบว่าแนวโน้มการเกิดขึ้นของแก๊สผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั้งหมดจะเกิดในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ ซึ่งเป็นช่วง 1 ชั่วโมงแรกที่มีการให้ความร้อนแก่ระบบโดยองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากภายในเวลา 1200 วินาทีของกระบวนการ และพบค่าองค์ประกอบสูงสุดคือ 3.94 vol% ในขณะที่องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) นั้นเพิ่มขึ้นแบบเฉียบพลันและลดลงทันทีที่เวลา 600 วินาที ทำให้ได้ค่าสูงสุดคือ 1.31 และ 0.43 vol% ตามลำดับในส่วนขององค์ประกอบแก๊สไฮโดรเจน (H_2) นั้นมีค่าสูงที่สุดคือ 0.85 vol% ที่เวลา 1200 วินาที เมื่อกระบวนการได้เข้าสู่ช่วงที่ 2 (3600 - 7200 วินาที) จะหยุดให้ความร้อนจากภายนอกแต่ยังคงให้อากาศเพื่อเข้าไปให้กระบวนการยังคงดำเนินต่อไปได้ด้วยตนเอง พบว่าแนวโน้มของแก๊สผลิตภัณฑ์ทุกชนิดนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง ดังแสดงในรูป 22 (จ)

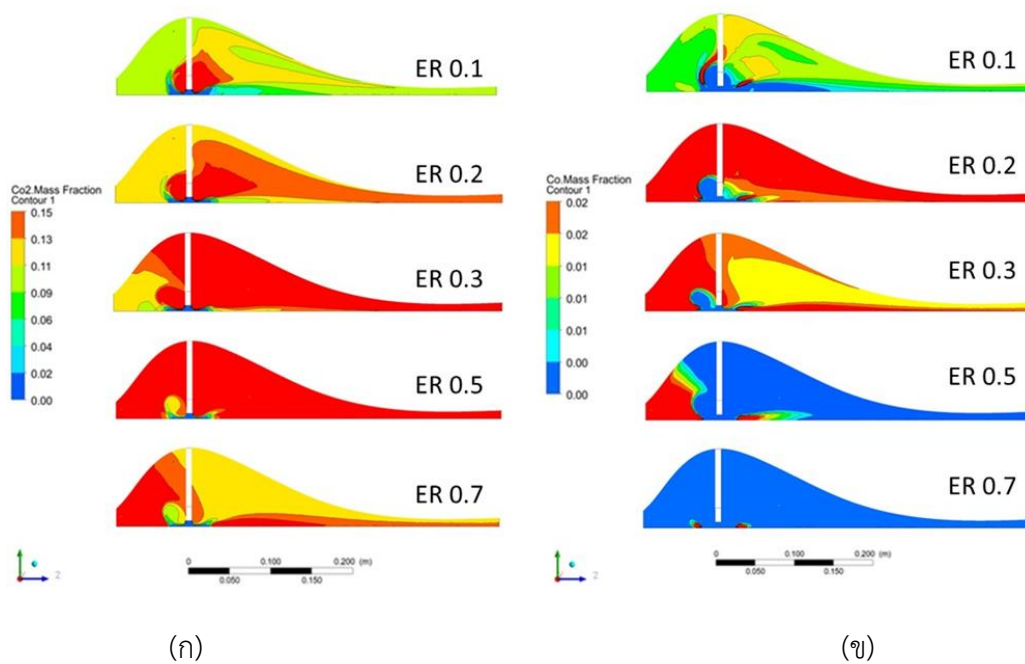
จากการศึกษาสรุปได้ว่าองค์ประกอบหลักที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้คือ องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งพบในปริมาณที่มากกว่าองค์ประกอบแก๊สชนิดอื่นๆ ในทุกอัตราส่วนสมมูลเนื่องจากเชื้อเพลิงถ่านหินนั้นมีธาตุคาร์บอน (C) ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และปริมาณของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) นั้นมีแนวโน้มการขึ้นที่คล้ายคลึงกัน การเกิดขึ้นขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) นั้นเนื่องมาจากการควบคุมปริมาณอากาศให้มีสัดส่วนที่น้อยกว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงตามทฤษฎีส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นและรวมกับความชื้น ที่มีอยู่มากในเชื้อเพลิงถ่านหินจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาอายุดูยาร์ด เกิดขึ้นและผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยานี้คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในขณะเดียวกันองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เพิ่มขึ้นด้วยปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำให้กลายเป็นแก๊ส จากการศึกษาข้างต้นพบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.1 จะเหมาะสมที่สุดแก่การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหิน เนื่องจากองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน เป็นองค์ประกอบที่สามารถติดไฟได้ซึ่งในอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.1 จะพบองค์ประกอบเหล่านี้สูงกว่าที่อัตราส่วนสมมูลอื่นๆ นอกจากนั้นพบว่าค่าความร้อนที่ได้มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนสมมูลอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่



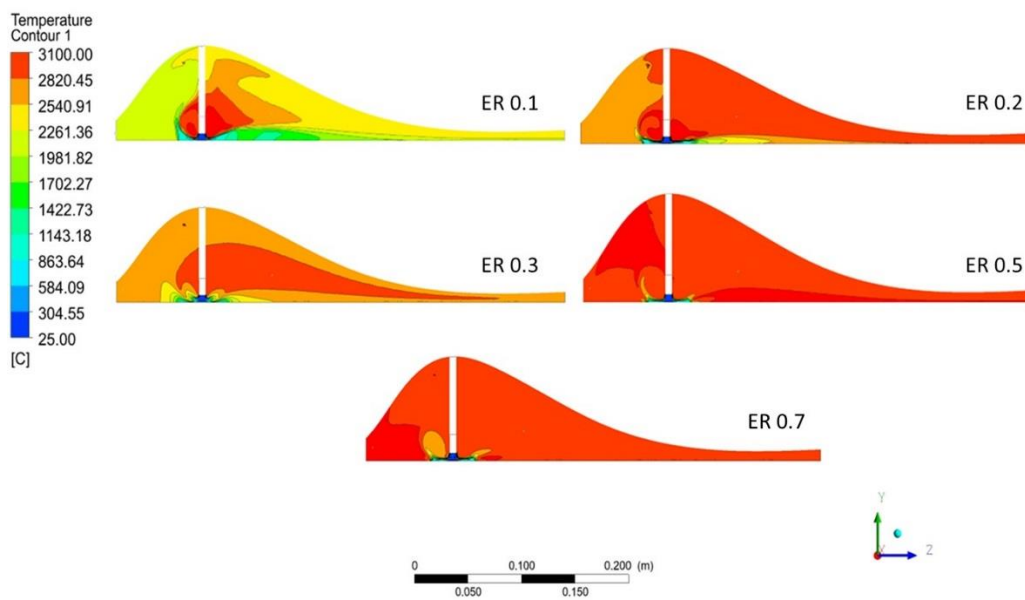
รูปที่ 23 กราฟแสดงค่าความร้อนเทียบกับเวลาที่แต่ละอัตราส่วนสมมูล

3.3 ผลของการศึกษาพฤติกรรมเกิดการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันและการกระจายตัวของอนุหุมิ โดยใช้ CFD

ในการศึกษานี้จะใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้โมเดลเตาปฏิกรณ์รูปทรงครึ่งหอยดน้ำ 3 มิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent Ver.2019 R3 รูปทรงของโมเดลมีขนาด ขนาด 210 x 85 x 55 มิลลิเมตร รูปที่ รูปที่ 24 (ก) แสดง Contour CO₂ (ข) แสดง Contour CO จากการศึกษพบว่า ความเข้มข้นขององค์ประกอบแก๊ส CO₂ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ อัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นจาก 0.1 – 0.7 ในขณะที่ความเข้มข้นขององค์ประกอบแก๊ส CO มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนสมมูลอยู่ในช่วง 0.1 – 0.3 แต่เมื่ออัตราส่วนสมมูลที่ 0.5 – 0.7 พบว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบแก๊ส CO กลับมีแนวโน้มที่ลดลง รูปที่ 25 คอนทัวร์แสดงการกระจายตัวของอนุหุมิที่เกิดขึ้นภายในโมเดลโพรง แสดงให้ทราบว่า เมื่อ อัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แนวโน้มความเข้มของอนุหุมิภายในโพรงเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



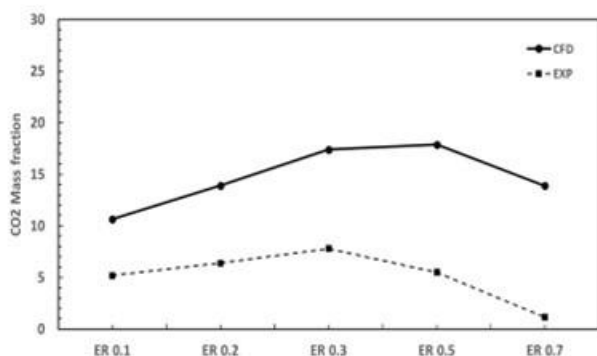
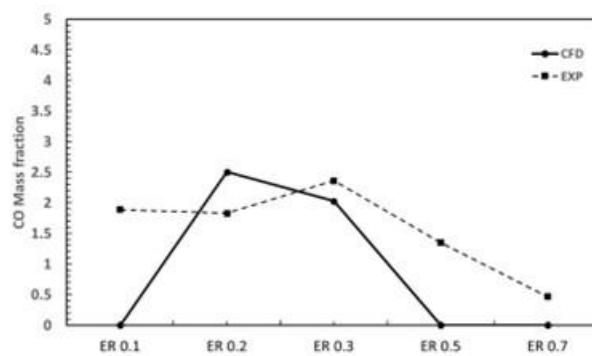
รูปที่ 24 (ก) แสดง Contour CO_2 (ข) แสดง Contour CO



รูปที่ 25 แสดง Contour ของอุณหภูมิ

3.4 การเปรียบเทียบผลขององค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS

รูปที่ 26(ก) และ (ข) แสดงแนวโน้มขององค์ประกอบแก๊ส CO และ CO₂ ที่มาจากการทดลอง และที่ได้มาจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS จากการศึกษาขั้นต้นพบว่า แนวโน้ม CO และ CO₂ ที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์นั้นมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยองค์ประกอบของ CO จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.2 - 0.3 และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่องค์ประกอบของ CO₂ จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วนสมมูลระหว่าง 0.3 - 0.5 และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

(ก) CO₂

(ข) CO

รูปที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบแก๊สระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Experiment) และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ (CFD) โดย (ก) องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

บทที่ 4

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

จากการศึกษาปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินโดยใช้เชื้อเพลิงถ่านหินที่พบในประเทศไทย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถใช้ TGA & DTG มาช่วยหาช่วงการสลายตัวทางความร้อนที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อใช้ในการออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชันให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงนั้นๆ จากผลการศึกษาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การสลายตัวทางความร้อนของถ่านหินคือช่วงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ถึงช่วงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

2. จากผลการวิเคราะห์โดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลพบว่าพื้นที่การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโพรงเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น และพื้นที่ของความเข้มข้นของ CO และ CO₂ จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนสมมูลลดลง

3. จากผลการทดสอบที่อัตราส่วนสมมูลในช่วง $0.1 < ER < 0.7$ พบว่าที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.1 มีองค์ประกอบแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนสมมูลอื่นๆ

4. จากผลการทดสอบพบว่าค่าความร้อนจะลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนสมมูลที่มีค่าเท่ากับ 0.1 จะให้ค่าสูงที่สุด

4.2 ข้อเสนอแนะ

เตาปฏิกรณ์รูปทรงโพรงคล้ายหยดน้ำที่ถูกสร้างเพื่อจำลองลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินซึ่งใช้ในการทดสอบและศึกษาพฤติกรรมและการเผาไหม้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปูนทนไฟมาหล่อขึ้นรูปเป็นสองส่วนประกบกันนั้นเมื่อเริ่มทดสอบการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันพบว่าการรั่วไหลของแก๊สผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นปริมาณมากทำให้ค่าองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่วัดค่าได้จากเครื่องวัดแก๊สพบว่ามีปริมาณที่ต่ำกว่าความเป็นจริงนอกจากนั้นการที่เตาปฏิกรณ์มีช่องว่างจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนจากภายในเตาสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไม่เป็นไปตาม ทฤษฎีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของถ่านหินก็เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญในการศึกษาการจำลองการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการนำถ่านหินที่มีลักษณะเป็นก้อนไปบดละเอียดและนำมาทดสอบการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินซึ่งการบดละเอียดจะมี

ประโยชน์ก็ต่อเมื่อต้องการนำถ่านหินนั้นไปใช้ในกระบวนการเผาไหม้โดยตรงซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีกว่าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่และการนำถ่านหินมาบดละเอียดนั้นจะส่งผลให้มีการทำลายโครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของถ่านหิน ดังนั้นข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงสำหรับงานวิจัยในอนาคตคือควรออกแบบเตาปฏิกรณ์ให้ลักษณะเป็นภาชนะปิด โดยจากการทบทวนเอกสารพบว่าการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินนั้นมีความคล้ายคลึงกับการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์ชนิดเบดซ์คงที่ (Fixed bed)

บรรณานุกรมหรือเอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. (2022), เชื้อเพลิงเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า, [online].URL:<https://www.egat.co.th/home/fuel/>, available accessed on 05/09/2022
- [2] คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภานิติบัญญัติแห่งชาติ. (2019), ทิศทางการใช้พลังงานฟอสซิลของไทยในอนาคต กรณีถ่านหิน, [online].
URL:https://www.senate.go.th/document/Ext20562/20562367_0005.PDF, available accessed on 05/09/2022
- [3] กรมทรัพยากรธรณี (2000). การพัฒนาการใช้เทคโนโลยีที่สะอาดกับถ่านหินในประเทศไทย, [online]. URL: <http://library.dmr.go.th/>, available accessed on 23/09/2022
- [4] Berkowitz, N. (1979). An introduction to coal technology, ACADEMIC PRESS Inc, Page 325-332.
- [5] เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil Fuel). (2022), ถ่านหิน, [Online].URL: <https://sites.google.com/a/wpk.ac.th/hydrocarbons/thanhin>, available accessed on 03/10/2022
- [6] miningweekly,2016. [online]. Available: https://www.miningweekly.com/article/monetising-of-south-africas-economically-unmineable-coal-highlighted-2016-10-21/rep_id:3650, available accessed on 06/10/2022
- [7] A. K. Biswas, W. Sukswan, K. Phoungthong, and M. Wae-hayee, “Effect Of Equivalent Ratio (ER) On the Flow and Combustion Characteristics in A Typical Underground Coal Gasification (UCG) Cavity,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 86, no. 2, pp. 28–38, Aug. 2021, doi: 10.37934/arfmts.86.2.2838.
- [8] L. Xin *et al.*, “Simulation of cavity extension formation in the early ignition stage based on a coal block gasification experiment,” *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 142, no. 6, p. 062304, 2020.

- [9] R. Mandal, T. Maity, S. K. Chaulya, and G. M. Prasad, "Laboratory investigation on underground coal gasification technique with real-time analysis," *Fuel*, vol. 275, p. 117865, 2020.
- [10] S. Kashyap and P. Vairakannu, "Movable injection point-based syngas production in the context of underground coal gasification," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no. 5, pp. 3574–3586, 2020.
- [11] S. Daggupati *et al.*, "Compartment modeling for flow characterization of underground coal gasification cavity," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 1, pp. 277–290, 2011.
- [12] G. Samdani, P. Aghalayam, A. Ganesh, R. K. Sapru, B. L. Lohar, and S. Mahajani, "A process model for underground coal gasification–Part-I: Cavity growth," *Fuel*, vol. 181, pp. 690–703, 2016.
- [13] ฐานิตย์ เมธิยานนท์. (2559). *ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล (พิมพ์ครั้งที่ 2)*. กรุงเทพฯ : มินเซอร์วิศซัพพลาย
- [14] J. Parikh, S. A. Channiwala, and G. K. Ghosal, "A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials," *Fuel*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1710–1719, 2007.
- [15] L. Mu, R. Wang, Z. Zhai, B. Zhang, Y. Shang, and H. Yin, "Evaluation of thermokinetics methodology, parameters, and coke characterization of co-pyrolysis of bituminous coal with herbaceous and agricultural biomass," *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 1–16, 2021.
- [16] วสุ สุขสุวรรณ. (2561). *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต การศึกษาเตาฟลูอิดได้ซ์เบด แก๊สซิไฟเออร์แบบหมุนควงสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลแบบผง*, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [17] ชัชชัย ชั่งคะจิตร. (2559). *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต การออกแบบและศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเตาเผาแบบแก๊สซิไฟเคชันที่ใช้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากพลาสติกผสมทางปาล์ม*, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

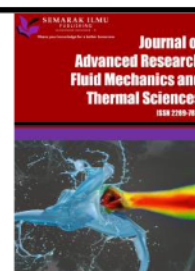
ภาคผนวก ก.

(Wattanasrirote, Whacharapat, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Maizirwan Mel, and Makatar Wae-hayee. "Experimental and Numerical Investigations of Underground Coal Gasification (UCG) Using Half-teardrop Shape Cavity." Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 101, no. 2 (2022): 172-183, **indexed by Scopus.**)



Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences

Journal homepage:
https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/index
ISSN: 2289-7879



Experimental and Numerical Investigations of Underground Coal Gasification (UCG) Using Half-teardrop Shape Cavity

Whacharapat Wattanasrirote^{1,2}, Mohd Faizal Mohideen Batcha³, Arkom Palamanit⁴, Maizirwan Mel⁵, Makatar Wae-hayee^{1,2,*}

¹ Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

² Energy Technology Research Center, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

³ Center for Energy and Industrial Environment Studies, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 86400 Parit Raja, Johor, Malaysia

⁴ Energy Technology Program, Department of Specialized Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

⁵ Department of Chemical Engineering and Sustainability, Kulliyah of Engineering, IIUM, Gombak 53100 Kuala Lumpur, Malaysia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 June 2022

Received in revised form 14 November 2022

Accepted 28 November 2022

Available online 17 December 2022

Keywords:

Underground coal gasification (UCG); coal; syngas; gas compositions

ABSTRACT

In this work, the process of Underground Coal Gasification (UCG) was studied experimentally and numerically. The typical cavity of UCG was a half-teardrop shape. The coal samples were collected from Mae Moh coal mine, Thailand. The coal type is mainly lignite. To generate the gasification process, the coal sample was heated in the half-teardrop cavity by injecting partial oxidant, which is air, according to the Equivalent Ratio (ER) of 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, and 0.7. The properties of the product gas were measured using a syngas analyser. CFD technique, ANSYS (Fluent), was used to simulate flow characteristics and gasification process in the cavity. The experimental results show that the low heating value (LHV) of syngas peaks at 0.92 MJ/m³ when ER = 0.1, and LHV decreases monotonically as ER increases. The CFD results show that the area of high temperature in the UCG cavity is larger when the ER was greater.

1. Introduction

The demand for electricity generation is rapidly increasing in order to empower nations all over the world using coal as energy source [1]. The reasons are: coal generates the most stable electricity [2] and is the cheapest when compared to other energy sources [3]; coal is abundant and relatively simple in mining, transportation, and processing when compared to natural gas and oil; coal resource base is well-understood as a fuel of necessity, encompassing "energy security" in many less developed economies [4]; availability of technology and skilled labour-force; existing massive infrastructural infrastructure [5].

Nevertheless, there is a worldwide competition to decrease coal consumption for generating electricity, as conventional coal-fired power plants transmit higher levels of greenhouse gases (GHGs)

* Corresponding author.

E-mail address: wmakatar@eng.psu.ac.th

<https://doi.org/10.37934/arfmts.101.2.172183>

such as carbon dioxide (CO₂) and pollutants such as sulfur dioxide (SO₂), nitrous oxide (NO_x), and particulates. However, according to the World Coal Association (WCA), coal remains the world's largest source of electricity, with a projected 22 percent share of global electricity in 2040. For developing countries, the figure is even higher; for example, coal will generate 39 percent of power generation in South East Asia at that time [3]. As a result, switching coal into a less polluting or cleaner fuel could be the only viable solution.

Another method of clean coal technology is underground coal gasification (UCG), which is carried out in situ in coal seams by burning the coal under controlled conditions. A traditional underground coal gasification plant is made up of two wells dug from the ground to coal seams. Several chemical reaction processes occur when underground coal gasification is converted into gaseous products. The combustion zone is located near the injection well, and the temperature ranges between 1,000 and 1,300 °C. The gasification zone overlaps in the same zone, and the temperature ranges between 800-1,300 °C. The drying zone occurred around the dry coal seam, and the temperature ranged between 100 and 200 °C [4].

A complex physicochemical process is carried out by an underground coal gasifier. Combustion (partial oxidation), reducing reactions leading to gasification, and pyrolysis-drying (destructive distillation) occur concurrently in a coal cavity as shown in Figure.1. Dewatering, cracking, absorption, and contraction of coal with high water content are the main physical changes. [7-9]. Drilling injection and production wells from the surface to the target coal seam are required. To facilitate a syngas flow path within the coal seam, a permeable channel is created between those wells [3] (Figure 1).

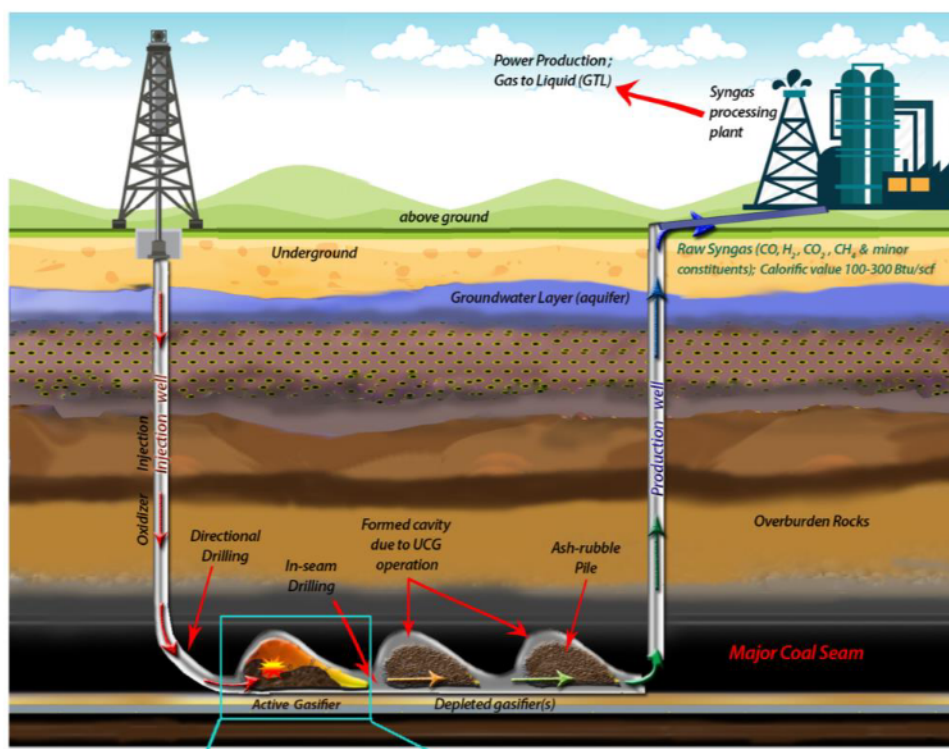


Fig. 1. Typical Underground Coal Gasification (UCG) [6]

Several research works have been conducted to investigate the effect of equivalence ratio (ER) on gasification performance. Most of those tests were carried out in conventional surface gasifiers. Fixed-bed, fluidized beds, and entrained flow gasifiers are three classical types of surface gasifiers [10].

