

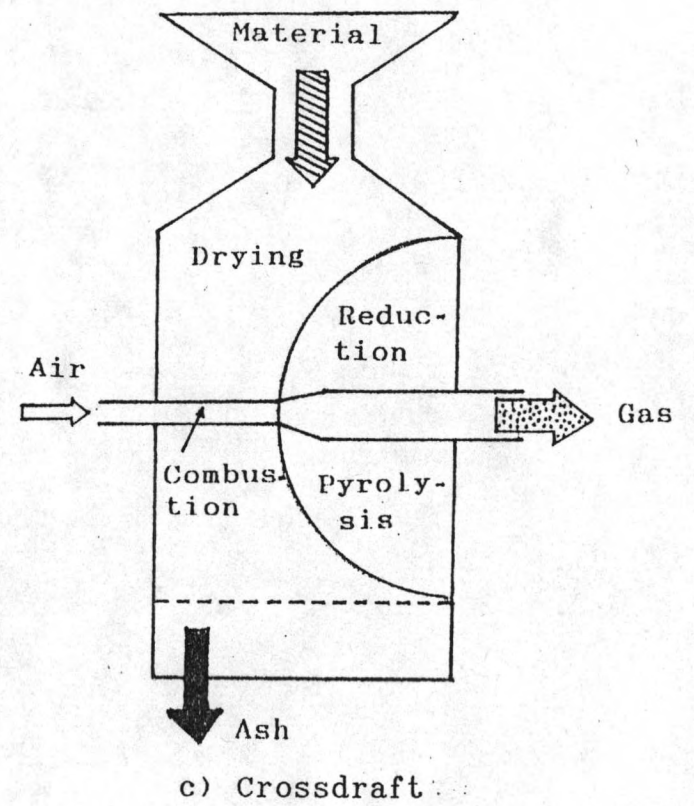
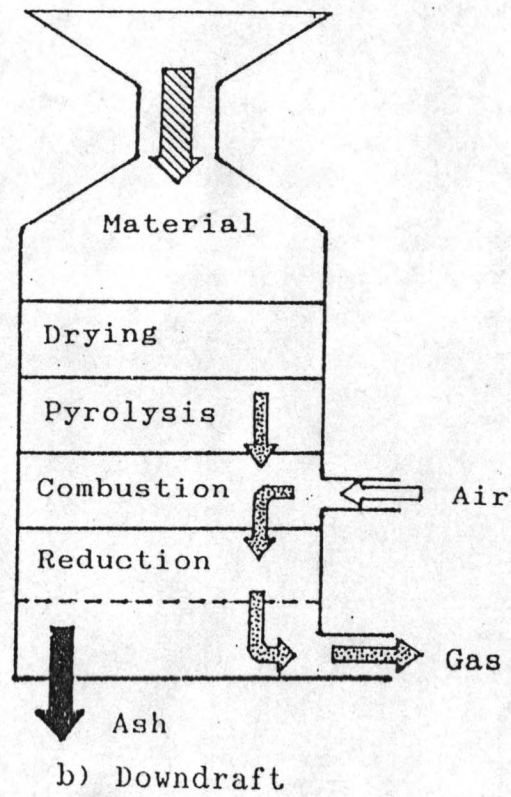
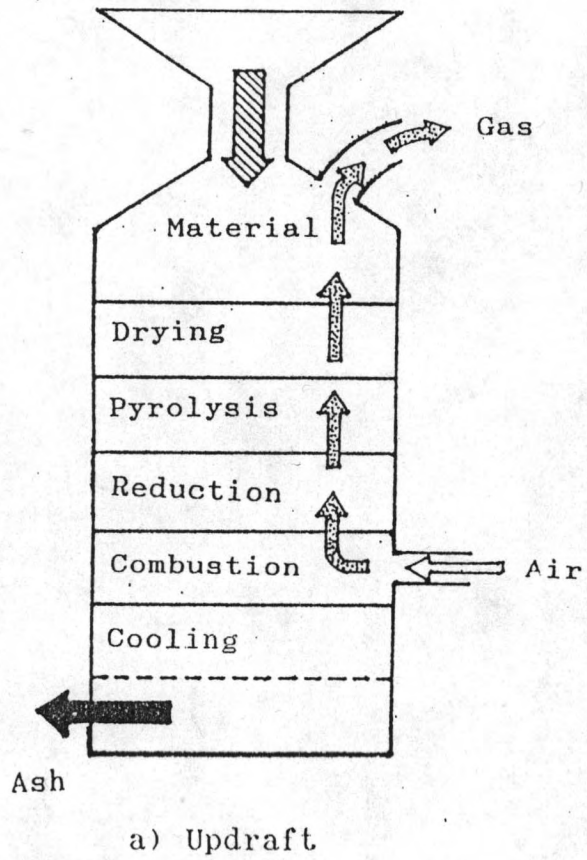
บทที่ 3

เตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น

3.1 ประเภทของเตาไพโรไลซิส

เตาที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลมีหลายประเภท และถูกเรียกชื่อต่างๆกันตามลักษณะของเตาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใน และวัตถุประสงค์ของการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น เตาที่ใช้เพื่อผลิตก๊าซเป็นหลัก โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า "เตาผลิตก๊าซ" หรือ เตาก๊าซซิฟายเออร์ (Gasifier) สำหรับเตาไพโรไลซิส (Pyrolysis furnace) มีลักษณะคล้ายคลึงกับเตาก๊าซซิฟายเออร์ แต่แตกต่างกันที่วัตถุประสงค์ของการใช้งาน กล่าวคือ เตาไพโรไลซิสไม่ได้มุ่งเฉพาะการผลิตก๊าซเพื่อใช้เป็นพลังงานเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีจุดมุ่งหมายในการผลิตถ่าน และน้ำมันทาร์ เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงด้วย

เตาไพโรไลซิส พอลจะจำแนกประเภทตามลักษณะปฏิกิริยาการไหลของก๊าซได้เป็น 3 ประเภท คือ เตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น (Updraft) เตาไพโรไลซิสแบบไหลลง (Downdraft) และเตาไพโรไลซิสแบบครอสดราฟท์ (Crossdraft) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ประเภทของเตาไพโรไลซิส

3.1.1 เตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น (Updraft)

เตาไพโรไลซิสชนิดนี้ โดยทั่วไปแล้วจะถูกสร้างขึ้นเพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงหรือที่เรียกว่า"ก๊าซชีวมวล" เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ส่วนถ่านและน้ำมันทาร์ที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์รอง ลักษณะของเตาชนิดนี้จะควบคุมให้ก๊าซที่ผลิตได้จากชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก ไหลขึ้นตอนบนเพื่อทำปฏิกิริยากับถ่านในชั้นรีดักชัน (Reduction zone) ให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง(ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน มีเทน และก๊าซองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ) ก๊าซที่ผลิตได้นี้จะไหลขึ้นผ่านถ่านในชั้นไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) และผ่านวัสดุในชั้นทำแห้ง (Drying zone) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกรองน้ำมัน ยางเหนียว ผุ่น และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากก๊าซ ทำให้ได้ก๊าซที่บริสุทธิ์เพิ่มขึ้น อีกทั้งสามารถลดอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเตา อันจะเป็นการช่วยลดขนาดของชุดกรองก๊าซ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในระบบจ่ายก๊าซได้ด้วย

3.1.2 เตาไพโรไลซิสแบบไหลลง (Downdraft)

เตาไพโรไลซิสชนิดนี้ อาจจะเรียกได้ว่าเป็นเตาแบบก๊าซชีวมวล เพราะสามารถผลิตก๊าซให้ปริมาณมากกว่าผลิตภัณฑ์ถ่าน และน้ำมันทาร์ เนื่องจากถ่าน และน้ำมันทาร์บางส่วนจะถูกใช้ไปในการเผาไหม้ให้กลายเป็นก๊าซ ลักษณะการทำงานของเตาชนิดนี้ วัสดุเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่ภายในเตาทางด้านตอนบน เช่นเดียวกับเตาแบบไหลขึ้น โดยวัสดุจะไหลผ่านชั้นทำแห้งเพื่อไล่ความชื้นออกแล้วไหลลงสู่ชั้นไพโรไลซิส เพื่อการกลั่นสลายชีวมวลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซ ไอสารระเหย และถ่าน จากนั้นจะไหลลงสู่ชั้นเผา

