

บทที่ 3 ทฤษฎี

กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification process) คือกระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงโดยกระบวนการเปลี่ยนสถานะของเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง จากการทำปฏิกิริยาเคมีของสารสองสถานะ คือของแข็งกับก๊าซ และสถานะเดียวกันคือก๊าซกับก๊าซ กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยกระบวนการ 4 กระบวนการคือ กระบวนการอบแห้ง กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการรีดักชัน ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีหน้าที่แตกต่างกันไป โดยจะต้องเกิดขึ้นอย่างสมดุลกัน จึงจะทำให้เกิดก๊าซเชื้อเพลิง โดยก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะมีองค์ประกอบของก๊าซที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ประเภทและขนาดของเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ รวมไปถึง ประเภทของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ให้เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

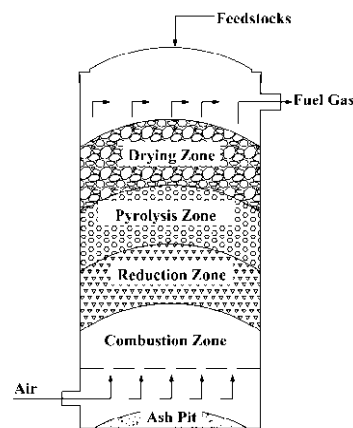
3.1 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลักซ์เบด (Fixed bed gasifiers)

เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลักซ์เบด แบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลของเชื้อเพลิง จำแนกได้ 3 ประเภทคือ เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier) เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft gasifier) และเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง (Crossdraft gasifier)

3.1.1 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier)

เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้นมีทิศทางการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงจากด้านล่างของเตาขึ้นไปสู่ด้านบนของเตา ซึ่งสวนทางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 อากาศจะถูกจ่ายเข้าสู่โซนเผาไหม้ (Combustion zone) เพื่อเพิ่มความร้อน และก๊าซจะไหลขึ้นสู่ทางด้านบน ในขณะที่เชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างลักษณะสวนทางกัน ผ่านชั้นของปฏิกิริยาต่างๆเป็นลำดับ จากโซนเผาไหม้ผ่านโซนรีดักชัน โซนไพโรไลซิส และโซนอบแห้ง ในระหว่างที่ก๊าซเชื้อเพลิงไหลผ่านโซนทั้ง 3 โซน ความร้อนจากก๊าซจะถ่ายเทไปยังเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อนำไปใช้สำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นในโซนนั้นๆ เนื่องจากก๊าซเชื้อเพลิงผ่านโซนอุณหภูมิต่ำ จะทำให้เกิดทาร์ซึ่งกลั่นตัวเป็นของเหลวเป็นผลให้ก๊าซเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิต่ำและมีองค์ประกอบของทาร์สูง ดังนั้นหากต้องการนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในนั้น จึงต้องการระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง ก่อนนำเข้าสู่เครื่องยนต์เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในของเครื่องยนต์ การผลิตก๊าซด้วยวิธีนี้อาจจะป้อนไอน้ำช่วยในการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มปริมาณ H_2 และ CO

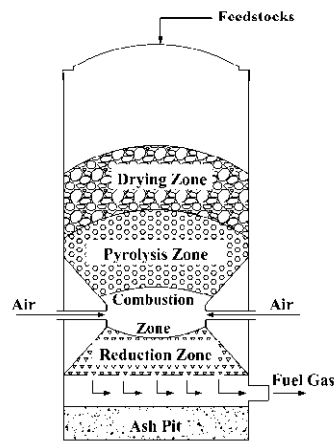
และช่วยควบคุมอุณหภูมิในโซนเผาไหม้ กรณีเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงไม่จำเป็นต้องป้อนไอน้ำ พารามิเตอร์ที่สำคัญประกอบด้วย วิธีการป้อนอากาศ ตำแหน่งของก๊าซเชื้อเพลิงไหลออก ชนิดและขนาดของตะแกรง การบดขยี้ ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง และค่า Specific Gasification Rate (SGR) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซในเวลา 1 ชั่วโมง (kg/hr) ต่อพื้นที่หน้าตัดของตะแกรง (m^2) โดยค่า SGR ของการผลิตก๊าซด้วยเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้นนี้มีค่าระหว่าง $100 - 300 \text{ kg/hr.m}^2$



รูปที่ 3.1 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น [14]

3.1.2 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

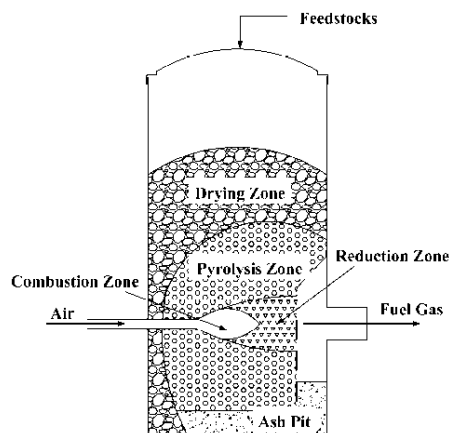
เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาที่ปนเปื้อนอยู่ในก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น โดยอากาศไหลลงทิศทางเดียวกับการไหลของเชื้อเพลิง โดยก๊าซเชื้อเพลิงจะผ่านโซนเผาไหม้ และผ่านโซนรีดักชัน ซึ่งมีจุดประสงค์ให้ก๊าซเชื้อเพลิงผ่านส่วนที่มีอุณหภูมิสูงก่อนออกจากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เพื่อให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงที่เกิดจากโซนไพโรไลซิส ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดทาร์สลายตัวเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลเบา เช่น CH_4 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะมีอุณหภูมิสูง $300 - 500^\circ C$ จุดสำคัญของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงคือลักษณะห้องเผาไหม้ รูปแบบตะแกรงและวิธีการป้อนอากาศโดยบริเวณห้องเผาไหม้ จะออกแบบให้เล็กลงโดยการลดพื้นที่หน้าตัด และปรับลักษณะการป้อนอากาศเพื่อทำให้อุณหภูมิภายในชั้นเผาไหม้มีค่าสูงเพียงพอในการสลายทาร์ โดยอัตราการผลิตก๊าซที่เหมาะสมมีค่า SGR อยู่ระหว่าง $2,900 - 3,900 \text{ kg/hr.m}^2$ ซึ่งการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงไปใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ยังคงต้องมีระบบทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่น ความชื้น และทาร์บางส่วนที่หลุดออกมา ก่อนนำเข้าสู่เครื่องยนต์ เนื่องจากกระบวนการผลิตก๊าซที่ซับซ้อนกว่าเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น จึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้กับเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้