Biswas *et al.*, [6] simulated flow and gasification characteristics in UCG cavity applying half-teardrop shape. The results show that streamlines of hot gas flow out from rubble zone circulating in the cavity and vent at the outlet. Daggupati *et al.*, [11] used compartment modelling to characterize the flow of a UCG cavity, which grows three-dimensionally in a nonlinear manner as gasification progresses. They discovered that the flow field primarily determines the cavity shape, which is a function of various parameters (e.g., inlet position and orientation), temperature distribution, and coal properties (e.g., thermal conductivity). The flow at Thulin UCG experiments was modelled by Debelle, *et al.*, [12]. The hydrodynamics of the flow profile inside the underground reactor was calculated, and the results showed that the flow conditions inside the underground reactor changed little during the series of reverse combustion tests.

Previous gasification works studying on equivalence ratio (ER) mostly relates to surface gasification. The subsurface gasification (i.e., UCG), however, is rare. Varying equivalence ratio (ER) would influence on combustion zone in the UCG cavity which needs to be understood. In this work, equivalence ratio (ER) effect on gasification characteristics in a UCG cavity was studied experimentally and numerically.

2. Experiment

2.1 Materials

The coal used for the experiment was taken from Mae Moh coal mine, Thailand. The type of the coal is mainly lignite. The specific data for the elemental compositions and proximate analysis are analysed using a thermogravimetric analyser (TGA8000, Perkin Elmer, USA). The coal properties are shown in Table 1.

Before experimenting, the coal was coarsely crushed by a jaw crusher. The size of the crushed coal is about 5–10 cm. Then, the coals were grinded with a fine crusher, which would reduce the coal size to be 0.5-3.0 cm. The coal powders were sieved using fine filter. The coal powders were in the range of 0.5-0.6 mm. This coal powder would be used as sample in the experimental study.

Table 1

Proximate and ultimate analysis of coal used in the present study

Proximate analysis	% wt.
Moisture (As received basis)	13.17
Fixed carbon (As received basis)	33.07
Volatile (As received basis)	42.00
Ash (As received basis)	11.77
Ultimate analysis	% wt.
Carbon (C) (As received basis)	48.65
Hydrogen (H) (As received basis)	4.17
Oxygen (O) (As received basis)	31.51
Nitrogen (N) (As received basis)	1.50
Sulfur (S) (As received basis)	3.29
Low Heating Value (L.H.V) (kcal/kg) (As received basis)	3939.72

2.2 Experimental Apparatus

The UCG cavity model is shown in Figure 2, and the experimental apparatus is shown in Figure 3 and 4. The apparatus consisted of a UCG cavity block having 200 mm in width 170 mm in high and 700 mm in length, an air supplier system for injecting gasification agent, a LPG torch for heating coal

sample and a gas analyzer unit for analyzing syngas properties. The UCG cavity block was made of refractory concrete which was separated in two parts. The upper part is for creating UCG cavity, and the lower part is for the cavity base. To create the upper part, a form was cut to be haft tear drop shape and was sucked in molten refractory concrete. After the refractory concrete drying to be solid, the form was removed remaining the cavity having haft tear drop shape.

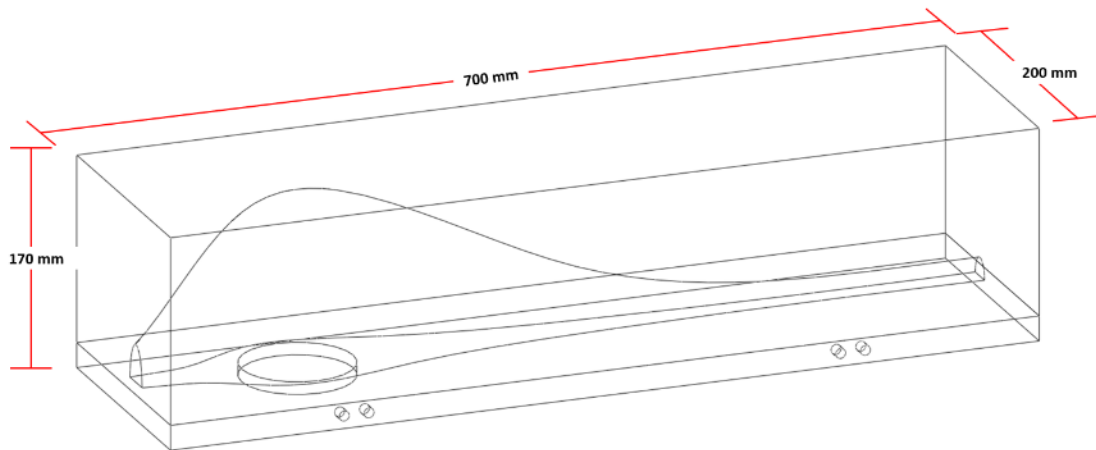


Fig. 2. Dimension of a UCG cavity

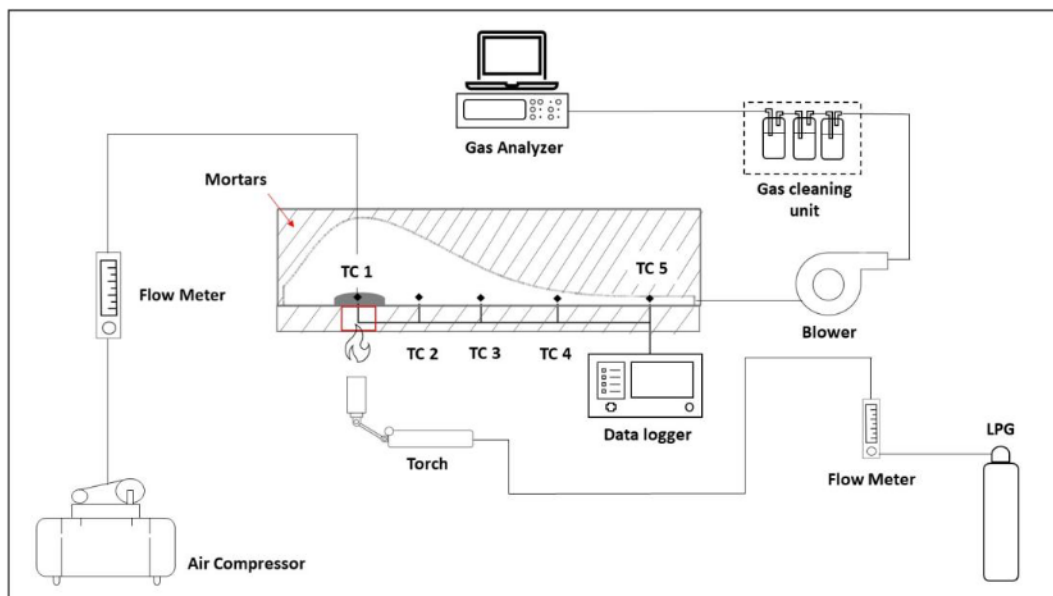


Fig. 3. The diagram of the experimental apparatus

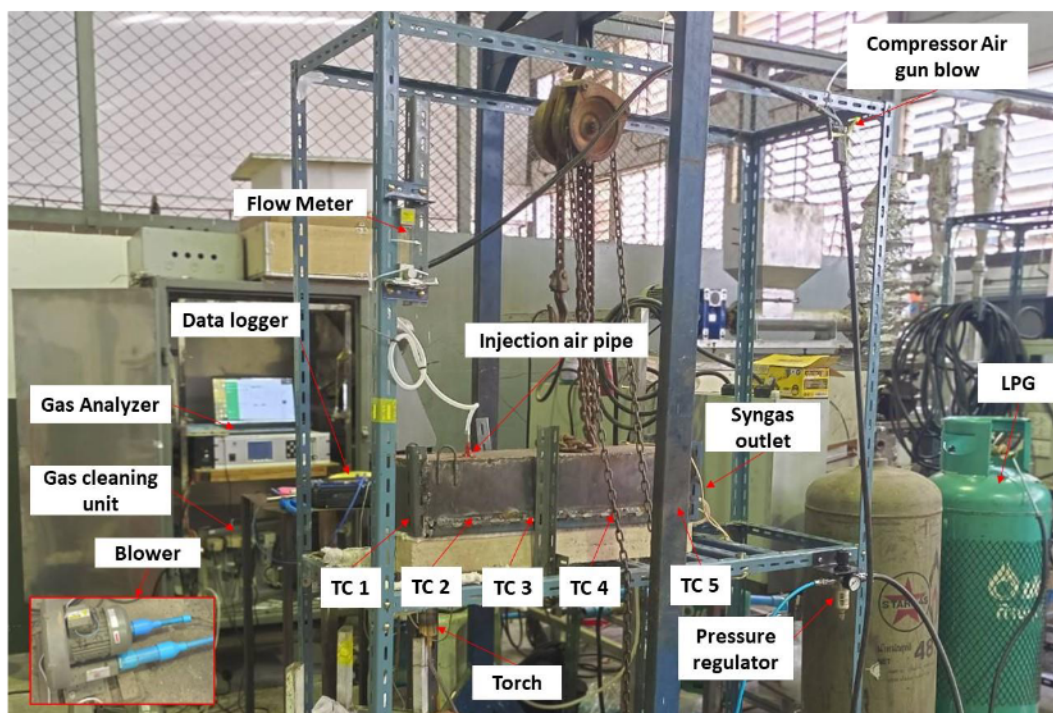


Fig. 4. The photo of the experimental apparatus

A vertical hole was drilled through the upper surface of the upper block for injecting the gasification agent. The air flows through the coal sample for generating syngas and vents out at the tail of the UCG cavity. Five horizontal holes were drilled, and type-K thermocouples were inserted in the holes for measuring temperature. Each thermocouple point (TC1, TC2, TC3, TC4, TC5) has a hole distance of 5 cm as shown in Figure 3. A high-temperature insulator (KAOWOOL, ASK-7912-H 8P Blanket 1,400 °C) was covered the block to reduce heat losses.

2.3 Experimental Procedure

In the experiment, the coal samples were weighted according to equivalence ratio (ER) as shown in Table 2. After the upper block lifting, the coal sample was placed on the lower block at the metal plate. Then, the upper block was placed on the lower block. To prevent gas leakage, the gasket was placed between the upper and the lower blocks.

In the first stage, the coal sample was placed on was heated using an LPG torch. The heating process took one hour. The gasification agent, in this work using air, was supplied into the vertical hole at 0.8 lpm. The coal sample was weighed according to equivalent ratio (ER) as shown in Table 2. In the second process, the heating system was turned off. The air still supplied for one hour. The gasification process was still running from partial combustion of the coal sample to generate heat source. Finally, in the third stage, the air supply was turned off, letting the process cooling down. During the experiment, the syngas was sucked by a blower and flowed through a gas cleaning unit. Then, the syngas was analysed using syngas analyser as shown in Figure 3 and 4.

Table 2

Experimental parameter		
ER	Air Flow (lpm)	Amount of Coal (g)
0.1	0.8	91.8
0.2	0.8	46.2
0.3	0.8	30.6
0.5	0.8	18
0.7	0.8	13.2

3. CFD Simulations

3.1 Simulation Model and Boundary Conditions

Figure 5 depicts the 3-D model of the underground coal gasification (UCG) cavity using ANSYS-Fluent. The geometry of the domain was a half-teardrop shape, which has 90 mm in a maximum width, 132 mm in a maximum height, and 680 mm in a maximum length. The half-teardrop shape of UCG cavity has been reported in several previous works [6, 11, 12]. A vertical pipe with a diameter of 5 mm was located at the center of the domain for injecting gasification agents, here using air.

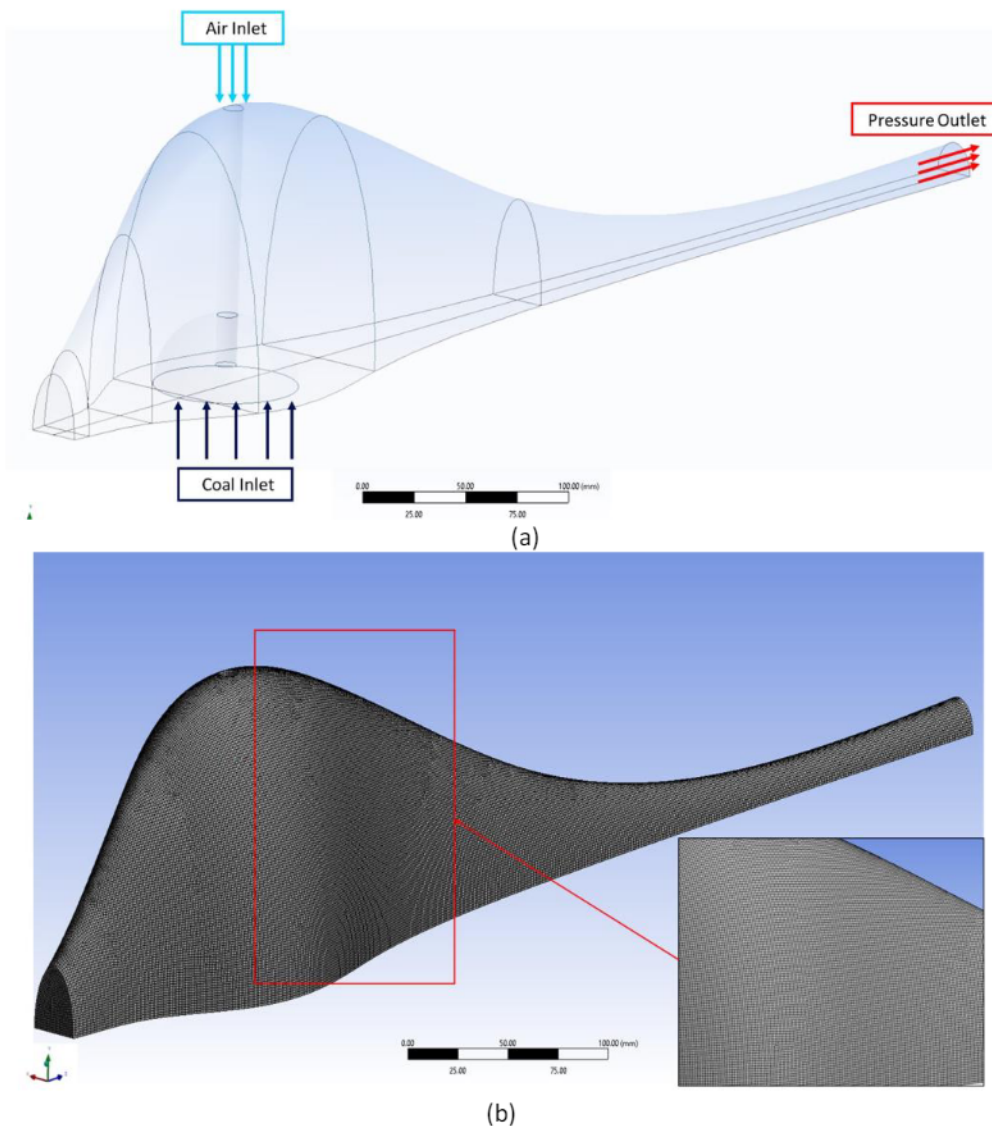


Fig. 5. (a) the 3-D model of underground coal gasification (UCG) cavity and (b) grid generation

Due to the falling of coal from the top surface of the cavity during gasification processing, a rubble pile was created to be a part of the accumulated fallen coal and remaining ash. This rubble-ash pile was dome shape, having a diameter of 55 mm, and was located at the bottom of the domain. The rubble pile was defined as a porous medium with a porosity of 50% [13]. The outlet for syngas was located at the tail of the domain.

3.2 Grid Generation

Figure 5(b) shows the grid generated from a numerical simulation of the underground coal gasification. The generated grids were refined at several locations. Due to the greatest velocity gradient at the ash-rubble pile (which is perched on the reactor's surface), the finest mesh was produced there. The grid-dependent test was varied in the element number of 0.1–0.8 million elements. It was found that the saturated elements which were not changing the results significantly were 0.67 million elements. Then, these element numbers were selected to apply to all CFD runs.

3.3 Calculation Method

The Navier-Stokes equations and Reynolds averaged continuity were used to address the issue after the computing procedure, within the boundaries that were specified. The K-epsilon turbulence model [14, 15] was used to resolve the numerical internal flow simulations. It was utilized for internal flow simulations with a low-cost computation method that could be performed with high forecast accuracy. The Discrete Ordinate (DO) model was utilized to calculate combustion. It was utilized in the radiation model part. The species transport model was performed based on the proximate and ultimate analysis of the coal sample as previously shown in Table 1.

SIMPLE algorithm with an upwind scheme was applied. Turbulent kinetic energy, turbulent dissipation rate, and discrete ordinates were all calculated using the first-order upwind scheme. The calculated pressure, velocity, and temperature were from the second-order upwind scheme. The convergent results were considered when the residuals was less than 1×10^{-4} .

4. Results and Discussion

4.1 Gasification Characteristics

Figure 6 shows the temperature contours on a plain at the center of the UCG cavity from the CFD work. The maximum temperature is detected up to 3,100 C, which can be attributed to the fact that there is no heat loss in simulation method. The area of high temperature is larger when the equivalence ratio (ER) was greater. This means that more air supplying as compared to the fuel (greater ER) would accelerate combustion sub-process of gasification reaction. It should be noted that the gasification is partial oxidation reaction. The acceleration of combustion sub-process in gasification is unsuitable to generate high heating values of syngas.

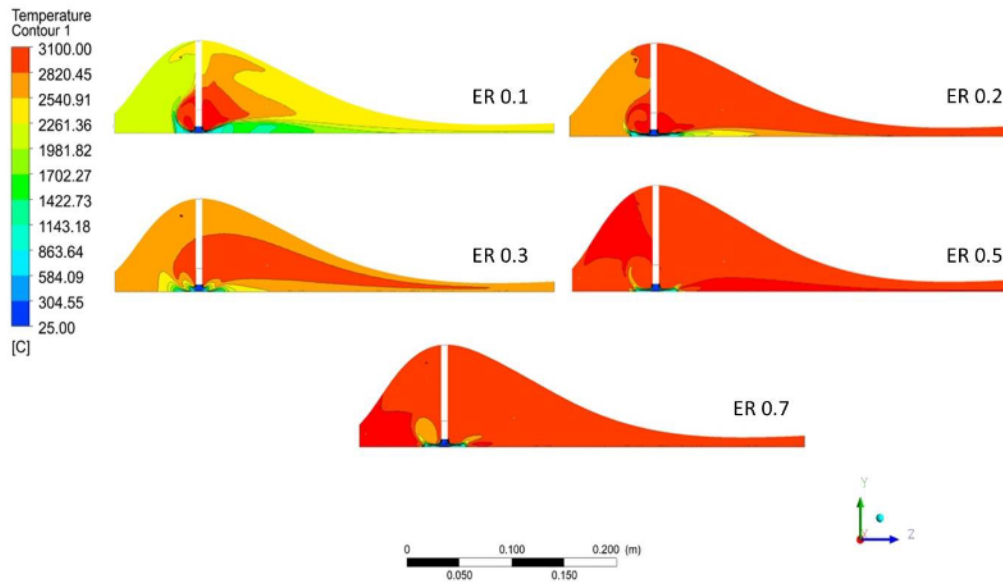


Fig. 6. the temperature contours on the plain at the center of the UCG cavity (CFD results)

Figure 7 show the CO₂ and CO contours on the plain at the center of the UCG cavity from the CFD work. The CO₂ is a product of complete combustion while the CO is a product of incomplete combustion (Gasification). The area of high CO took place at ER=0.2 When the condition is near complete combustion (ER=0.7), the area of high CO become the smallest.

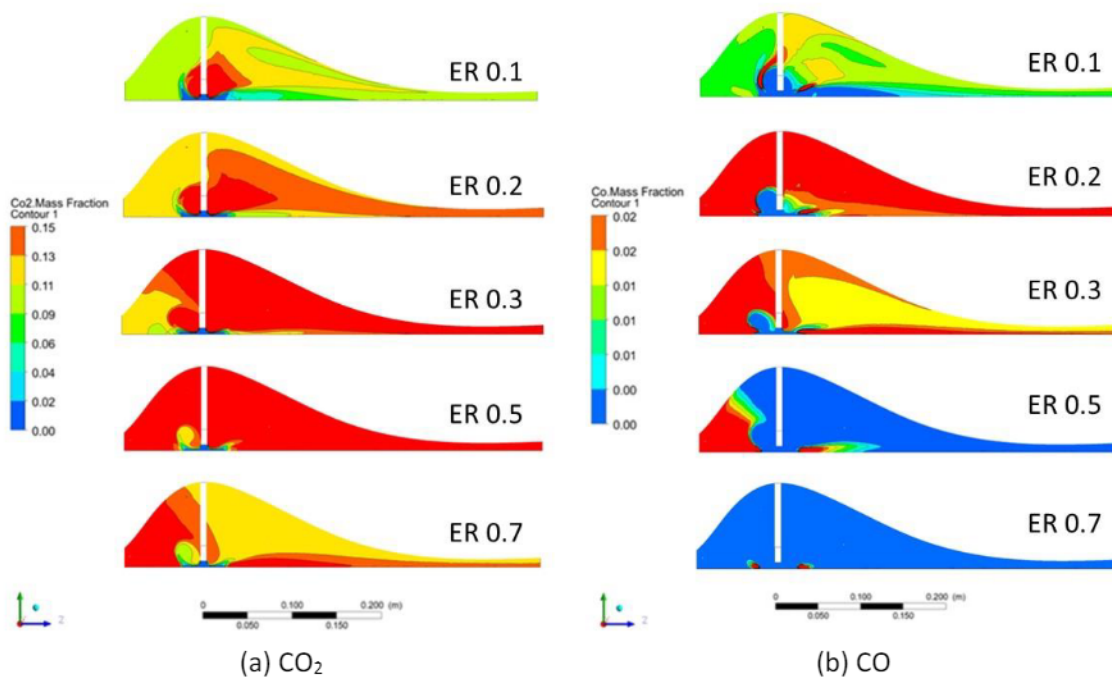


Fig. 7. the CO₂ and CO contours on the plain at the center of the UCG cavity (CFD results)

4.2 Gas Composition

Gas compositions of syngas by volume varying with time from experimental results are shown in Figure 8. This shows the variations of gas compositions for running over 3 hours. In the first stage, the coal sample was heated. The gas composition started to rise up due to decomposition of solid

matter from the thermal reaction. The gas composition continues high in second stage. At this stage, however, the heating system was turned off. This continuous high gas composition is from self-reaction of gasification process having combustion sub-reaction for generating thermal source. The gas composition decreased in the third stage when the gasification agent was stopped to supply.