ไหม้ ซึ่งในขั้นนี้ผลิตภัณฑ์บางส่วนจะถูกเผาไหม้เพื่อให้พลังงานความร้อนแก่เตาได้ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไหลลงสู่ชั้นรัดกั้น และทำปฏิกิริยาเคมีกับถ่านภายในชั้น เกิดเป็นก๊าซเชื้อเพลิงไหลออกจากเตาทางตอนล่างอย่างไรก็ตาม แม้ว่าเตาไพโรไลซิสชนิดนี้ จะสามารถผลิตให้ก๊าซได้ปริมาณมาก แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิก๊าซที่ออกมาค่อนข้างสูง และมีสิ่งเจือปนในก๊าซค่อนข้างมาก เนื่องจากก๊าซไหลผ่านเพียงชั้นของรัดกั้น ไม่ผ่านชั้นไพโรไลซิส และชั้นทำแห้ง อย่างในกรณีของเตาแบบไหลขึ้น ทำให้ไม่มีชั้นกรองก๊าซภายในเตา และเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสูงในชั้นรัดกั้น จึงทำให้ก๊าซที่ออกมามีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างชุดกรองก๊าซและชุดแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซลงอันจะทำให้ได้ความหนาแน่นของก๊าซเพิ่มมากขึ้น และได้ก๊าซที่บริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปน ก็นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้แก่เครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานให้ความร้อนต่างๆ

3.1.3 เตาไพโรไลซิสแบบครอสตราฟท์ (Crossdraft)

เตาไพโรไลซิสแบบครอสตราฟท์ ยังใช้กันไม่แพร่หลายนักในปัจจุบัน เนื่องจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเตาชนิดนี้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับเตาอย่างสองชนิดแรกวัตถุประสงค์ของการออกแบบเตาชนิดนี้ เพื่อผลิตก๊าซใช้ในเครื่องยนต์ และได้ผลิตภัณฑ์ถ่านเป็นจำนวนมาก ลักษณะเด่นของเตาก็คือโครงสร้างเบา เนื่องจากต้องการพื้นที่ในการเผาไหม้วัสดุ เพื่อเป็นแหล่งพลังงานน้อยโดยการอัดอากาศช่วยในการเผาไหม้ บริเวณแถบกลางเตาก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะไหลผ่านทำปฏิกิริยากับถ่านในแถบบริเวณพื้นที่รัดกั้น และได้ก๊าซเชื้อเพลิงไหลผ่านชั้นถ่านของแถบพื้นที่ไพโรไลซิส ก่อนที่จะออกจากเตา

ช่วงบริเวณกลางเตา ดังรูปที่ 3.1 (ค) ทำให้มีการสูญเสียความร้อนน้อย และ
ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านที่มีคุณภาพ

3.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเตาไพโรไลซิส

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเตาแบบไพโรไลซิส สามารถจำ
แนกออกได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

3.2.1 ปฏิกิริยาในชั้นทำแห้ง (Drying zone)

ในชั้นทำแห้งของเตาไพโรไลซิส จะเป็นชั้นปฏิกิริยาทำแห้ง
วัสดุเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุ อันได้แก่ ชั้นไพโรไลซิส ชั้นรีดักชัน และชั้น
เผาไหม้ โดยทั้งนี้ต้นแหล่งพลังงานอยู่ที่ชั้นเผาไหม้ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน
ความร้อนให้แก่ทุกชั้นปฏิกิริยาภายในเตา

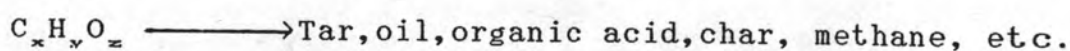
ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำแห้งวัสดุ คืออุณหภูมิ ยิ่งอุณหภูมิ
สูงอัตราการทำแห้งก็ยิ่งเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิและความเร็วการ
ไหลของก๊าซผ่านวัสดุ ก็มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมทั้งระบบการควบคุมเตาถ้า
หากอุณหภูมิต่ำเกินไป (น้อยกว่า 95°C) จะมีผลทำให้ไอน้ำเกิดการควบ
แน่นเป็นแผ่นกั้นการไหลของก๊าซในชั้นทำแห้ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้การทำ
งานของระบบเตาล้มเหลว นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญอื่น ๆ เช่น ความหนา
ของชั้นทำแห้ง ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการป้อนอากาศในชั้น
เผาไหม้ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอัตราความเร็วของก๊าซไหลผ่านวัสดุ รวมทั้งคุณ
สมบัติของวัสดุ เช่น ขนาด รูปทรง และโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

พลังงานความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการทำแห้ง ได้มีศึกษา โดย Toshizo (1978) ซึ่งรายงานว่าการทำแห้งวัสดุที่มีความชื้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ให้เหลือเพียงประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นต้องใช้พลังงาน ความร้อนประมาณ 1.26 กิโลคาลอรีต่อกิโลกรัมของน้ำ แต่เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่น ๆ มีผลต่อการแห้งเช่น ขนาด รูปทรง ของวัสดุ ดังที่กล่าวข้างต้น จะทำให้ความร้อนที่ใช้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่ง Toshizo ได้แนะนำว่า ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่ใช้ ควรจะประเมินเป็นสองเท่าของค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี

3.2.2 ปฏิกิริยาในชั้นไพโรไลซิส (Pyrolysis zone)

หลังจากวัสดุถูกทำให้แห้งโดยความร้อนในชั้นทำแห้งแล้ว วัสดุแห้ง จะเคลื่อนลงสู่ชั้นไพโรไลซิส และเกิดปฏิกิริยาการกลั่นสลายที่อุณหภูมิมากกว่า 200°C. องค์ประกอบจำพวกลิกโนเซลลูโลส (Lignocelluloses) ในวัสดุจะถูกกลั่นสลายได้ก๊าซ ของเหลวทาร์ และถ่าน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิสุดท้าย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา รวมทั้งขนาดอนุภาค ความชื้น เปอร์เซ็นต์ซีเถ้า และอื่นๆ ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.4

สำหรับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในชั้นไพโรไลซิส เป็นเช่นสมการ
ดังนี้



ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 900°C.

ในการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส Stout (1981) ได้รายงานสรุปเกี่ยวกับปัจจัยการควบคุมที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ถ่าน ก๊าซและของเหลวทาร์ไว้ดังนี้



ก) ถ่าน (Char) การให้อุณหภูมิต่ำ (200 - 400 °ซ.) และให้อัตราความร้อนอย่างช้า (เป็นชั่วโมง หรือเป็นสัปดาห์) จะทำให้ได้ปริมาณถ่านสูงสุด และการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะมีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดถ่าน จะทำให้ลดทั้งปริมาณถ่านและสารระเหยในถ่าน การลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Retention time) หรือระยะเวลาในการเก็บกักวัสดุที่อุณหภูมิสูง จะมีผลเอื้ออำนวยต่อการเกิดถ่าน

ข) ก๊าซเชื้อเพลิง (Fuel gas) การให้อุณหภูมิสูง (มากกว่า 600 °ซ.) มีความจำเป็นสำหรับการเปลี่ยนคาร์บอนให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซ การเพิ่มช่วงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะช่วยในการแตกตัวขององค์ประกอบคาร์บอนและการไหลของก๊าซ ในแนวขนาน (Parallel flow) อาจช่วยในการเพิ่มการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนและลดปริมาณน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งช่วยเพิ่มคุณภาพให้แก่ก๊าซในเตาลักษณะการไหลของก๊าซในแนวขนาน เช่น เตาไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น หากปริมาณความชื้นสูง จะส่งผลให้การเปลี่ยนคาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซเพิ่มขึ้น โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ค) ของเหลวทาร์ (Liquid tar) จะเกิดที่อุณหภูมิช่วงกลางๆ (450-600 °ซ.) โดยให้อัตราความร้อนอย่างรวดเร็วและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาพอเพียงต่อการเกิดสารระเหย การให้อัตราความร้อนที่อุณหภูมิสูง แต่ให้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารระเหยทาร์

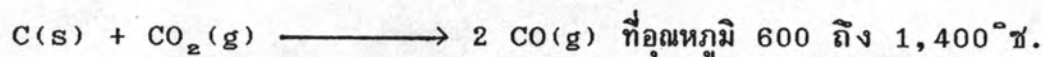
กลายเป็นก๊าซและของแข็งทาร์สำหรับในกรณีเตาที่มีลักษณะการไหลของก๊าซแบบขนานปริมาณความชื้นที่ยอมรับได้สูงสุด ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์

