บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass fuels)

เชื้อเพลิงชีวมวล หมายถึง เชื้อเพลิงที่ได้จากบรรดามวลสารสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย ซึ่งจะเป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้ และจะมีความแตกต่างกับเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอย่างจำกัดเพราะเวลาการเกิด นั่นคือเชื้อเพลิงฟอสซิลจะใช้เวลาในการสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ ที่ยาวนานเป็นล้านๆ ปีภายใต้อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม

ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งออกเป็นชีวมวลที่ได้จากพืชและสัตว์ [4-5]

1.1 ชีวมวลที่ได้จากพืชสามารถแบ่งตามที่มาได้เป็น 5 จำพวก คือ

- ไม้ชนิดต่างๆ ซึ่งรวมถึงไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง
- วัสดุทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง
- วัชพืชบุก และวัชพืชน้ำ เช่น หญ้า ผักตบชวา
- ผลิตภัณฑ์ที่มาจากพืช เช่น น้ำมันพืช
- สิ่งที่เหลือทางการเกษตร เช่น เศษไม้ ขี้เลื่อย แกลบ ชานอ้อย

1.2 ชีวมวลที่ได้จากสัตว์ ได้แก่ มูลสัตว์ต่างๆ

2. การเปลี่ยนรูปชีวมวล (biomass conversion)

การนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานจะมีกระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานได้ 3 ประเภท [4-5] คือ

2.1 การเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (biochemical conversion) สามารถแบ่งตามกระบวนการได้ดังนี้ คือ

- กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) เป็นการใช้แบคทีเรียในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์เพื่อให้เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas)
- กระบวนการหมัก (yeast fermentation) เป็นการหมักจำพวกแป้งเพื่อให้กลายเป็นแอลกอฮอล์ (alcohol) สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

2.2 การเปลี่ยนรูปโดยการสกัด (extraction conversion)

การเปลี่ยนรูปโดยการสกัดเป็นการเปลี่ยนรูปชีวมวลประเภทพืชน้ำมันเพื่อสกัดเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเดินเครื่องยนต์หรือเผาไหม้ เช่น ถั่วลิสง เม็ดสะบู่ดำ โดยมีการสกัดอยู่ 2 วิธี คือ การสกัดโดยการบีบอัดทางกล (pressing extraction) และการสกัดโดยสารละลาย (solving extraction)

2.3 การเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion)

- การเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) แต่จะมีการสูญเสียความร้อนจากเตามาก ทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้นี้ต่ำ

- กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในสภาวะที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิ 200-600°C ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

- กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่มีอยู่ในชีวมวลโดยเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์ และแก๊สที่ได้นี้จะเรียกว่าโปรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas)

3. **ลักษณะและประเภทของแก๊สซิฟิเคชั่น** (gasification)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น คือ กรรมวิธีการสลายโมเลกุลชีวมวลด้วยความร้อนในภาชนะปิดโดยทั่วไปในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นจะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ในสภาวะจำกัดออกซิเจนเรียกว่า partial combustion ซึ่งระบบเตาผลิตแก๊สสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลไปเป็นแก๊สได้ร้อยละ 50-70 ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่นสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทดังนี้ [4-5] คือ

3.1 oxidaton gasification

ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการทำปฏิกิริยาซึ่งจะเป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สสูงขึ้นเพราะไม่มีไนโตรเจนปะปนมา การควบคุมกระบวนการเผาไหม้สามารถทำได้ดี แต่เนื่องจากออกซิเจนบริสุทธิ์มีราคาแพงควรใช้เมื่อวัตถุดิบเป็นถ่านหินเท่านั้น

3.2 air-blown gasification

ใช้อากาศธรรมดาซึ่งมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 โดยปริมาตรเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในขั้นการเผาไหม้ โดยมีไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศเป็นส่วนประกอบหลักโดยจะมีอยู่ราวร้อยละ 60-70

3.3 hydro gasification

ใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงซึ่งต้องการความดันสูงและอุณหภูมิประมาณ 750°C และโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จะมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก

3.4 steam gasification

ใช้ไอน้ำในการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณโปรดิวเซอร์แก๊ส โดยเฉพาะไฮโดรเจน แต่อุณหภูมิของเตาต้องสูงเพียงพอและไม่ควรต่ำกว่า 800°C จึงจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีดำเนินต่อไปได้

4. **ปฏิกิริยาการเกิดแก๊ส** (gasification reaction)

ในเตาผลิตแก๊สโดยทั่วไปสามารถแบ่งเป็นชั้นๆ ที่สำคัญได้ 4 ชั้นโดยขึ้นกับอุณหภูมิของปฏิกิริยาและผลผลิตที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นซึ่งอาจจะเหลื่อมล้ำ (overlap) กันอยู่ก็ได้ [4-5]

4.1 ชั้นเผาไหม้ (hearth zone or combustion zone)

ในบริเวณนี้คาร์บอนจะเผาไหม้กับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศในปริมาณจำกัด (partial combustion) ด้วยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$C+O_2 \Rightarrow CO_2+393,800$ kJ/kg mol (1)

$2H_2+O_2 \Rightarrow 2H_2O+285,600$ kJ/kg mol (2)

ปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนอุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ระหว่าง 900-1,200°C ความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในชั้นรีดักชั่นและชั้นกลั่นสลาย ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้นี้คือความร้อนและเถ้าถ่าน

4.2 ชั้นรีดักชั่น (reduction zone or gasification zone)

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ที่ได้จากการเผาไหม้ในชั้นเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นรีดักชั่นและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในชั้นนี้เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่เหมาะสมในชั้นนี้อยู่ที่ประมาณ 500-1,000°C

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เรียกว่า boudouard reaction ดังสมการที่ (3)