รูปที่ 3.2 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง [14]

3.1.3 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง

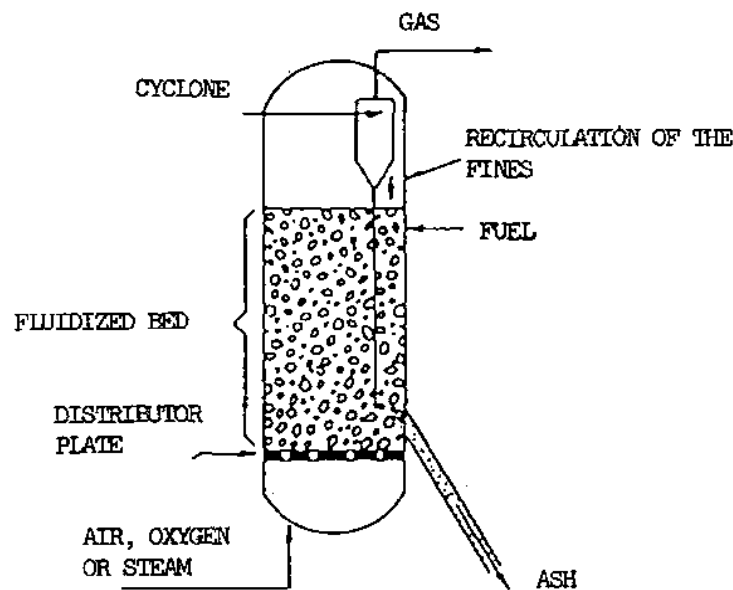
เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง เป็นระบบที่อากาศไหลขวางกับทิศทางของการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 3.3 ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้จะมียอดประกอบของทาร์น้อย เนื่องจากก๊าซเชื้อเพลิงผ่านโซนที่มีอุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงแต่จะมีโซนการเผาไหม้และโซนรีดักชันที่อยู่ใกล้ชิดกันมาก จึงส่งผลให้การเริ่มต้นทำงานของเตาผลิตก๊าซใช้เวลาน้อย ดังนั้นจึงสามารถผลิตก๊าซได้อย่างรวดเร็วแต่แปรผันง่าย โดยปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเตาผลิตก๊าซ แต่ขอบเขตของการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้นเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้นเนื่องจากโซนรีดักชันที่แคบ ส่งผลให้ก๊าซที่ผ่านโซนรีดักชันมีความเร็วสูง ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาในโซนนี้ CO_2 จะมีเวลาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนแข็งได้น้อย ทำให้เชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความร้อนต่ำ



รูปที่ 3.3 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง [14]

3.2 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed gasifier)

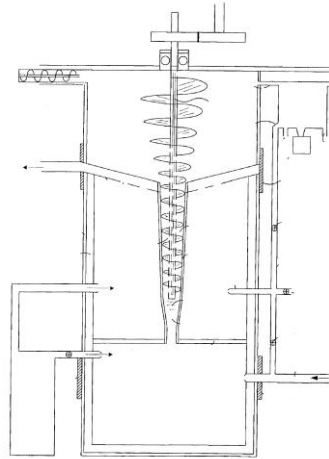
เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงขนาดเล็กบางชนิด เช่น เชื้อเพลิงมีขนาดเล็กโดยธรรมชาติ มีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณของเถ้าสูงและอุณหภูมิการหลอมเหลวของเถ้าต่ำ ในระบบฟลูอิดไดซ์เบด การสัมผัสกับ อากาศ สารตัวกลาง และเชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ $800 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้ เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด แบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้สำรอง ในสภาวะการทำงาน ภาวะ Steady state อุณหภูมิของสารตัวกลางเช่น ทราย ถ่าน หรือวัสดุเชื้ออื่นๆ จะมีการกระจายตัว สม่ำเสมออย่างทั่วถึง การเผาไหม้และการผลิตก๊าซจะเกิดขึ้นพร้อมกับที่สภาวะฟลูอิดไดซ์เบดของสาร ตัวกลาง แต่เนื่องจากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด ต้องการอากาศที่มีความเร็วสูง ดังนั้น จึงมีการสูญเสียเชื้อเพลิงไปกับอากาศบางส่วนและโปรดิวเซอร์ก๊าซจะมีอนุภาคฝุ่นปะปนสูง ดังแสดง ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด [14]

3.3 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบเอนทรานซ์เบด (Entrained bed gasifier)

หรืออาจเรียกว่า เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมูฟวี่งเบดเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง การทำงานในการถ่ายเทความร้อนคล้ายเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยปกติจะควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $482 - 593\text{ }^{\circ}\text{C}$ เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบเอนทรานซ์เบดมีประสิทธิภาพสูงในการทำปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับก๊าซ ลักษณะเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเช่น ผงถ่านหินและชีวมวลที่มีขนาดเล็ก การทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในช่องหมุนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบเอนทรานซ์เบด [14]

3.4 กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลักซ์เบดทั้ง 3 ประเภท มีกระบวนการผลิตก๊าซ 4 กระบวนการเช่นเดียวกัน คือ กระบวนการอบแห้ง กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการรีดักชัน แต่ละกระบวนการต้องเกิดขึ้นอย่างสัมพันธ์กันเพื่อจะทำให้เกิดก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแต่ละประเภทจะให้คุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน การอธิบายกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะอ้างอิงกระบวนการและตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงซึ่งใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นหลักโดยมีรายละเอียดของแต่ละโซนดังนี้