In this experiment, the concentration of CO₂ was higher than the other combustible gas as CO, CH₄ and H₂ in all equivalence ratio (ER). Considering combustible gas, the concentration of CO is higher than that of CH₄ and H₂. It is exception in short period (4,100 – 6,100 sec) of ER=1 which the concentration of H₂ is higher than that of CO and CH₄. Noted that the rest of gas composition without showing in these results is N₂ which was about 60-80% by volume. The high volume of N₂ is from using air (about 79% in air) as gasification agent.

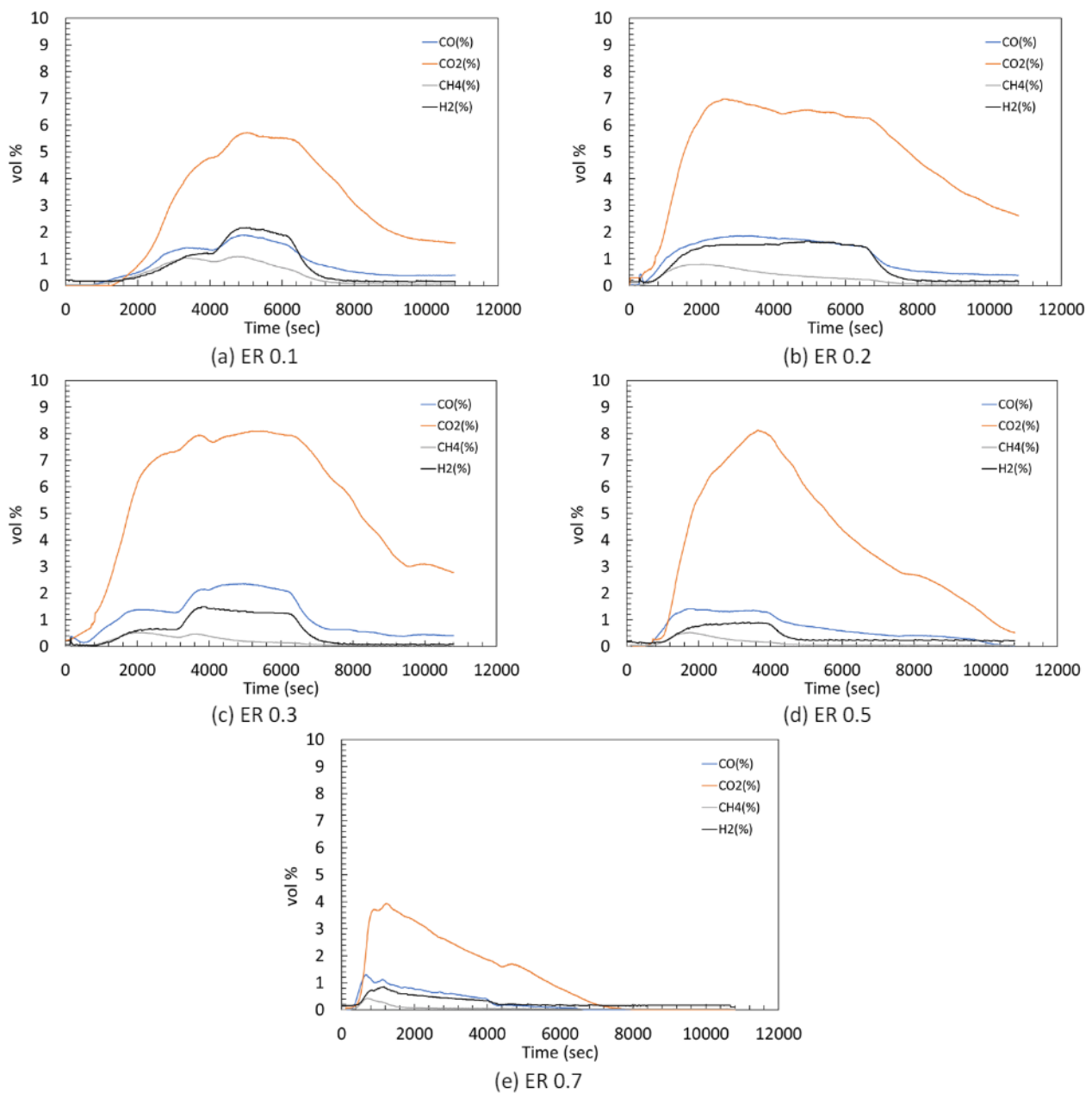


Fig. 8. Gas compositions of syngas by volume varying with time (Experimental results)

CO₂ and CO mass fraction of syngas from CFD and experimental results are shown in Figure 9. The experimental results were measured using syngas analyser while the CFD results were detected at

the outlet of the cavity. Both CFD and experimental results show similar trend that the high mass fraction took place in ER=0.3-0.5 for CO₂ and ER=0.2-0.3 of CO. However, the discrepancy between CFD and experimental results of CO₂ looks large difference. This is from the limitation of CFD work which predict only partial combustion without gasification reaction.

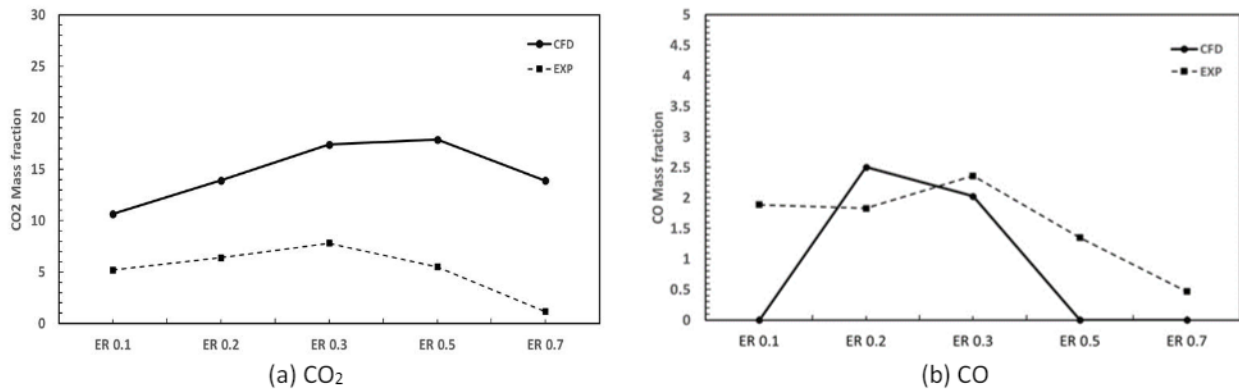


Fig. 9. Percentage of CO₂ and CO in syngas (CFD and Experimental results)

4.3 Gas Calorific Value

The low heating value (LHV) of syngas was measured by the Gas analyzer varying with time from experimental results are shown in Figure 10. The peak of LHV took place when the run was over 2,100 sec for ER=0.1-0.3 and was before 2,100 sec for ER=0.5-0.7. This show that high supply of gasification agent (ER=0.5-0.7) can accelerate gasification process to take place in beginning of the run. The peak of LHV (which taking from Figure 10) is shown in Figure 11. The peak of LHV decreased monotonically when the ER increased. The highest peak of LHV took place at ER=0.1.

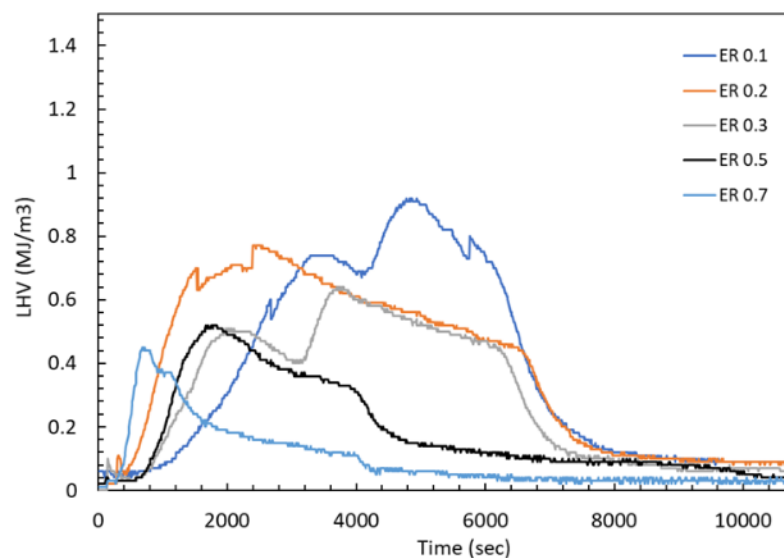


Fig. 10. Low heating value (LHV) of syngas varying with time (Experimental results)

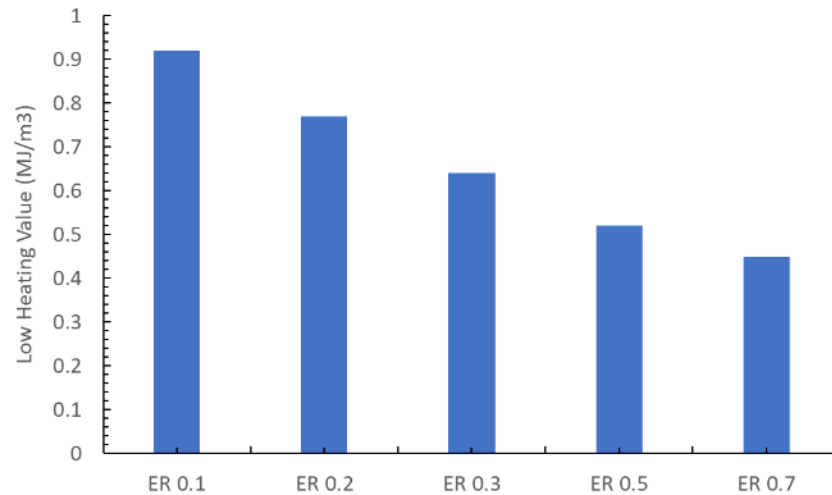


Fig. 11. Peak of Low heating value (LHV) of syngas varying with equivalence ratio (ER) (Experimental results)

5. Conclusion

In this work, the coal from Thailand, was tested under cavity imitating underground coal gasification (UCG) experimentally and numerically. The results can be concluded as follow

- i. The CFD results show that the area of high temperature in the UCG cavity was larger when the equivalence ratio (ER) was greater. The area of high CO_2 and low CO were also larger when the equivalence ratio (ER) was smaller.
- ii. Considering combustible gas, the concentration of CO was higher than that of CH_4 and H_2 . It was exception in short period (4,100 – 6,100 sec) of $\text{ER}=0.1$ which the concentration of H_2 was higher than that of CO and CH_4 .
- iii. The peak of LHV decreased when the equivalence ratio (ER) increased. The highest peak of LHV took place at $\text{ER}=0.1$.

Acknowledgment

This research was supported by National Science, Research and Innovation Fund (NSRF) and Prince of Songkla University (Grant No ENG6601140S). Authors also thank the Energy Technology Research Unit (ETRC) of PSU for partial support to Mr. Whacharapat during this work.

References

- [1] Cozzi, Laura, T. Gould, S. Bouckart, D. Crow, T. Y. Kim, C. Mcglade, P. Olejarnik, B. Wanner, and D. Wetzel. "World Energy Outlook 2020." *vol* 2050 (2020): 1-461.
- [2] Zaman, Rafia, Thomas Brudermann, S. Kumar, and Nazrul Islam. "A multi-criteria analysis of coal-based power generation in Bangladesh." *Energy Policy* 116 (2018): 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.053>
- [3] World Coal Association. Powering the globe <https://www.worldcoal.org/coal-facts/coal-contribution/>
- [4] BP. Statistical Review of World Energy. 2020.
- [5] Miller, Bruce G. *Clean coal engineering technology*. Elsevier, 2010.
- [6] Biswas, Arup Kumar, Wasu Suksuwan, Khamphe Phoungthong, and Makatar Wae-hayee. "Effect Of Equivalent Ratio (ER) On the Flow and Combustion Characteristics in A Typical Underground Coal Gasification (UCG) Cavity." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 86, no. 2 (2021): 28-38. <https://doi.org/10.37934/arfmts.86.2.2838>
- [7] BCMCL. Barapukuria Coal Mining Company, Dinajpur, Bangladesh.
- [8] Petrobangla Mines Division. "Consultancy Services for Drilling and Testing of Core Holes for Feasibility Study for the Extraction of Coal Bed Methane at Jamalganj." *Restricted access*, 2016.

- [9] Ferdous, Hridita, Md Mobinul Haque, and Wahida Akhtar. "Coal Bed Methane Extraction Proposal of Khalashpir Coal Field, Rangpur, Bangladesh."
- [10] Liu, Hui, Ali Elkamel, Ali Lohi, and Mazda Biglari. "Computational fluid dynamics modeling of biomass gasification in circulating fluidized-bed reactor using the Eulerian–Eulerian approach." *Industrial & engineering chemistry research* 52, no. 51 (2013): 18162-18174. <https://doi.org/10.1021/ie4024148>
- [11] Daggupati, Sateesh, Ramesh N. Mandapati, Sanjay M. Mahajani, Anuradda Ganesh, A. K. Pal, R. K. Sharma, and Preeti Aghalayam. "Compartment modeling for flow characterization of underground coal gasification cavity." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50, no. 1 (2011): 277-290. <https://doi.org/10.1021/ie101307k>
- [12] Debelle, Benoît, Marc Malmendier, Marc Mostade, and Jean-Paul Pirard. "Modelling of flow at Thulin underground coal gasification experiments." *Fuel* 71, no. 1 (1992): 95-104. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(92\)90198-W](https://doi.org/10.1016/0016-2361(92)90198-W)
- [13] Samdani, Ganesh, Preeti Aghalayam, Anuradda Ganesh, R. K. Sapru, B. L. Lohar, and Sanjay Mahajani. "A process model for underground coal gasification–Part-I: Cavity growth." *Fuel* 181 (2016): 690-703. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.020>
- [14] İlbaş, Mustafa, and Serhat Karyeyen. "Modelling of combustion performances and emission characteristics of coal gases in a model gas turbine combustor." *International journal of energy research* 38, no. 9 (2014): 1171-1180. <https://doi.org/10.1002/er.3135>
- [15] Tian, Zhao F., Peter J. Witt, M. Phillip Schwarz, and William Yang. "Numerical modeling of victorian brown coal combustion in a tangentially fired furnace." *Energy & fuels* 24, no. 9 (2010): 4971-4979. <https://doi.org/10.1021/ef100514v>

ภาคผนวก ข.

(วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์, อาคม ปะหลามานิต, มั๊กตาร์ แวหะยี่, 2022. การทบทวนเอกสาร:
เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดินและศักยภาพในประเทศไทย. Engineering Journal
Chiang Mai University, 29(1), pp.79-99 Indexed by TCI.)

การทบทวนเอกสาร: เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จากถ่านหินใต้ดินและศักยภาพในประเทศไทย A Review: Underground Coal Gasification Technology and Its Potential in Thailand

วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์¹ อาคม ปะหลามานิต² และ มั๊กตาร์ แวหะยี^{1,*}

Whacharapat Wattanasrirote¹, Arkom Palamanit² and Makatar Wea-Hayee^{1,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์

²หลักสูตรเทคโนโลยีพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเฉพาะทาง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

¹Department of Mechanical and Mechatronics Engineering

²Energy Technology Program, Department of Specialized Engineering

Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110

*E-mail: wmakatar@eng.psu.ac.th, Telephone Number: 074-287231

บทคัดย่อ

ในอดีตกระบวนการแปรรูปถ่านหินให้เป็นพลังงานนั้นถูกมองว่าเป็นเชื้อเพลิงที่อันตรายและส่งผลกระทบต่อสุขภาพ อีกทั้งยังส่งผลเสียต่อธรรมชาติและระบบนิเวศ แต่ปัจจุบันเทคโนโลยีกระบวนการแปรรูปถ่านหินให้กลายเป็นพลังงานนั้นได้มีการพัฒนาให้ดีขึ้นและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล ข้อดีของถ่านหินคือ สามารถพบแหล่งถ่านหินได้ทุกที่ทั่วโลก เป็นเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความร้อนสูงและมีต้นทุนต่ำ เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลแล้วถ่านหินสามารถควบคุมการเผาไหม้ได้ง่ายกว่า มีความเสถียรและไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาไหม้ ราคาของถ่านหินถือว่าคงที่เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลชนิดอื่น ๆ จึงนิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับผลิตไฟฟ้าในหลาย ๆ ประเทศ ในการทำเหมืองถ่านหิน กรณีที่ถ่านหินอยู่ลึกจากผิวดินไม่มากจะใช้วิธีขุดเปิดหน้าดิน และสำหรับถ่านหินที่อยู่ลึกจากผิวดินจะใช้วิธีทำเหมืองใต้ดิน แต่สำหรับถ่านหินที่อยู่ในระดับความลึกมาก ๆ ซึ่งไม่คุ้มต่อการทำเหมืองใต้ดิน สามารถใช้เทคโนโลยีการผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน (Underground coal gasification, UCG) ได้ โดยฉีดแก๊สซิฟิเคชันเอเจนต์ (Gasification agent) ไปยังชั้นถ่านหินใต้ดินเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน แล้วจึงนำแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) มาใช้ประโยชน์ สำหรับบทความนี้จะมีการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดิน โดยเริ่มต้นจากการกล่าวถึงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป จากนั้นจะกล่าวถึงเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน บททบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สุดท้ายจะกล่าวถึงเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินที่นำไปใช้งานจริง และศักยภาพการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินใช้ในประเทศไทย เป็นต้น

คำสำคัญ: การผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน; เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด; ถ่านหิน

ABSTRACT

In the past, coal conversion was often seen as pollution that affected people's health and environment. Nowadays, clean coal technology is getting enhanced and accepted. The major benefit of coal is found around the world and has high heating value for low-cost fuel. When compared with biomass fuel, combustion operation of coal is easier and more stable, as well as has small effect on combustion equipment. The cost of coal is more consistent as compared to other fossil fuels. So, coal is the main fuel used for power plant in many countries. For coal harvesting, surface mining is applied for shallow coal seam while underground mining is adopted for depth coal seam. For the case of very depth coal seam, which is unworthy for applying underground mining, Underground Coal Gasification (UCG) technology can be applied by injecting gasification agent into underground coal seam for generating gasification process. Then, syngas from the gasification process supplies to the surface for beneficial usage. In this article, UCG technology and its research were reviewed. General gasification was firstly introduced. The, UCG technology were reported, and UCG research was reviewed. Finally, practical use of UCG technology in coal mining was mentioned, and potential of applying UCG in Thailand was reported.

Keywords: Underground coal gasification; Clean coal technology; Coal

1. บทนำ

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีบทบาทต่อพลังงานโลกมาตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมทั่วโลกนิยมใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากใช้งานได้ง่าย มีปริมาณสำรองที่สูงสามารถนำมาใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 200 ปี จากการสำรวจพบว่าแหล่งถ่านหินกระจายอยู่ทั่วโลก จุดแข็งของถ่านหินคือราคามีความผันผวนน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทอื่น ๆ เช่น น้ำมัน หรือ ก๊าซธรรมชาติ ด้วยคุณลักษณะของถ่านหินที่เป็นของแข็ง จึงง่ายต่อการขนส่งและนำมาเป็นเชื้อเพลิง โดยเฉพาะการนำมาผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ถ่านหินจึงเป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากถึงร้อยละ 40 ของโลก การนำเชื้อเพลิงฟอสซิลทุกชนิดรวมถึงถ่านหินมาใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น ก่อให้เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ เช่น ฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุให้เกิดข้อกังวลถึงปัญหาสภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ อาจเกิดสารปนเปื้อนจากโลหะหนัก เช่น ไอปรอท เป็นต้น

อย่างไรก็ตามผลกระทบดังกล่าวสามารถควบคุมหรือกำจัดได้ด้วยเทคโนโลยีและมาตรการต่าง ๆ ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพจนเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล ปัจจุบันการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอย่างต่อเนื่อง ช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังมีเทคโนโลยีในการกำจัดมลพิษต่าง ๆ เรียกว่าเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) ซึ่งสามารถแบ่งตามสภาพของการนำถ่านหินไปใช้ได้ดังนี้ [1]

1. ในรูปของแข็ง ได้แก่ การเพิ่มคาร์บอนในถ่านหิน (Carbonization) การผลิตถ่านโค้ก (Coke manufacture) และการทำถ่านหินอัดก้อน (Briquette)
2. ในรูปของเหลว ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงจากถ่านหินผสมน้ำ (Coal water mixture) และการกลั่นถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Coal Liquefaction)
3. ในรูปของก๊าซ ได้แก่ การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน (Coal gasification) เป็นต้น

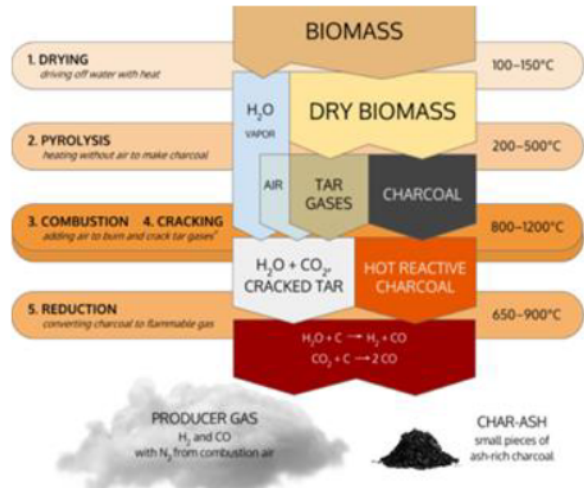
เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดที่กล่าวมาข้างต้น รูปแบบการทำให้ถ่านหินเป็นก๊าซด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ขบลงทุนไม่มากเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ และแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ที่ได้จากกระบวนการ เมื่อเผาแล้วสะอาดกว่ารูปแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีการผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน (Underground coal gasification: UCG) ซึ่ง เป็นเทคโนโลยีที่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ไม่ต้องทำเหมืองถ่านหิน เป็นต้น [1]

จุดประสงค์ของบทความนี้ เพื่อทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดิน โดยเริ่มต้นจากการกล่าวถึงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป จากนั้นจะกล่าวถึงเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สุดท้ายรายงานเกี่ยวกับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินที่นำไปใช้งานจริง และศักยภาพการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินใช้ในประเทศไทย

2. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

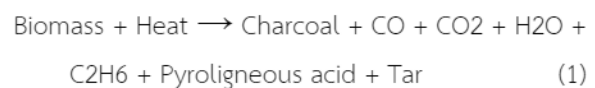
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) คือ กระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแก๊ส โดยทำให้เกิดการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ โดยควบคุมปริมาณอากาศเข้าให้มีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการสันดาปที่สมบูรณ์ แต่จะเกิดความร้อนเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปเตาแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งชั้นของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันออกเป็นชั้นที่สำคัญ ๆ ได้ 4 ชั้นปฏิกิริยา ดังนี้

1. ชั้นลดความชื้น (Drying zone) อุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ที่ประมาณ 100–135°C จึงไม่สูงพอที่จะเกิดการสลายตัวของสารระเหยต่าง ๆ แต่จะมีการระเหยความชื้นที่มีอยู่ในชีวมวลให้ออกมาในรูปของไอน้ำแทน
2. ชั้นกลั่นสลาย (Distillation zone) ในชั้นนี้สารอินทรีย์ที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะสลายทำให้เกิดสารระเหย (Volatile matter) ต่าง ๆ ออกมาซึ่งประกอบไปด้วยเมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน แก๊สที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ โดยเกิดการ

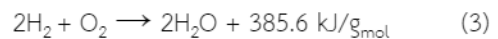


รูปที่ 1 กระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชัน [2]

ได้รับความร้อนที่ส่งมาจากชั้นเผาไหม้ที่อยู่ตำแหน่งด้านล่าง อุณหภูมิในชั้นนี้จะประมาณ 135–600°C เมื่อเวลาผ่านไปเชื้อเพลิงจะเหลืออยู่ในรูปของแข็งที่เป็นถ่าน ดังสมการที่ 1

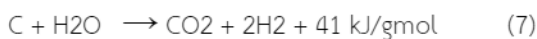
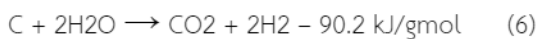
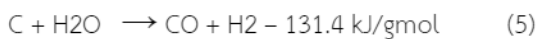


3. ชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) เป็นส่วนของชั้นแรกที่สัมผัสกับอากาศที่ป้อนเข้าไปมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 900–1200°C การเผาไหม้ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2 และแก๊สไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนได้น้ำออกมา ดังสมการที่ 3 ในชั้นตอนนี้ต้องควบคุมแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในอากาศให้มีปริมาณน้อย



4. ชั้นรีดักชัน (Reduction zone) เป็นการนำสิ่งที่ได้จากชั้นเผาไหม้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ มาทำปฏิกิริยาต่อโดยการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากการเคลื่อนที่ผ่านคาร์บอนที่ร้อน ดังสมการที่ 4 อุณหภูมิที่เหมาะสมของชั้นนี้อยู่ที่ประมาณ 500–1,000°C ส่วนไอน้ำทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการที่ 5 อุณหภูมิที่เหมาะสมของชั้นนี้อยู่ที่ประมาณ 500-1,000°C

สำหรับสมการที่ 6 จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500–600°C เมื่อเพิ่มไอน้ำจะมีการเพิ่มขึ้นของแก๊สไฮโดรเจนตามมา และจะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลให้ค่าพลังงานความร้อนของแก๊สสูงขึ้นแต่ถ้ามีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำให้ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้ลดลง ดังสมการที่ 7 โดยแก๊สไฮโดรเจนจะไปรวมตัวกับคาร์บอนและเกิดเป็นแก๊สมีเทนออกมาได้ ดังสมการที่ 8 โดยจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความดันสูง ๆ และอุณหภูมิไม่สูงมาก เพราะปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนจะสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของโซลิดตกชั้นอยู่ประมาณ 700°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะลดลงเรื่อย ๆ



3. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน (Underground coal gasification: UCG)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน มีหลักการเหมือนกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไปตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2 แต่จะไม่ขุดถ่านหินขึ้นมา ใช้วิธีฉีดออกซิโดเซอร์ (เป็นอากาศ ไอน้ำ หรือออกซิเจน) ลงไปในชั้นใต้ดิน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินที่อยู่ชั้นใต้ดิน จากนั้นจะส่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (Syngas) ขึ้นมาบนดินเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป ลักษณะการทำงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินแสดงในรูปที่ 2 [3]

3.1 โครงสร้างของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน

โครงสร้างของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินประกอบด้วยดังนี้ [4]

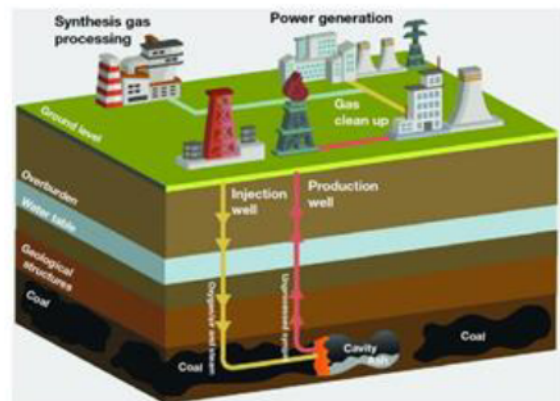
1. หลุมเจาะหรือหลุมฉีด (Injection well) มีหน้าที่ในการฉีดออกซิแดนท์ (Gasification agent) เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับถ่านหินที่อยู่ใต้ดิน เดิมตัวออกซิแดนท์นั้นจะเป็นอากาศ ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้

ออกซิแดนท์ที่หลากหลาย ได้แก่ ออกซิเจน (Oxygen) ไอน้ำ (Steam) หรือ ออกซิเจนผสมกับไอน้ำ (Oxygen and Steam) เข้าไปพร้อมกันเพื่อเพิ่มค่าความร้อนให้กับแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas)

2. ชั้นถ่านหิน (Coal seam) ทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อตัวของออกซิแดนท์เข้าไปและเริ่มมีการเผาไหม้เกิดขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสามช่วงที่เกิดการพร้อมกัน

3. ส่วนที่อยู่เหนือชั้นของถ่านหิน (Overburden) เป็นชั้นดินและชั้นหินที่อยู่เหนือถ่านหินทำหน้าที่ในการกักเก็บและสร้างสภาพความดันใต้ดิน

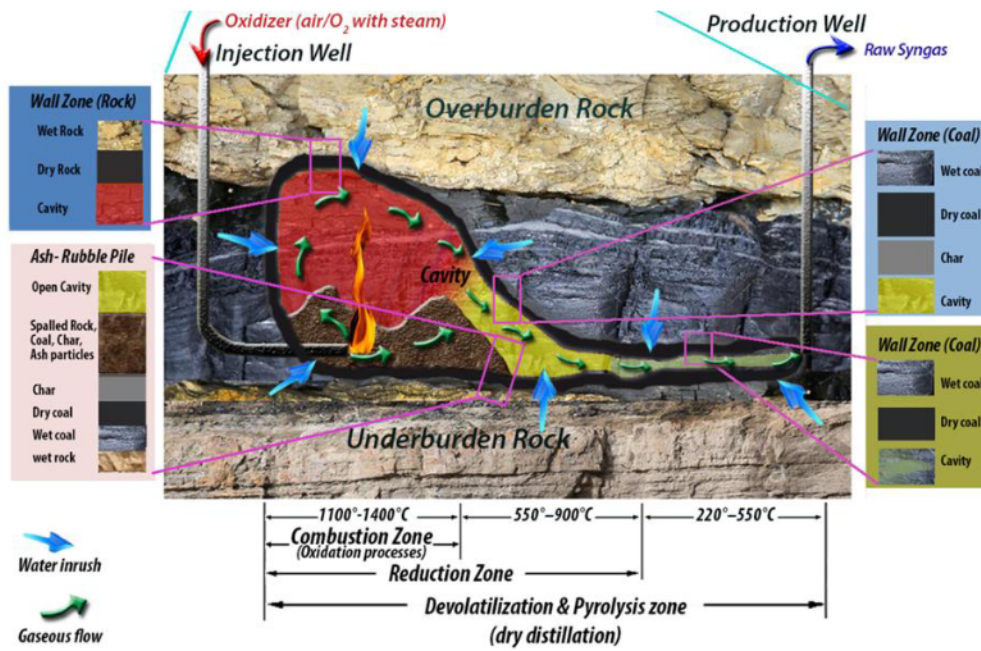
4. หลุมผลิตถ่านหิน (Production well) ทำหน้าที่ในการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันขึ้นมาจากใต้ดิน



รูปที่ 2 องค์ประกอบของโรงผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน [3]

3.2 ปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน [4]

รูปที่ 3 แสดงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน แก๊สซิฟิเคชันออกซิแดนท์ ซึ่งอาจจะเป็น อากาศ ไอน้ำ หรือออกซิเจน ถูกฉีดเข้าจากท่อด้านบนแล้วไหลลงสู่โพรงของถ่านหินด้านล่าง จากนั้นจะทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับถ่านหินแล้วสร้างแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ขึ้นมา [4]-[6] สำหรับปฏิกิริยาย่อยของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเกิดขึ้นคล้ายๆ กับที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2 ดังนี้

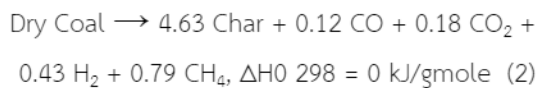


รูปที่ 3 กระบวนการแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน [5]

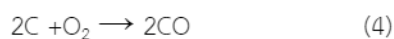
(1) ชั้นไล่ความชื้น (Drying) โดยส่วนใหญ่แล้ว ถ่านหินที่อยู่ชั้นใต้ดินมีความชื้นความชื้นที่อยู่ในถ่านหินระเหยออกเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโพรง ส่งผลทำให้ถ่านหินมีรูพรุนมากขึ้น สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ [7]



(2) ชั้นไพโรไลซิส (Pyrolysis) เมื่อถ่านหินแห้งหลังจากที่ได้รับความร้อน ต่อไปจะเกิดเป็นชั้นไพโรไลซิส ซึ่งจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 350°-400°C ถ่านจะเกิดขึ้นจากการปล่อยสารระเหย (Hydrocarbons, CH₄, H₂, H₂O, CO, CO₂) สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ [8]



(3) ชั้นออกซิเดชัน (Oxidation) ชี้ถ่าน (C) และสารระเหย (Volatiles) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ [9]

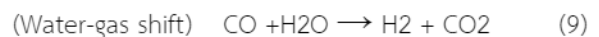
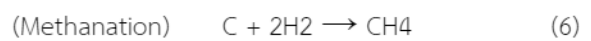


ลำดับที่ 3 และ 4 คือปฏิกิริยาคายความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหิน ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นภายในโพรงใกล้เคียงสารออกซิเดนต์ที่ถูกฉีดลงไป

(4) ชั้นแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นปฏิกิริยาการทำให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง สามารถแสดงสมการได้ดังนี้



นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนและไฮโดรเจนในก๊าซเชื้อเพลิง สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ [10]



กระบวนการโดยรวมของ UCG มีการคายความร้อนปริมาณที่มาก ทำให้อุณหภูมิในช่วงการเผาไหม้มีค่าสูงเกิน 900°C [11] อย่างไรก็ตาม แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างการไหลออกจากโพรง ทำให้อุณหภูมิแก๊สลดลงเหลือประมาณ 300°C สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ใน UCG

คือ สัดส่วนของสารออกซิเจนต่อไอน้ำ (O₂/Steam ratio) ความดันในการทำงาน มวลและความสมดุลของพลังงาน ไนโตรเจน [12], [13] เป็นต้น

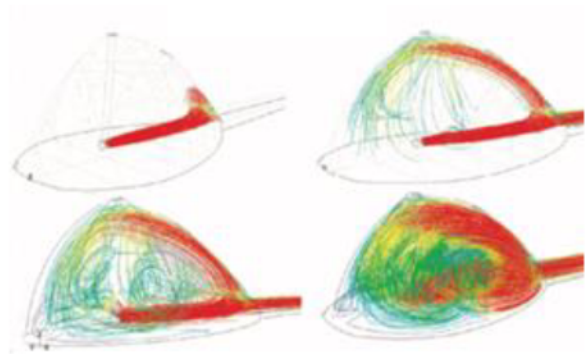
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดิน (UCG) ซึ่งเป็นทั้งแบบทดลองและแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation)

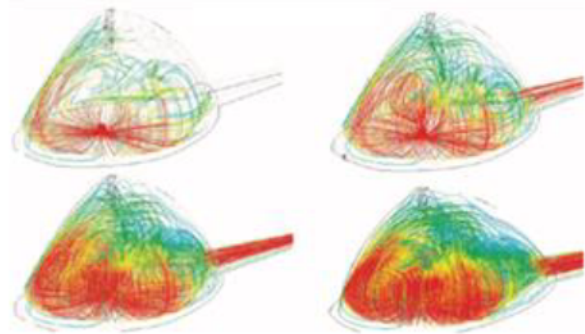
Sateesh และคณะ [14] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการไหลที่ส่งผลต่อการโตของโพรงในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน โดยใช้วิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD) และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับเงื่อนไขขอบเขตคือความเร็วทางเข้าที่ 4 m/s และเลือกใช้ออกซิเจน (Oxygen) เป็นออกซิแดนท์ มีการกำหนดให้อุณหภูมิของโพรงคงที่ 1273 k และความดันทางออกที่ 5 atm โดยใช้โมเดลการไหลแบบปั่นป่วน Realizable k- ϵ ในการศึกษาได้กำหนดขนาดของโพรงโดยแบ่งตามระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 5 ขนาด ในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลได้มีการแบ่งออกเป็นสองลักษณะ แบบแรกคือ ฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวนอน (Horizontal Injection) และแบบที่สองคือ ฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวตั้ง (Vertical Injection) โดยผลที่ได้จากการศึกษากรณีฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวนอน (Horizontal Injection) แสดงในรูปที่ 4(ก) และฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวตั้ง (Vertical Injection) แสดงในรูปที่ 4(ข) พบว่า การฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวตั้งมีผลต่อการกระจายของออกซิแดนท์ทุกทิศทางมากกว่ากรณีฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวนอน

Lin Xin และคณะ [15] ได้จำลองการขยายตัวและการก่อตัวของโพรงในระยะเริ่มต้นของการเผาไหม้ โดยได้ใช้ถ่านหินที่พบอยู่ภายในประเทศจีนซึ่งเป็นถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (Anthracite) ถ่านหินนั้นเดิมจะมีสภาพเป็นผง โดยได้นำไปผ่านกระบวนการอัดภายใต้ความดัน 14 MPa ภายในโมลและผสมด้วยกาวหรือตัวเชื่อมผสมประมาณ

5wt% เพื่อผสมเนื้อของผงถ่านหินเข้าด้วยกันจนกลายเป็นบล็อกถ่านหิน (Coal block) ขนาด 30 cm x 30 cm x 23 cm



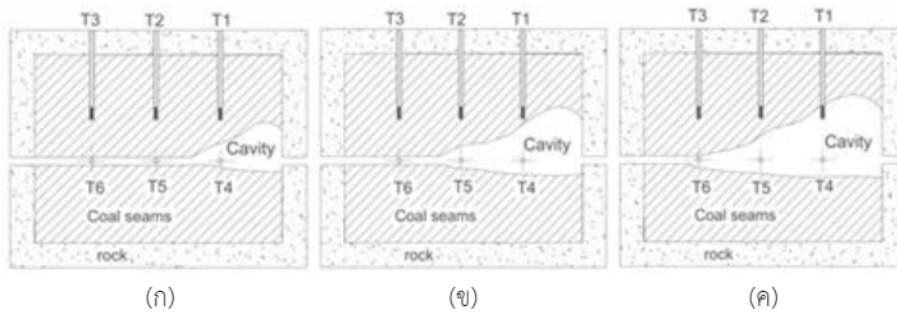
(ก) ฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวนอน (Horizontal Injection)



(ข) ฉีดยุติออกซิแดนท์ในแนวตั้ง (Vertical Injection)

รูปที่ 4 ลักษณะการไหลภายในอุโมงค์ UCG [14]

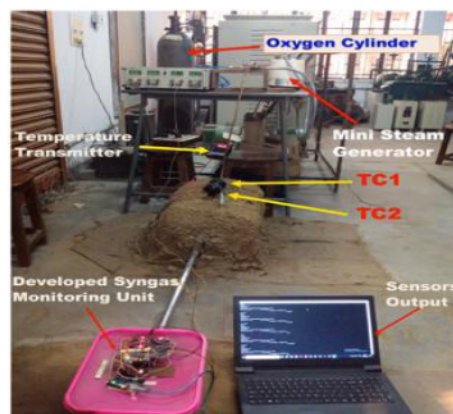
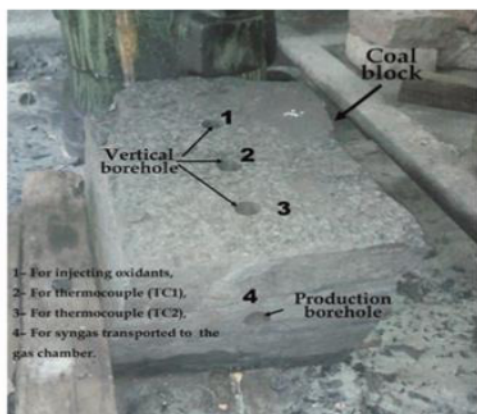
หลังจากได้บล็อกถ่านหินแล้วได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมด 6 จุด และใช้ออกซิแดนท์ (Oxidizer) เป็นก๊าซออกซิเจน โดยแบ่งการทดลองไว้สามช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นการให้ความร้อน มีการพ่นออกซิเจนที่ 0.4 L/min และได้มีการให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน (Heating tube) ลักษณะโพรงดังแสดงในรูปที่ 5(ก) ช่วงที่ 2 คือ ช่วงที่นำขดลวดความร้อนออก ลักษณะโพรงแสดงในรูปที่ 5(ข) และช่วงสุดท้ายคือช่วงที่หยุดการจ่ายออกซิเจนให้กับระบบ ลักษณะโพรงแสดงในรูปที่ 5(ค) จากการทดลองพบว่า จุดที่ใกล้ตำแหน่งของการเริ่มการเผาไหม้มากที่สุดคือตำแหน่งที่ 1 จะมีอุณหภูมิสูงที่สุด และมีขนาดของความโตของโพรงมากที่สุด



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการโตของโพรง UCG ที่ได้จากการทดลองของ Lin Xin และคณะ [15]

Ranjeet Mandal และคณะ [16] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินโดยติดตามผลแบบ Real time ในการทดลองได้สร้างชุดทดลองขนาด Laboratory scale ซึ่งได้ใช้ถ่านหินจากเหมืองแร่ในประเทศอินเดีย สำหรับบล็อกถ่านหินที่นำมาทดลองมีขนาด 45 cm x 35 cm x 28 cm โดยได้ทำการเจาะรูตามแนวตั้ง (Vertical borehold) ความลึกที่ 10 cm และเจาะรูตามแนวนอน (Horizontal borehold) ยาว 32 cm ซึ่งรูที่เจาะตามแนวนอน (Horizontal bore hold) จะเชื่อมกับรูแนวตั้ง (Vertical borehold) ทั้ง 3 รู ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) โดยหลุมแนวตั้งใช้สำหรับฉีดออกซิแดนท์ (Injection Oxidant) และหลุมแนวนอนสำหรับเป็นรูทางออกของผลิตภัณฑ์ บล็อกถ่านหินจะถูกนำไปเคลือบด้วยดินเหนียวและต่อท่อสเตนเลสเพื่อนำแก๊สผลิตภัณฑ์มาเก็บไว้ในถังแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ในระหว่างกระบวนการทดลองได้ฉีด

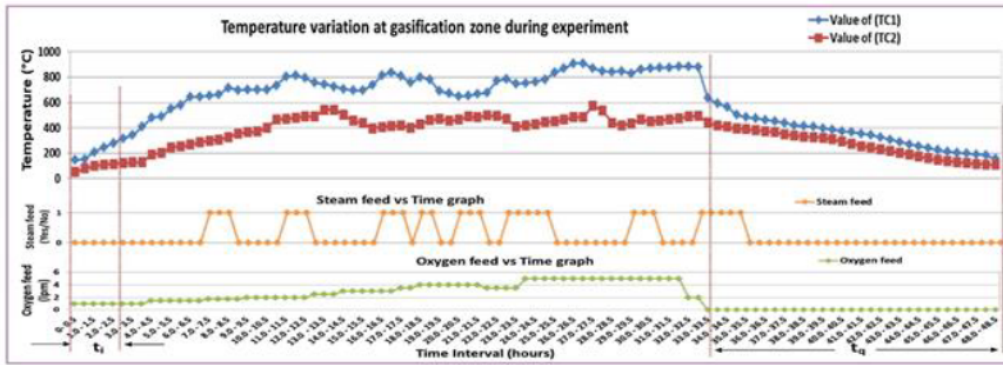
ออกซิแดนท์เข้าไปอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษากระบวนการเกิดแก๊สเอาไว้และมีการฉีดพ่นไอน้ำ (Steam) เข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของแก๊สผลิตภัณฑ์ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราส่วนของ Co/H₂ ให้กับแก๊สผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองของ Ranjeet Mandal และคณะ [16] แสดงในรูปที่ 7 และ 8 พบว่า ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองในช่วงของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าช่วงแก๊สซิฟิเคชัน ช่วงไพโรไลซิสและช่วงของชั้นลดความชื้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับผลของการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันนั้น ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซไนโตรเจน (N₂) ดังแสดงในรูปที่ 8 แต่จากการทดลองสังเกตได้ว่าในช่วงที่เริ่มมีการหยุดฉีดออกซิแดนท์ส่งผลต่อคุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน (H₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีเทน (CH₄)) ที่ได้ลดลง



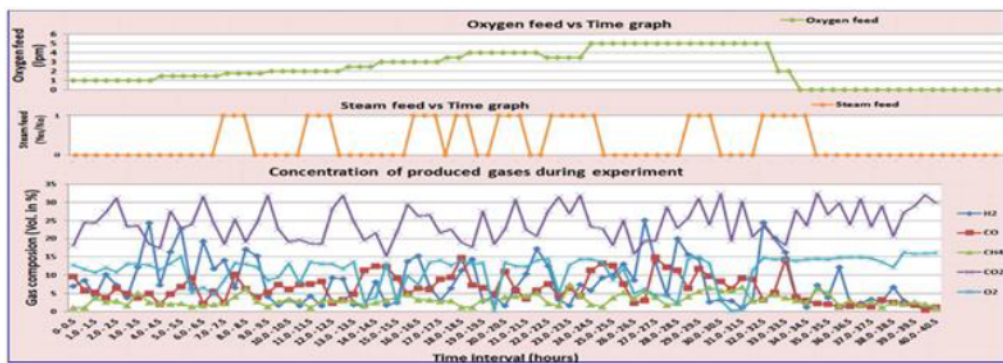
(ก) ลักษณะการเจาะรูบล็อกถ่านหิน

(ข) ชุดทดลองและการวัดผลแก๊ส

รูปที่ 6 ถ่านหินและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Ranjeet Mandal และคณะ [16]