$C+CO_2 \Rightarrow 2CO-172,600$ kJ/kg mol (3)

water gas reaction อากาศประกอบด้วยออกซิเจน ไอน้ำและแก๊สเฉื่อยต่างๆ ซึ่งถือว่าไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ไอน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและจะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900°C ดังสมการที่ (4)

$$C+H_2O \Rightarrow CO+H_2\text{-}121{,}400 \quad kJ/kg\ mol \qquad (4)$$

กรณีไอน้ำในการทำปฏิกิริยาสูงเกินไป จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนออกไซด์เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า water shift reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนมีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของโปรดิวเซอร์แก๊สลดลงดังสมการที่ (5)

$$CO+H_2O \Rightarrow CO_2+H_2+412{,}400 \quad kJ/kg\ mol \qquad (5)$$

ถ้าไอน้ำสูงมากจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อุณหภูมิประมาณ 500-600°C ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนโดยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจึงมีผลให้อุณหภูมิภายในแก๊สซิไฟเออร์ลดลงดังสมการที่ (6)

$$C+2H_2O \Rightarrow CO_2+2H_2\text{-}88{,}000 \quad kJ/kg\ mol \qquad (6)$$

ผลิตภัณฑ์มีเทนเกิดจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนกับไฮโดรเจนซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 500°C เป็นต้นไป ดังสมการที่ (7)

$$C+2H_2 \Rightarrow CH_4+75{,}000 \quad kJ/kg\ mol \qquad (7)$$

ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนมีโอกาสเกิดมีเทน ซึ่งโอกาสในการเกิดจะสูงกว่าปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$CO+3H_2 \Rightarrow CH_4+H_2O \qquad (8)$$

$$CO_2+4H_2 \Rightarrow CH_4+2H_2O \qquad (9)$$

มีเทนเกิดขึ้นน้อยมากและโอกาสจะเกิดในโปรดิวเซอร์แก๊สมากกว่าชั้นรีดักชั่น แต่ถ้าคาร์บอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°C ที่ระดับความดันบรรยากาศ จะไม่เกิดมีเทน ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนที่เหมาะสมจะต้องอยู่ในสภาวะความดันสูง แต่มีอุณหภูมิต่ำ

4.3 ชั้นกลั่นสลาย (distillation zone)

ในชั้นนี้เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากชั้นเผาไหม้ เพื่อสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงทำให้ได้สารระเหยต่างๆ ออกมา เช่น เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิบ อุณหภูมิในชั้นนี้ประมาณ 135-600°C

4.4 ชั้นลดความชื้น (drying zone)

ในชั้นนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ ความร้อนที่ได้รับมาจากชั้นไพโรไลซิสจะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้ออกมาในรูปของไอน้ำ อุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ที่ประมาณ 100-135°C

5. ชนิดของเตาผลิตแก๊ส

การผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจากชีวมวลเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีของสารสองสถานะคือของแข็งกับแก๊ส และสารสถานะเดียวกันคือแก๊สกับแก๊ส ซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบและเป็นสารทำปฏิกิริยาเริ่มต้น การผลิตแก๊สสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์หรือกระบวนการทางความร้อนแบ่งได้ 3 ประเภท [4-6] คือ

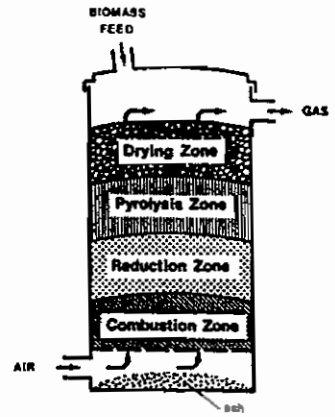
5.1 fixed bed gasifier

เชื้อเพลิงภายในเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์มีตัวรองรับ เช่น ตะแกรงจึงเปรียบเสมือนอยู่กับที่ดลอดเวลาเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลของแก๊สหรืออากาศสามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงได้ 3 ชนิด คือ

- updraft gasifier คือ เตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขึ้น โดยอากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างไหลขึ้นด้านบนในขณะที่เชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างในลักษณะสวนทางกันจึงอาจเรียกอีกชื่อว่า counter current gasifier ดังภาพ 2 ชั้นของปฏิกิริยาจะแบ่งเรียงเป็นลำดับจากระดับอุณหภูมิสูงในชั้นเผาไหม้ไปสู่อุณหภูมิต่ำชั้นลดความชื้น

updraft gasifier มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงเนื่องจากแก๊สร้อนที่เกิดจากชั้นเผาไหม้ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิง ความร้อนสัมผัสจะถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิงก่อนไหลลงสู่ชั้นไพโรไลซิสและชั้นรีดักชั่นต่อไป ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากชั้นไพโรไลซิสและชั้นลดความชื้นจะปะปนอยู่ในโปรดิวเซอร์แก๊สและเมื่อออกจากเตาผลิตแก๊สอุณหภูมิโปรดิวเซอร์แก๊สจะลดลง ทาร์และน้ำมันจะกลั่นตัวเป็นของเหลว ดังนั้นโปรดิวเซอร์แก๊สมีสิ่งปนเปื้อนสูง

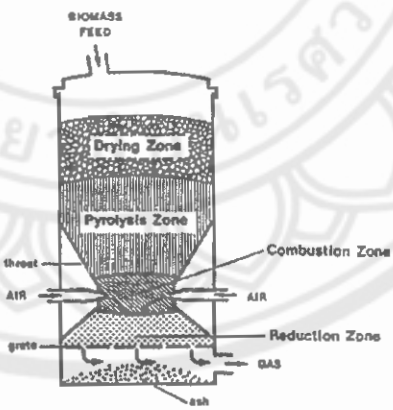
การผลิตแก๊สโดยเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขึ้นอาจจะป้อนไอน้ำช่วยในการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนและช่วยควบคุมอุณหภูมิชั้นเผาไหม้กรณีเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงไม่จำเป็นต้องป้อนไอน้ำ พารามิเตอร์สำคัญประกอบด้วยวิธีการป้อนอากาศ ตำแหน่งแก๊สไหลออก ชนิดและขนาดของตะแกรง การบุฉนวนชั้นเผาไหม้ ความหนาของชั้นเชื้อเพลิงและค่า specific gasification rate (sgr)



ภาพ 2 เตาผลิตแก๊สแบบอากาศไหลขึ้น

sgr หมายถึงอัตราส่วนปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาผลิตแก๊สในเวลา 1 ชั่วโมง (kg/hr) ต่อพื้นที่หน้าตัดของตะแกรง (m^2) ขึ้นอยู่กับชนิดเชื้อเพลิง การออกแบบและการทำงานของแก๊สซิไฟเออร์ ค่า sgr ของ updraft gasifier อยู่ระหว่าง 100-300 kg/hr-m^2

- downdraft gasifier คือเตาผลิตแก๊สที่อากาศไหลลงโดยอากาศไหลลงทิศทางเดียวกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงจึงอาจเรียกว่า cocurrent gasifier เตาชนิดนี้มีจุดประสงค์ให้ผลิตภัณฑ์จากชั้นไพโรไลซิสไหลผ่านชั้นเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะไหลออกจากเตาผลิตแก๊ส ดังภาพ 3 โปรดิวเซอร์แก๊สจึงมีทาร์ต่ำแต่มีอุณหภูมิสูง 300-500^{o}C จุดสำคัญเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง คือ ลักษณะชั้นเผาไหม้ รูปแบบของตะแกรง และวิธีการป้อนอากาศ