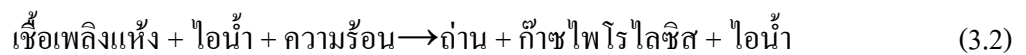
3.4.1 โซนอบแห้ง

คือกระบวนการระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิงแข็งซึ่งจะอยู่ด้านบนสุดของเตา โดยได้รับความร้อนมาจากโซนไพโรไลซิส ไอน้ำ และเชื้อเพลิงแห้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง จะไหลลงไปสู่โซนไพโรไลซิส ซึ่งอยู่ในโซนถัดไปด้านล่าง ในโซนนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ อุณหภูมิในโซนนี้มีค่าประมาณ $100 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วงอุณหภูมิในโซนอบแห้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงหากเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงจะส่งผลต่อโซนปฏิกิริยาภายในและส่งผลต่อไปยังคุณสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิง กระบวนการที่เกิดขึ้นในโซนนี้เป็นไปดังสมการที่ 3.1



3.4.2 โชนไฟโรไลซิส

คือกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยได้รับความร้อนจากโชนเผาไหม้ที่อยู่บริเวณด้านล่าง ทำให้สารระเหยที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแห้งจะถูกกลั่นสลายออกมาจากเชื้อเพลิงแห้งซึ่งประกอบไปด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิบ ก๊าซที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ อุณหภูมิในโชนนี้มีค่าประมาณ 200 – 600 °C ช่วงอุณหภูมิในโชนไฟโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสคือ ถ่าน และก๊าซไฟโรไลซิส อาทิเช่น CO, CH₄, C₂H₆, และก๊าซไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เป็นไปดังสมการที่ 3.2



3.4.3 โชนการเผาไหม้

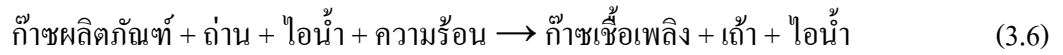
ก๊าซไฟโรไลซิสและถ่านที่ผ่านเข้ามาในโชนการเผาไหม้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศที่ง่ายเข้าสู่โชนการเผาไหม้ โดยในโชนการเผาไหม้นี้คาร์บอนจะเผาไหม้กับออกซิเจนในปริมาณที่จำกัด (Partial combustion) เพื่อผลิตพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในโชนปฏิกิริยาอื่น การออกแบบโชนเผาไหม้จึงมีความสำคัญต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมากเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้มาจากโชนการเผาไหม้เพียงแหล่งเดียว ปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิในโชนนี้มีค่าประมาณ 1,100 - 1,500 °C ผลผลิตหลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้คือ ความร้อนและเถ้าถ่าน กระบวนการที่เกิดขึ้นในโชนการเผาไหม้จะเกิดดังสมการที่ 3.3 และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เป็นไปดังสมการที่ 3.4 และ 3.5



3.4.4 โชนรีดักชัน

หลังจากผ่านโชนการเผาไหม้ CO₂, ไอน้ำ, N₂ ที่เข้ามาพร้อมกับอากาศและจากเชื้อเพลิง CO และก๊าซไฟโรไลซิสที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในโชนการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นรีดักชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในชั้นนี้เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนก๊าซไอน้ำให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากโชนการเผาไหม้จะทำปฏิกิริยาต่อในโชนรีดักชันเพื่อผลิตก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้

ซึ่งประกอบด้วย CO, H₂ และ CH₄ ซึ่งมีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง โดยในโซนนี้จะมีอุณหภูมิระหว่าง 600 – 900 °C ซึ่งกระบวนการในโซนนี้จัดชั้น เป็นไปดังสมการที่ 3.6 - 3.11



ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในโซนนี้ประกอบด้วย

ปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard reaction)



ปฏิกิริยาอวเตอร้ก๊าซ (Water gas reaction)



ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation reaction)



ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทน (Methanation)



ปฏิกิริยาเปลี่ยนก๊าซ CO เป็นก๊าซ CO₂ ด้วยน้ำ (Water shift reaction)



3.5 นิยามพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

3.5.1 โพรดิวเซอร์ก๊าซ (Producer gas) [13]

คือก๊าซที่ผลิตโดยการป้อนอากาศที่ปริมาณที่น้อยกว่าทางทฤษฎี (Substoichiometric air) ผ่านชั้นร้อนของถ่านหิน พิศ ไม้หรือของเหลือทางการเกษตร ส่วนประกอบหลักของโพรดิวเซอร์ก๊าซคือ CO, H₂, N₂ (มากถึง 55%) และ CO₂ ในปริมาณเล็กน้อย การนำไปใช้งานจะนำไปใช้ทันทีที่ผลิตได้ขณะยังร้อนอยู่หรือนำไปพอกให้สะอาดเพื่อกำจัด น้ำมันดินและเขม่าออกเสียก่อน อย่างไรก็ตามโพรดิวเซอร์ก๊าซมีค่าความร้อนต่ำเนื่องจากมี N₂ ปนอยู่มาก ดังนั้นถ้าต้องการให้ค่าความร้อนสูงขึ้นจึงต้องให้ N₂ น้อยกว่าทางทฤษฎี (Substoichiometric oxygen) แทนอากาศในการผลิตก๊าซ และการผลิตวอเตอร์ก๊าซคือ ก๊าซที่ผลิตขึ้นโดยปล่อยอากาศผ่านชั้นของถ่านหิน ถ่านโค้ก หรือไม้ เพื่อยกระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ให้สูงขึ้นก่อนพ่นไอน้ำลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับถ่านร้อนดังสมการที่ 3.12 ดังนี้



ผลผลิตที่ได้คือ CO และ H₂ ในปริมาณที่สูงกว่าโพรดิวเซอร์ก๊าซเพราะใช้ไอน้ำแทนอากาศทำให้ส่วนประกอบของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่า

3.5.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิง

คุณลักษณะที่สำคัญของก๊าซเชื้อเพลิงคือ ส่วนประกอบโดยปริมาตร ความหนาแน่นและค่าความร้อน เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างส่วนประกอบโดยปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิงบางชนิด ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงนั้น อยู่ในสภาวะเริ่มต้นที่ 25 °C ทำปฏิกิริยาสมบูรณ์กับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ซึ่งเย็นตัวลงมาที่ 25 °C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมี 2 ค่าคือ ค่าความร้อนทางสูง (Higher heating value, HHV) หรือ Gross calorific value (gross C.V.) ซึ่งเกิดขึ้นกรณีที่ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์การเผาไหม้กลั่นตัวเป็นน้ำ และค่าความร้อนทางต่ำ (Lower heating value, LHV) หรือ net calorific value (net C.V.) เกิดในกรณีที่ไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางต่ำสามารถหาได้จากค่าความร้อนทางสูง โดยการหักค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำในสารผลิตภัณฑ์ออกจากค่าความร้อนสูงดังสมการที่ 3.13 ดังนั้นได้ความสัมพันธ์ระหว่าง HHV (หรือ gross C.V.) และ LHV (หรือ net C.V.) คือ

$$\text{LHV (หรือ net C.V.)} = \text{HHV (หรือ gross C.V.)} - (m_{\text{H}_2\text{O}}/m_{\text{fuel}}) h_{\text{fg}} \quad (3.13)$$

