



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

วัชรภัทร วัฒนาศรีโรจน์¹ อาคม ปะหลามานิต² และ มัkatar แวหะยี่^{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 มีความเสถียรและไม่ส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาไหม้ 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 บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สุดท้ายจะกล่าวถึงงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินที่นำไปใช้งานจริง 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

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีบทบาทต่อพลังงานโลกมาตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ทั่วโลกนิยมใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากใช้งานได้ง่าย มีปริมาณสำรองที่สูงสามารถนำมาใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 200 ปี จากการสำรวจพบว่ามีแหล่งถ่านหินกระจายอยู่ทั่วโลก 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 นอกจากนั้นอาจเกิดสารปนเปื้อนจากโลหะหนัก 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

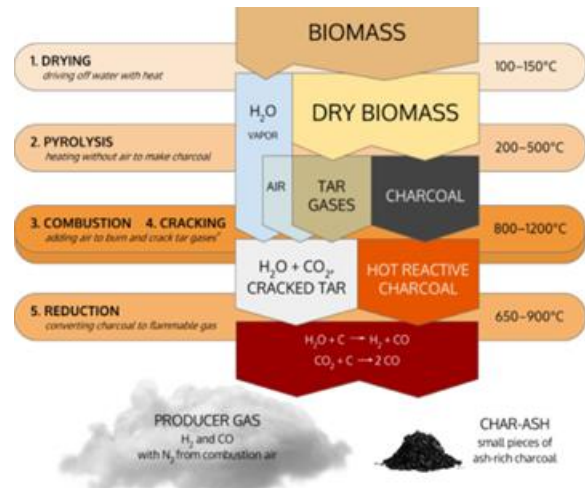
เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดที่กล่าวมาข้างต้น รูปแบบการทำให้ถ่านหินเป็นก๊าซด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ขบลงทุนไม่มาก เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ และแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ที่ได้จากกระบวนการ เมื่อเผาแล้วสะอาดกว่ารูปแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีการผลิตแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน (Underground coal gasification: UCG) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ไม่ต้องทำเหมืองถ่านหิน เป็นต้น [1]

จุดประสงค์ของบทความนี้ เพื่อทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดิน โดยเริ่มต้นจากการกล่าวกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป จากนั้นจะกล่าวถึงเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดิน บททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สุดท้ายรายงานเกี่ยวกับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินที่นำไปใช้งานจริง และศักยภาพการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินใต้ดินใช้ในประเทศไทย

2. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

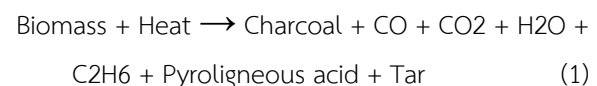
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) คือ กระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแก๊ส โดยทำให้เกิดการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ โดยควบคุมปริมาณอากาศเข้าให้มีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการสันดาปที่สมบูรณ์ แต่จะเกิดความร้อนเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปเตาแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันออกเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ๆ ได้ 4 ขั้นตอนปฏิกิริยา ดังนี้

1. ขั้นตอนลดความชื้น (Drying zone) อุณหภูมิในขั้นนี้จะอยู่ที่ประมาณ 100–135°C จึงไม่สูงพอที่จะเกิดการสลายตัวของสารระเหยต่าง ๆ แต่จะมีภาระระเหยความชื้นที่มีอยู่ในชีวมวลให้ออกมาในรูปของไอน้ำแทน
2. ขั้นตอนกลั่นสลาย (Distillation zone) ในขั้นนี้สารอินทรีย์ที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะสลายทำให้เกิดสารระเหย (Volatile matter) ต่าง ๆ ออกมาซึ่งประกอบไปด้วยเมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน แก๊สที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ โดยเกิดการ

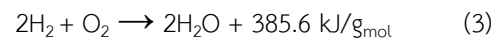
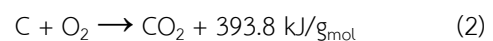


รูปที่ 1 กระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชัน [2]

ได้รับความร้อนที่ส่งมาจากชั้นเผาไหม้ที่อยู่ตำแหน่งด้านล่าง อุณหภูมิในขั้นนี้จะประมาณ 135–600°C เมื่อเวลาผ่านไปเชื้อเพลิงจะเหลืออยู่ในรูปของแข็งที่เป็นถ่าน ดังสมการที่ 1

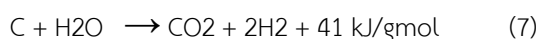
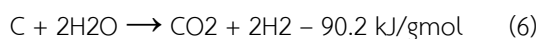
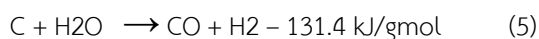
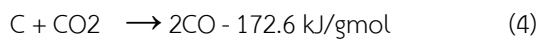


3. ชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) เป็นส่วนของชั้นแรกที่สัมผัสกับอากาศที่ป้อนเข้าไปมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 900–1200°C การเผาไหม้ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2 และแก๊สไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนได้น้ำออกมา ดังสมการที่ 3 ในขั้นตอนนี้ต้องควบคุมแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในอากาศให้มีปริมาณน้อย



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

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



3. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน (Underground coal gasification: UCG)

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

3.1 โครงสร้างของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน

โครงสร้างของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินประกอบด้วยดังนี้ [4]