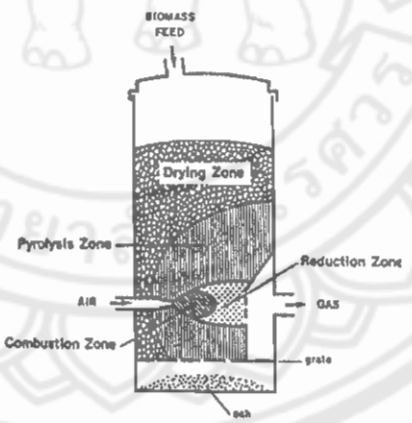


ภาพ 3 เตาผลิตแก๊สแบบอากาศไหลลง

วิธีการป้อนอากาศและรูปร่างของชั้นเผาไหม้ที่เล็กลงโดยการลดพื้นที่หน้าตัดตำแหน่งป้อนอากาศเพื่อให้อุณหภูมิมีค่าสูงเพียงพอในการสลายทาร์ เชื้อเพลิงที่มีเถ้าสูงกว่าร้อยละ 6 และความชื้นสูงกว่าร้อยละ 20 ไม่เหมาะสมกับเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง เนื่องจากเถ้าอาจจะหลอมละลายติดกับคอคอดขัดขวางการไหลของเชื้อเพลิงและแก๊ส

- crossdraft gasifier คือ เตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขวาง เป็นระบบที่อากาศไหลในทิศทางขวางกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงดังภาพ 4 ลักษณะชั้นปฏิกิริยาโดยเฉพาะชั้นเผาไหม้ และชั้นรีดักชั่น จะอยู่ใกล้ชิดกันมาก ดังนั้นจะสามารถผลิตแก๊สได้อย่างรวดเร็วและแปรผันได้ง่ายปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเตาผลิตแก๊ส แต่ขอบเขตของการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้นเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น

จุดสำคัญของเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขวาง คือ ความเร็วของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยา และขอบเขตของชั้นเผาไหม้ ซึ่งปกติความเร็วอากาศจะมีค่าสูงและเกิดอุณหภูมิการเผาไหม้ โปรดิวเซอร์แก๊สที่ออกจากเตาผลิตแก๊สมีอุณหภูมิสูงและสิ่งปนเปื้อนสูง ปกติชั้นรีดักชั่นมีขนาดเล็กจึงทำให้เวลาสั้นในการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนออกไซด์ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นโปรดิวเซอร์แก๊สจะมีค่าความร้อนต่ำแต่เมื่อป้อนอากาศที่ความเร็วสูงมากจะมีผลต่อองค์ประกอบโปรดิวเซอร์แก๊ส โดยอัตราการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาเข้าใกล้สภาวะสมดุล

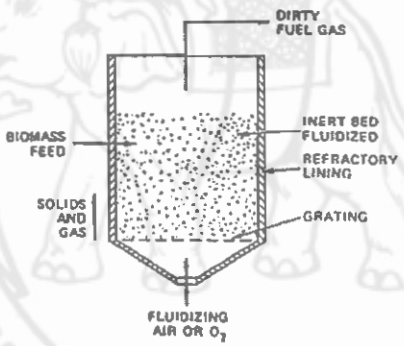


ภาพ 4 เตาผลิตแก๊สแบบอากาศไหลขวาง

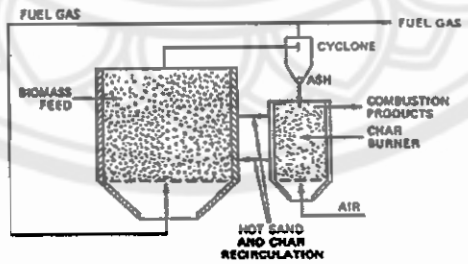
5.2 fluidized bed gasifier

คือ เตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบพ่นฝอยที่มีรูปแบบมีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงบางชนิด เช่น เชื้อเพลิงมีขนาดเล็กโดยธรรมชาติ มีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณของเถ้าสูงและอุณหภูมิการหลอมเหลวของเถ้าต่ำในระบบแบบพ่นฝอย การสัมผัสระหว่างอากาศสารตัวกลาง (bed) กับเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 800-900°C ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้

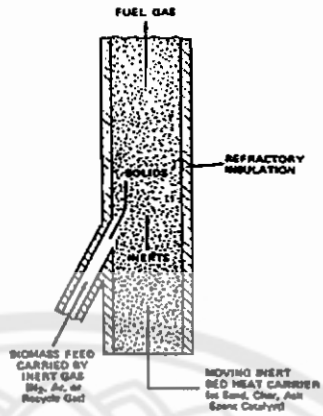
เตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบพ่นฝอยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้สำรอง ดังภาพ 5 และ 6 ตามลำดับ ในสภาวะการทำงานแบบคงตัว (steady state) อุณหภูมิของสารตัวกลาง เช่น ทราย ถ่านหรือวัสดุเฉื่อยอื่นๆ จะมีการกระจายสม่ำเสมออย่างทั่วถึงการเผาไหม้และการผลิตแก๊สจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับที่สภาวะการเกิด fluidized bed ของสารตัวกลางแต่เนื่องจากเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบพ่นฝอย ต้องการอากาศที่ความเร็วสูงดังนั้นเกิดการสูญเสียเชื้อเพลิงไปกับอากาศบางส่วนและโปรดิวเซอร์แก๊สจะมีอนุภาคฝุ่นปะปนสูง



ภาพ 5 เตาผลิตแก๊สแบบพ่นฝอยโดยตรง



ภาพ 6 เตาผลิตแก๊สแบบพ่นฝอยในห้องเผาไหม้



ภาพ 7 เตาผลิตแก๊สแบบหมุนวน

5.3 เตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบหมุนวน (entrained bed gasifier or moving bed gasifier)

เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงการทำงานในการถ่ายเทความร้อนคล้ายกับเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบพ่นฝอย โดยปกติควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 482-593^{o}C

เตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบหมุนวนมีประสิทธิภาพสูงในการทำปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับแก๊สโดยมีลักษณะเชื้อเพลิงที่เหมาะสม เช่น ผงถ่านหินและชีวมวลที่มีขนาดเล็กๆ การทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเกิดขึ้นในช่องปฏิกิริยาแบบหมุนวน แสดงดังภาพ 7

6. **อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน** (heat exchanger) [7-8]

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งโดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่งเพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่างๆ ทางด้านพลังงานอย่างกว้างขวาง ผู้ใช้ควรมีความรู้ที่จะคำนวณออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีความรู้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนการส่งผ่านของความร้อนและความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล

ในปัจจุบันกระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนได้แพร่หลายไปในประเทศต่างๆ อย่างรวดเร็ว และเพื่อให้การใช้พลังงานความร้อนเป็นไปอย่างถูกหลักการ กระบวนการเหล่านี้มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นส่วนประกอบตัวอย่าง เช่น อุตสาหกรรม

น้ำมัน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบและสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือแก๊สสำหรับการเปลี่ยนสภาวะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว ในทำนองเดียวกันอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ก็ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนนความร้อนสำหรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนเอาความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่

หน้าที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือการนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการและมีประสิทธิภาพดังนั้นวิธีใช้และวิธีเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างแน่นแฟ้นกับหลักเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์อย่างมากด้วย เงื่อนไขที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งรวมถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ ความมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงและราคาถูก

การจำแนกประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ดังนี้

6.1 การจำแนกตามโครงสร้างหรือรูปร่าง

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ (double-pipe) โครงสร้างของอุปกรณ์แบบนี้ประกอบด้วยท่อสองชนิดที่ซ้อนกัน โดยมีแกนกลางของท่อรวมกันของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในท่อ และของไหลอีกประเภทหนึ่งจะไหลอยู่ในช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อในและท่อนอก

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube) ในอุตสาหกรรมจะใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมาตรฐานการออกแบบและการสร้างไม่มีข้อจำกัดการทำงานของอุณหภูมิและความดัน

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ (coil tube) เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้เป็นแบบง่ายๆ ราคาย่อมเยา จึงมีการใช้กันมานาน ในปัจจุบันจะพบเห็นบ่อยๆ ในรูปของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบกล่อง (box cooler)

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (plate) ได้แก่ แบบแก๊สเก็ต (gasket) แบบท่อหมุนวน (spiral) และแบบลาเมลล่า (Lamella)

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่มีครีบเพิ่มที่ผิว (extended surface) ได้แก่ ครีบแบบท่อ (tube-fin) และครีบแบบแผ่น (plate-fin)

- **อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีเจนเนอเรเตอร์** (regenerators) ได้แก่ fixed matrix และrotary

6.2 การจำแนกตามลักษณะการสัมผัสหรือการถ่ายเทความร้อน

การจำแนกอุปกรณ์แบบนี้พิจารณาจากลักษณะการถ่ายเทพลังงานความร้อน เช่น ของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสโดยตรงหรือไม่ ในกรณีที่มีการสัมผัสกันโดยตรงของไหลดังกล่าวจะต้องไม่ผสมและไม่รวมตัวกัน (immiscible) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วของไหลชนิดหนึ่งมักจะเป็นแก๊ส และอีกชนิดเป็นของเหลวและสามารถแยกตัวออกหลังจากที่มีการถ่ายเทพลังงานความร้อนกันแล้ว

6.3 การจำแนกตามความกะทัดรัดของผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกจำแนกตามความกะทัดรัด (compactness) ของอุปกรณ์ ซึ่งพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน (heat transfer surface are density ในหน่วย m^2/m^3) ต้องมีค่ามากกว่า 700 m^2/m^3

6.4 การจำแนกตามทิศทางการไหล

ได้แก่ การไหลแบบมีทิศทางไปทางเดียวกัน (parallel flow) ไหลแบบสวนทางกัน (counter flow) ไหลแบบตั้งฉากกัน (cross flow) หรือมีทิศทางการไหลสลับกันไปมา คือ ไหลตั้งฉากกันบางส่วนและสวนทางกัน หรือขนานกันบางส่วนขณะที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์

6.5 การจำแนกตามจำนวนของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อน

ส่วนใหญ่แล้วของไหลที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีเพียง 2 กระแสเท่านั้น แต่ในบางกระบวนการ เช่น กระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนียและในระบบแยกฮีเลียม-อากาศเป็นต้น จะมีการไหล 3 กระแสหรือ 3 ชนิดขึ้นไปในการแลกเปลี่ยนพลังงานกัน

6.6 การจำแนกตามเฟสของการทำงาน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจำแนกตามเฟสของสารทำงานแบ่งออกเป็น แก๊สกับแก๊ส (gas-gas) แก๊สกับของเหลว (gas-liquid) และของเหลวกับของเหลว (liquid-liquid)

6.7 การจำแนกตามกลไกการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลจำแนกตามกลไกการถ่ายเทความร้อน เช่น การถ่ายเทความร้อนอาจก่อให้กระแสหนึ่งกระแส หรือทั้งสองกระแสมีการเปลี่ยนเฟส

6.8 การคำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อน

วัตถุประสงค์อันดับแรกในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อหาพื้นที่ผิวที่จำเป็นที่ต้องการเพื่อการถ่ายเทความร้อนโดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม (U) แสดงได้ด้วยสมการการถ่ายเทความร้อน คือ

$$Q = UA\,(\Delta T)_{LM}$$

โดยที่ Q คือ อัตราถ่ายเทความร้อน, kW

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, $kW/(m^2.^\circ C)$

A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m^2

$(\Delta T)_{LM}$ คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิล็อกมีน, $^\circ C$

ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิล็อกมีน (log-mean temperature difference) $(\Delta T)_{LM}$ สามารถคำนวณ โดยจะมีสมมุติฐานในการวิเคราะห์ ดังนี้

ก. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลทั้งสองกระแสที่แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าคงที่ตลอดในอุปกรณ์

ข. การถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์เป็นแบบอะเดียแบติก (adiabatic) ความร้อนจะแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลทั้งสองกระแสเท่านั้น

ค. การทำงานของอุปกรณ์อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state condition) นั่นคือ อัตราการไหลมีค่าคงที่ และคุณสมบัติต่างๆ มีค่าคงที่

ง. ความเร็วและอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์ จะมีค่าสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด (cross section) ในการไหลของของไหลที่ไหลในอุปกรณ์ และสามารถแทนที่ได้ด้วยค่าเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด

จ. ค่าความจุความร้อน (specific heats) ของของไหลมีค่าคงที่

ฉ. ไม่มีการนำความร้อนตามแนวแกนในของไหลและในผนัง

ช. ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงาน (thermal energy source)

7. **การอบแห้ง** [9]