เมื่อ h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำที่ 25 °C มีค่าเท่ากับ 2,440 kJ/kg

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ คือมวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้โดยรวมถึงน้ำที่มาจากความชื้นในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

m_{fuel} คือมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้

ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าแคลอริมิเตอร์ หรือคำนวณหาโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อทราบส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงนั้น ดังตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวอย่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบ (โดยปริมาตร) ของก๊าซเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ [13]

ส่วนประกอบ	ก๊าซธรรมชาติ	LPG	โพรพิลเชอร์ก๊าซ จากถ่านหิน	โพรพิลเชอร์ก๊าซ จากไม้
CO	-	-	20 - 30%	18 - 25%
H ₂	-	-	8 - 20%	13 - 25%
CH ₄	80-95%	-	0.5 - 3%	1 - 5%
C ₂ H ₆	<6	-	น้อยมาก	น้อยมาก
>C ₂ H ₆ *	<4	100%	น้อยมาก	น้อยมาก
CO ₂	<5	-	3 - 9%	5 - 10%
N ₂	<5	-	50 - 56%	45 - 54%
H ₂ O	-	-	-	5 - 15%

*รวมทั้งไฮโดรคาร์บอนที่หนักกว่า C₂H₆

ตารางที่ 3.2 ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงต่างๆที่ความดัน 1 บรรยากาศและ 25 °C [13]

ก๊าซเชื้อเพลิง	HHV		LHV	
	(MJ/m ³)	(MJ/kg)	(MJ/m ³)	(MJ/kg)
ไฮโดรเจน(H ₂)	11.80	141.77	10.06	119.85
คาร์บอนมอนอกไซด์(CO)	11.77	10.10	11.77	10.10
มีเทน(CH ₄)	37.05	55.47	33.38	49.99
อีเทน(C ₂ H ₆)	64.93	51.87	59.38	47.46
โพรเพน(C ₃ H ₈)	92.38	50.34	85.04	46.33
บิวเทน(C ₄ H ₁₀)	119.80	49.52	110.59	45.71
เอทิลีน(C ₂ H ₄)	58.71	50.28	55.02	47.10
อะซีทิลีน(C ₂ H ₂)	54.05	49.89	52.22	48.17
ก๊าซธรรมชาติ(ตัวอย่าง)	38.37	54.13	34.83	49.13
โพรพิลเชอร์ก๊าซ(ตัวอย่าง)	6.33	5.81	5.77	5.30

3.5.3 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติได้แก่ ไม้ ชีวมวลรูปแบบต่างๆ พืธ ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินบิทูมินัส และถ่านหินแอนทราไซต์ ขยะจากที่อยู่อาศัยและจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน โดยองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้ว ยังประกอบด้วย ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ น้ำ และเถ้าอีกด้วย ตัวอย่างเช่น ไม้ มีออกซิเจนอยู่ถึง 45% (โดยมวลและไมรวมน้ำหนักเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2% เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งปรากฏอยู่ 2 รูปแบบคือ เป็นน้ำอิสระ (Free water) แทรกตัวอยู่ระหว่างผนังเซลล์ของไม้หรือในรูพรุนเล็กๆ ของถ่านหินซึ่งน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปโดยอิทธิพลของความตึงผิว (Capillary effect) และเป็นน้ำที่ถูกดูดกลืนไว้อย่างเชิงกายภาพ (Physical absorption หรือ bound water) ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพโดยรวมของการเผาไหม้ เถ้าในเชื้อเพลิงแข็งคือสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้ว ไม้มีเถ้าเล็กน้อยในขณะที่ถ่านหินมีค่าสูงถึง 10% หรือมากกว่า คุณสมบัติของเถ้าโดยมีความสำคัญมากในการออกแบบอุปกรณ์การเผาไหม้และอุปกรณ์การถ่ายความร้อน ทั้งนี้เพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดสแลก (Slag fouling), การกัดกร่อน (Erosion) และการผุกร่อน (Corrosion) ลงได้

ตารางที่ 3.3 ปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่างๆ [13]

เชื้อเพลิง	ออกซิเจน ,% (dry, ash free basis)	ความชื้น,%	เถ้า,% (dry basis)
ไม้	45	15-50	0.1-1.0
พืธ	35	90	0.1-10
ถ่านหินลิกไนต์	25	30	>5
ถ่านหินบิทูมินัส	5	5	>5
ถ่านหินแอนทราไซต์	2	4	>5
เชื้อเพลิงจากขยะ	40	24	10 - 15

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งจะถูกรายงานตามลักษณะที่ได้รับมา (As-received basis) หรือในลักษณะ dry basis หรือ dry, ash-free basis ดังนั้นในการระบุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งต้องระบุเงื่อนไขให้ถูกต้องเพราะเกี่ยวข้องกับการคำนวณหาความร้อนทางสูงและทางต่ำโดยตรง ทำให้ช่วยพิจารณาได้อย่างถูกต้องว่าความร้อนแฝงของน้ำที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นน้ำอิสระ (Free water) หรือน้ำที่ถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง (Bound water) หรือน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

3.5.3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass)

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนมากเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) และลิกนิน ($C_{40}H_{44}O_6$) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชีวมวลชนิดไม้ (Woody biomass) และชีวมวลชนิดไม้ใช้ไม้ (Nonwoody biomass) ชีวมวลชนิดไม้ (ทั้งไม้เนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง) ได้แก่ กิ่งไม้ (Limb wood), เศษไม้ (Wood chips), ขี้เลื่อย (Sawdust), ถ่านไม้ (Charcoal), เศษเยื่อกระดาษ (Pulp waste) เป็นต้น ส่วนชีวมวลชนิดไม้ใช้ไม้ ได้แก่ แกลบ (Husks), ชานอ้อย (Bagasse), ฟางข้าว (Straws), ก้านรวงข้าว (Stalks), เปลือกเมล็ด (Pits) รวมไปถึงมูลสัตว์แห้ง (Manure) เป็นต้น