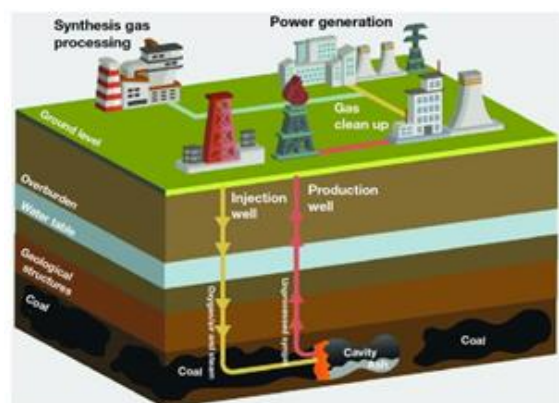
1. หลุมเจาะหรือหลุมฉีด (Injection well) มีหน้าที่ในการฉีดออกซิแดนท์ (Gasification agent) เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับถ่านหินที่อยู่ใต้ดิน เดิมตัวออกซิแดนท์นั้นจะเป็นอากาศ ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้

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

2. ชั้นถ่านหิน (Coal seam) ทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อตัวของออกซิแดนท์เข้าไปและเริ่มมีการเผาไหม้เกิดขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสามช่วงที่เกิดการพร้อมกัน

3. ส่วนที่อยู่เหนือชั้นของถ่านหิน (Overburden) เป็นชั้นดินและชั้นหินที่อยู่เหนือถ่านหินทำหน้าที่ในการกักเก็บและสร้างสภาพความดันใต้ดิน

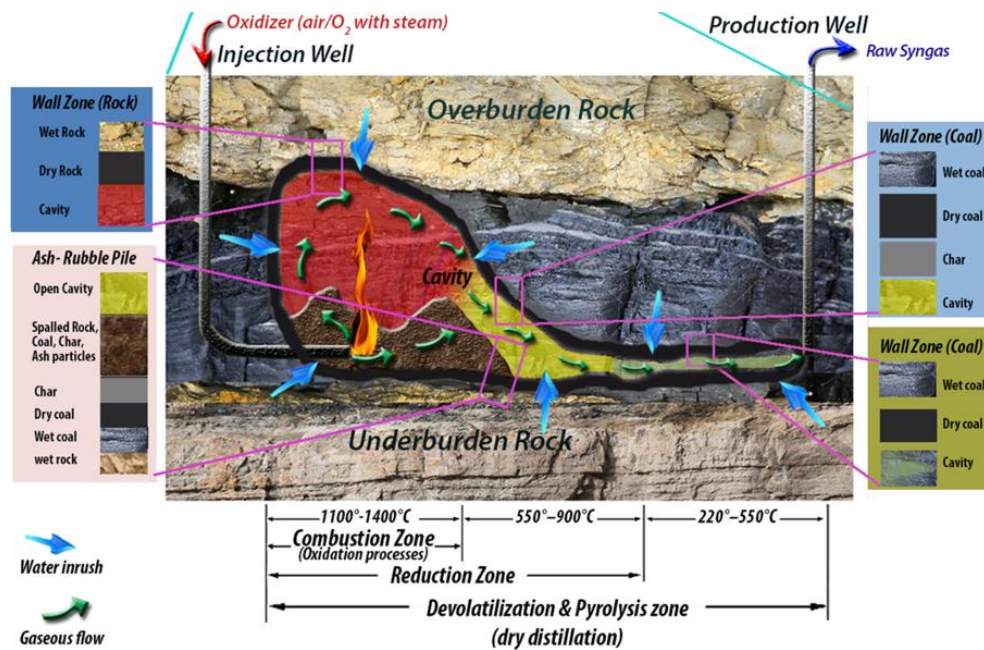
4. หลุมผลิตผลิตภัณฑ์ (Production well) ทำหน้าที่ในการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันขึ้นมาจากใต้ดิน



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

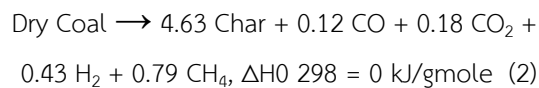


รูปที่ 3 กระบวนการแก๊สจากถ่านหินใต้ดิน [5]

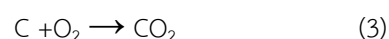
(1) ขั้นไล่ความชื้น (Drying) โดยส่วนใหญ่แล้ว ถ่านหินที่อยู่ชั้นใต้ดินมีความชื้นความชื้นที่อยู่ในถ่านหินระเหยออกเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโพรง ส่งผลทำให้ถ่านหินมีรูพรุนมากขึ้น สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ [7]



(2) ขั้นไพโรไลซิส (Pyrolysis) เมื่อถ่านหินแห้งหลังจากที่ได้รับความร้อน ต่อไปจะเกิดเป็นขั้นไพโรไลซิส ซึ่งจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 350°–400°C ถ่านจะเกิดขึ้นจากการปล่อยสารระเหย (Hydrocarbons, CH_4 , H_2 , H_2O , CO , CO_2) สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ [8]



(3) ขั้นออกซิเดชัน (Oxidation) ซี้ถ่าน (C) และสารระเหย (Volatiles) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ฉีดเข้าไปในท้องเผาไหม้ สามารถแสดงสมการได้ดังนี้ [9]

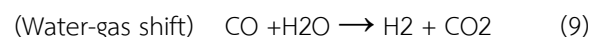
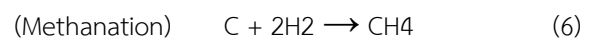


ลำดับที่ 3 และ 4 คือปฏิกิริยาคายความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านหิน ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นภายในโพรงใกล้เคียงบริเวณสารออกซิเดนต์ที่ถูกฉีดลงไป

(4) ขั้นแก๊สซิฟิเคชัน (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 ($O_2/Steam$ ratio) ความดันในการทำงาน มวลและความสมดุลของพลังงาน ในโพรง [12], [13] เป็นต้น