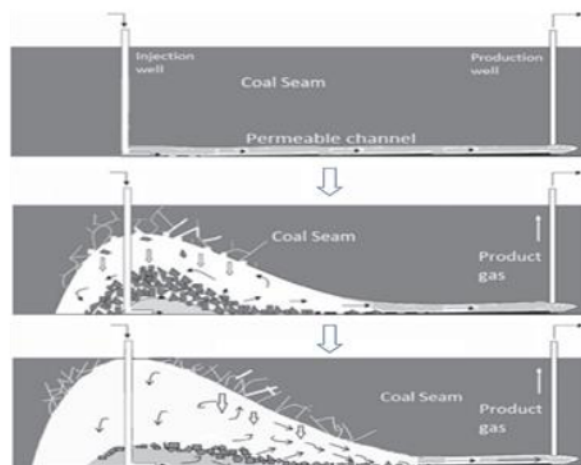
รูปที่ 7 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลา [16]



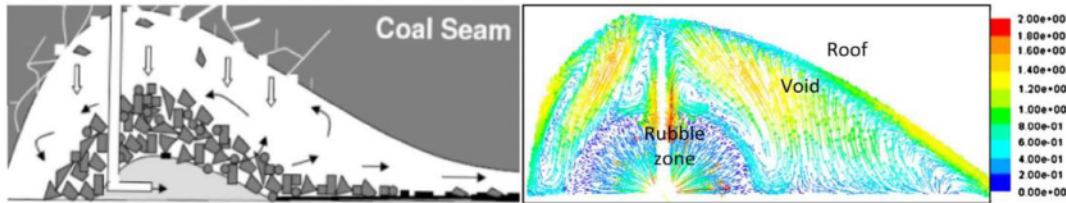
รูปที่ 8 การเกิดแก๊สเชื้อเพลิงเทียบกับเวลา [16]

Samdani และคณะ [17] ได้ศึกษาการขยายตัวของโพรงและพฤติกรรมของอนุภาคที่ตกลงมาสู่ด้านล่างของโพรง โดยสร้างแบบจำลองโมเดลในระยยะเฟสแรกของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันภายใต้เงื่อนไขดังนี้ อัตราส่วนของไอน้ำและออกซิเจน (Steam/O₂ ratio) มีค่าเท่ากับ 3.57 ระยะเวลาในการจำลองการเกิดปฏิกิริยา (Simulation time) 10 ชั่วโมง ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินชนิดลิกไนต์ (Lignite) การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของถ่านหินจำเป็นต้องวิเคราะห์ทั้งแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์แบบประมาณการ(Approximate analysis) ภายใต้สภาวะความดัน 4.8 atm ระยะห่างระหว่างหลุม 0.5 m ขนาดของอนุภาคที่ตกลงมาสู่พื้นล่างของโพรงคือ 5 mm ในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ Ansys fluent ในความเป็นจริงแล้วการเกิดของโพรงในปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินนั้นยากต่อการสร้างแบบจำลอง และยากต่อการคิดวิเคราะห์มากดังนั้นเพื่อง่ายต่อการคิดวิเคราะห์จึงต้องจำลองรูปทรงแบบ Resident-time distribution (RTD)

เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ปรากฏการณ์จำลองของอนุภาคเมื่อตกลงมาสู่พื้นของโพรงและทิศทางการไหลของอากาศ ดังแสดงในรูป 9 และ 10 หลังจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ทำให้ได้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิเทียบกับปริมาตรของแต่ละช่วงเวลา และผลของการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับระยะเวลา



รูปที่ 9 การเกิดโพรงของ UCG [17]



รูปที่ 10 ลักษณะการตกของอนุภาคลงบนพื้นโพรงและการไหลภายในโพรง [17]

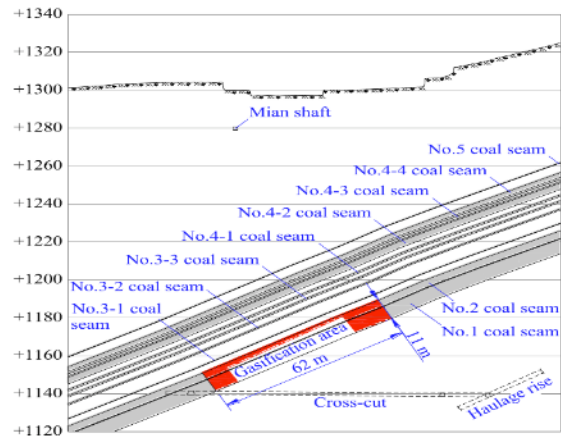
Kashyap และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าที่สูง (High ash coal) โดยตั้งสมมุติฐานว่า หากเคลื่อนย้ายหลุมเจาะ (Injection well) จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาของถ่านหินชนิดที่มีเถ้าสูงนั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเพียงใด ในการทดลองได้มีการแบ่งชุดทดลองออกเป็น 5 ชุด โดยชุดที่ 1 ถึง 4 จะเป็นการทำปฏิกิริยาแบบชั้นเดียว และชุดทดลองที่ 5 จะเป็นปฏิกิริยาแบบ 2 ชั้นตอน มีการใช้ออกซิโดซ์เซอร์ ที่แตกต่างกันในแต่ละชุดทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองที่ 1 และชุดทดลองที่ 2 จะใช้ออกซิเจน ชุดทดลองที่ 3 จะเป็นอากาศ ชุดทดลองที่ 4 จะเป็นออกซิเจนที่มีปริมาณความเข้มข้นสูง และในชุดทดลองที่ 5 จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบ 2 ชั้นตอน ผลจากการทดลองแสดงในตารางที่ 1 พบว่าชุดทดลองที่ 4 ให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด ซึ่งเป็นกรณีการฉีดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูง

ตารางที่ 1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง [18]

Experiment No.	Gasification agent	Average syngas calorific value (KJ/mol)
1	ออกซิเจน	153.9
2	ออกซิเจน	123.2
3	อากาศ	77.9
4	ออกซิเจนที่มีความเข้มข้น	192.9
5	คาร์บอน-ออกซิเจน	191.1

Huang และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน โดยนำก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยจุดประสงค์หลักของงานวิจัยคือ เพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีอิทธิพลต่อการฉีดและเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในระดับอุตสาหกรรม และเพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นของออกซิเจนและไอน้ำในตัวทำปฏิกิริยา (Gasification agent) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน และเพื่อศึกษาปัญหาของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหินใต้ดิน โดยได้เลือกสถานที่ในการทำการทดลองเป็นเหมืองถ่านหินที่ถูกทิ้งร้างแห่งหนึ่งในมณฑลกานซู สาธารณรัฐประชาชนจีน ในสถานที่ทดสอบคุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ได้ถูกนำมาวิเคราะห์พบว่ามีค่าองค์ประกอบของคาร์บอน (Fixed Carbon) ประมาณ 58.72 wt% และค่าความชื้นอยู่ที่ 8.79 wt% ซึ่งจากการสังเกตพบว่ามีปริมาณคาร์บอนที่ไม่ค่อยสูงมากอาจจะเป็นถ่านหินชนิดลิกไนต์ และสภาพเงื่อนไขทางธรณีวิทยาในสถานที่ทดสอบประกอบไปด้วยถ่านหิน 5 ชั้นโดยเรียงลำดับจากหมายเลข 5 (No.5) ถึงหมายเลข 1 (No.1) (ความหมาย No.4 คือประกอบด้วยถ่านหินจำนวน 4 ชั้น) โดยเรียงลำดับจากบนลงล่างด้วยระดับความลึกของเหมืองถ่านหินที่ 40-400 เมตร ถ่านหินที่อยู่ในระดับชั้นหมายเลข 1 (No.1) และหมายเลข 2 (No.2) ได้ถูกเลือกที่จะทำแก๊สซิฟิเคชัน แต่ระดับชั้นที่ 3 ถึง 5 ไม่ถูกเลือกเพราะมีระดับความหนาของชั้นที่ต่ำเกินไป (< 0.5 เมตร) แต่ถ่านหินในชั้นที่ 1 และ 2 มีระดับความหนาเฉลี่ยที่ 7-3.6 เมตร ตามลำดับ และทำมุมองศาที่ 28 องศา แต่ในระหว่างของชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะมีหินโคลน (Mudstone) หนา 0.5 เมตรขึ้นอยู่ระหว่าง 2 ชั้นนี้ แต่ก็จะนำรวมมาใช้ในการทำแก๊สซิฟิเคชันด้วยส่วนบนของถ่านหิน

ทั้งสองชั้นส่วนใหญ่ได้ประกอบด้วย ดินทรายละเอียด (Fine Sandstone) และโคลนเนื้อทราย (Sandy mudstone) และส่วนล่างของชั้นถ่านหินเป็นเนื้อของทรายปนหยาบละเอียด (Medium fine sandstone) ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณเหมืองถ่านหิน

[19]

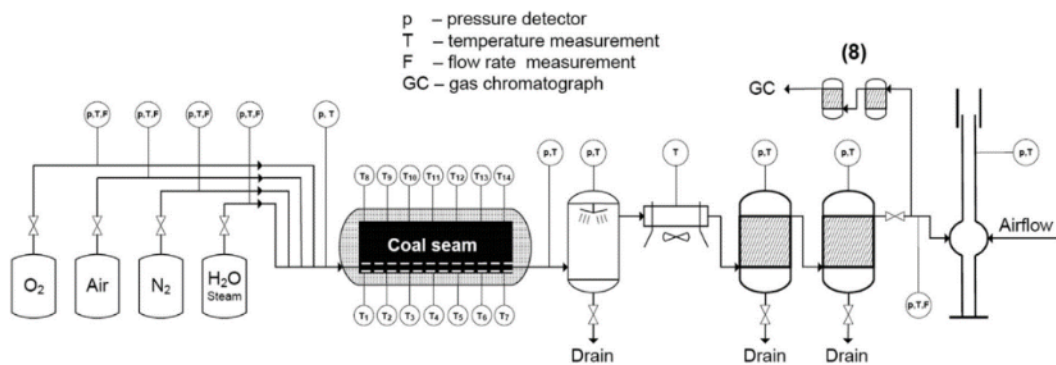
ตารางที่ 2 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลองของ Huang และคณะ [19]

Gasification process		Air flow (Nm ³ /h)	Steam flow (m ³ /h)	O ₂ flow (Nm ³ /h)	O ₂ concentration (vol%)
Air Gasification	Case 1 (A1)	3100-4400	-	-	-
	Case 2 (A2)	3300	-	-	-
		4400	-	-	-
		3300	-	-	-
Air Steam Gasification	Case 1 (AS1)	4000	356	-	-
	Case 2 (AS2)	3700	164	-	-
		2740	-	-	-
Oxygen enriched Gasification	32% O ₂	4400-4600	-	800	25-33
	33% O ₂	4400-4600	-	800	33
	35% O ₂	3400-4100	-	800	34-36
	36% O ₂	3400-3500	-	800	36
	37% O ₂	2900-3000	-	800	37
Oxygen enriched Steam Gasification	23% O ₂ -steam	4000-4200	136	82-199	22-25
	34% O ₂ -steam	2800-4100	132-1081	800	30-37
	39% O ₂ -steam	2300-3600	135-1486	800	33-52
	100% O ₂ -steam	-	800	800	100
Gasification with alternative injection	48% O ₂ + 48% O ₂ steam	1494	-	800	48
		1494	120-1500	800	48
		1494	-	800	48
	83% O ₂ + 83% O ₂ steam	220	0-1500	800	83
		220	-	800	83
		220	0-1500	800	83
		220	-	800	83

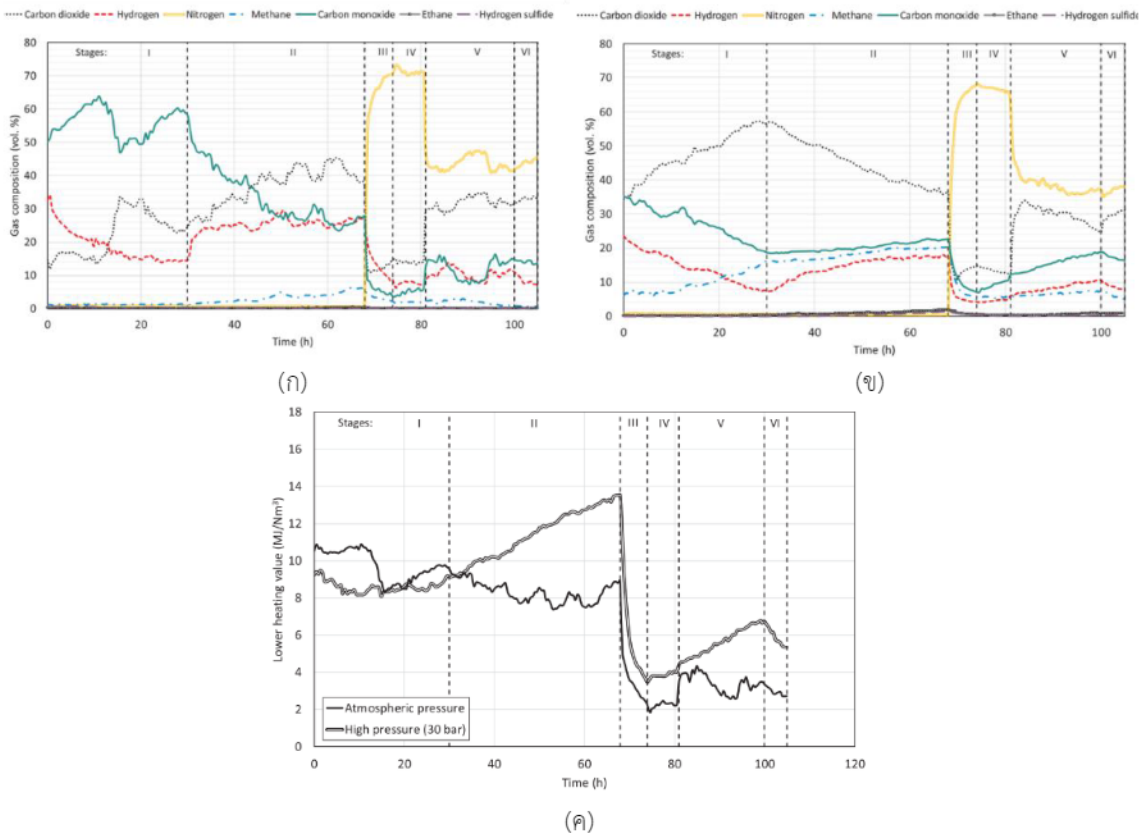
Huang ได้ออกแบบการทดลองออกเป็น 5 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มก็จะมีการทดลองย่อย ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 จากผลการศึกษาพบว่าค่าความร้อนของการทดลองที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเพียงอย่างเดียว (Air Gasification) มีค่าต่ำกว่าการทดลองที่มีการใช้ไอน้ำร่วม (Air Steam Gasification) แต่การทดลองที่มีการใช้ออกซิเจนเข้มข้น (Oxygen enriched Gasification) จะมีการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของก๊าซ บางชนิดเพิ่มขึ้น ได้แก่ CH₄, CO₂, CO, H และยังพบอีกว่าถ้าใช้ไอน้ำร่วมด้วย (Oxygen enriched Steam Gasification) จะทำให้ทั้งค่าความร้อนและองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้อากาศเพียงอย่างเดียว

Zagorščak และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาระบบการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินโดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองตามเงื่อนไขสภาวะความดัน ได้แก่ การทดลองกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินภายใต้ความดันบรรยากาศและกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินภายใต้สภาวะความดันสูงสำหรับการทดลองนี้ Zagorščak และคณะได้เลือกสภาวะความดันที่ 30 bar ซึ่งในแต่ละการทดลองจะแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนย่อยที่ต่อเนื่องกันโดยขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการใช้ออกซิเจน

ที่เป็นก๊าซออกซิเจน(O₂) เป็นระยะเวลาประมาณ 30 ชั่วโมง ต่อจากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการจ่ายก๊าซออกซิเจน (O₂) ร่วมกับไอน้ำเป็นระยะเวลา 38 ชั่วโมงหลังจากนั้นในขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 จะเป็นการจ่ายอากาศให้แก่ระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 13 ชั่วโมงในขั้นตอนที่ 5 จะเป็นการจ่ายออกซิเจนอิมิตัว 50% (OEA 50%) ให้แก่ระบบเป็นเวลา 19 ชั่วโมงและในขั้นตอนที่ 6 จะเป็นการจ่ายออกซิเจนอิมิตัว 50% ร่วมกับไอน้ำ (OEA 50% + Steam) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาอัตราการผลิตก๊าซในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน และ เพื่อศึกษาองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และหาค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกันและนำมาเปรียบเทียบผลโครงสร้างของเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันได้ถูกออกแบบมาให้ทนต่อความดันสูงสุดที่ 50 bar และทนต่ออุณหภูมิสูงสุดได้ที่ 1600 องศาเซลเซียสซึ่งมีขนาดความยาวสูงสุดที่ 3.5 m ขนาดด้านตัดขวางที่ 0.41 m x 0.41 m และออกซิแดนท์ ได้แก่ ไอน้ำ อากาศ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูงโดยมีองค์ประกอบของคาร์บอนที่ 87.31 wt%



รูปที่ 12 ไดอะแกรมของชุดทดลอง [20]



รูปที่ 13 กราฟแสดงผล Gas composition (ก) atmospheric gasification (ข) High pressure gasification (ค) Calorific values [20]

จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของแก๊สเป็นผลมาจากปัจจัยที่มีอิทธิพลหลายประการ เช่น สภาวะทางอุณหพลศาสตร์ ตลอดจนองค์ประกอบและอุณหภูมิของออกซิแดนท์ที่ใช้ ในช่วงที่มีการจ่ายออกซิเจนให้กับระบบกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สจะถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาคายความร้อนสูง ซึ่งเพิ่มอุณหภูมิของระบบและผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่มีความเข้มข้นสูง ความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูงของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ในระยะที่ 1 สามารถอธิบายได้บางส่วนผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับความชื้นของถ่านหินโดยธรรมชาติ ส่วนการผลิตก๊าซมีเทน (CH₄) เกิดจากปฏิกิริยา มีเทนเนชั่น (Methanation) เป็นหลัก อย่างไรก็ตามพบความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (CH₄) ที่ค่อนข้างสูงในการทดลองที่ความดันสูงเมื่อเทียบกับการทดลองที่ความดันบรรยากาศพบว่าก๊าซมีเทน (CH₄) มีค่า

ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า และเมื่อมีการจ่ายไอน้ำเข้าสู่ระบบในขั้นตอนที่สองพบว่าค่าของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และก๊าซมีเทน (CH₄) มีค่าเพิ่มขึ้นในทั้งสองการทดลอง แต่ในทางกลับกันองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กลับมีค่าลดลงเนื่องจากผลของปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่นและปฏิกิริยาการตัดด้วยน้ำ (Water gas shift reaction) ดังนั้นในการเพิ่มความร้อนให้แก่ก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการเพิ่มความดันให้แก่ระบบการผลิตแก๊สซิฟิเคชั่นมีนัยสำคัญในการเพิ่มองค์ประกอบก๊าซมีเทน (CH₄) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ แต่องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กลับไม่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่นภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศซึ่งพบว่ามีค่าองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่สูงกว่าแต่ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นที่ความดันสูงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของก๊าซ

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากระบบแก๊สซิทีเคชั่นที่ความดันบรรยากาศในช่วงที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบองค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจน (N₂) จะเพิ่มขึ้นสูงมากในองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ของทั้งสองการทดลองนั้นก็เพราะว่าอากาศนั้นมีก๊าซไนโตรเจน (N₂) เป็นองค์ประกอบหลักและก๊าซไนโตรเจน (N₂) ไม่ได้ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิทีเคชั่น

ในช่วงของการใช้ออกซิเจนเข้มข้นร่วมกับอากาศและออกซิเจนเข้มข้นและอากาศร่วมกับไอน้ำพบว่าค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกันอาจจะเป็นผลจากการที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนมากขึ้นในระบบและทำให้อุณหภูมิภายในระบบสูงขึ้นดังแสดงในรูป 13

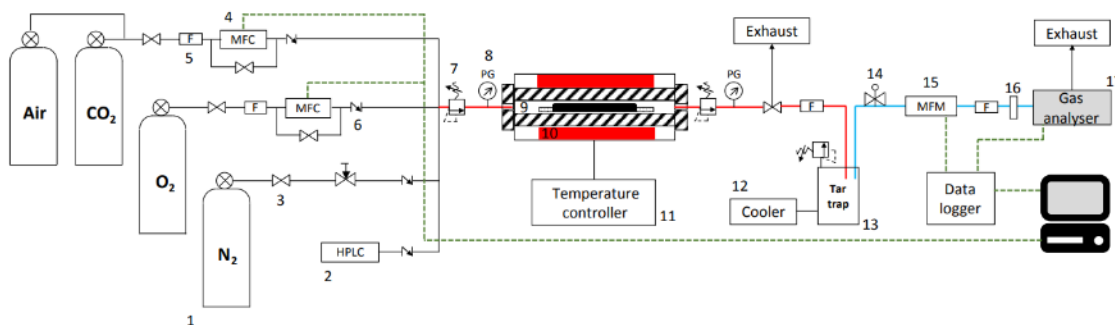


(ก)



(ข)

รูปที่ 14 ขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง (ก) ถ่านหินชนิด Semi anthracite (ข) ถ่านหินชนิด Bituminous [21]



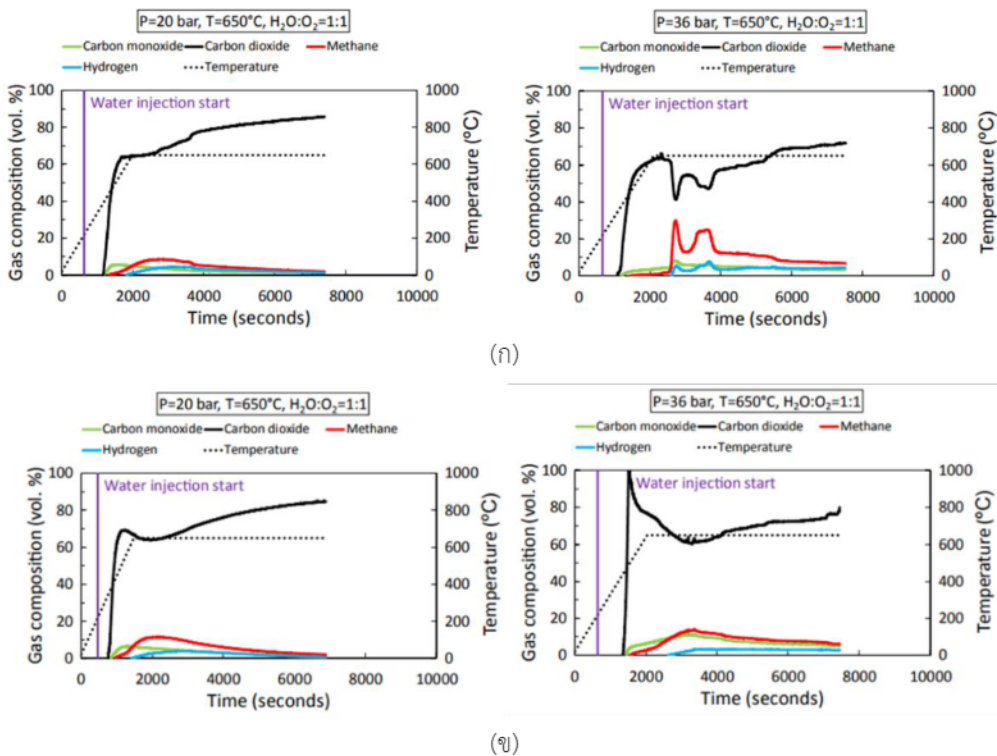
รูปที่ 15 ไดอะแกรมของชุดทดลอง [21]