3.5.3.2 พีต (Peat)

พีตเกิดจากไม้หรือเซลลูโลสอยู่ในบริเวณอับอากาศและหมักหมมใต้ดินเป็นเวลานานจนเกิดการเน่าสลายทางเคมีโดยมีแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการที่ 3.14



พีตมีสีดำปนน้ำตาล มีรูพรุนและความชื้นสูงถึง 80 - 90% จึงต้องตากแห้งก่อนนำไปใช้

3.5.3.3 ถ่านหิน

ถ่านหินเกิดจากไม้และชีวมวลอื่นๆที่ทับถมกันและอัดแน่นเป็นเวลานานหลายแสนปีจนกระทั่งกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพีตในบริเวณที่ชื้นแฉะและอับอากาศแล้วเกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพ (Biochemical decomposition) พร้อมกับการทับถมกันของพืชชนิดต่างๆ เพิ่มเข้ามาจนมีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆให้พีตมีความชื้น ความพรุน (Porosity) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter content) พร้อมกับปริมาณของ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พีตจะเปลี่ยนถ่านหินที่มีศักย์ (Rank of coal) สูงตามลำดับ (มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้น) คือ ลิกไนต์ บิทูมินัสและแอนทราไซต์ในที่สุด โดยเรียกกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า การเกิดถ่านหิน (Coalification) ถ่านหินมีองค์ประกอบหลัก คือประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้วยังประกอบไปด้วย ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และสารอนินทรีย์อื่นๆ (ในปริมาณเล็กน้อย) ที่จะกลายเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัส และออกไซด์ของซิลิกอนเช่น แร่ไฟไรต์ แร่แคลไซต์ และแร่แคลิไนต์ เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.4 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของไม้สน (Pine) กับถ่านหินบิทูมินัส คุณภาพถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบ่งตามศักย์ถ่านหิน (Rank of coal) กับแบ่งตามเกรดของถ่านหิน (Grade of coal) ศักย์ของถ่านหินเช่น ลิกไนต์ที่มีศักย์ต่ำ (Low rank) ในขณะที่แอนทราไซต์มีศักย์สูง (High rank) พิจารณาจากค่าความร้อนของถ่านหิน (สำหรับถ่านหินศักย์ต่ำ) และจากปริมาณของคาร์บอนคงตัว (สำหรับถ่านหินศักย์สูง) ภายใต้งี๊วแห้งหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า (dry, free ash basis) ดังแสดงในตารางที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการแบ่งชนิดถ่านหินตามศักย์ของถ่านหิน

สำหรับเกรดของถ่านหิน พิจารณาจากปริมาณเถ้า จุดหลอมเหลวของเถ้า (Ash fusion temperature) ปริมาณกำมะถันและสารประกอบคุณภาพต่างๆ เป็นหลักโดยไม่เกี่ยวกับสัณฐานของถ่านหินแต่ประการใด การเพิ่มเกรดของถ่านหิน ทำได้หลายวิธีทั้งทางโดยทางกลหรือทางเคมีเพื่อลดปริมาณสิ่งต่างๆที่ได้กล่าวมาให้น้อยลง เช่นการบดถ่านหินให้เป็นผงขนาด 10 mm แล้วล้างด้วยน้ำก็สามารถลดปริมาณเถ้าให้เหลือน้อยกว่า 1%ได้ หรือใช้วิธีแยกความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (Gravity separation) เพื่อให้สิ่งเจือปนที่มีน้ำหนักมากกว่าถ่านหินตกตะกอนแยกออกมาจากถ่านหินเป็นต้น

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส [13]

ธาตุ	ไม้สน (ppm)	ถ่านหินบิทูมินัส (ppm)
Ca	760	>5,000
Na	28	200 - 5,000
K	39	200 - 5,000
Mg	110	200 - 5,000
Mn	97	6 - 210
Fe	10	>5,000
P	40	10 - 340
Si	-	>5,000
Al	6	>5,000
Cl	48	200 - 1,000

ตารางที่ 3.5 การแบ่งชนิดของถ่านหินโดยสัณฐานของถ่านหิน (อ้างอิงแห้งและไม่กิดเถ้า) [13]

สัณฐานของถ่านหิน	คาร์บอนคงตัว (%)	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)
เมตา-แอนทราไซต์	>98	-
แอนทราไซต์	92 - 98	-
เซมิแอนทราไซต์	86 - 92	-
บิทูมินัสสารระเหยต่ำ	78 - 86	-
บิทูมินัสสารระเหยปานกลาง	69 - 78	-
บิทูมินัสสารระเหยสูง A	-	>32
บิทูมินัสสารระเหยสูง B	-	30 - 32
บิทูมินัสสารระเหยสูง C	-	27 - 30
ซับบิทูมินัส A	-	24 - 27
ซับบิทูมินัส B	-	22 - 24
ซับบิทูมินัส C	-	19 - 22
ลิกไนต์ A	-	15 - 19
ลิกไนต์ B	-	<15