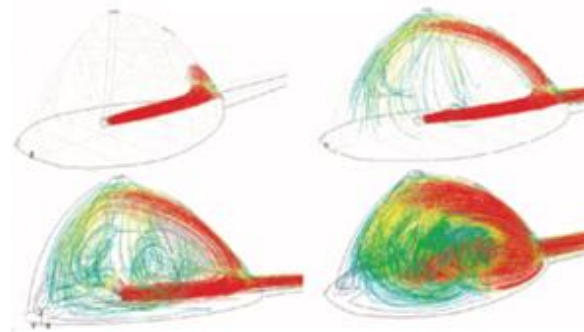
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินใต้ดิน (UCG) ซึ่งเป็นทั้งแบบทดลองและแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation)

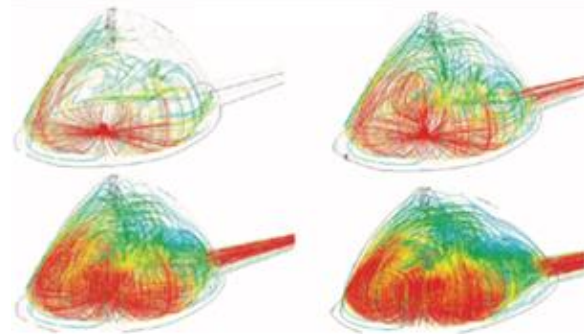
Sateesh และคณะ [14] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลที่ส่งผลต่อการโตของโพรงในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน โดยใช้วิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD) และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับเงื่อนไขขอบเขตคือความเร็วทางเข้าที่ 4 m/s และเลือกใช้ออกซิเจน (Oxygen) เป็นออกซิแดนท์ มีการกำหนดให้อุณหภูมิของโพรงคงที่ 1273 K และความดันทางออกที่ 5 atm โดยใช้โมเดลการไหลแบบปั่นป่วน Realizable k- ϵ ในการศึกษาได้กำหนดขนาดของโพรงโดยแบ่งตามระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 5 ขนาด ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลได้มีการแบ่งออกเป็นสองลักษณะ แบบแรกคือ ฉีดออกซิแดนท์ในแนวนอน (Horizontal Injection) และแบบที่สองคือ ฉีดออกซิแดนท์ในแนวตั้ง (Vertical Injection) โดยผลที่ได้จากการศึกษากรณีฉีดออกซิแดนท์ในแนวนอน (Horizontal Injection) แสดงในรูปที่ 4(ก) และฉีดออกซิแดนท์ในแนวตั้ง (Vertical Injection) แสดงในรูปที่ 4(ข) พบว่า การฉีดออกซิแดนท์ในแนวตั้งมีผลต่อการกระจายของออกซิแดนท์ทุกทิศทางมากกว่ากรณีฉีดออกซิแดนท์ในแนวนอน

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

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



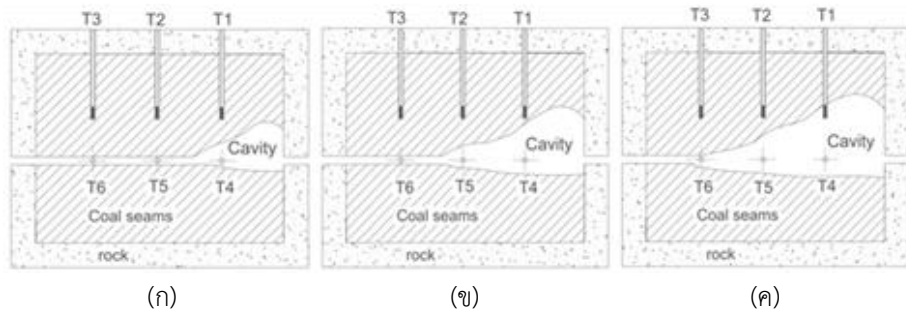
(ก) ฉีดออกซิแดนท์ในแนวนอน (Horizontal Injection)



(ข) ฉีดออกซิแดนท์ในแนวตั้ง (Vertical Injection)

รูปที่ 4 ลักษณะการไหลภายในอุโมงค์ UCG [14]

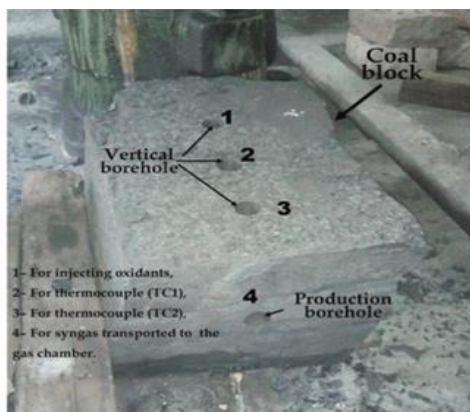
หลังจากได้บล็อกถ่านหินแล้วได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมด 6 จุด และใช้ออกซิแดนท์ (Oxidizer) เป็นก๊าซออกซิเจน โดยแบ่งการทดลองไว้สามช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นการให้ความร้อน มีการพ่นออกซิเจนที่ 0.4 L/min และได้มีการให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน (Heating tube) ลักษณะโพรงดังแสดงในรูปที่ 5(ก) ช่วงที่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



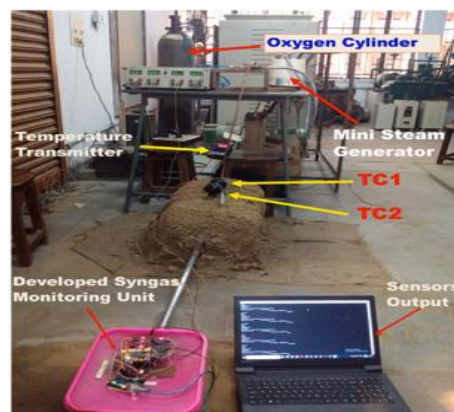
รูปที่ 5 แสดงลักษณะการโตของโพรง UCG ที่ได้จากการทดลองของ Lin Xin และคณะ [15]