3.2.3 ปฏิริยาในชั้นรีดักชัน (Reduction zone)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่มีผลสูงสุดต่อค่าความร้อนของก๊าซที่ได้ ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ในชั้นปฏิริยารีดักชัน โดยทั้งนี้ความสามารถของการเกิดปฏิริยารีดักชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) ของถ่านความสัมพัทธ์ระหว่างความเร็วในการไหลของก๊าซกับถ่าน และอุณหภูมิในชั้นรีดักชัน ซึ่งอุณหภูมิในชั้นรีดักชันเป็นปัจจัยส่งผลที่สำคัญที่สุดกล่าวคือ ปฏิริยารีดักชันจะเกิดได้ดี เมื่ออุณหภูมิภายในชั้นรีดักชันสูงเพียงพอ ตามที่ The Swedish Academy of Engineering Sciences ศึกษาพบว่า การที่จะทำให้ปฏิริยารีดักชันเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ ให้สามารถผลิตก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ 34.5 เปอร์เซ็นต์ นั้น จะต้องให้อุณหภูมิในชั้นรีดักชันสูงมากกว่า $1,100^{\circ}\text{C}$. และเรื่องนี้คูว์นชัย (1982) ได้รายงานสนับสนุนว่าหากต้องการให้ปฏิริยารีดักชันเกิดขึ้น 90 เปอร์เซ็นต์ จะต้องให้อุณหภูมิสูงกว่า 900°C .

สำหรับปฏิริยาหลักที่เกิดขึ้นในชั้นรีดักชัน Manurung (1981) ได้รวบรวมปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นไว้ดังนี้

ก). ปฏิริยารีดักชัน (Reduction reaction)



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (Endothermic reaction) โดยใช้พลังงาน 159,905 kJ/kg atom of carbon

ปฏิกิริยารีดักชันนี้เป็นปฏิกิริยาที่มีความสำคัญมาก ต่อ การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงโดยการเปลี่ยนจากก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ (Noncombustible gas, CO_2) กลายเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ (Combustible gas, CO)

ข) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction or Shift reaction)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาช่วยเสริมในการผลิตก๊าซที่เผาไหม้ได้เพิ่มขึ้นซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ปฏิกิริยา คือ

(1) ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 900°C. ขึ้นไป

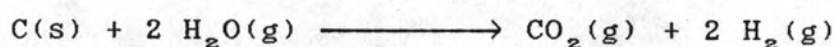


ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน โดยใช้พลังงาน 118,045 kJ/kg atom of carbon

การเพิ่มปริมาณความชื้น (Water content) ในอากาศที่ป้อนเข้าสู่ชั้นเผาไหม้ หรือการฉีดน้ำเข้าไปในชั้นเผาไหม้หรือชั้นรีดักชัน สามารถ

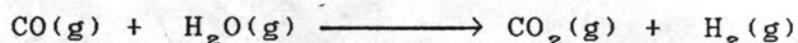
ช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง หรือเพิ่มค่าความร้อนให้แก่ก๊าซ ปฏิกริยานี้มีความสำคัญมากต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เพราะสามารถทำให้ได้ก๊าซที่เผาไหม้ได้ถึงสองชนิด คือ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน

(2) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นช่วงอุณหภูมิต่ำ 500 ถึง 600 °C.



ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาแบบดูดความร้อน โดยใช้พลังงาน 88,000 kJ/kg atom of carbon

(3) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากไอน้ำส่วนเกิน (Excess steam)



ปฏิกริยานี้จะเป็นปฏิกริยาแบบคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยให้พลังงาน 42,000 kJ/kg mol of CO

ซึ่งปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาที่ควรหลีกเลี่ยงในกระบวนการเพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเพราะมีผลทำให้ลดประมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์

ค) ปฏิกริยามีเทน (Methanation reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถ่านที่อุณหภูมิประมาณ 500°C .



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน โดยใช้พลังงาน

88,324 kJ/kg atom carbon

3.2.4 ปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้ (Combustion zone)

การเผาไหม้ชีวมวล อาจสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การเผาไหม้ชีวมวลแข็ง (Solid biomass) โดยตรง และการเผาไหม้ถ่าน น้ำมัน ของเหลว และก๊าซที่ผลิตได้จากชีวมวล สำหรับกระบวนการเผาไหม้โดยตรงที่เกิดขึ้นจริง จะไม่ใช่เป็นกระบวนการเดียว แต่จะประกอบไปด้วยกระบวนการหลาย ๆ กระบวนการเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่ง Matte (1985) ได้แยกแยะออกเป็น 3 เฟส คือ (1) การระเหยกลายเป็นไอของความชื้น (2) การเกิดสารระเหยและการลุกไหม้ของสารระเหย (3) การเผาไหม้ถ่านคาร์บอน (Fixed carbon) โดยที่การไล่ความชื้นออกจากวัสดุถือเป็นขั้นตอนแรก และการเผาไหม้ถ่านคาร์บอนถือเป็นขั้นตอนสุดท้าย