3.5.4 การเผาไหม้อนุภาคคาร์บอน

การเผาไหม้อนุภาคคาร์บอนนับว่ามีความสำคัญมากเพราะคาร์บอนบดละเอียดเช่น ถ่านหินบดละเอียด เป็นต้น จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงอย่างแพร่หลายในเตาเผาอุตสาหกรรมหรือหม้อไอน้ำ นอกจากนี้แล้ว การเผาไหม้ของโลหะบางชนิดและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นใดที่แยกสลายด้วยความร้อนได้และมีสภาพเป็นคาร์บอนที่เหลือจากภายหลังขบวนการแยกสลายด้วยความร้อนสิ้นสุดอย่างสมบูรณ์แล้วต่างก็มีกลไกการเผาไหม้เหมือนกับอนุภาคคาร์บอนทั้งสิ้น ดังนั้นเมื่อทราบกลไกที่แน่ชัดของอนุภาคคาร์บอนก็สามารถคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ของคาร์บอนได้และเมื่อทราบต่อไปถึงการกระจายขนาดของอนุภาคคาร์บอนก็จะสามารถหาค่าอัตราการเผาไหม้ของกลุ่มอนุภาคคาร์บอน (Cloud of pulverized carbon) อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ พลิกซ์ความร้อนที่ผิวเชื้อเพลิงนั้นได้รับและอัตราการแพร่ของเชื้อเพลิงเข้าสู่ผิวเชื้อเพลิง ในเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็งที่แยกสลายด้วยความร้อนได้นั้น เปลวไฟการเผาไหม้เกิดขึ้นในสถานะก๊าซห่างจากผิวเชื้อเพลิง ในขณะที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาจะเกิดขึ้นที่ผิวของเชื้อเพลิง ทั้งนี้เพราะว่าในเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็งที่แยกสลายด้วยความร้อนได้นั้นจะเกิดการระเหยเป็นไอที่ผิวเชื้อเพลิงเหลว (กรณีเชื้อเพลิงเหลว) พร้อมทั้งเกิดการปลดปล่อยก๊าซสารระเหยภายในเชื้อเพลิงแข็งที่แยกสลายด้วยความร้อนได้นั้น เคลื่อนที่ออกจากผิวเชื้อเพลิงโดยรอบอยู่ตลอดเวลาและสวนทางกับออกซิเจนที่แพร่จากบรรยากาศรอบข้างเข้าหาผิวเชื้อเพลิงเปลวไฟจึงอยู่ห่างจากผิวเชื้อเพลิงเพราะถูกผลักออกมาโดยไอเชื้อเพลิงหรือก๊าซระเหยนั่นในทางตรงกันข้าม เชื้อเพลิงแข็งธรรมดาไม่มีไอเชื้อเพลิงหรือสารระเหยใดๆเกิดขึ้น ออกซิเจนจึงแพร่เข้าหาผิวเชื้อเพลิงและติดไฟที่ผิวได้เมื่ออุณหภูมิสูงเพียงพอเราจึงสังเกตเห็นว่าก่อนถ่านเวลาเผาไหม้จะมีสีแดงสว่างที่ผิวอันเนื่องมาจากเปลวไฟอยู่ติดกับผิวของถ่านนั่นเอง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากถ่านจะถ่ายโอนสู่สิ่งแวดล้อมโดยการแผ่รังสี จากการทดลองพบว่าถ่านอนุภาคคาร์บอนที่เผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.25 mm ผลของการแผ่รังสีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอนุภาคคาร์บอนมีค่าต่ำประมาณ 1,100 K เท่านั้น ดังนั้นเพื่อที่จะลดการสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสี เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ผิวให้สูงกว่าค่าดังกล่าวแล้ว จำเป็นต้องลดขนาดอนุภาคคาร์บอนให้เล็กกว่าขนาดข้างต้นลงไปอีก จากการที่กลไกการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาหรืออนุภาคคาร์บอนขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิงเป็นสำคัญและการเผาไหม้ดังกล่าวจัดได้ว่าเป็นการเผาไหม้แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous combustion) ซึ่งโดยทั่วไปของการเผาไหม้ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 5 ประการคือ

- ก. ออกซิเจนแพร่เข้าสู่เชื้อเพลิง
- ข. ออกซิเจนถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวเชื้อเพลิง
- ค. ออกซิเจนที่ถูกดูดกลืนไว้ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้สารผลิตภัณฑ์และถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวเชื้อเพลิง

ง. สารผลิตภัณฑ์ถูกปลดปล่อยออกมาที่ผิวเชื้อเพลิง

จ. สารผลิตภัณฑ์แพร่ออกมาจากผิวเชื้อเพลิง

ขั้นตอนเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ ขั้นตอนไหนเกิดขึ้นที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้น ในกรณีเชื้อเพลิงแข็งธรรมดาเป็นอนุภาคคาร์บอนจะพบว่าขั้นตอน ข. และ ง. เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก

3.5.5 อัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็ง

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปของเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นเชื้อเพลิงก๊าซของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งก็คือปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ซึ่งนิยามที่สภาวะปกติต่อปริมาณของเชื้อเพลิงแห้งที่ใช้ผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถนิยามได้ 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 รวมองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงทั้งหมด เมื่อต้องการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ และรูปแบบที่ 2 ไม่รวมองค์ประกอบของ N_2 (Free Nitrogen) เมื่อต้องการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพ

3.5.6 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

เป็นปริมาณไร้หน่วยที่นิยมใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งเป็นตัวบอกให้ทราบว่าส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์อยู่ห่างไกลจากค่าทางทฤษฎีแค่ไหน อัตราส่วนสมมูลมี 2 ชนิดคือ

1. Fuel Equivalent Ratio, ER

$$ER_{Fuel} = \frac{(\dot{m}_{Air} / \dot{m}_{Fuel})}{(A / F_{Stoi})} \quad (3.15)$$

โดยที่

ER_{Fuel} = อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

$\dot{m}_{Air}$ = อัตราการป้อนอากาศ (kg/h)

$\dot{m}_{Fuel}$ = อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (kg/h)

A / F_{Stoi} = อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีของถ่านหิน

เท่ากับ 7.72[13]

2. Oxidizer Equivalent Ratio,

$$ER_{Oxi} = \frac{1}{ER_{Fuel}} \quad (3.16)$$

เมื่อ

$ER_{Fuel} < 1$ หรือ $ER_{Oxi} > 1$

เรียกว่า Fuel - lean mixture

$ER_{Fuel} > 1$ หรือ $ER_{Oxi} < 1$

เรียกว่า Fuel - rich mixture

$ER_{Fuel} = 1$ หรือ $ER_{Oxi} = 1$

เรียกว่า Stoichiometric ratio

โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชัน จะเผาไหม้เชื้อเพลิงในสถานะที่มีการควบคุมปริมาณอากาศ ทำให้เป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยปริมาณของอากาศจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Stoichiometric fuel air ratio) ซึ่งมีค่า Fuel equivalent ratio ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้โดยมีค่าประมาณ 0.25

3.5.7 Hearth load

Hearth Load ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิงในสถานะปกติ 25 °C 1 atm ต่อพื้นที่หน้าตัดของคอคอดในโซนการเผาไหม้