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) โดยหลุมแนวตั้งใช้สำหรับฉีดฉีดออกซิแดนซ์ (Injection Oxidant) และหลุมแนวนอนสำหรับเป็นรูทางออกของผลิตภัณฑ์ บล็อกถ่านหินจะถูกนำไปเคลือบด้วยดินเหนียวและต่อท่อสเตนเลสเพื่อนำแก๊สผลิตภัณฑ์มาเก็บไว้ในถังแก๊สดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ในระหว่างกระบวนการทดลองได้ฉีด

ออกซิแดนซ์เข้าไปอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษากระบวนการเกิดแก๊สเอาไว้และมีการฉีดพ่นไอน้ำ (Steam) เข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของแก๊สผลิตภัณฑ์ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราส่วนของ Co/H_2 ให้กับแก๊สผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองของ Ranjeet Mandal และคณะ [16] แสดงในรูปที่ 7 และ 8 พบว่า ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองในช่วงของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าช่วงแก๊สซิฟิเคชัน ช่วงไพโรไลซิสและช่วงของชั้นลดความชื้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับผลของการผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันนั้น ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) ดังแสดงในรูปที่ 8 แต่จากการทดลองสังเกตได้ว่าในช่วงที่เริ่มมีการหยุดฉีดออกซิแดนซ์ส่งผลต่อคุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีเทน (CH_4)) ที่ได้ลดลง

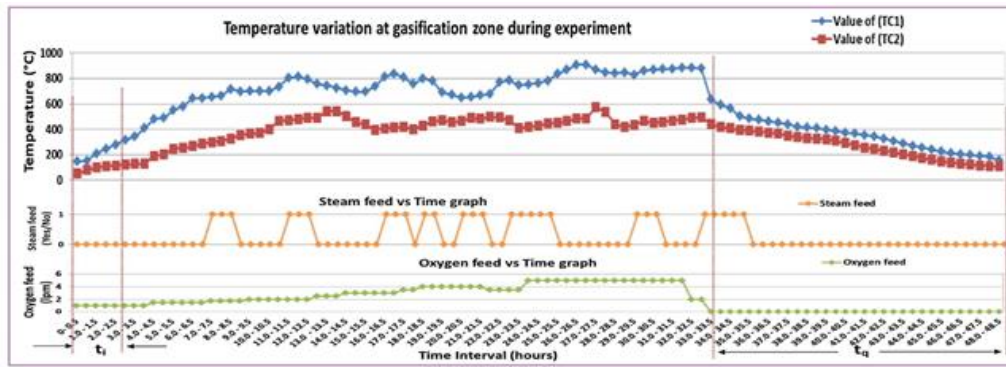


(ก) ลักษณะการเจาะรูบล็อกถ่านหิน

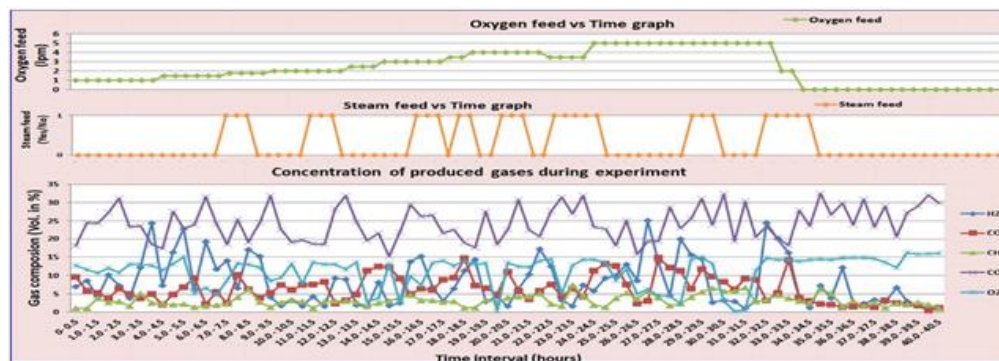


(ข) ชุดทดลองและการวัดผลแก๊ส

รูปที่ 6 ถ่านหินและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Ranjeet Mandal และคณะ [16]



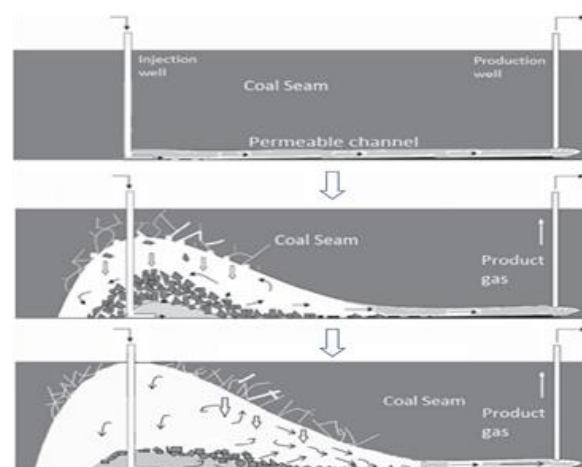
รูปที่ 7 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลา [16]



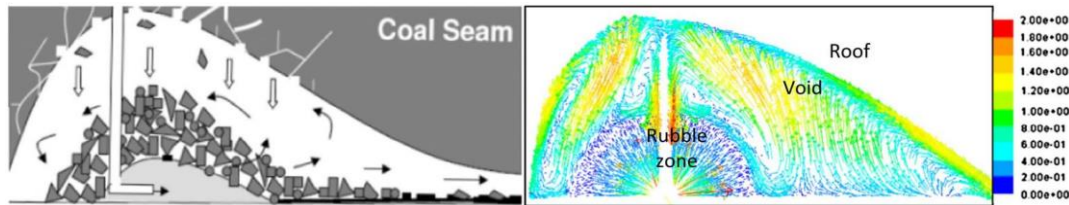
รูปที่ 8 การเกิดแก๊สเชื้อเพลิงเทียบกับเวลา [16]