การอบแห้ง คือ กระบวนการนำน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ โดยให้น้ำที่มีอยู่ในวัสดุนั้นระเหยออกไปด้วยความร้อนจากแหล่งพลังงานต่างๆ กระบวนการอบแห้งจึงเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงาน พลังงานที่ทำให้น้ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอ คือ พลังงานความร้อนที่ต้องใช้อย่างน้อยเท่ากับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ จึงจะทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์นั้นระเหยออกไปได้ การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีการสิ้นเปลืองพลังงานสูงซึ่งอาจจะเปลี่ยนรูปมาจากพลังงานไฟฟ้า น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ แก๊สหุงต้ม เชื้อเพลิงจากของเหลือใช้ทางการเกษตร หรือพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศที่สูง วิธีประหยัดพลังงานจึงเหมาะสมที่สุด ดังนั้นพลังงานจากเชื้อเพลิงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการประหยัดพลังงานและเพิ่มพลังงานทางเลือก

ประโยชน์ของการอบแห้งอาจสรุปได้ตามลำดับความสำคัญดังต่อไปนี้

1. ป้องกันการเน่าเสียจากเชื้อจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาเคมีและเอนไซม์
2. ทำให้มีใช้ในยามขาดแคลนนอกฤดูกาลหรือในแหล่งห่างไกล
3. เก็บไว้ได้นานโดยไม่ต้องใช้ตู้เย็นให้เปลืองค่าใช้จ่าย
4. ลดน้ำหนักอาหารทำให้สะดวกในการบรรจุ เก็บรักษาและขนส่ง
5. ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ เช่น ลูกเกด จากการทำแห้งองุ่น
6. มีความสะดวกในการใช้ เช่น กาแฟผงสำเร็จรูป

<u>การวัดค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์</u>

ความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่บอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์นั้น น้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ การบอกค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์จะนิยมใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำ การวัดค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์สามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \qquad (10)$$

เมื่อ M_w คือ เปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นมาตรฐานเปียก

w คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์

d คือ น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ (ที่ไม่มีความชื้น)

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \qquad (11)$$

เมื่อ M_d คือ เปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในทางทฤษฎีเพราะช่วยในการคำนวณสะดวกขึ้นซึ่งเป็นเพราะมวลของผลิตภัณฑ์แห้ง (d) จะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สมีแนวทางการศึกษาและวิจัยหลากหลาย เช่น การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส การทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับติดเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อเป็นต้นกำลังหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องสูบน้ำ การศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตแก๊สเพื่อใช้ในการผลิตเซรามิกส์ การศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตแก๊สเพื่อใช้ในการอบแห้ง รวมถึงการใช้เทคโนโลยีการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สในการกำจัดขยะต่างๆ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ ผลงานวิจัยทั้งภายในประเทศและต่างประเทศเหล่านี้จะกล่าวโดยสังเขป ดังนี้

งานวิจัยภายในประเทศ

สุรีย์ จรูญศักดิ์ [4] ศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (downdraft gasifier) ขนาด 0.28 m^3 ผลิตความร้อนได้สูงสุด 82 MJ/hr ระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาเซรามิกส์ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

(1) การทดลองผลิตแก๊สที่อัตราอากาศไหลต่างกัน แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ $1.0x10^{-3}$ $3.0x10^{-3}$ และ $5.0x10^{-3}$ m^3/s โดยมีค่าความร้อนสูง (HHV) ของโปรดิวเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ย 3.13 3.26 และ 3.52 MJ/Nm^3 และปริมาณคาร์บอนมอนออกไซด์ร้อยละ 20.99 22.12 และ 25.60 ตามลำดับ

(2) การทดลองผลิตแก๊สเพื่อใช้ในการเผาเซรามิกส์แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ การเผาดิบ การเผาเคลือบ และการเผาแกร่ง

ผลการทดลองเผาดิบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 800°C โดยใช้เวลา 480 นาที หลังการเผามีความแข็งสามารถนำไปชุบเคลือบต่อไปได้

ผลการเผาเคลือบที่อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1,102°C โดยใช้เวลาเผา 540 นาที เซรามิกส์ที่ได้มีลักษณะเนื้อดินหดตัวมีขนาดตามต้องการแต่ผิวเคลือบมีลักษณะด้านไม่เปลี่ยนสภาพเป็นเนื้อแก้ว เนื่องจากอุณหภูมิสุดท้ายต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำเคลือบเซรามิกส์ (under firing)

ผลการเผาแกร่งใช้เวลาเผา ที่อุณหภูมิสุดท้าย 103°C 540 นาที เซรามิกส์ที่ได้มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับเซรามิกส์ที่ได้จากโรงงานแต่ความชัดเจนของสีลายกระที่ผิวเนื้อดินน้อยกว่า ส่วนการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 1,110°C เซรามิกส์ที่ได้จะหดตัวจนมีขนาดเล็กกว่าเซรามิกส์จากโรงงาน

วิภาวรรณ แสงสง่า [5] ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเซรามิกส์โดยใช้พลังงานความร้อนที่ได้จากเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขึ้นและไหลลง ซึ่งเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง เคยมีผู้ทดลองทำมาก่อนหน้านี้ โดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงเช่นเดียวกัน จึงศึกษาเตาแก๊สชนิดไหลขึ้นขนาด 0.309 m^3 ทดลองผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สที่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน 3 ระดับ คือ $3.0x10^{-3}$ $4.0x10^{-3}$ และ $5.0x10^{-3}$ m^3/s โดยมีปริมาณคาร์บอนมอนออกไซด์ที่เกิดขึ้นร้อยละ 26.79 31.78 และ 29.55 ตามลำดับ และมีค่าความร้อนสูง 4.072 4.392 และ 3.857 MJ/Nm^3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของอากาศ $4.0x10^{-3}$ m^3/s นั้นมีความเหมาะสมที่จะนำโปรดิวเซอร์แก๊สไปใช้ประโยชน์

ผลการทดลองเผาดิบเตาผลิตแก๊สทั้งชนิดไหลขึ้นและชนิดไหลลงจะได้เซรามิกส์ที่มีคุณภาพสามารถนำไปชุบเคลือบได้

ผลการทดลองการเผาเคลือบที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นและไหลลง อุณหภูมิสุดท้ายที่ทำได้คือ 1,185.6 °C และ 1,102°C ระยะการเผา 600 และ 540 นาที ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นนั้นมีลักษณะรูปร่างและสีเช่นเดียวกับโรงงานผลิตเซรามิกส์ ส่วนเซรามิกส์ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงจะมีลักษณะ under firing

ผลการทดลองเผาแกร่งชนิดไฟเดียวได้ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับเซรามิกส์ที่เผาโดยโรงงานแต่แตกต่างกันที่สีเนื้อดิน แสดงให้เห็นว่าโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนในโรงงานเซรามิกส์ได้ และให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง

วิทยา จงเจริญ และ บุญเลี้ยง ชิ้มศรีสกุล [10] ทำการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สเพื่อที่จะใช้ในการเดินเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยเผาไหม้ถ่านไม้ในเตาที่มีอากาศจำกัดได้โปรดิวเซอร์แก๊สที่มีปริมาณคาร์บอนมอนออกไซด์ประมาณร้อยละ 20-30 จากนั้นให้โปรดิวเซอร์แก๊สไหลผ่านเครื่องทำความสะอาดแก๊ส เครื่องหล่อเย็นแล้วผสมกับอากาศป้อนเข้าไปในเครื่องยนต์ขนาด 1300 ซีซี 4 จังหวะ 4 สูบ พบว่าเมื่อเครื่องยนต์ทำงานโดยอาศัยพลังงานจากโปรดิวเซอร์แก๊สอย่างเดียวและที่ความเร็วรอบ 1330 rpm ในสภาวะที่ไม่มีภาระในการทำงานจะใช้ถ่านไม้ 1.5 กิโลกรัม ซึ่งสามารถแทนน้ำมันได้ 1 ลิตร

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน [11] ได้ศึกษาเตาเผาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ที่นำเข้ามาจากประเทศจีน รุ่น RSL-I-8 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อน

ของเตาผลิตแก๊สและความเป็นไปได้ในการนำความร้อนจากเตาผลิตแก๊สนี้ไปใช้กับอุตสาหกรรมชนบทของไทยโดยทำการทดสอบด้วยการใช้เชื้อเพลิงแข็ง 4 ชนิด คือ ไม้ฟืน ซังข้าวโพด แกลบอัดแท่ง และขี้เลื่อยอัดแท่ง

ผลการทดสอบพบว่าไม้ฟืนและซังข้าวโพดให้คุณภาพแก๊สจากเตาเผา ซึ่งมีประสิทธิความร้อนในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงประมาณร้อยละ 70-80 และความร้อนที่ได้ออกมาประมาณ 420.237 MJ/hr ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะนำความร้อนจากเตาผลิตแก๊สนี้มาปรับปรุงและนำไปใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมชนบทของประเทศไทยที่เกี่ยวกับการใช้ลมร้อน อาทิเช่น การอบเมล็ดพันธุ์พืช การอบยาง เป็นต้น

บวรพรรณ คติการ [12] ออกแบบสร้างเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงโดยใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการทำความสะอาดโปรดิวเซอร์แก๊สโดยใช้วัสดุกรอง 5 ชนิด ประกอบด้วย ไนล่อน แกลบ ไฟเบอร์กล๊าส ผ้าดิบ และสำลี โดยพิจารณาประสิทธิภาพในการกักเก็บแก๊สที่ผลิตได้ การทดลองกำหนดความเร็วอากาศเฉลี่ย 0.65 m/s และ 2.5 m/s และป้อนอากาศเข้าชั้นเผาไหม้ตรงกลางจากด้านบนจุดเดียว จากการทดลองพบว่า แกลบเป็นวัสดุกรองที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บฝุ่นสูงที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 98 การสูญเสียความดันต่ำสุด 0.5-1.5 cm.H_2O ส่วนไนล่อนมีประสิทธิภาพต่ำสุด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สพบว่าปริมาณคาร์บอนมอนออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วอากาศ และโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้ประกอบด้วยคาร์บอนมอนออกไซด์ร้อยละ 12.3-22.6 คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 7.6-12.5 น้ำร้อยละ 12-22.9

ธรากร สกุลพานิช และ ปิยะวงษ์ ฑิตธิวงษ์ [13] ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลจากกะลามะพร้าว โดยใช้เครื่องผลิตแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลงซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้กับไม้ฟืน เมื่อศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณถ่านและแก๊สที่ผลิตได้คือ อัตราการไหลอากาศซึ่งอยู่ในช่วง 2.13×10^{-3}-8.5×10^{-3} m^3/s ขนาดกะลามะพร้าว 1.25-5 cm เวลาที่ใช้ในการผลิตแก๊ส 3-6 ชั่วโมงจากการทดลองพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการผลิตแก๊ส 4 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลอากาศ 4.5×10^{-3} m^3/s จะได้ปริมาณสูงสุดร้อยละ 30 จากการวิเคราะห์แก๊สพบว่าไม่มีส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้เลยสาเหตุเนื่องจากปริมาณอากาศป้อนเข้าเครื่องผลิตแก๊สมากเกินไปและการไม่ยอมเคลื่อนตัวลงของกะลามะพร้าวสู่ส่วนล่างของเตา อย่างไรก็ตามถ่านที่ได้มีคุณภาพดี

จงจิดร์ หิรัญลาภ และคณะ [14] ทำการอบแห้งพริกโดยใช้โปรดิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น โดยระบบอบแห้งนี้ประกอบด้วย ระบบผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส ระบบทำความสะอาดแก๊ส ห้องเผาไหม้เครื่องอบแห้ง พัดลมเป่าอากาศ และส่วนประกอบที่สำคัญของโปรดิวเซอร์แก๊ส คือ คาร์บอนมอนออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 17.319 MJ/Nm^3 และตู้บรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้งมีความกว้าง 0.6 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 1 เมตร สามารถวางถาดบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ 8 ถาดมีระบบควบคุมอัตราการไหลอากาศภายในห้องอบแห้งได้ตามต้องการ

เมื่อทำการอบแห้งพริกชี้ฟ้าแดงที่มีการผ่าเมล็ดออก พบว่าที่สภาวะเหมาะสมคือ อัตราการไหลของอากาศ 0.082 kg/s อุณหภูมิในห้องอบแห้งโดยเฉลี่ย 63°C อบแห้งพริกชี้ฟ้าแดงปริมาณ 17.2 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 86 มาตรฐานเปียก จนกระทั่งมีความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณร้อยละ 15 มาตรฐานเปียก และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด 19 ชั่วโมง โดยมีต้นทุนที่ใช้ในการระเหยน้ำ 1 kg ออกจากพริกชี้ฟ้าแดงของเครื่องอบแห้งนี้มีค่า 54.3 baht/kg-H_2O evap

ศิริศักดิ์ ศิริสมบูรณ์ [15] ศึกษาถึงการอบแห้งตะไคร้โดยใช้พลังงานจากโปรดิวเซอร์แก๊สซึ่งใช้ไม้ไผ่ข้าวหลามเป็นเชื้อเพลิง พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมเท่ากับ 1.48x10^{-3} m^3/s จะสามารถผลิต CO ได้มากที่สุดร้อยละ 23 โดยมีค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สประมาณ 3.1 MJ/Nm^3 และทำการอบแห้งตะไคร้น้ำหนัก 6 kg โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง สามารถลดความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 516 มาตรฐานแห้ง (ร้อยละ 84 มาตรฐานเปียก) ให้เหลือค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 มาตรฐานแห้ง (ร้อยละ 9 มาตรฐานเปียก) โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 80°C