3.5.8 Specific Gasification Rate

ค่า Specific Gasification Rate (SGR) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาผลิตก๊าซในเวลา 1 ชั่วโมง (kg/hr) ต่อพื้นที่หน้าตัดของตะแกรง (m²) ขึ้นอยู่กับ ชนิดเชื้อเพลิง การออกแบบและการทำงานของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง อัตราการผลิตก๊าซที่เหมาะสมมีค่า SGR อยู่ระหว่าง 2,900 - 3,900 kg/hr-m²

3.5.9 ประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Efficiency)

ปัจจัยที่สำคัญในการหาประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคือการหาประสิทธิภาพในการทำงานที่แท้จริงของเตาผลิตก๊าซ สามารถหาได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ได้จากเตาผลิตก๊าซซึ่งหมายถึง พลังงานที่ได้จากก๊าซที่ผลิตได้ กับพลังงานที่ใช้ในการผลิตซึ่งหมายถึงพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใช้ สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.17

$$\eta_{\text{Gasifier}} = \frac{HHV_{\text{Gas}} \times Q_{\text{Gas}}}{HHV_{\text{Fuel}} \times \dot{m}_{\text{Fuel}}} \times 100 \quad (3.17)$$

โดยที่	η_{Gasifier}	= ประสิทธิภาพของเตา (%)
	HHV_{Gas}	= ค่าความร้อนทางสูงของก๊าซ (MJ/Nm ³)
	Q_{Gas}	= อัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Nm ³ /h)
	HHV_{Fuel}	= ค่าความร้อนทางสูงของเชื้อเพลิง (MJ/kg)
	$\dot{m}_{\text{Fuel}}$	= อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/h)

3.6 การออกแบบเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาทาร์ที่ปนเปื้อนอยู่ในก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ไม่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์โดยเฉพาะเครื่องยนต์สันดาปภายในเพราะจะทำให้เครื่องยนต์สึกหรอและอายุการใช้งานของเครื่องยนต์จะลดลง ซึ่งเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงสามารถลดปัญหาของการเกิดทาร์ เนื่องจากทาร์ที่ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิส จะไหลผ่านโซนการเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูง ทาร์จะสลายตัวและจัดเรียงโมเลกุลใหม่ ก่อนเข้าสู่โซนรีดักชัน การออกแบบโซนการเผาไหม้มีความสำคัญต่อการเผาไหม้ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้คือ ขนาดของห้องเผาไหม้ โดยจะต้องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมกับปริมาณอากาศและรูปแบบของการฉีดอากาศที่ปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้สม่ำเสมอทั่วพื้นที่ห้องเผาไหม้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องเกิดอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของโซนการเผาไหม้เพื่อป้องกันการหลุดรอดของทาร์วิธีการที่นิยมใช้สำหรับการแก้ปัญหาคอขวดของทาร์ออกจากเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคือการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของโซนเผาไหม้ หรือที่เรียกว่า คอคอด (Throat) ในส่วนการออกแบบ คอคอดจำเป็นต้องเข้าใจความสัมพันธ์ของ Hearth Load จึงจะกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดได้ การออกแบบขนาดของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลดปล่อยพลังงานจากก๊าซเชื้อเพลิงที่ต้องการ และ ค่าความร้อนทางสูงของก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งจะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงสำหรับการออกแบบได้ เมื่อทราบอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงจึงจะสามารถเลือกขนาดของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากตารางเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงแบบอิมเบิร์ด [14] ได้ โดยขนาดของส่วนประกอบภายในที่สำคัญต่อการออกแบบเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยขนาดช่องเก็บเชื้อเพลิง, เส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด, ความยาวของโซนรีดักชัน, ความยาวของโซนเผาไหม้, ตำแหน่งของท่อส่งอากาศ และพื้นที่หน้าตัดของท่อส่งอากาศ ตัวอย่างการออกแบบเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงดังแสดงในภาคผนวก ก

3.7 ของไหลนาโน (Nanofluid)

3.7.1 การแบ่งสาขานาโนเทคโนโลยี

มี 3 สาขาหลัก คือ

1. นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านชีวภาพ เช่น การพัฒนานาโนไบโอเซนเซอร์ หรือ หัวตรวจวัดสารชีวภาพ และสารวินิจฉัยโรคโดยใช้วัสดุชีวโมเลกุล การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยาที่สามารถหวังผลการมุ่งทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายเฉพาะเจาะจง เช่น เซลล์มะเร็ง การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางในการส่งผ่านสารบำรุงเข้าสู่ชั้นได้ผิวหนังได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น
2. นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (ไฮเทค) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและทำงานด้วยประสิทธิภาพที่สูง ตัวอย่างเช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลชีพ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ การพัฒนานาโนชิป ทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง การพัฒนา High density probe storage device เป็นต้น
3. วัสดุนาโน (Nanomaterials) การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านวัสดุนาโน เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตผลอนุภาคนาโนมาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียไวรัส หรือทำให้ไม่เปียกน้ำ เป็นต้น

3.7.2 เทคโนโลยีการผลิตของไหลนาโน

การผลิตของไหลนาโนเป็นสิ่งสำคัญอย่างแรก เพื่อที่จะได้มาซึ่งของไหลนาโนที่มีคุณภาพ สำหรับการผสมอนุภาคนาโนกับสารทำงานเข้าด้วยกันนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ซึ่งต้องทำให้ของไหลนาโนไม่เกิดการตกตะกอน ไม่รวมตัวกัน และไม่เปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีของอนุภาคนาโนในสารทำงาน เทคโนโลยีการผลิตของไหลนาโนแบ่งได้ 2 วิธี คือ วิธี Single - step method และวิธี Two - step method ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