Samdani และคณะ [17] ได้ศึกษาการขยายตัวของโพรงและพฤติกรรมของอนุภาคที่ตกลงมาสู่ด้านล่างของโพรง โดยสร้างแบบจำลองโมเดลในระยะเฟสแรกของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันภายใต้เงื่อนไขดังนี้ 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]

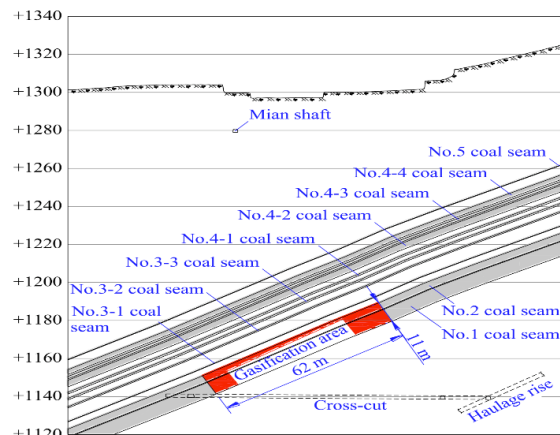
Kashyap และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าที่สูง (High ash coal) โดยตั้งสมมุติฐานว่า หากเคลื่อนย้ายหลุมเจาะ (Injection well) จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาของถ่านหินชนิดที่มีเถ้าสูงนั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเพียงใด ในการทดลองได้มีการแบ่งชุดทดลองออกเป็น 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 เพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีอิทธิพลต่อการเกิดและการเปลี่ยนแปลงต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในระดับอุตสาหกรรม และเพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นของออกซิเจนและไอน้ำในตัวทำปฏิกิริยา (Gasification agent) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน และเพื่อศึกษาปัญหาของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหินใต้ดิน โดยได้เลือกสถานที่ในการทำทดลองเป็นเหมืองถ่านหินที่ถูกทิ้งร้างแห่งหนึ่งในมณฑลกานซู 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 และทำมุมมองค่าที่ 28 องศา แต่ในระหว่างของชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะมีหินโคลน (Mudstone) หนา 0.5 เมตรขึ้นอยู่ระหว่าง 2 ชั้นนี้ แต่ก็ก็นำรวมมาใช้ในการทำแก๊สซิฟิเคชันด้วยส่วนบนของถ่านหิน

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



รูปที่ 11 ลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณเหมืองถ่านหิน

[19]

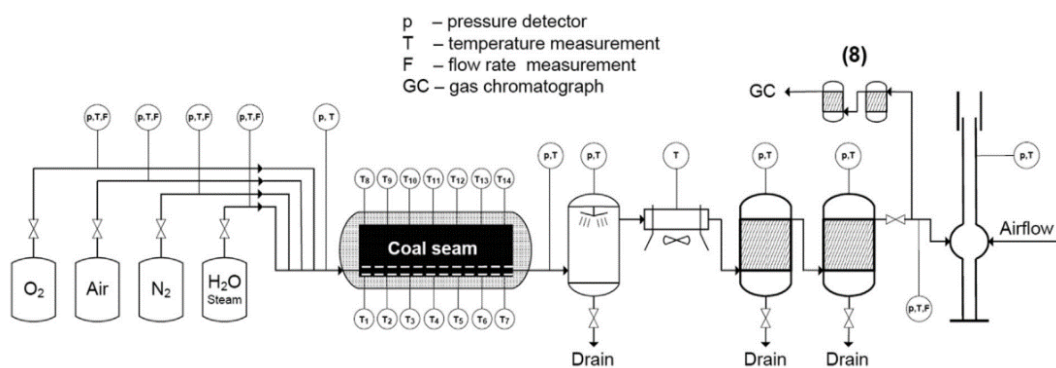
ตารางที่ 2 ตารางแสดงเงื่อนไขการทดลองของ Huang และคณะ [19]