Sadasivam และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนในองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบการแก๊สซิทีเคชั่นของถ่านหินใต้ดินซึ่งในการศึกษาได้เลือกใช้ถ่านหินที่มีคุณภาพสูงชนิด Semi anthracite นำมาจากเหมืองในประเทศอังกฤษ และ ถ่านหินคุณภาพที่ไม่สูงมากชนิด Bituminous นำมาจากเหมืองในประเทศโปแลนด์ โดยได้นำถ่านหินทั้งสองชนิดนี้มาตัดเป็นแท่งเล็ก ๆ ขนาดความยาว 5-10 cm และกว้างประมาณ 1.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้ถูกออกแบบมาให้มี

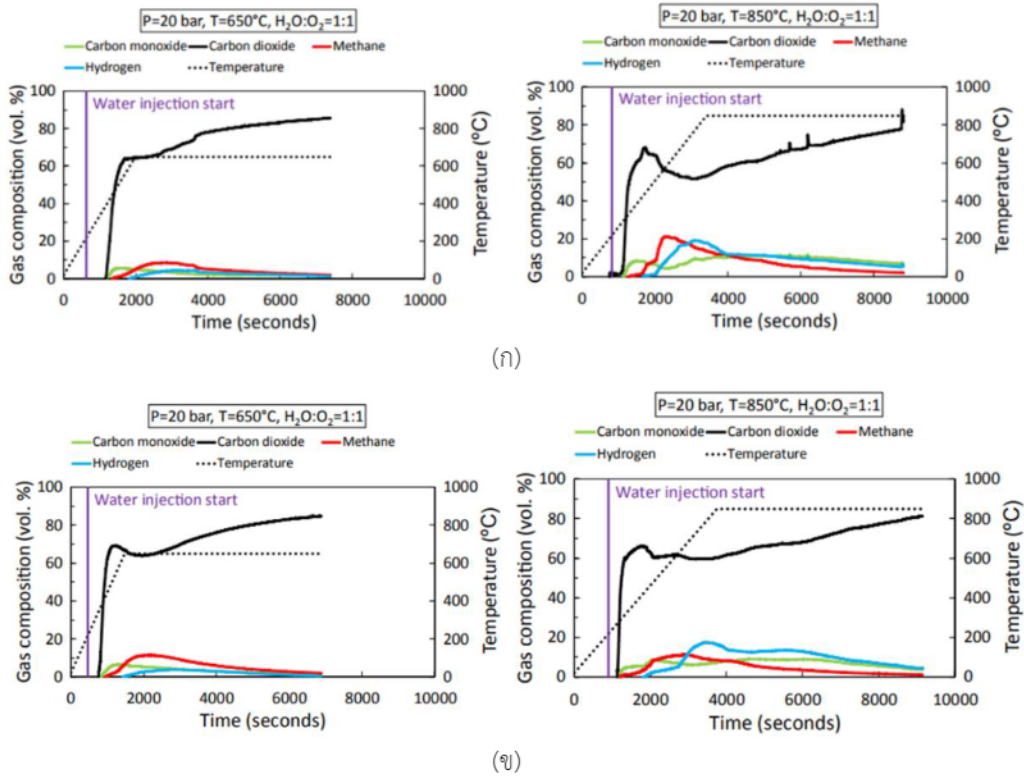
ขนาดที่เล็กและสามารถทนความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่ 50 bar และ 900°C ตามลำดับดังแสดงในรูป 15 ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองของถ่านหินทั้งสองชนิดๆ ละ 10 การทดลอง โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ ปัจจัยของความดันที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ จากการศึกษพบว่า การเพิ่มความดันให้แก่ระบบจะส่งผลให้องค์ประกอบของก๊าซบางชนิดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนเนื่องจากปฏิกิริยามีเทนเนชั่นและการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ ในทางกลับกันองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอน

มอนอกไซด์กลับไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญซึ่งอาจจะเป็นเพราะการเกิดการออกซิเดชันในถ่านหินนั้นมีความซับซ้อนมากกว่าการเกิดการออกซิเดชันกับคาร์บอนบริสุทธิ์เพราะว่าในถ่านหินนั้นมีองค์ประกอบของแร่ธาตุหลายชนิดซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้จะกลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเคมีและเกิดการไปรบกวนการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 16

ปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มของอุณหภูมิมิมีผลต่อการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน เพราะปฏิกิริยา ยานูดยาร์ดและปฏิกิริยา Steam gasification มักจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 16 (ก) แสดงอิทธิพลของความดันที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ในถ่านหินชนิด Semi anthracite
 (ข) แสดงอิทธิพลของความดันที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ในถ่านหินชนิด Bituminous [21]



รูปที่ 17 (ก) แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ในถ่านหินชนิด Semi anthracite
 (ข) แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ในถ่านหินชนิด Bituminous [21]

ตารางที่ 3 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลองของ Sadasivam และคณะ [21]

Test No.	Temperature (°C)	Pressure (bar)	O ₂ flow rate (L/min)	H ₂ O flow rate (L/min)	H ₂ O:O ₂ molar ratio
1	650	20	0.4	0.3	1:1
2	650	20	0.4	0.6	2:1
3	850	20	0.4	0.3	1:1
4	850	36	0.4	0.6	2:1
5	650	36	0.7	0.53	1:1
6	650	36	0.7	1.05	2:1
7	850	36	0.7	0.53	1:1
8	850	36	0.7	1.05	2:1
9	750	20	0.4	0.6	2:1
10	750	36	0.7	1.05	2:1

ตารางที่ 4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน

ผู้วิจัย (ปี)	จุดประสงค์ของงานวิจัย	วิธีการศึกษา	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	Gasification agent	ผลจากการศึกษา	เงื่อนไขการทดลอง
Sateesh Daggupati และ คณะ (2011) [14]	ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรง (Cavity) ระหว่างการพ่นแบบแนวนอน (Horizontal Injection) และการพ่นแบบแนวตั้ง (Vertical Injection)	Simulations & Experiments	Nitrogen gas ,Helium gas	Oxygen	จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการไหลแบบแนวนอนส่งผลต่อการขยายตัวของโพรงสาเหตุทำให้เกิดการกระจายตัวในทุกทิศทาง	Velocity inlet: 4 m/s Cavity temperature: 1273 K Outlet pressure: 5 atm
Lin Xin และคณะ (2019) [15]	ศึกษาการขยายตัวและการก่อตัวของโพรง (Cavity) ในช่วงระยะเริ่มต้นของกระบวนการเผาไหม้	Experiments	Coal (Anthracite)	Oxygen	ในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้นั้นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดจะมีขนาดของโพรงที่ใหญ่ตามากด้วย	O ₂ flow rate: 0.4 (L/min)
Ranjeet Mandal และคณะ (2020) [16]	ศึกษาพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันตามเวลาจริงของ UCG	Experiments	Coal	Oxygen, Steam	ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของแต่ละตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริงในเวลาสั้น ๆ	O ₂ flow rate: 1-5 (L/min) Stream feed: Pulse Value
Ganesh Samdani และ คณะ (2016) [17]	ศึกษาการขยายตัวของโพรง (Cavity) โดยสนใจพฤติกรรมการของอนุภาคที่ตกลงมาสู่ด้านล่างของโพรง (Cavity) ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเตา	Simulations & Experiments	Coal	Oxygen, Steam	อนุภาคขนาดเล็กที่ร่วงหล่นลงชั้นด้านล่างของเตามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน	Stream/O ₂ ratio: 3.57 Molar flow rate: 3.2x10 ⁻³ kmol/m ² s
Swarnotpal Kashyap และ คณะ (2019) [18]	ศึกษาลักษณะการพ่น (Injection well) แบบเคลื่อนที่และแปรเปลี่ยนไปตามระยะเวลา จะส่งผลในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ในถ่านหินที่มีปริมาณแก๊สสูงได้	Experiments	Coal	Oxygen, Carbon dioxide, Air, Humidified Oxygen	การฉีดพ่นแบบจุดเคลื่อนที่เป็นวิธีที่ดีกว่าในการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับการฉีดพ่นแบบจุดคงที่	O ₂ flow rate: 1 (L/min), Air flow rate: 1 (L/min), Humidified O ₂ flow rate: 1 (L/min)
Huang และคณะ (2021) [19]	ศึกษาอิทธิพลของก๊าซออกซิเจน (O ₂) ล้อน้ำ (Steam) ที่ส่งผลต่อกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	Experiments	Coal	Oxygen, Steam, Air	ออกซิเจน (O ₂) และล้อน้ำ (Steam) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซผลิตภัณฑ์ได้ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าความร้อนและองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น	Unsteady Injection & Pulse Injection Air flow: 3100-4400 (Nm ³ /h), Steam flow: 132, 1500 (m ³ /h), O ₂ flow: 82-800 (Nm ³ /h)

ตารางที่ 4 (ต่อ) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน

ผู้วิจัย(ปี)	จุดประสงค์ของงานวิจัย	วิธีการศึกษา	วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	Gasification agent	ผลจากการศึกษา	เงื่อนไขการทดลอง
Zagorišćak และคณะ(2020) [20]	ศึกษาอิทธิพลของความดันที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	Experiments	Coal	Oxygen, Steam, Air	ความดันมีผลต่ออัตราการเกิดของก๊าซผลิตภัณฑ์ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ความดันสูงจะให้อัตราการเกิดก๊าซที่เสถียรและองค์ประกอบของก๊าซบางชนิดจะเกิดได้มากขึ้น	Atmospheric pressure High pressure (30 bar) O ₂ flow rate: 5 (Nm ³ /h), water flow rate: 2.5 (Nm ³ /h), Air flow rate: 6, 10 (Nm ³ /h)
Sadasivam และคณะ(2020) [21]	ศึกษาอิทธิพลของชนิดถ่านหินที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะความดันสูง ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	Experiments	Coal (Semi anthracite), Coal (Bituminous)	Mixtures of O ₂ ,H ₂ O	ผลของความดันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและส่งผลให้องค์ประกอบของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น และการเพิ่มจำนวนโมเลของไอน้ำที่ออกซิเจนสามารถเพิ่มองค์ประกอบของก๊าซมีเทน	Pressure: 20, 36 (bar), Temperature: 650, 750, 850 (°C), O ₂ flow rate: 0.4, 0.7 (L/min), H ₂ O flow rate: 0.3, 0.53, 0.6, 1.05 (mL/min),

ตารางที่ 5 โรงงานผลิตก๊าซจากถ่านหินในต่างประเทศ [22]

Country	Project name	Agent injection
Soviet Union	Ergo exergy	Air
	Geer	Air
	Krumlov	Air
	Lehizensk	Air
	Moscow suburbs	Air
	Maas Mine	Air
USA	High Vegas	Air
	North Wyoming	Air
	Chinchilla, Queensland	Air
China	Xinhe, Xuzhou	Oxygen-enriched vapor, Air
	Liuzhuang, Hebei	Oxygen-enriched vapor
	Feicheng, Shandong	Air
	Xiyang, Xinwen	Air
	Suncun, Xinwen	Oxygen-enriched vapor
	Huating, Shanxi	Oxygen-enriched vapor

5. ศักยภาพการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินไปใช้งาน

5.1 การนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินไปใช้จริง

ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดของการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินไปใช้จริง ซึ่งได้แก่ประเทศที่เคยอยู่ในกลุ่มสหภาพโซเวียต สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย และจีน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้อากาศเป็นออกซิแดนท์ มีเฉพาะประเทศจีนที่ใช้ออกซิเจนร่วมกับไอน้ำเป็นต้น

5.2 ต้นทุนต่อหน่วยพลังงาน

จากการศึกษาการเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่เป็นที่ยอมรับใช้ปัจจุบัน ได้แก่ Underground Coal Combined Cycle (UCGCC), Pulverized Coal plant (PC), Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) และเทคโนโลยี Natural Gas Combined Cycle (NGCC) ตามที่ได้แสดงในตารางที่ 6 พบว่า UCGCC ต้นทุนต่อพลังงานเทียบเท่า NGCC และยิ่งต่ำกว่า IGCC โดยภาพรวมแล้วพบว่าต้นทุนต่อหน่วยพลังงานของแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินอยู่ในระดับเดียวกับวิธีอื่น ๆ

ตารางที่ 6 ราคาต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้า [23]

Method	Cost (\$/MWh)
UCGCC	48
PC	45-60
IGCC	100
NGCC	48

5.3 ความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินมาใช้ในประเทศไทย

จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีพบว่าแอ่งถ่านหินในภาคใต้ของประเทศไทย [1] ได้แก่แอ่งกระบี่ที่จังหวัดกระบี่ และแอ่งสินปุนที่จังหวัดนครศรีธรรมราช มีความลึกที่เหมาะสมแก่การทำ UCG

6. สรุปข้อดีของการเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน

1. การศึกษาพบว่าเทคโนโลยีการผลิตก๊าซจากถ่านหินใต้ดิน (UCG) นั้นเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับชุมชนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะการทำ UCG นั้นไม่มีการรบกวนที่ของชาวบ้านเพื่อขอเปิดหน้าดินทำเหมือง และไม่ต้องมีการฟื้นฟูเพราะไม่มีการเปิดหน้าดินและการทำลายป่าไม้ และใช้พื้นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทำเหมืองแบบเปิดหน้าดิน

2. การศึกษาพบว่าการผลิตก๊าซจากกระบวนการ UCG นั้นมีการปล่อยมลพิษที่น้อยกว่าการนำถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์โดยวิธีการอื่นเพราะในระหว่างกระบวนการนั้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกักเก็บไว้ในชั้นใต้ดินและเมื่อก๊าซผลิตภัณฑ์ขึ้นมาสู่ข้างบนแล้วเรายังสามารถทำความสะอาดก๊าซได้ง่ายอีกด้วย และยังช่วยลดมลพิษทางน้ำ เพราะไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดหรือล้างถ่านหินก่อนเข้าสู่เตาแก๊สซิฟิเคชัน

3. การศึกษาพบว่าต้นทุนในการผลิตก๊าซจากกระบวนการ UCG นั้นต่ำกว่ากระบวนการอื่น ๆ ในกรณีที่ถ่านหินนั้นอยู่ในระดับความลึกมาก ๆ เพราะการทำ UCG ไม่จำเป็นต้องเปิดหน้าดิน และลดภาระของการจ้างแรงงาน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตก๊าซต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้เศรษฐกิจและสาธารณสุขป็นภาคพื้นฐาน ราคาต้นทุนลดลงด้วย เช่น ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

4. การศึกษาพบว่าก๊าซที่ผลิตได้จากกระบวนการ UCG นั้นง่ายและสะดวกเพราะก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะถูกขนส่งผ่านทางท่อและสามารถส่งไปยังผู้ใช้ปลายทางได้โดยตรง

7. สรุป

จากที่ได้ทบทวนเอกสารงานวิจัยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ (UCG) สามารถสรุปประเด็นที่น่าสนใจดังนี้

1. โครงสร้างของ UCG ประกอบด้วย หลุมฉีดออกซิเจน (Injection well) ชั้นถ่านหิน (Coal seam) ส่วนที่อยู่เหนือชั้นถ่านหิน (Overburden) และหลุมผลิตภัณฑ์ (Production well)

2. กระบวนการเกิด UCG คล้ายกับกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป ประกอบด้วย การไล่ความชื้น (Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) การเผาไหม้ (Combustion zone, Oxidation zone) การทำให้เป็นแก๊ส (Gasification zone)

3. คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าสูง (High ash coal) เมื่ออุณหภูมิในโพรงเผาไหม้สูงมาก จนทำให้เถ้าเกิดการละลายและไปจับตัวกันบริเวณปลายหลุมผลิตภัณฑ์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาลดลง

- เชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูง (Moisture) ปริมาณความชื้นของถ่านหินจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของแก๊สผลิตภัณฑ์ได้

- เชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (Fix carbon) ปริมาณคาร์บอนที่สูงจะส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้ดีขึ้น

4. Gasification agent ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ จากการศึกษาพบว่า ไอน้ำร่วมกับออกซิเจนจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้มีคุณภาพสูง

5. ลักษณะการพ่นออกซิเจนในโพรง UCG พบว่า การพ่นออกซิเจนทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของโพรงได้ดีกว่าการพ่นแบบราบเรียบ

7. อิทธิพลของอนุภาคที่ร่วงลงมาสู่พื้นของโพรง จากการศึกษาพบว่าอนุภาคเหล่านี้เป็นตัวช่วยสะสมความร้อนภายในโพรง ซึ่งจะช่วยรักษาระดับของอุณหภูมิภายในโพรง ทำให้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

8. แหล่งถ่านหินแอ่งกระบี่ จังหวัดกระบี่ และแอ่งสินปุน จังหวัดนครศรีธรรมราช มีความลึกที่เหมาะสมแก่การทำ UCG

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชาย พุ่มอิม, และ เฉลิมเกียรติ ปลายทอง, "การพัฒนาการใช้เทคโนโลยีที่สะอาดกับถ่านหินในประเทศไทย," Symposium on Mineral, Energy, and Water Resources of Thailand, 2543, หน้า 341-345.
- [2] ALL Power Labs, "How Gasification Works: The Basics Explained," allpowerlabs.com, Sep. 7, 2009. [Online]. Available: <http://www.allpowerlabs.com/gasification-explained>. [Accessed: Mar. 12, 2019].

- [3] K. Smuts, “Monetising of South Africa’s economically unmineable coal highlighted,” Mining Weekly. [Online]. Available: <https://www.miningweekly.com>. [Accessed: 28-Apr-2022].
- [4] N. (Norbert) Berkowitz, An introduction to coal technology. Academic Press, 1979.
- [5] A. K. Biswas, W. Sukswan, K. Phoungthong, and M. Wae-hayee, “Effect Of Equivalent Ratio (ER) On the Flow and Combustion Characteristics in A Typical Underground Coal Gasification (UCG) Cavity,” Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 86, no. 2, Aug., pp. 28–38, 2021.
- [6] S. J. Self, B. V. Reddy, and M. A. Rosen, “Review of underground coal gasification technologies and carbon capture,” International Journal of Energy and Environmental Engineering, vol. 3, no. 1, Aug., pp. 1–8, 2012.
- [7] E. A. Burton, R. Upadhye, and S. J. Friedmann, “Best Practices in Underground Coal Gasification,” Dec. 2019.
- [8] A. Beath, S. Craig, A. Littleboy, R. Mark, and C. Mallett, “Underground coal gasification: evaluating environmental barriers,” Kenmore, Queensland, Australia, CSIRO Exploration and Mining Report, Aug., 2004.
- [9] M. Seifi, Z. Chen, and J. Abedi, “Numerical simulation of underground coal gasification using the CRIP method,” The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 89, no. 6, Dec., pp. 1528–1535, 2011.
- [10] A. W. Bhutto, A. A. Bazmi, and G. Zahedi, “Underground coal gasification: From fundamentals to applications,” Progress in Energy and Combustion Science, vol. 39, no. 1, Feb., pp. 189–214, 2013.
- [11] G. Perkins, “Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling,” Progress in Energy and Combustion Science, vol. 67, pp. 234–274, 2018.
- [12] S. Lee, J. G. Speight, and S. K. Loyalka, Handbook of alternative fuel technologies. 2nd ed., U.S.: CRC Press, 2015.
- [13] S. M. Elahi, M. Nassir, and Z. Chen, “Effect of various coal constitutive models on coupled thermo-mechanical modeling of underground coal gasification,” Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 154, Jun., pp. 469–478, 2017.
- [14] S. Daggupat, N. Ramesh, Mandapati, M. Mahajani Sanjay, A. Ganesh, A.K. Pal, R.K. Sharma, P. Aghalayam, “Compartment Modeling for flow characterization of Underground Coal Gasification Cavity,” Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 50, pp. 277-290, 2011.
- [15] L. Xin, J. Li, J. Xie, C. Li, L. Han, M. An, M. Xu, Z. Wang, “Simulation of Cavity Extension Formation in the Early Formation in the Early Ignition Stage Based on a Coal Block Gasification Experiment,” Journal of energy Resources Technology., Vol.142, no.6, Jun., 2020.
- [16] R. Mandal, T. Maity, S.K. Chaulya, G.M. Prasad, “Laboratory investigation on Underground Coal Gasification Technique with real-time analysis,” Fuel. vol. 275, Sep., 2020.
- [17] G. Samdani, P. Aghalayam, A. Ganesh, R. K. Sapru, B. L. Lohar, and S. Mahajani, “A process model for Underground Coal Gasification – Part I : Cavity growth,” Fuel, vol. 181, Oct., pp. 690-703, 2016.

- [18] S. Kashyap and P. Vairakannu, "Movable injection point-based syngas production in the context of underground coal gasification," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no. 5, Apr., pp. 3574–3586, 2020.
- [19] W. gang Huang, Z. tang Wang, T. hong Duan, and L. Xin, "Effect of oxygen and steam on gasification and power generation in industrial tests of underground coal gasification," *Fuel*, vol. 289, Apr., pp. 119855, 2021.
- [20] R. Zagorščak, S. Sadasivam, H. R. Thomas, K. Stańczyk, and K. Kapusta, "Experimental study of underground coal gasification (UCG) of a high-rank coal using atmospheric and high-pressure conditions in an ex-situ reactor," *Fuel*, vol. 270, Jun., pp. 117490, 2020.
- [21] S. Sadasivam, R. Zagorščak, H. R. Thomas, K. Kapusta, and K. Stańczyk, "Experimental study of methane-oriented gasification of semi-anthracite and bituminous coals using oxygen and steam in the context of underground coal gasification (UCG): Effects of pressure, temperature, gasification reactant supply rates and coal rank," *Fuel*, vol. 268, May., pp. 117330, 2020.
- [22] F. Mao, "Underground coal gasification (UCG): A new trend of supply-side economics of fossil fuels," *Natural Gas Industry B*, vol. 3, no. 4, Oct., pp. 312–322, 2016.
- [23] P. Pei, K. Barse, and J. Nasah, "Competitiveness and cost sensitivity study of underground coal gasification combined cycle using lignite," *Energy Fuels*, vol. 30, no. 3, pp. 2111–2118, 2016.