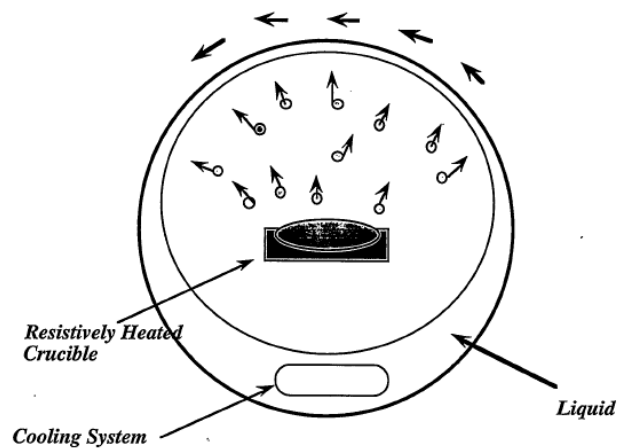
3.8.2.1 Single-step method

เทคโนโลยีการผลิตของไหลนาโนด้วยวิธี Single-step method เหมาะสำหรับการผลิตอนุภาคนาโนจำพวกโลหะ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการระเหยโดยตรง ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า VEROS (Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate) โดย Eastman และคณะ [15] ได้ทำการระเหยทองแดงโดยตรง และไอของทองแดงถูกควบแน่นไปผสมกับสารทำงานที่มีความดันไอต่ำ สารทำงานอยู่ภายในทรงกระบอกที่ถูก

หมุนอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แรงหมุนนี้ทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆของสารทำงานที่ผิวท่อ และถูกผสมกับไอทองแดงที่ควบแน่น จึงเกิดเป็นของไหลนาโนที่มีอนุภาคทองแดงขนาดเฉลี่ยประมาณ 10 nm

ตารางที่ 3.6 ค่าการนำความร้อนของโลหะและของเหลว [15]

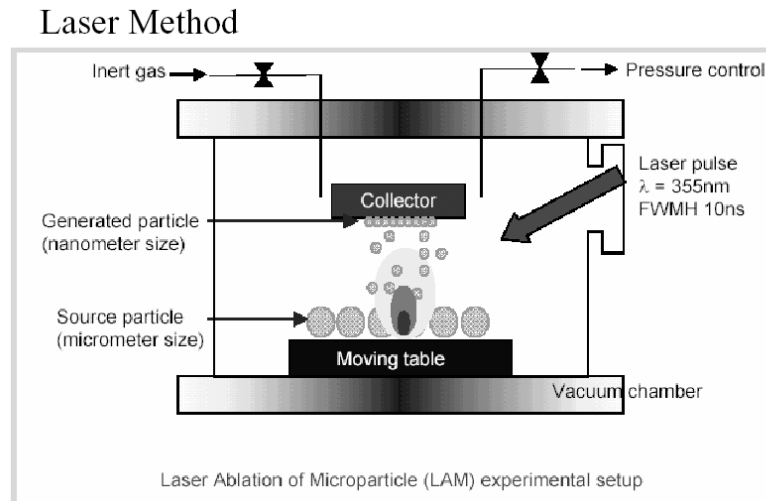
	Material	Thermal Conductivity (W/m.K)
Metallic Solids :	Silver	429
	Copper	401
	Aluminum	237
Nonmetallic Solids :	Silicon	148
	Alumina (Al_2O_3)	40
Metallic Liquids :	Sodium@644K	72.3
Nonmetallic Liquids :	Water	0.613
	Ethylene Glycol	0.253
	Engine Oil	0.145



รูปที่ 3.6 การผลิตของไหลนาโนด้วยวิธี single-step [15]

3.8.2.2 Two-step method

เทคโนโลยีนี้เหมาะสำหรับการผลิตอนุภาคนาโนจำพวกออกไซด์ โดยจะผลิตอนุภาคนาโนขึ้นมาก่อน โดยการระเหยและถูกทำให้ควบแน่นด้วยก๊าซเฉื่อย (Inert gas) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 หลังจากนั้นจึงนำไปผสมกับสารทำงาน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic equipment) เพื่อให้อนุภาคนาโนกระจายตัวได้ดีในสารทำงาน และไม่ทำให้อนุภาคนาโนตกตะกอน



รูปที่ 3.7 Laser Ablation of Microparticle (LAM) [15]

3.7.3 การนำวัสดุนาโนมาใช้ประโยชน์ (Applications in Nanomaterials)

เนื่องจากวิทยาการทางด้านนาโนศาสตร์เป็นความรู้ใหม่เพิ่มมีการนำเสนองานวิจัยเมื่อปี ค.ศ. 1991 อีกทั้งศักยภาพของวัสดุนาโนมีคุณสมบัติครอบคลุมศาสตร์ต่างๆ หลายหลายแขนง ดังนี้

1. ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ (Integrated electronics and optoelectronics) เช่น หน่วยความจำ (Memory cell) ที่มีขนาดประมาณ 90 nm และคาดว่าจะลดขนาดลงเหลือประมาณ 22 nm ในปี ค.ศ. 2016 วัสดุพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ (Plastic electronics), อุปกรณ์ตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensors), อุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมี (Chemical sensors) หรืออุปกรณ์แสดงผลโครงสร้างสุขภาพ (Structural health monitoring) เป็นต้น
2. ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพนาโนและการแพทย์นาโน (Bionanotechnology and nanomedicine) เช่น การขนส่งยาไปยังที่หมายเฉพาะ (Targeted drug delivery), การแสดงภาพโมเลกุล (Molecular

imaging), ตัวต่อต้านจุลชีพ (Antimicrobial agents), เนื้อเยื่อและโครงนาโน (Tissues and scaffolds) หรือ เครื่องแสดงผลสุขภาพอัจฉริยะ (Smart health monitoring) เป็นต้น

3. ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering) เช่น วัสดุเชิงกลนาโน (Nanomechanics materials), ระบบไฟฟ้าเชิงกลนาโน (Nanoelectro-mechanical systems), วัสดุโครงสร้างอัจฉริยะ (Smart material structures), วัสดุและโครงสร้างป้องกันไฟ (Fire retardant materials and structures), วัสดุประกอบ (Composites) หรือพลาสติกยิ่งยวด (Superplastic) เป็นต้น
4. ทางด้านพลังงานเช่น เป็นวัสดุกักเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (Hydrogen storage), ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry), เซลล์สุริยะ (Solar cell), หรือท่อคาร์บอนนาโนความหนาแน่นกระแสสูง (Highest current density carbon nanotubes) เป็นต้น
5. การวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐาน ฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ งานวิจัยทางด้านนาโนศาสตร์ยังมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการอาศัยหลักการ ทฤษฎีและองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปทางฟิสิกส์ หรือเคมีของวัสดุนาโนที่แตกต่างไปจากวัสดุเดิมในระดับไมโคร เป็นต้น