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

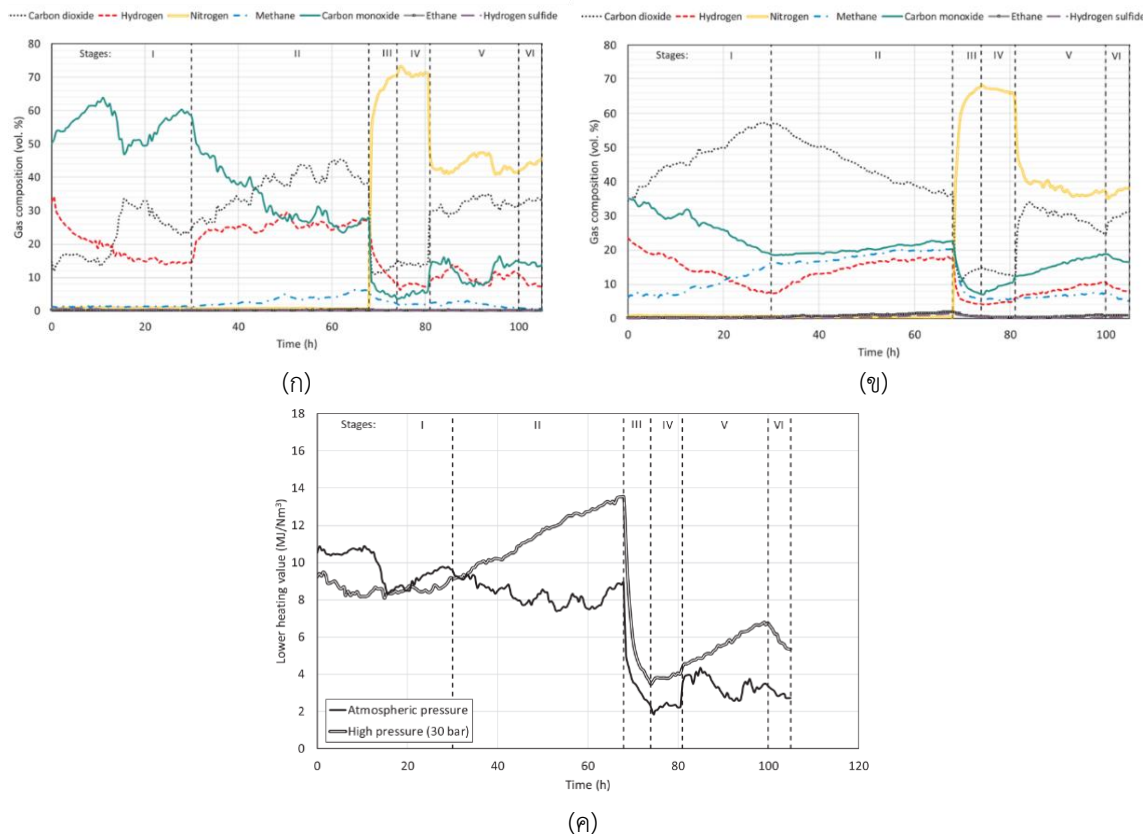
Huang ได้ออกแบบการทดลองออกเป็น 5 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มก็จะมีทดลองย่อย ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 จากผลการศึกษาพบว่าค่าความร้อนของการทดลองที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบเพียงอย่างเดียว (Air Gasification) มีค่าต่ำกว่าการทดลองที่มีการใช้ไอน้ำร่วม (Air Steam Gasification) แต่การทดลองที่มีการใช้ออกซิเจนเข้มข้น (Oxygen enriched Gasification) จะมีการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของก๊าซ บางชนิดเพิ่มขึ้น ได้แก่ CH_4 , CO_2 , 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 (O_2) เป็นระยะเวลาประมาณ 30 ชั่วโมง ต่อจากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการจ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ร่วมกับไอน้ำเป็นระยะเวลา 38 ชั่วโมงหลังจากนั้นในขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 จะเป็นการจ่ายอากาศให้แก่ระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 13 ชั่วโมงในขั้นตอนที่ 5 จะเป็นการจ่ายออกซิเจนอิ่มตัว 50% (OEA 50%) ให้แก่ระบบเป็นเวลา 19 ชั่วโมงและในขั้นตอนที่ 6 จะเป็นการจ่ายออกซิเจนอิ่มตัว 50% ร่วมกับไอน้ำ (OEA 50% + Steam) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาอัตราการผลิตก๊าซในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน และเพื่อศึกษาองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และหาค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกันและนำมาเปรียบเทียบผลโครงสร้างของเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันได้ถูกออกแบบมาให้ทนต่อความดันสูงสุดที่ 50 bar และทนต่ออุณหภูมิสูงสุดได้ที่ 1600 องศาเซลเซียสซึ่งมีขนาดความยาวสูงสุดที่ 3.5 m ขนาดด้านตัดขวางที่ 0.41 m x 0.41 m และออกซิแดนซ์ ได้แก่ ไอน้ำ อากาศ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูงโดยมีองค์ประกอบของคาร์บอนที่ 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) ดังนั้นในการเพิ่มค่าความร้อนให้แก่ก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการเพิ่มความดันให้แก่ระบบการผลิตแก๊สซิฟิเคชั่นมีนัยสำคัญในการเพิ่มองค์ประกอบก๊าซมีเทน (CH₄) ในก๊าซผลิตภัณฑ์ แต่องค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กลับไม่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่นภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศซึ่งพบว่ามีค่าองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่สูงกว่าแต่ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นที่ความดันสูงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของก๊าซ

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ความดันบรรยากาศในช่วงที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบองค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจน (N_2) จะเพิ่มขึ้นสูงมากในองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ของทั้งสองการทดลองนั้นก็เพราะว่าอากาศนั้นมีก๊าซไนโตรเจน (N_2) เป็นองค์ประกอบหลักและก๊าซไนโตรเจน (N_2) ไม่ได้ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

ในช่วงของการใช้ออกซิเจนเข้มข้นร่วมกับอากาศและออกซิเจนเข้มข้นและอากาศร่วมกับไอน้ำพบว่าค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกันอาจจะเป็นผลจากการที่มีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนมากขึ้นในระบบและทำให้อุณหภูมิภายในระบบสูงขึ้นดังแสดงในรูป 13

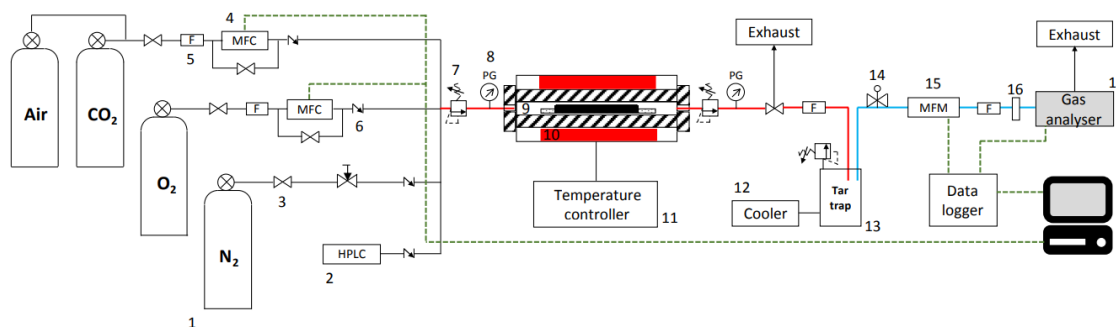


(ก)