ภาคผนวก ค.

(วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์, อาคม ปะหลามานิต, มุस्ताฟา ยะภา, มัगतาร์ แวะหะยี้. “การศึกษาพฤติกรรม การสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ ดิน” งานประชุมวิชาการ การถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและ กระบวนการ ครั้งที่ 21, 10 – 11 มีนาคม 2565 จังหวัดเชียงราย ประเทศไทย.)

การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน

STUDY OF THERMAL DECOMPOSITION BEHAVIOR OF COAL FROM MAEMOH MINING FOR UNDERGROUND COAL GASIFICATION PROCESS

วัชรภัทร วัฒนาศรีโรจน์

มักตาร์ แวหะยี*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

*E-mail: wmakatar@eng.psu.ac.th

อาคม ปะหลามานิต

หลักสูตรเทคโนโลยีพลังงาน

สาขาวิชาวิศวกรรมเฉพาะทาง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

มูस्ताฟา ยะกา

สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง

คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นตัวอย่างถ่านหินจากระดับความลึก 1000 และ 1300 เมตร การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของตัวอย่างถ่านหินดำเนินการแบบ Thermogravimetric analysis (TGA) และ Derivative thermogravimetry (DTG) โดยใช้เครื่อง TA Instruments ทดสอบภายใต้ความดันบรรยากาศโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราให้ความร้อน 20 °C/min ในช่วงอุณหภูมิ 50-1000 °C ผลการศึกษาพบว่าถ่านหินจากระดับความลึกดังกล่าวมีพฤติกรรมการสลายตัวที่ค่อนข้างต่างกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ การสลายตัวของถ่านหินเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 300-600 °C เป็นหลัก หลังอุณหภูมิช่วงนี้การสลายตัวยังคงเกิดขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น แต่อัตราการสลายตัวมีค่าลดลง พฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินและมวลของถ่านหินที่คงเหลือหลังเสร็จสิ้นกระบวนการมีความสอดคล้องกับองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านหิน ดังนั้นผลจากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลสนับสนุนการศึกษาระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน ต่อไป

คำสำคัญ :เทอร์โมกราวิเมตริก , ถ่านหิน, แอ่งถ่านหินแม่เมาะ, แก๊สเชื้อเพลิง

Abstract

This research studied the thermal decomposition behavior of coals obtained from Maemoh mining, Lampang Province. These coals were collected from different depths at 1000 and 1300 m. The thermal decomposition of coal samples was observed via thermogravimetric analysis (TGA) and derivative thermogravimetry (DTG) methods. The observation was performed under nitrogen carrier gas at atmospheric pressure with flow rate of 40 mL/min, heating rate of 20 °C/min and temperature range of 50-1000 °C. The results showed that the coal from such levels had relatively different thermal decomposition behavior at each temperature range. The main thermal decomposition of coals occurred at temperature range of 300-600 °C. After this range, the decomposition of coals was still occurred with low decomposition rate. The thermal decomposition behavior and remaining mass of coal samples after heating was consistent with coal components as revealed by proximate analysis. Therefore, these results will support the further studies of underground coal gasification.

Keywords: Coal, Gasification, Maemoh mine, Thermogravimetric analysis, Syngas

1. บทนำ

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแข็งซึ่งมีบทบาทต่อระบบพลังงานโลกมาตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกยังนิยมใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิต

ความร้อนและผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากมีปริมาณอยู่มาก ต้นทุนต่ำ และเผาไหม้ได้ง่าย อีกทั้งยังมีปริมาณสำรองมาก ซึ่งได้มีการประมาณไว้ว่าถ่านหินสามารถนำมาใช้ได้อีกประมาณ 150-200 ปี จากแหล่งถ่านหินที่กระจายอยู่ทั่วโลก จุดเด่นของถ่านหินสำหรับการใช้เป็น

แหล่งพลังงาน คือ มีความหนาแน่นพลังงานค่อนข้างสูง จัดเก็บและขนส่งได้ง่าย และมีราคาที่ไม่ค่อยความผันผวน หากเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ด้วยข้อเด่นดังกล่าวนี้ ถ่านหินจึงนิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตกำลังไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าฐานขนาดใหญ่ และใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนในหลายๆ อุตสาหกรรม จากรายงานสถานการณ์พลังงานโลก พบว่า มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้ามากถึงร้อยละ 40 แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานในปริมาณมากเกินไปได้ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอย่างมีนัยสำคัญ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นปัญหาหลักจากปริมาณก๊าซ CO₂ ในชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงถ่านหินยังก่อให้เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ เช่น ฝุ่น (PM) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งก๊าซเหล่านี้และฝุ่นไม่ดีต่อสุขภาพของมนุษย์และสภาพแวดล้อม นอกจากนี้อาจจะเกิดความเสียหายการปนเปื้อนจากโลหะหนัก เช่น ไอปรอท [1, 2] ได้เช่นกัน

การจัดการปัญหาดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ด้วยกระบวนการควบคุมหรือการกำจัด โดยการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมและทันสมัย ร่วมกับการใช้มาตรการต่างๆ ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลเป็นที่ยอมรับในระดับสากล ในปัจจุบัน การพัฒนาด้านเทคโนโลยีของเชื้อเพลิงถ่านหินและการเผาไหม้ รวมทั้งระบบบำบัดไอเสีย ได้มีการศึกษาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้การใช้เชื้อเพลิงถ่านหินส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดหรือไม่ส่งผลกระทบต่อ เทคโนโลยีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือ เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) ซึ่งสามารถแบ่งตามสภาพของการนำถ่านหินไปใช้ ดังนี้ [3]

1. ในรูปของแข็ง ได้แก่ การเพิ่มคาร์บอนในถ่านหิน (Carbonization) การผลิตถ่านโค้ก (Coke manufacture) และการทำถ่านหินอัดก้อน (Briquette)

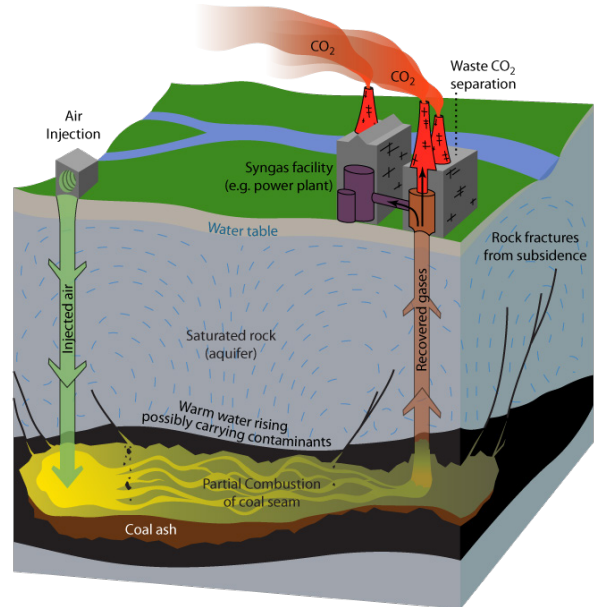
2. ในรูปของเหลว ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงจากถ่านหินผสมน้ำ (Coal water mixture) และการกลั่นถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Coal Liquefaction)

3. ในรูปของก๊าซ ได้แก่ การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน (Coal gasification)

จากเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดที่กล่าวมาข้างต้น การทำให้ถ่านหินกลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันกำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ขบลงทุนไม่มากเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ และก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthesis gas or syngas) ที่ได้จากกระบวนการนี้ ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ ซึ่งเกิดเป็นก๊าซไอเสียที่มีองค์ประกอบดีกว่าไอเสียที่เกิดจากเชื้อเพลิงถ่านหินรูปแบบอื่น นอกจากนี้ ยังมีเทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่อยู่ใต้ดิน (Underground coal gasification: UCG) โดยตรง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เนื่องจากไม่ต้องทำเหมืองถ่านหิน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน มีหลักการเหมือนกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป แต่ส่วนที่แตกต่างกันคือ

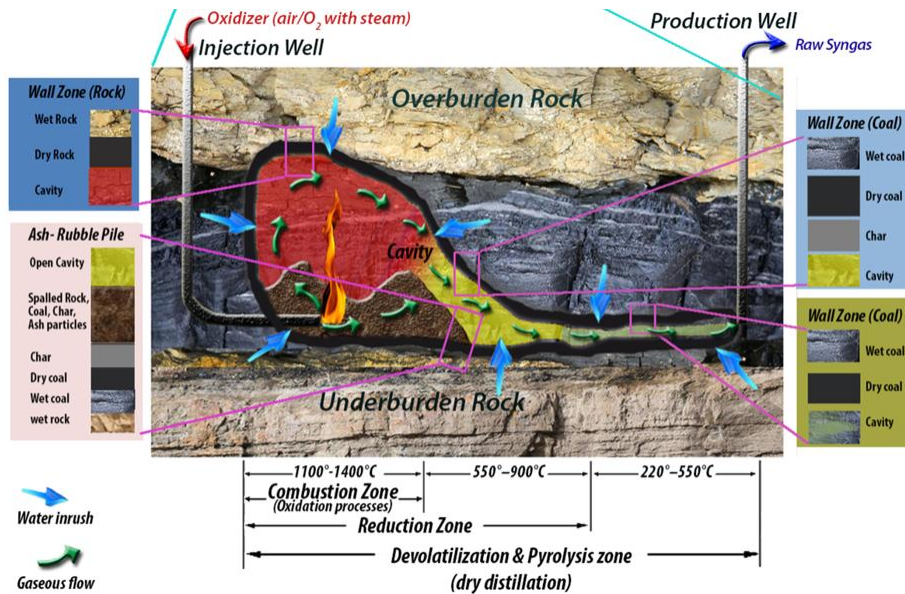
ไม่มีการทำเหมืองเพื่อขุดถ่านหินขึ้นมาบนผิวดิน ก๊าซทำให้ถ่านหินกลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงใช้วิธีจ่ายหรือบ้อนออกซิไดเซอร์ (อากาศ ไอน้ำ หรือ ออกซิเจน) และความร้อนลงไปในพื้นที่ถ่านหินที่อยู่ใต้ดินโดยตรง เพื่อให้ทำให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหิน จากนั้นส่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Syngas) ขึ้นมาบนดินเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป [4-9] ตัวอย่างลักษณะของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบของโรงผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน [10]

องค์ประกอบของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินประกอบด้วย ดังนี้ [10]

1. หลุมเจาะหรือหลุมฉีด (Injection well) มีหน้าที่ในการฉีดออกซิแดนท์ (Gasification agent) เข้าไปทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับถ่านหินที่อยู่ใต้ดิน ซึ่งเดิมที่ตัวออกซิแดนท์จะเป็นอากาศ แต่ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ออกซิแดนท์ที่หลากหลาย ได้แก่ ออกซิเจน (Oxygen) ไอน้ำ (Steam) หรือออกซิเจนผสมกับไอน้ำ (Oxygen and Steam) เข้าไปพร้อมกันเพื่อเพิ่มค่าความร้อนให้กับก๊าซเชื้อเพลิง (Syngas)
2. ชั้นถ่านหิน (Coal seam) ทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อออกซิแดนท์ไหลเข้าไปและเริ่มมีการเผาไหม้เพื่อกำเนิดความร้อน และทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสามช่วงที่เกิดการพร้อมกัน
3. ส่วนที่อยู่เหนือชั้นของถ่านหิน (Overburden) เป็นชั้นดินและชั้นหินที่อยู่เหนือถ่านหินทำหน้าที่ในการกักตุนและสร้างสภาพแรงดันใต้ดิน
4. หลุมผลิตภัณฑ์ (Production well) ทำหน้าที่ในการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันขึ้นมาจากใต้ดิน



รูปที่ 2 กระบวนการแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน [11]

รูปที่ 2 แสดงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน ก๊าซหรือสารตัวกลางที่ทำหน้าที่ออกซิเดนต์ซึ่งอาจจะเป็นอากาศ ไอน้ำ หรือ ออกซิเจน ถูกป้อนเข้าจากท่อด้านบนเพื่อให้ไหลลงสู่โพรงของถ่านหินด้านล่าง จากนั้นทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับถ่านหิน และสร้างเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Syngas) ขึ้นมาบนผิวดิน [12-16] สำหรับปฏิกิริยาย่อยของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นคล้ายกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป ดังนี้

1. การอบแห้งหรือลดความชื้น (Drying)
2. การไพโรไลซิส (Pyrolysis)
3. การออกซิเดชัน (Oxidation)
4. การเกิดแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

จากกระบวนการย่อยที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นต้องทำความเข้าใจพฤติกรรมของการสลายตัวของถ่านหินด้วยความร้อน เพื่อใช้ในการศึกษาและประยุกต์ใช้กับแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรม

การสลายตัวของถ่านหินด้วยความร้อนภายใต้สภาวะของก๊าซเฉื่อย โดยใช้ตัวอย่างถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ ซึ่งเป็นตัวอย่างถ่านหินจากระดับความลึก 1000 และ 1,300 เมตร สำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ถ่านหินดังกล่าวกับระบบแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน ต่อไป

2. วิธีการวิเคราะห์

2.1 ตัวอย่างถ่านหิน

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างถ่านหินที่ได้จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นตัวอย่างถ่านหินจากระดับความลึก 1000 และ 1,300 เมตร ตัวอย่างถ่านหินดังกล่าวถูกนำมาบดให้ละเอียดขนาด 300 ไมโครเมตร สำหรับการนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบละเอียด (Ultimate analysis) องค์ประกอบแบบประมาณการ (Proximate analysis) และการสลายตัวด้วยความร้อนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด



(ก) ระดับความลึก 1000 เมตร



(ข) ระดับความลึก 1,300 เมตร

รูปที่ 3 ตัวอย่างถ่านหิน

2.2. วิธีการวิเคราะห์

ตัวอย่างถ่านหินที่เตรียมถูกส่งไปวิเคราะห์ที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับการวิเคราะห์หาคาร์บอนประกอบแบบละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ดำเนินการโดยใช้ CHNS/O Analyzer การวิเคราะห์หาคาร์บอนประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ใช้เครื่อง Micro TGA ผลการวิเคราะห์จากส่วนนี้รายงานอยู่ในรูปของร้อยละโดยน้ำหนัก (As received basis) การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของถ่านหินด้วยความร้อนใช้วิธีการติดตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือมวลของตัวอย่างด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) โดยใช้เครื่อง TA Instruments รุ่น TGA 8000, Perkin Elmer, USA ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ซึ่งมีอัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความร้อนแบบอัตราความร้อนคงที่ (Constant heating rate) 20 °C/min

3. ผลการวิเคราะห์

3.1 องค์ประกอบของถ่านหิน

ในการศึกษาที่กำหนดให้สัญลักษณ์ A และ B แทนตัวอย่างถ่านหินจากระดับความลึก 1000 และ 1300 เมตร ตามลำดับ (เดิมที่ใช้อักษร K สำหรับถ่านหินจากความลึก 1000 m และอักษร Q สำหรับถ่านหินจากความลึก 1300 m) ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์หาคาร์บอนประกอบของตัวอย่างถ่านหินแบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบละเอียด (Ultimate analysis) การวิเคราะห์หาคาร์บอนประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuels) แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์หาคาร์บอนประกอบโดยรวมของเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณความชื้น ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า เพื่อประเมินศักยภาพสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการเผาไหม้หรือกระบวนการอื่นๆ เช่น แก๊สซิฟิเคชัน และไพโรไลซิส ผลการวิเคราะห์ พบว่า ถ่านหิน A และ B มีองค์ประกอบของส่วนที่เผาไหม้ได้ ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนคงตัว และสารระเหย แตกต่างกัน ปริมาณของคาร์บอนคงตัวในถ่านหิน A (33.07%) ต่ำกว่าถ่านหิน B (39.71%) ในขณะที่ปริมาณสารระเหยของถ่านหิน A (42%) สูงกว่าถ่านหิน B (35.68%) ผลนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านหิน A มีแนวโน้มที่จะให้ปริมาณหรือปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากกว่าถ่านหิน B ตามปริมาณของสารระเหยที่มีอยู่ แต่อย่างไรก็ตามในเชิงองค์ประกอบทั้งปริมาณและคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ซึ่งโดยปกติประกอบด้วย CO₂, CO, CH₄, H₂ และ C_xH_y นั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนคงตัวและสารระเหย รวมทั้งสถานะหรือเงื่อนไขของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของถ่านหิน

องค์ประกอบ	ความลึก (m)	
	1000	1,300
Proximate analysis	% โดยน้ำหนัก	
ความชื้น (Moisture)	13.17	18.60

คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	33.07	39.71
สารระเหย (Volatile matter)	42.00	35.68
เถ้า (Ash)	11.77	6.01

Ultimate analysis	% โดยน้ำหนัก	
คาร์บอน (C)	48.65	55.31
ไฮโดรเจน (H)	4.17	4.55
ออกซิเจน (O)	31.51	24.51
ไนโตรเจน (N)	1.50	2.19
ซัลเฟอร์ (S)	3.29	0.88
ค่าความร้อนต่ำ (LHV) (kcal/kg)	3939.72	4837.07

หมายเหตุ: ผลการทดสอบรายงานอยู่ในรูปของ wt. % as received basis

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบ Partial combustion นั้น สารระเหยส่วนหนึ่งเกิดระเหยออกจากวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงแข็งในโซนของการไพโรไลซิสกลายเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และเกิดการเผาไหม้บางส่วนในโซนการเผาไหม้ ส่วนที่เหลือเกิดการเผาไหม้พร้อมกับคาร์บอนบางส่วนในโซนการเผาไหม้ คาร์บอนคงตัวที่เหลือในรูปของถ่านร้อนเกิดปฏิกิริยาต่อกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ในส่วนของผลการวิเคราะห์แบบละเอียด พบว่า ถ่านหิน B มีปริมาณของธาตุคาร์บอนสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนคงตัว แต่ปริมาณของสารระเหยและปริมาณไฮโดรเจนในถ่านหิน A และ B มีค่าที่ไม่สอดคล้องกัน จากผลที่ได้จะเห็นว่าถ่านหิน A มีปริมาณของสารระเหยสูง แต่มีปริมาณของไฮโดรเจนต่ำกว่า B ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าสารระเหยที่อยู่ในถ่านหิน A เป็นองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างโมเลกุล แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณไฮโดรเจนในถ่านหิน B อาจเกิดจากไฮโดรเจนจากความชื้นในโครงสร้างของถ่านหิน ซึ่งสังเกตได้ว่าถ่านหิน B มีปริมาณความชื้นสูงกว่าถ่านหิน A ความชื้นที่ต่างกันนี้ส่วนหนึ่งเป็นปัจจัยจากแหล่งน้ำใต้ดิน

สำหรับปริมาณเถ้าของถ่านหิน พบว่า ถ่านหิน A มีปริมาณเถ้ามากกว่าถ่านหิน B โดยปกติเถ้าเป็นองค์ประกอบของสารที่เผาไหม้ไม่ได้และเหลือหลังจากการเผาไหม้ ในกรณีของถ่านหินเถ้าที่เกิดขึ้นอาจมีส่วนผสมของดิน ทราย และแร่ธาตุ การใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป จึงต้องคำนึงถึงการจัดการหรือการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้นทั้งในส่วนของ Fly ash และ Bottom ash โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของ Fly ash ที่ไหลไปพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งอาจเกิดการอุดตันในระบบท่อหากก่อตัวร่วมกับทาร์ (Tar) ที่เกิดขึ้นในระบบ สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน ประเด็นดังกล่าวอาจจะน้อยกว่าระบบทั่วไป

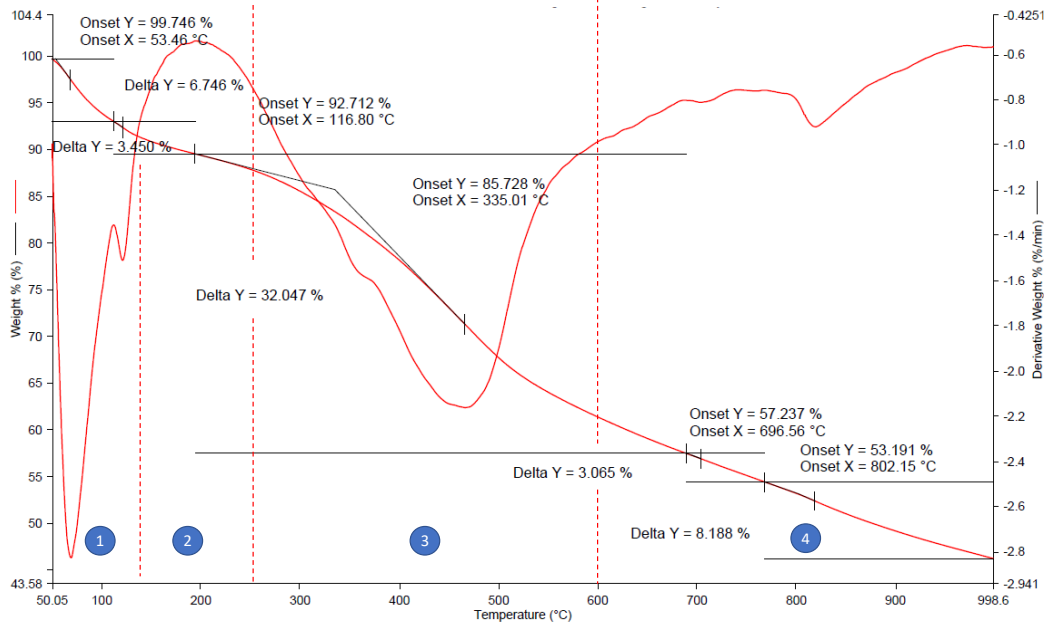
ในส่วนของคุณค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของถ่านหิน พบว่า ถ่านหิน B มีค่าความร้อนสูงกว่าถ่านหิน A อย่างชัดเจน สอดคล้องกับปริมาณของคาร์บอนคงตัวและธาตุคาร์บอนในถ่านหิน B โดยปกติเชื้อเพลิงแข็งหรือวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไฮโดรเจนสูง จะมีปริมาณค่าความร้อนสูง เป็นไปตามหลักการของการเผาไหม้แบบ Heat of formation ของ C เป็น CO₂ และ H เป็น H₂O แต่สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัย

อื่นๆ เช่น ชนิดของออกซิไดเซอร์ ชนิดของเตา และสภาวะในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [6]

3.2 พฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหิน

รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหิน A และ B ที่อุณหภูมิในช่วง 50-1000 °C กลไกการ