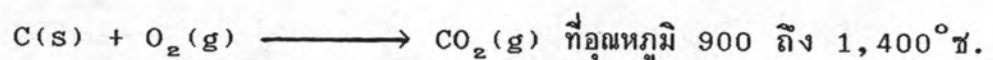
ในชั้นเผาไหม้ของเตาไพโรไลซิส อาจเกิดขึ้นเพียงกระบวนการเดียว หรือสองกระบวนการ เนื่องจากความชื้นถูกไล่ออกไปหมดแล้วในขั้นทำแห้ง และการเกิดสารระเหยและการลุกไหม้สารระเหยเกิดขึ้นใน

ชั้นไพโรไลซิส และชั้นรีดักชัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละชั้นปฏิกิริยา

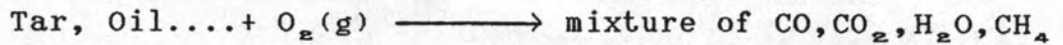
ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้เชื้อเพลิง ได้แก่ (1) ความร้อนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา (2) ส่วนผสมของออกซิเจนหรืออากาศกับเชื้อเพลิง และ (3) ระยะเวลาที่พอเพียงต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ หากไม่ตรงตามเงื่อนไขดังกล่าวแล้ว จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีเชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ และทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ คือ การกำหนดอัตราส่วนผสมของอากาศ และเชื้อเพลิง (Air/Fuel ratio) เพราะหากให้อากาศเกินกว่าปริมาณจำเป็นตามทฤษฎีแล้ว จะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่ง Stout (1985) ได้รายงานว่าการให้ปริมาณอากาศที่มากเกินไปจะทำให้ (1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีช้าลง (2) ทำให้ก๊าซมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นซึ่งจะนำพาเอาสิ่งเจือปน ผุ่น ผงอนุภาคจากการเผาไหม้ออกจากเตาด้วย และ (3) ทำให้ต้องเพิ่มกำลังในการอัดอากาศเข้าสู่เตา

สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในชั้นเผาไหม้ Manurung (1981) ได้รวบรวมสมการดังนี้



โดยที่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยให้พลังงาน 406,042 kJ/kg atom of carbon



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนเช่นกัน

ในกระบวนการการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเตาล้วนต้องใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแทบทั้งสิ้น เช่น ปฏิกิริยาทำแก๊ส ปฏิกิริยาไพโรไลซิสและปฏิกิริยารีดักชัน โดยทั้งนี้พลังงานความร้อนที่ได้ ถูกผลิตขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในชั้นเผาไหม้ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานจ่ายให้แก่ชั้นปฏิกิริยาต่างๆ เพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

3.3 วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อการผลิตพลังงานมีมากมายหลายประเภท ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1 สำหรับชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้ มี 2 ชนิดคือ แกลบ และขี้เถ้าอัด ซึ่งทั้งสองชนิดเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตในโรงสีข้าวและโรงงานแปรรูปไม้ ซึ่งมีศักยภาพสูงเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบป้อนเตาในการผลิตผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง เพื่อใช้เป็นพลังงาน

3.3.1 แกลบ (Rice husk)

คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของแกลบเป็นที่ทราบกันดีแล้วจากการศึกษาวิจัยมาเป็นเวลานานและมีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับแกลบอยู่

มาก อันสามารถศึกษาค้นคว้าได้ทั่วไป

ตารางที่ 3.1 แร่ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

Element	Mass Fraction % (%)	True density (g/cm ³)
C	41.44	1.8 - 2.26
O	37.32	-
Si	14.66	2.0 - 2.50
H	4.94	-
K	0.59	0.86
N	0.57	-
S	0.30	2.0 - 2.90
P	0.70	1.82 - 2.69
Ca	0.06	1.55
Na	0.035	0.97
Fe	0.006	7.86
Mg	0.003	1.74
Zn	0.006	7.14

แกลบจะมีอยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของเมล็ดข้าวเปลือก และมีส่วนประกอบหลัก คือ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและแร่ธาตุอื่นๆ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนให้พลังงานความร้อน แร่ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของแกลบแสดงในตารางที่ 3.1

ปฏิกิริยาทางเคมีของแกลบที่สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเตา ที่ใช้ผลิตพลังงาน อันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบการทำงานของเตาล้มเหลวก็คือ ปฏิกิริยาการยึดเหนี่ยวของสารระเหยที่มีสถานะไม่คงรูป (Free radicals) กับไฮโดรเจน ซึ่งจะเกิดเป็นยางเหนียวหรือทาร์ (Tar) มีลักษณะเป็นแผ่นรูพรุน คุณสมบัติเปราะบาง จะเป็นตัวช่วยประสานให้เกิดการเกาะตัวของแกลบติดกับผนังของเตาเป็นชั้นขวางกั้นการเคลื่อนตัวของแกลบ ในแนวตั้งทำให้ระบบการป้อนเชื้อเพลิงต้องหยุดชะงัก ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นถูกเรียกว่า "Caking" มักจะเกิดในเตาขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 50 ซม.) และช่วงอุณหภูมิ 250-450 °C. (Kaupp, 1984) วิธีแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการติดตั้งใบกวาดหรือใบกวน (Strirrer) ภายในเตา เพื่อกวนหรือกระทั่งการเกาะตัวของชั้นแกลบให้แตกสลาย ทำให้แกลบสามารถเคลื่อนตัวได้ ระบบการไหลของก๊าซ และการป้อนเชื้อเพลิงดำเนินไปได้โดยต่อเนื่อง

และอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สำคัญ ที่เป็นปัญหาต่อระบบการทำงานของเตา ก็คือการเกิดการหลอมละลายเกาะตัวของแร่ธาตุในแกลบ เช่น ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ที่อุณหภูมิสูง 1,400-1,610 °C. ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งมีลักษณะเป็นวัตถุพรุนสีขาว เกาะตัวอุดตันการเคลื่อนตัวของแกลบ ปรากฏการณ์ลักษณะนี้ถูกเรียกว่า "Slagging" และมักเกิดขึ้นในชั้นเผาไหม้ของเตาที่มีอุณหภูมิสูงเกินไป ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ควรหลีกเลี่ยงเพราะจะก่อให้เกิดผลเสีย

ต่อระบบการทำงานของเตา

ตารางที่ 3.2 ค่าจุดหลอมเหลวของแร่ธาตุบางชนิด

Mineral oxide	Melting point (°C)
CaO	2,614
MgO	2,852
K ₂ O	350
Na ₂ O	1,275
Fe ₂ O ₃	1,560
P ₂ O ₅	580
SiO ₂ : Quartz (amorphous)	1,400-1,610
Trydimite	1,703
Cristobalite	1,723

ข้อมูลจาก : Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 1982

3.3.2 ขี้เลื่อยอัด (Bark pellet)

ขี้เลื่อยอัดเป็นวัสดุชีวมวลชนิดหนึ่ง ที่ได้จากการอัดเศษผง
ขี้เลื่อยให้เป็นเม็ด โดยใช้เครื่องจักร เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบป้อนเตาผลิต
พลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการก่อประโยชน์ในการหมุนเวียนการ

ใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด แทนการปล่อยทิ้งไว้ ให้เป็นมลภาวะต่อ
สิ่งแวดล้อม

ชี้เลี้ยงสัตว์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นชี้เลี้ยงสัตว์ที่ทำจากเศษ
ชี้เลี้ยงจากกระบวนการผลิตแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ ซึ่งมี
คุณสมบัติให้ค่าความร้อนสูง หากนำมาเป็นวัสดุเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานให้
ความร้อนในกระบวนการที่ต้องการความร้อน ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อีกทั้ง
ก็ยังให้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาใช้ในเชื้อเพลิง ให้แก่
เครื่องยนต์สันดาปภายในทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงอื่น ๆ ขนาด และรูปทรงของ
ชี้เลี้ยงสัตว์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของขี้เลื่อยอัดที่ใช้ในการทดลอง

จำนวนครั้งที่วัด	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	ความยาว (มม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลบ.มม)
1	0.71	1.75	0.613	0.885
2	0.67	2.20	0.806	1.039
3	0.66	1.46	0.509	1.019
4	0.65	1.15	0.421	1.103
5	0.69	1.76	0.643	0.977
6	0.67	2.04	0.766	1.065
7	0.76	1.58	0.535	0.746
8	0.66	1.54	0.592	1.124
9	0.66	1.66	0.615	1.083
10	0.65	1.22	0.405	1.000
ค่าเฉลี่ย	0.678	1.636	0.591	1.004