(ข)

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



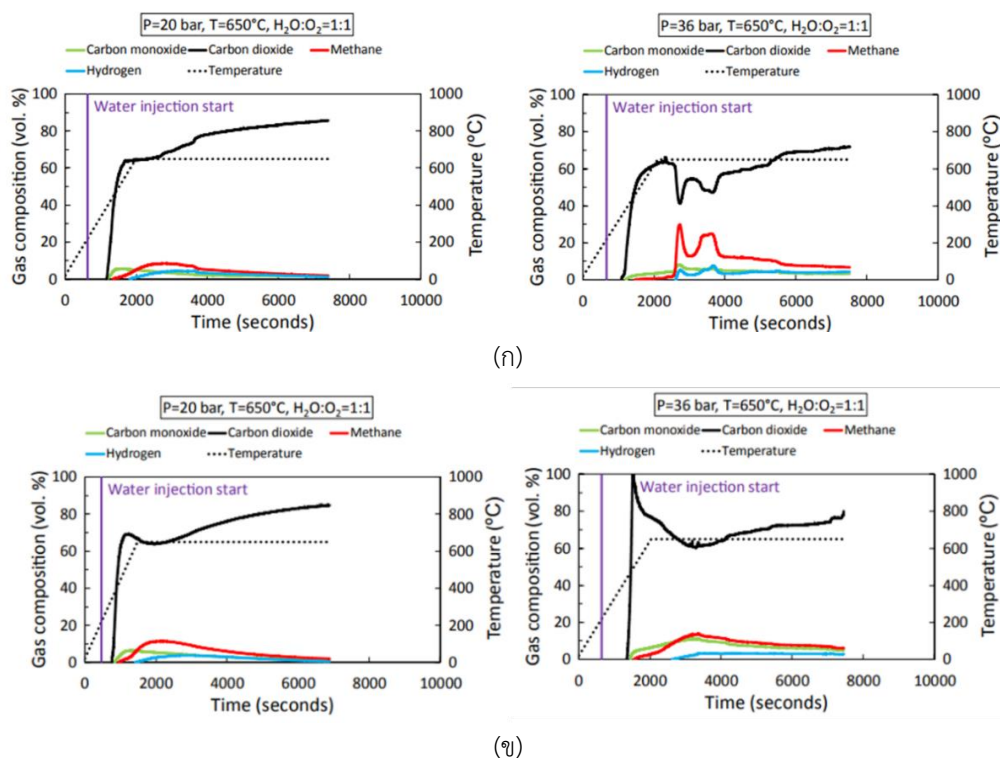
รูปที่ 15 ไดอะแกรมของชุดทดลอง [21]

Sadasivam และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนในองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดินซึ่งในการศึกษาได้เลือกใช้ถ่านหินที่มีคุณภาพสูงชนิด 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 การเพิ่มความดันให้แก่ระบบจะส่งผลให้องค์ประกอบของก๊าซบางชนิดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนเนื่องจากปฏิกิริยามีเทนเนชันและการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์ ในทางกลับกันองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอน

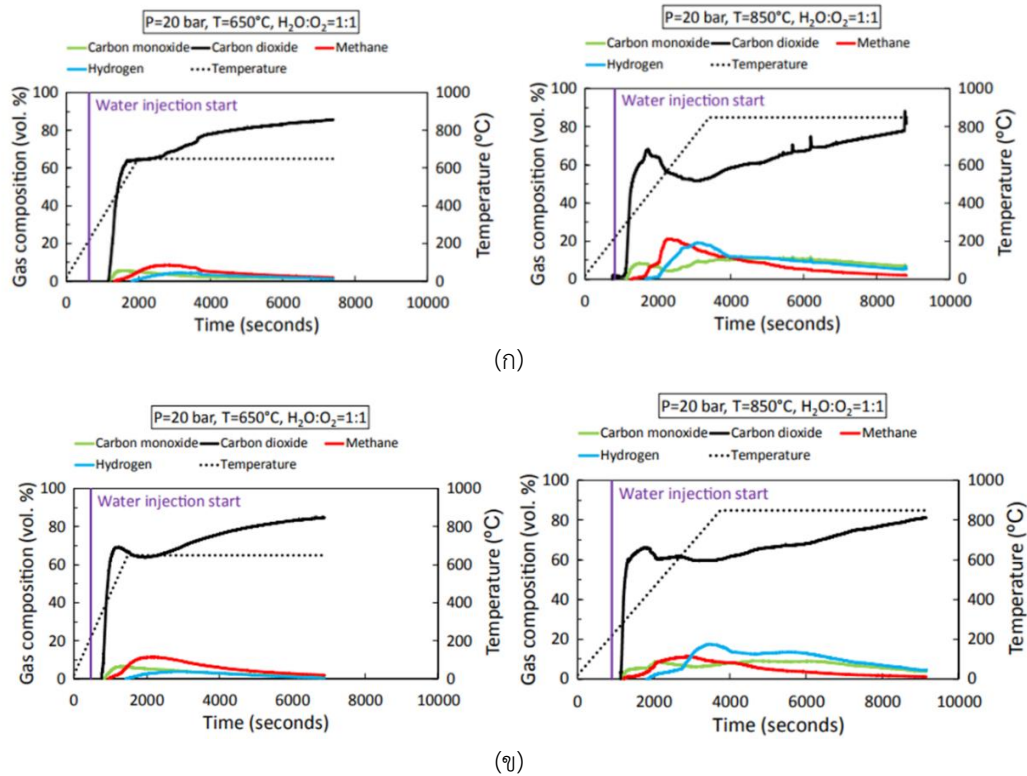
มอนอกไซด์กลับไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญซึ่งอาจจะเป็นเพราะการเกิดการออกซิเดชันในถ่านหินนั้นมีความซับซ้อนมากกว่าการเกิดการออกซิเดชันกับคาร์บอนบริสุทธิ์เพราะว่าในถ่านหินนั้นมีองค์ประกอบของแร่ธาตุหลายชนิดซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้จะกลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเคมีและเกิดการไปรบกวนการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 16

ปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มของอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน เพราะปฏิกิริยา ยานูดาร์ตและปฏิกิริยา 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 Dagupati และคณะ (2011) [14]	ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรง (Cavity) ระหว่างการพ่นแบบแนวนอน (Horizontal Injection) และการพ่นแบบแนวตั้ง (Vertical Injection)	Simulations & Experiments	Nitrogen gas ,Helium gas	Oxygen	จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมของการไหลแบบแนวตั้งนั้นส่งผลต่อการขยายตัวของโพรงสาเหตุทำให้เกิดการกระจายตัวในทุกทิศทาง	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	ในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้นั้นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดจะมีขนาดของโพรงที่ใหญ่ตามมาด้วย	O ₂ flow rate: 0.4 (L/min)
Ranjeet Mandal และคณะ (2020) [16]	ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันตามเวลาจริงของ UCG	Experiments	Coal	Oxygen, Steam	ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของแต่ละตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริงในเวลานั้น ๆ	O ₂ flow rate: 1-5 (L/min) Stream feed: Pulse Value
Ganesh Samdani และคณะ (2016) [17]	ศึกษาการขยายตัวของโพรง (Cavity) โดยสนใจพฤติกรรมของอนุภาคที่ตกลงมาสู่ด้านล่างของโพรง (Cavity) ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเตา	Simulations & Experiments	Coal	Oxygen, Steam	อนุภาคขนาดเล็กที่ร่วงหล่นลงขึ้นด้านล่างของเตา มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน	Stream/O ₂ ratio: 3.57 Molar flow rate: 3.2x10 ⁻³ kmol/m ² s
Swarnotpal Kashyap และคณะ (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) ละอองน้ำ (Steam) ที่ส่งผลต่อการกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	Experiments	Coal	Oxygen, Steam, Air	ออกซิเจน (O ₂) และไอน้ำ (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
Zagorščak และคณะ(2020) [20]	ศึกษาอิทธิพลของความดันที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	Experiments	Coal	Oxygen, Steam, Air	ความดันมีผลต่ออัตราการเกิดของก๊าซผลิตภัณฑ์ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ความดันสูงจะให้อัตราการเกิดก๊าซที่เสถียรและองค์ประกอบของก๊าซบางชนิดจะเกิดขึ้น	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]	ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะความดันสูง ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน	Experiments	Coal (Semi anthracite), Coal (Bituminous)	Mixtures of O ₂ &H ₂ O	ผลของความดันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและส่งผลให้องค์ประกอบของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น และการเพิ่มจำนวนโมเลกุลของน้ำไดออกซิเจนสามารถเพิ่มองค์ประกอบของก๊าซมีเทน	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	
	Lehizensk	Air
	Moscow	Air
	suburbs	
USA	Maas Mine	Air
	High Vegas	Air
	North Wyoming	Air
Australia	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 โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้อากาศเป็นออกซิแดนซ์ 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] ได้แก่แอ่งกระบี่ ที่จังหวัดกระบี่ และแอ่งสินปุนที่จังหวัดนครศรีธรรมราช มีความลึกที่เหมาะสมแก่การทำ UCG

6. สรุปข้อดีของการเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินใต้ดิน

1. การศึกษาพบว่าเทคโนโลยีการผลิตก๊าซจากถ่านหินใต้ดิน (UCG) นั้นเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับชุมชนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะการทำ UCG นั้นไม่มีการรบกวนที่ของชาวบ้านเพื่อขอเปิดหน้าดินทำเหมือง และไม่ต้องมีการฟื้นฟูเพราะไม่มีการเปิดหน้าดินและการทำลายป่าไม้ และใช้พื้นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทำเหมืองแบบเปิดหน้าดิน

2. การศึกษาพบว่าการผลิตก๊าซจากกระบวนการ UCG นั้นมีการปล่อยมลพิษที่น้อยกว่าการนำถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์โดยวิธีการอื่นเพราะในระหว่างกระบวนการนั้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกักเก็บไว้ในชั้นใต้ดินและเมื่อ ก๊าซผลิตภัณฑ์ขึ้นมาสู่ข้างบนแล้วเรายังสามารถทำความสะอาดก๊าซได้ง่ายอีกด้วย และยังช่วยลดมลพิษทางน้ำ เพราะไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดหรือล้างถ่านหินก่อนเข้าสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์

3. การศึกษาพบว่าต้นทุนในการผลิตก๊าซจากกระบวนการ UCG นั้นต่ำกว่ากระบวนการอื่น ๆ ในกรณีที่ ถ่านหินนั้นอยู่ในระดับความลึกมาก ๆ เพราะการทำ UCG ไม่จำเป็นต้องเปิดหน้าดิน และลดภาระของการจ้างแรงงาน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตก๊าซต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้เศรษฐกิจ และสาธารณูปโภคพื้นฐาน ราคาต้นทุนลดลงด้วย เช่น ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

4. การศึกษาพบว่า การขนส่งก๊าซที่ได้จากกระบวนการ UCG นั้นง่ายและสะดวกเพราะก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะถูกขนส่งผ่านทางท่อและสามารถส่งไปยังผู้ใช้ปลายทางได้โดยตรง

7. สรุป

จากที่ได้ทบทวนเอกสารงานวิจัยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินได้ (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. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ร่วงลงมาสู่พื้นของโพรง จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเหล่านี้เป็นตัวช่วยสะสมความร้อนภายในโพรง 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.