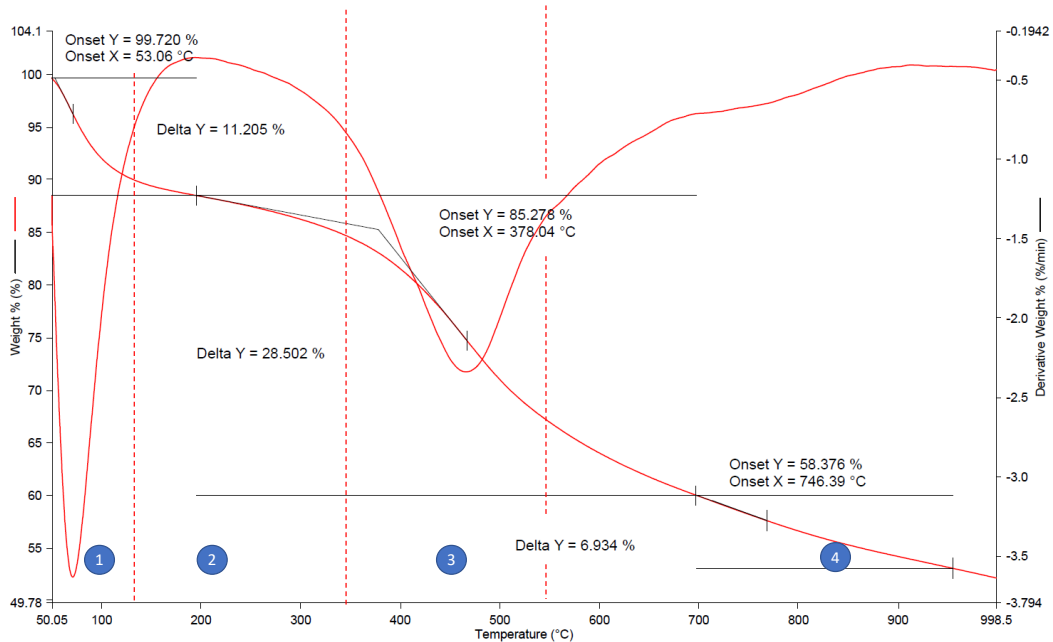
สลายตัวของตัวอย่างถ่านหิน A และ B แสดงผลอยู่ในรูปของ Thermogravimetric analysis (TGA) และ Derivative thermogravimetry (DTG) ซึ่งการสลายตัวของถ่านหิน A และ B สามารถแบ่งออกเป็น 4 โซน ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4 การสลายตัวทางความร้อนของตัวอย่างถ่านหินจากความลึก 1000 m

สำหรับถ่านหิน A การลดลงของมวลหรือน้ำหนักโซนที่ 1 เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 50-130 °C เนื่องจากการระเหยของความชื้นภายในถ่านหิน การระเหยความชื้นส่วนนี้ทำให้ถ่านหินเกิดการสูญเสียมวลประมาณร้อยละ 7.5 ของน้ำหนัก เมื่อให้ความร้อนต่อไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่าง อัตราการลดลงของมวลตัวอย่างจะน้อยลง ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟของ TGA และ DTG ในโซนที่ 2 (130-250 °C) การลดลงของมวลเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากความร้อนที่ให้กับตัวอย่างส่วนใหญ่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่าง และอีกบางส่วนใช้ในการระเหยความชื้นในโครงสร้างและระเหยสารระเหยเบา (Light volatile) ซึ่งในกรณีนี้มีการสูญเสียมวลประมาณร้อยละ 5 และมีอัตราการสูญเสียมวลสูงสุดที่ร้อยละ 0.54 ต่อนาที หลังจากโซนที่ 2 ถ่านหินมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและการลดลงของมวลเริ่มมีปริมาณเพิ่มขึ้นอีกครั้งตั้ง Peak ของ DTG ที่เกิดขึ้นชัดเจน ในโซนนี้การลดลงของมวลตัวอย่างเกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของสารระเหยเบาและสารระเหยหนัก

(Light and heavy volatiles) ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300-600 °C มีค่าการสูญเสียมวลอยู่ที่ร้อยละ 25 ของน้ำหนัก มวลที่หายไปในส่วนนี้เกิดจากการแตกตัวและกลายเป็นไอระเหยของถ่านหิน โดยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และโซนสุดท้ายเป็นโซนที่ 4 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600 °C ในช่วงนี้การลดลงของมวลเกิดขึ้นช้าและอัตราการสลายตัวของมวลมีค่าเล็กน้อย การสลายตัวเกิดจากการแตกตัวของสารระเหยหนักที่เหลือ ร่วมกับการสลายตัวของธาตุ (Minerals) บางชนิดที่มีอุณหภูมิการหลอม (Melting) ต่ำกว่า 1000 °C ในส่วนนี้จะเห็นว่ามวลที่เหลืออยู่ของถ่านหินมีค่าสูงกว่า 43% ส่วนที่เหลือนี้อยู่ในรูปของ Charcoal และเถ้าของถ่านหิน สำหรับในโซนดังกล่าวนี้สังเกตเห็นว่าไม่มี Peak ของ TGA และ DTG ปรากฏอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าไม่มี Partial combustion หรือ Partial oxidation เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าในโครงสร้างถ่านหินจะมีออกซิเจนอยู่ก็ตาม



รูปที่ 5 การสลายตัวของความร้อนของตัวอย่างถ่านหินจากระดับความลึก 1300 m

ในส่วนพฤติกรรมของการสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหิน B ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลการทดสอบ พบว่า ถ่านหินนี้มีการสลายตัวแบ่งออกเป็น 4 โซน ซึ่งโซนที่ 1 ถ่านหินมีการสูญเสียมวลเล็กน้อยประมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักเริ่มต้น การสูญเสียมวลในส่วนนี้เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับถ่านหิน A ในส่วนของโซนที่ 2 ตัวอย่างถ่านหิน B มีการสูญเสียมวลในอัตราที่ไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับถ่านหิน A การสูญเสียมวลในโซนนี้มีค่าประมาณร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก และเกิดอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ร้อยละ 0.43 โดยมวลต่ออนาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของถ่านหินให้สูงขึ้นซึ่งเป็นโซนที่ 3 ถ่านหิน B มีการสูญเสียมวลอย่างชัดเจน ซึ่งครอบคลุมช่วงอุณหภูมิประมาณ 350-550 °C ช่วงนี้มีการสูญเสียมวลร้อยละ 18.3 ของน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่าถ่านหิน A ในช่วงเดียวกัน ผลของการสูญเสียมวลนี้สอดคล้องกับองค์ประกอบของปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน ซึ่งถ่านหิน B มีปริมาณสารระเขยน้อยกว่าถ่านหิน A และเป็นจุดที่บ่งบอกถึงอัตราการสลายตัวที่กำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน และในช่วงสุดท้ายซึ่งเป็นโซนที่ 4 ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิ 550-1000 °C การสลายตัวของถ่านหินยังเกิดขึ้นอย่างโดยมวลที่ลดลงในช่วงนี้ประมาณร้อยละ 14.12 โดยน้ำหนัก และอัตราการสลายตัวที่ต่ำหลังสิ้นสุดกระบวนการ มวลของถ่านหินที่เหลืออยู่มีปริมาณสูงกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลืออยู่นี้มีปริมาณสูงกว่าถ่านหิน A สอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าในถ่านหิน B นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า มวลของถ่านหินที่เหลืออยู่หลังให้ความร้อนมีปริมาณสูงกว่าผลรวมของคาร์บอนคงตัวและเถ้า แสดงให้เห็นว่า อาจจะมีส่วนสารระเหยเหลืออยู่เช่นกัน ดังนั้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอาจจะต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูง และระยะเวลาเหมาะสม เพื่อให้เกิดการแตกตัวหรือสลายตัวของถ่านหินได้อย่างสมบูรณ์

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมของการสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นตัวอย่างถ่านหินจากระดับความลึก 1000 และ 1300 เมตร ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างถ่านหินดังกล่าวนี้มีพฤติกรรมของการสลายตัวที่ค่อนข้างต่างกัน โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 300-600 °C ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟของ TGA และ DTG หลังช่วงอุณหภูมินี้ การเพิ่มอุณหภูมิถ่านหินส่งผลทำให้มวลถ่านหินมีแนวโน้มการลดลงด้วยอัตราการสูญเสียมวลที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งพฤติกรรมของการสลายตัวของถ่านหินสอดคล้องกับองค์ประกอบของถ่านหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า นอกจากนี้ การลดลงของมวลที่อุณหภูมิสูงอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยหนัก หรืออาจจะเกิดจากการหลอมและระเหยของธาตุบางชนิดที่มีในถ่านหิน ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ผลที่ได้ทั้งหมดนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับสนับสนุนการศึกษาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG 6402019N และได้รับการสนับสนุนเงินอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R. Mandal, T. Maity, S.K. Chaulya, G.M. Prasad, "Laboratory investigation on Underground Coal Gasification Technique with real-time analysis," Fuel. 275, 2020.

- [2] G. Perkins, "Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 67, pp. 234–274, 2018.
- [3] กรมทรัพยากรธรณี (2000). การพัฒนาการใช้เทคโนโลยีที่สะอาดกับถ่านหินในประเทศไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://library.dmr.go.th/>, เข้าดูเมื่อวันที่ 23/09/2564
- [4] A. W. Bhutto, A. A. Bazmi, and G. Zahedi, "Underground coal gasification: From fundamentals to applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 189–214, 2013.
- [5] G. Perkins, "Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 67, pp. 234–274, 2018.
- [6] S. Lee, *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [7] Sadasivam, S., Zagorščak, R., Thomas, H. R., Kapusta, K., & Stańczyk, K. (2020). Experimental study of methane-oriented gasification of semi-anthracite and bituminous coals using oxygen and steam in the context of underground coal gasification (UCG): Effects of pressure, temperature, gasification reactant supply rates and coal rank. *Fuel*, 268, 117330.
- [8] S. Lee, *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [9] S. J. Self, B. V. Reddy, and M. A. Rosen, "Review of underground coal gasification technologies and carbon capture," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2012.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Underground_coal_gasification, เข้าดูเมื่อวันที่ 01/12/2564
- [11] Biswas, A.K., Suksuwan, W., Phoungthong, K., Wae-hayee, M., Effect of equivalent ratio (er) on the flow and combustion characteristics in a typical underground coal gasification (UCG) cavity, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 86 (2), pp.28–38, 2021
- [12] G. Samdani, P. Aghalayam, A. Ganesh, R.K. Sapru, B.L. Lohar, S. Mahajani, "A process model for Underground Coal Gasification – Part I : Cavity growth," *Fuel.*, 181, Page 690-703, 2016.
- [13] S. Kashyap, P. Vairakannu, "Movable Injection point-based syngas production in the context of Underground Coal gasification," *International Journal of Energy Research WILEY.*, 2019.
- [14] S. M. Fei, "Underground Coal Gasification (UCG) : A new trend of supply-side economics of fossil fuels," *Natural Gas Industry .*, page 312-322, 2016
- [15] L. Xin, J. Li, J. Xie, C. Li, L. Han, M. An, M. Xu, Z. Wang, "Simulation of Cavity Extension Formation in the Early Formation in the Early Ignition Stage Based on a Coal Block Gasification Experiment," *Journal of energy Resources Technology.*, Vol.142, Jun 2020.
- [16] S. Daggupat, N. Ramesh, Mandapati, M. Mahajani Sanjay, A. Ganesh, A.K. Pal, R.K. Sharma, P. Aghalayam, "Compartment Modeling for flow characterization of Underground Coal Gasification Cavity," *Ind.Eng.Chem.*, 50, 277-290, 2011.

ภาคผนวก ง.

(ภาคผนวกชุดทดลองและการทดลอง)

- การสร้างชุดทดลอง

ในกระบวนการสร้างเตาชั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งคือการเลือกชนิดของคอนกรีตทนไฟให้เหมาะสมกับสภาวะอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่ 300 - 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทำการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของการสลายตัวทางความร้อนของถ่านหิน (TGA) โดยคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Castable Refractories ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในการทนต่อความร้อนที่สูงถึง 1,300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1(ก) คอนกรีตทนไฟ ง.1(ข) ลักษณะเนื้อผสมของคอนกรีตทนไฟ

สัดส่วนของน้ำต่อคอนกรีตทนไฟที่เหมาะสมคือน้ำ 30 ลิตร ต่อปูนซีเมนต์ 1 ถุง เมื่อผสมน้ำและคอนกรีตทนไฟได้ในสัดส่วนที่เหมาะสมเนื้อสัมผัสของคอนกรีตจะมีลักษณะคล้ายกับดินน้ำมันสามารถทดสอบได้โดยการโยนขึ้นจากมือเบาๆ เมื่อคอนกรีตตกลงมาจะยังคงสภาพเดิมไม่แตกออก ซึ่งแตกต่างออกไปถ้าสัดส่วนของน้ำและคอนกรีตไม่เหมาะสมกันจะทำให้ก้อนคอนกรีตมีลักษณะแห้งและแตกออกเมื่อมีสัดส่วนของน้ำที่น้อยเกินไป ในทางกลับกันกรณีที่มีสัดส่วนของน้ำมากเกินไปเนื้อสัมผัสของก้อนคอนกรีตจะเหลวไม่จับตัวเป็นก้อน ดังแสดงในรูป ง.1(ข)



รูปที่ ง.2 ภาพการหล่อคอนกรีตลงเข้าไม้



รูปที่ ง.3 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำในบ่อพัก

โม่ได้ถูกนำมาตัดเป็นรูปของโพรงรูปทรงคล้ายหยดน้ำขนาด กว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 680 มิลลิเมตร สูง 132 มิลลิเมตร และวางไว้ในเบ้าไม้ที่มีขนาด กว้าง 210 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร สูง 190 มิลลิเมตร หลังจากนั้นให้ค่อยๆ เทคอนกรีตที่ผสมเสร็จลงไปโดยต้องระวังการเกิดโพรงอากาศ ภายในเนื้อของคอนกรีตและปล่อยให้คอนกรีตเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อโมเดลเริ่มแข็งตัวจนสามารถแกะออกจากเบ้าไม้ได้แล้วจะนำโมเดลไปบ่มน้ำต่อโดยขั้นตอนนี้จะใช้เวลาโดยประมาณ 7 วันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โมเดลดังแสดงในรูปที่ ง.3

- เครื่องมือและกระบวนการบดถ่านหิน



รูปที่ ง.4 เครื่องบดจอร์ชเชอร์



รูปที่ ง.5 เครื่องย่อย Crushing



รูปที่ ง.6 เครื่องบดแบบใจเร็กเตอร์ครีซเซอร์



รูปที่ ง.7 ตะแกรงกรองขนาด 0.6 มิลลิเมตร

- เครื่องมือวัด



รูปที่ ๓.8 Data logger และ Thermocouple type k



รูปที่ ๓.9 Air Flow meter



รูปที่ ง.10 เครื่องมือ Fluke 51 Thermocouple



รูปที่ ง.11 เครื่องวิเคราะห์สภาพแก๊ส CUBIC flue gas analyzer Model 3000 series และชุดทำความ
สะอาดแก๊ส

- การสร้างชุดทดลอง

ในกระบวนการสร้างเตาขั้นตอนนี้ที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งคือการเลือกชนิดของคอนกรีตทนไฟให้เหมาะสมกับสภาวะอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่ 300 - 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทำการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของการสลายตัวทางความร้อนของถ่านหิน (TGA) โดยคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Castable Refractories ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในการทนต่อความร้อนที่สูงถึง 1,300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1(ก) คอนกรีตทนไฟ ง.1(ข) ลักษณะเนื้อผสมของคอนกรีตทนไฟ

สัดส่วนของน้ำต่อคอนกรีตทนไฟที่เหมาะสมคือน้ำ 30 ลิตร ต่อปูนซีเมนต์ 1 ถุง เมื่อผสมน้ำและคอนกรีตทนไฟได้ในสัดส่วนที่เหมาะสมเนื้อสัมผัสของคอนกรีตจะมีลักษณะคล้ายกับดินน้ำมันสามารถทดสอบได้โดยการโยนขึ้นจากมือเบาๆ เมื่อคอนกรีตตกลงมาจะยังคงสภาพเดิมไม่แตกออก ซึ่งแตกต่างออกไปถ้าสัดส่วนของน้ำและคอนกรีตไม่เหมาะสมกันจะทำให้ก้อนคอนกรีตมีลักษณะแห้งและแตกออกเมื่อมีสัดส่วนของน้ำที่น้อยเกินไป ในทางกลับกันกรณีที่มีสัดส่วนของน้ำมากเกินไปเนื้อสัมผัสของก้อนคอนกรีตจะเหลวไม่จับตัวเป็นก้อน ดังแสดงในรูป ง.1(ข)



รูปที่ ง.2 ภาพการหล่อคอนกรีตลงเข้าไม้



รูปที่ ง.3 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำในบ่อพัก

โม่ได้ถูกนำมาตัดเป็นรูปของโพรงรูปทรงคล้ายหยดน้ำขนาด กว้าง 90 มิลลิเมตร ยาว 680 มิลลิเมตร สูง 132 มิลลิเมตร และวางไว้ในเบ้าไม้ที่มีขนาด กว้าง 210 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร สูง 190 มิลลิเมตร หลังจากนั้นให้ค่อยๆ เทคอนกรีตที่ผสมเสร็จลงไปโดยต้องระวังการเกิดโพรงอากาศ ภายในเนื้อของคอนกรีตและปล่อยให้คอนกรีตเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อโมเดลเริ่มแข็งตัวจนสามารถแกะออกจากเบ้าไม้ได้แล้วจะนำโมเดลไปบ่มน้ำต่อโดยขั้นตอนนี้จะใช้เวลาโดยประมาณ 7 วันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โมเดลดังแสดงในรูปที่ ง.3

- เครื่องมือและกระบวนการบดถ่านหิน



รูปที่ ง.4 เครื่องบดจอร์ชเชอร์



รูปที่ ง.5 เครื่องย่อย Crushing



รูปที่ ง.6 เครื่องบดแบบใจเร็กเตอร์ครัชเซอร์



รูปที่ ง.7 ตะแกรงกรองขนาด 0.6 มิลลิเมตร

- เครื่องมือวัด



รูปที่ ๓.8 Data logger และ Thermocouple type k



รูปที่ ๓.9 Air Flow meter



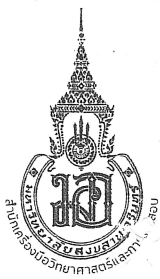
รูปที่ ง.10 เครื่องมือ Fluke 51 Thermocouple



รูปที่ ง.11 เครื่องวิเคราะห์สภาพแก๊ส CUBIC flue gas analyzer Model 3000 series และชุดทำความสะอาดแก๊ส

ภาคผนวก จ.

(องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน)



สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Office of Scientific Instrument and Testing (OSIT)

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
Academic and administrative buildings. Hat Yai, Songkhla, 90110 Thailand
Tel: +668 4407 1732, +668 9734 2482 E-mail: osit@group.psu.ac.th Website: <https://osit.psu.ac.th>

F-RES-E-033 rev. 1 01/07/64

TEST REPORT

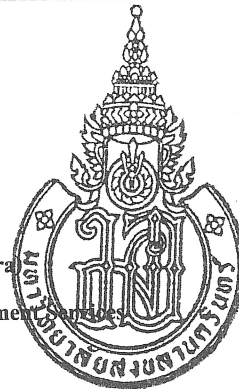
Report No.:	R3753/64_1	Page:	1/2
Issue date:	September 17, 2021	Date Received:	September 08, 2021
Test Request Form No.:	4809/64		
Customer Name and Address:	Mr. Whacharapat Wattanasrirote Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University		
Sample Name:	Coal A (หนัก 1,000 กรัม)		
Sample condition:	Solid		
Sample description:	Coal		
Test date:	September 09, 2021 - September 16, 2021		

Test Result(s): Please refer to next page

(Mrs. Roosanee Kulvijitra)

Head of Scientific Research Equipment

September 17, 2021





สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Office of Scientific Instrument and Testing (OSIT)

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
Academic and administrative buildings. Hat Yai, Songkhla, 90110 Thailand
Tel: +668 4407 1732, +668 9734 2482 E-mail: osit@group.psu.ac.th Website: https://osit.psu.ac.th

F-RES-E-033 rev. 1 01/07/64

Report No.:

R3753/64_1

Page:

2/2

Test Result(s):

No.	Parameters	Unit	Instrument/methods	Results \pm SD
1.	Moisture (As received basis)	% wt.	In-house method based on ASTM D7582	13.17 \pm 0.05
2.	Volatile (As received basis)	% wt.	In-house method based on ASTM D7582	42.00 \pm 0.07
3.	Fixed Carbon (As received basis)	% wt.	In-house method based on ASTM D7582	33.07 \pm 0.01
4.	Ash (As received basis)	% wt.	In-house method based on ASTM D7582	11.77 \pm 0.09
5.	Carbon (C) (As received basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	48.655 \pm 0.078
6.	Hydrogen (H) (As received basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	4.178 \pm 0.023
7.	Nitrogen (N) (As received basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	1.508 \pm 0.003
8.	Sulfur (S) (As received basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	3.298 \pm 0.060
9.	Oxygen (O) (As received basis)	% wt.	CHNS/O Analyzer	31.519 \pm 0.573
10.	Gross Heating Value (G.H.V.) (As received basis)	kcal/kg	CHNS/O Analyzer	4154.103 \pm 2.796
11.	Net Heating Value (N.H.V.) (As received basis)	kcal/kg	CHNS/O Analyzer	3939.722 \pm 2.860

- The results were referred to test request (F-ASO-T-054) no 4809/64.

- Instrument: CHNS/O Analyzer, FLASH 2000, ThermoScientific, Italy
Macro CHNS, CHNS628, LECO, USA

- Non-homogeneous sample, SD = Standard Deviation

Ash receive base

..... End of result



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายวัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์
รหัสประจำตัวนักศึกษา 6310120032

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2563

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2564 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์, Arup Kumar Biswas, และ มั๊กตาร์ แวะหะยี. 2022. การทบทวนเอกสาร: เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดินและศักยภาพในประเทศไทย. Engineering Journal Chiang Mai University, 29(1), pp.79-99.

Wattanasrirote, Whacharapat, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Maizirwan Mel, and Makatar Wae-hayee. "Experimental and Numerical Investigations of Underground Coal Gasification (UCG) Using Half-teardrop Shape Cavity." Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 101, no. 2 (2022): 172-183.

วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์, Arup Kumar Biswas, และ มั๊กตาร์ แวะหะยี. “การทบทวนเอกสาร : เรื่องเทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดิน” งานประชุมวิชาการ การถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 20, 18 – 19 มีนาคม 2564 จังหวัดสงขลา ประเทศไทย.

วัชรภัทร์ วัฒนาศรีโรจน์, อาคม ปะหลามานิต, มุस्ताฟา ยะภา, มั๊กตาร์ แวหะยี.
“การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะสำหรับกระบวนการแก๊ส
ซิฟเคชั่นถ่านหินใต้ดิน” งานประชุมวิชาการ การถ่ายทอดผลงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความ
ร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 21, 10 – 11 มีนาคม 2565 จังหวัดเชียงราย ประเทศไทย.