งานวิจัยต่างประเทศ

Arthayukti et al. [16] ศึกษาการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงแบบท่อตรงโดยซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงอากาศไหลเข้าด้านบนของท่อเหล็กขนาด 15 cm ยาว 150 cm ซังข้าวโพดมีองค์ประกอบคาร์บอนคงตัวร้อยละ 20.46 สารระเหยร้อยละ 70.3 เถ้า ร้อยละ 2.48 ซัลเฟอร์ร้อยละ 0.07 ค่าความร้อนสูง 17.31 MJ/kg พบว่าอัตราการไหลของอากาศ 17.5 Nm^3/hr สามารถผลิตแก๊สมีค่าความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 4.217 MJ/Nm^3 ประกอบด้วยคาร์บอนมอนออกไซด์ ร้อยละ 12.7 ไฮโดรเจนร้อยละ 11.1 และมีเทนร้อยละ 3.0

Hoi et al. [17] ศึกษาระบบผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจากไม้ยางพาราโดยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงขนาด 35 kW โดยออกแบบตามรูปแบบของ Swedish Academy of Engineering Science ใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราขนาด 3x3x3 cm^3 ความชื้นร้อยละ 7.9 และค่าความร้อนสูง 18.44 MJ/kg อัตราการไหลโปรดิวเซอร์แก๊สเฉลี่ย 89.3 Nm^3/hr ได้ค่าความร้อนสูงโปรดิวเซอร์แก๊สประมาณ 4.975 MJ/Nm^3 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 33.5 kg/hr และโปรดิวเซอร์แก๊สประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 18.9 ไฮโดรเจนร้อยละ 18.4 มีเทนร้อยละ 0.6 และไนโตรเจนร้อยละ 49.8 ทดลองใช้โปรดิวเซอร์แก๊สร่วมกับน้ำมันดีเซลในการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถทดแทนน้ำมันดีเซลได้ร้อยละ 68.9

Zainal et al. [18] ศึกษาถึงแบบจำลองสภาวะสมดุลที่ถูกนำไปใช้ในการทำนายขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง ซึ่งองค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สจะถูกนำมาใช้ช่วยในการพิจารณาค่าพลังงานความร้อน และเนื่องจากความชื้นเริ่มต้นในไม้และอุณหภูมิของขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าพลังงาน และในการเปรียบเทียบการทำนายของแบบจำลองกับผลการทดลองได้ผลที่สอดคล้องกัน คือ ค่าพลังงานของโปรดิวเซอร์แก๊สลดลงในขณะที่ความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และในทำนองเดียวกันค่าพลังงานของโปรดิวเซอร์แก๊สลดลงเมื่ออุณหภูมิของขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเพิ่มขึ้น

Lincoln Young and Carlson Pian [19] ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลงทุนของการใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์เพื่อเปลี่ยนมูลสัตว์ต่างๆ ไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเป็นต้นกำลังงานต่างๆ ได้ และเป็นการใช้ประโยชน์จากมูลสัตว์ที่มีมากเกินไปซึ่งเป็นปัญหาของระบบอุตสาหกรรม และระบบแก๊สซิฟิเคชั่นที่ถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนมูลสัตว์ให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 65-85 ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในการทำงานของเตาแก๊สซิไฟเออร์ด้วย และแก๊สที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สซไฟเออร์สามารถนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในฟาร์มหรือในรูปความร้อนที่จำเป็นต้องใช้อื่นๆ ก็ได้ ดังนั้นจะเป็นการช่วยลดต้นทุนภายในฟาร์มด้วย จากการศึกษาข้อมูลของฟาร์มในรัฐนิวยอร์กแสดงให้เห็นว่า แก๊สซิฟิเคชั่นจากมูลสัตว์จะผลิตพลังงานได้มากกว่าความจำเป็นที่จะใช้พลังงานภายในฟาร์มถึง 2 เท่า

Peter McKendry [20] ศึกษาถึงการเปลี่ยนรูปชีวมวลโดยขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ และเป็นการเพิ่มศักยภาพของการใช้ประโยชน์จากชีวมวล

ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วย ขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเป็นเทคโนโลยีที่ได้ทดลองแล้วว่ามีความแข็งแรง ทนทาน ทั้งสองระบบ คือ ระบบเทคโนโลยีสมัยเก่าก็คือเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ fixed-bed และระบบเทคโนโลยีสมัยใหม่ก็คือเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ fluidized-bed ซึ่งแก๊สที่ผลิตได้จากขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของชีวมวล จะเป็นประโยชน์ต่อโลก คือ เป็นการช่วยลดการเกิดแก๊สที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนโดยทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และเป็นการพัฒนาโลกโดยการจัดหากระแสไฟฟ้าในพื้นที่ชนบทที่สามารถหาแหล่งชีวมวลได้

Dogru et al. [21] ศึกษาถึงศักยภาพของชีวมวลที่สามารถช่วยลดปรากฏการณ์สภาวะโลกร้อน และพลังงานจากชีวมวลได้นำมาใช้ได้จริงทั้งการเผาไหม้โดยตรง หรือการเพิ่มมูลค่าให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นประโยชน์มากขึ้น เช่น แก๊ส น้ำมันเชื้อเพลิง และผลิตภัณฑ์ที่มูลค่าสูงเพื่อใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเคมี หรือใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ณ ปัจจุบันนี้ระบบแก๊สซิฟิเคชั่นได้เป็นศูนย์กลางของเชื้อเพลิงจำพวกไม้ และก็ยังมีเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆ ด้วยเพราะมีศักยภาพเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ โดยเฉพาะที่จะกล่าว คือ เปลือกถั่วเฮเซล พบว่ามีทาร์เป็นองค์ประกอบในอัตราเดียวกันกับองค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊ส และปัจจัยที่มีผลต่อการป้อนเชื้อเพลิง คือ องค์ประกอบของแก๊ส อุณหภูมิแต่ละชั้นของเตาแก๊สซิไฟเออร์ และระบบทำความสะอาดแก๊ส เพราะว่าแก๊สที่ผลิตได้นำไปเชื่อมต่อกับเครื่องยนต์อาจเกิดภาวะแรงดันต่ำได้ ซึ่งคุณภาพของแก๊สจะขึ้นอยู่กับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงและความสม่ำเสมอของชั้นไพโรไลซิส ซึ่งในการทดลองพบว่าความเหมาะสมในการทำงานของเตาแก๊สซิไฟเออร์จะมีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 1.44-1.47 Nm^3/kg และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 4.06-4.48 kg/hr ซึ่งสามารถผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สได้ประมาณ 5 MJ/m^3 ที่อัตราการไหลของอากาศในช่วง 8-9 Nm^3/hr

และสรุปได้ว่าเปลือกถั่วเฮเซล สามารถผลิตแก๊สจากเตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลงได้อย่างดีและมีมลพิษต่ำ และควรสนับสนุนให้มีการใช้งานพื้นที่ชนบทที่มีเปลือกถั่วที่เหลือจากการเกษตรเพื่อเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นพลังงานสะอาด และสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ที่สันดาปภายในได้อีกด้วย

Midilli et al. [22] ศึกษาถึงการนำสิ่งปฏิกูลที่เป็นปัญหาสำคัญของโลกเพราะว่ามีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชีวิตความเป็นอยู่ เปลี่ยนให้เป็นแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ หรือการใช้ประโยชน์ทางพลังงานเพื่อเป็นการขจัดปัญหาในทางลบ และเป็นการส่งเสริมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากสิ่งปฏิกูลเหล่านี้ ในการศึกษาแก๊สที่ผลิตจากสิ่งปฏิกูลโดยขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นนี้พบว่ามีแก๊ส

ป TP
360
ส๖๒๓๑
2548

4840003
2 4 มิ.ย. 2549
สำนักหอสมุด

ที่จุดติดไฟ คือ H_2 CO CH_4 C_2H_2 และ C_2H_6 ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 19-23 ของจำนวนโปรดิวเซอร์แก๊สทั้งหมด และค่าพลังงานเฉลี่ยอยู่ที่ 2.55-3.2 MJ/Nm^3 ซึ่งจะเท่ากับ 12.19-28.97 MJ/hr เนื่องจากแก๊สที่จุดติดไฟนี้ผลิตจากสิ่งปฏิกูลโดยการใช้ประโยชน์จากเตาแก๊สซิไฟเออร์ ดังนั้นเราสามารถนำสิ่งปฏิกูลเหล่านี้มาเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนสำหรับในการผลิตพลังงานความร้อนและเป็นการกำจัดสิ่งปฏิกูลด้วย

Dasappa et al. [23] ศึกษาถึงความต้องการใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูงในอุตสาหกรรมโดยการใช้ขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นจากพลังงานชีวมวล ซึ่งระบบเตาแก๊สซิฟิเคชั่นนี้ประกอบด้วย ส่วนที่เปิดทางด้านบนเพื่อไว้สำหรับป้อนเชื้อเพลิง ระบบหล่อเย็น ระบบทำความสะอาดแก๊ส และสิ่งจำเป็นพื้นฐานอื่นๆ เช่น ระบบสายพานลำเลียงเชื้อเพลิง ระบบบำบัดน้ำสำหรับหมุนเวียนในการหล่อเย็นเพื่อให้เพียงพอในการควบคุมระบบแก๊สซิไฟเออร์ ซึ่งในการทดลองอบแห้งดอกดาวเรืองที่อุณหภูมิต่ำสามารถทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ 125-150 ลิตรต่อชั่วโมง และแทนแก๊สได้ 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และในการใช้งานอุณหภูมิสูงที่อยู่ในช่วง 873 ถึง 1200 เคลวิน ซึ่งจะต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประมาณ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และสามารถทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ถึง 2000 ลิตรต่อวัน โดยที่การทำงานของระบบจะทำงานอย่างต่อเนื่องมากกว่า 140 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 4000 ชั่วโมงสามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างสมบูรณ์

Borgianni et al. [24] ศึกษาถึงการนำพลาสติกมาเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งเป็นวัสดุที่หาง่ายและราคาไม่แพง ถึงแม้ว่าจะมีส่วนประกอบของโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งจะมีปัญหาเมื่อถูกความร้อน จึงได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำพลาสติกมาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงใหม่ของขบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยปราศจากการเติมสารลดคลอรีน จากข้อมูลการทดลองพบว่าการเติม Na_2CO_3 เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงจะช่วยลดคลอรีนจากการผลิตแก๊ส ซึ่งจะถูกกว่าสารประกอบจำพวกแคลเซียม แต่ผลการกำจัดคลอรีนเหมือนกัน และส่วนประกอบของแก๊สที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะมีค่าน้อยกว่าที่กฎหมายของอิตาลีกำหนดไว้ ซึ่งสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า หรือเป็นแหล่งให้ความร้อนในท้องถิ่นได้

Jayah et al. [25] ศึกษาเตาแก๊สซิไฟเออร์ที่สร้างขึ้นในประเทศศรีลังกาสำหรับอุตสาหกรรมใบชา แต่ยังขาดความเข้าใจในตัวแปรที่มีผลต่อการทำงาน และคุณสมบัติในการออกแบบ สำหรับ

การทดสอบในการออกแบบภายใต้สภาวะที่เปลี่ยนไปทำให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบถึงผลกระทบของตัวแปรและประสิทธิภาพ และโปรแกรมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของไพโรไลซิส และส่วนของแก๊สซิฟิเคชั่น ซึ่งส่วนของไพโรไลซิสถูกนำไปใช้เป็นตัวกำหนดค่าของอุณหภูมิ และองค์ประกอบของแก๊ส ส่วนของแก๊สซิฟิเคชั่นได้เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง พบว่าขนาดไม้ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 3-5 cm และมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะต้องมีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนคงที่ (fixed carbon) มากกว่าร้อยละ 30 และควรจะหลีกเลี่ยงการสูญเสียความร้อนที่มีมากกว่าร้อยละ 15 ซึ่งความสูงของชั้นแก๊สซิฟิเคชั่นมีค่าเท่ากับ 33 cm จะทำให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจะเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สและองค์ประกอบที่สำคัญของโปรดิวเซอร์แก๊ส จากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เช่น ไม้ยางพารา ถ่าน ซังข้าวโพด แต่ในงานวิจัยนี้ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส เพื่อหาความเหมาะสมในการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สโดยจะทดลองที่อัตราการไหลอากาศต่างกันและวิเคราะห์องค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊ส เนื่องจากโปรดิวเซอร์แก๊สสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องปั่นไฟ เครื่องสูบน้ำ หรือใช้เป็นแหล่งความร้อนให้กับระบบอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากแรงดันไอ อุตสาหกรรมผลิตเซรามิกส์ อุตสาหกรรมการอบแห้งต่างๆ เช่น ลำไย พริก แต่ในที่นี้ใช้กับกระบวนการผลิตชาเขียวใบหม่อนเพื่อทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม