

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล หมายถึง วัสดุหรือเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ชีวมวล จึงนับรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ มูลสัตว์ และของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิลมีที่มาจากแหล่งเดียวกัน คือพืชและสัตว์ แต่มีความแตกต่างกันที่เวลา นั่นคือการเกิดเชื้อเพลิงฟอสซิลต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานในการแปรสภาพซากพืชซากสัตว์ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่ต่างกัน จึงไม่ถือว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นชีวมวล

2.1.1 แหล่งที่มาของชีวมวล

ชีวมวลประกอบด้วยวัสดุหลายประเภท แต่มักจะหมายถึงวัสดุจากพืชเป็นหลัก เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้จากการทำป่าไม้ หรือแปรรูปไม้ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ และสามารถจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- เศษไม้ (Wood Residues) เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่อยู่ในรูปของแข็ง ที่เกิดขึ้นมากในอุตสาหกรรมป่าไม้ ซึ่งส่วนใหญ่ต้องการใช้เพียงแค่ส่วนของลำต้นหรือเนื้อไม้ ส่วนที่เหลือ คือ ใบและกิ่งก้านต่างๆ รวมถึงชี้เลื้อยจากกระบวนการแปรรูปไม้ ที่ไม่สามารถนำมาใช้ตามวัตถุประสงค์สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้
- เศษพืชผลทางการเกษตร (Agricultural Wastes) เป็นเศษวัสดุต่างๆ ที่เกิดจากพืชผลทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และเศษผัก เป็นต้น เศษวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มีจำนวนมาก และสามารถนำมาผลิตพลังงานได้เช่นกัน
- สิ่งปฏิกูลจากสัตว์ (Animal Wastes) สิ่งปฏิกูลจากสัตว์มีปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากการเลี้ยงสัตว์ในลักษณะเป็นฟาร์ม การรวบรวมสิ่งปฏิกูลได้มากพอจะสามารถผลิตเป็นพลังงานได้
- ของเหลือใช้จากชุมชน (Municipal Wastes) หรืออาจเรียกว่าขยะชุมชน เป็นผลจากการบริโภคของมนุษย์ที่มีการทิ้งของที่เหลือใช้ในสภาพขยะ ซึ่งในเมืองใหญ่หรือในที่ที่มีปริมาณประชากรหนาแน่น จะยังมีปริมาณของเหลือทิ้งชนิดนี้มาก

2.2 ศักยภาพพลังงานจากชีวมวลในประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นฐานด้านการเกษตร จึงมีการปลูกพืช และการทำการเกษตร ส่งผลให้มีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งทำให้เกิดสิ่งเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากการเกษตรในปริมาณมาก โดยในประเทศไทยมีพืชที่เพาะปลูกมาก และมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นแหล่งพลังงาน รวม 9 ชนิด [6] คือ ปาล์ม อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวข้าวโพด ถั่วเหลือง สับปะรด มะพร้าว และไม้ยางพารา โดยในตารางที่ 2.1 แสดงศักยภาพพลังงานจากพืชชีวมวลทั้ง 9 ชนิด

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพพลังงานของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร [6]

ชนิด	ส่วนเหลือทิ้ง	สัดส่วนการเกิด (%)	สัดส่วนการนำไปใช้ (%)	ค่าความร้อน (kJ/ton)	ศักยภาพพลังงาน (ktoe/year)
อ้อย	ส่วนยอด	0.20	10-30	17.39	4892
	ชานอ้อย	0.30	100	-	
ข้าว	แกลบ	0.23	70-80	14.27	4239
	ฟางข้าว	1.19	50	10.24	
ข้าวโพด	ต้น และใบ	0.89	10	17.39	1494
	ซังข้าวโพด	0.19	70	18.04	
มันสำปะหลัง	ต้น และใบ	0.12	60-80	17.39	917
	เหง้า	0.09	0	18.42	
มะพร้าว	กะลา	0.25	50-70	16.23	810
	เปลือก	0.57	20	17.93	
	ต้น และทะลาย	0.56	0	15.40	
สับปะรด	ยอดสับปะรด	0.59	0	12.68	305
ปาล์ม	ใบปาล์ม	0.15	100	-	219
	ทะลายปาล์ม	0.22	50-60	17.86	
	ทางปาล์ม	0.27	100	-	
	กะลาปาล์ม	0.13	70-80	18.46	
ยางพารา	ไม้พิน	0.25	100	-	86
	จีเลื่อย	0.03	100	-	
	อื่นๆ	0.10	20	14.98	
ถั่วเหลือง	ต้นและใบ	1.18	50-60	19.44	63

จากศักยภาพพลังงานของ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จากพืชทั้ง 9 ชนิด พบว่ามีพลังงานเหลือทิ้ง ที่ยังไม่มีการนำมาใช้อีก 13.0 Mtoe ต่อปี โดยที่ซึ่งข้าวโพดเองเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มี ศักยภาพชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูง และมีพลังงานเหลือทิ้งที่ยัง ไม่มีการนำไปใช้ถึง 1494 ktoe ต่อปี

2.2.1 ชนิดของข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจอีกชนิดของประเทศไทย มีปริมาณการปลูก และการส่งออกสูง เนื่องจาก สามารถปลูกได้ง่าย มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น (ประมาณ 90-100 วัน) ทำให้สามารถปลูกข้าวโพดได้ปีละ สองครั้ง โดยในปี 2553 มีพื้นที่การปลูกข้าวโพดในประเทศไทยมากกว่า 7.1 ล้านไร่ และมีปริมาณ ผลผลิตข้าวโพดมากกว่า 4.4 ล้านตัน [7]

ข้าวโพดที่นิยมปลูกในประเทศไทยมีหลายสายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์แก้วเตมาลา พีบี 12 (Rep.1) แก้วเตมาลา พีบี 12 (Rep.2) พีบี 5 ข้าวโพดเหนียว และโอเปก-2 มีเมล็ดตั้งแต่สีขาว สีเหลือง ไปจนถึงสีแดง ขนาด ของเมล็ดขึ้นอยู่กับพันธุ์ โดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.5-0.8 cm ก่อนนำมาเลี้ยงสัตว์จึง ต้องบดก่อนเพื่อช่วยในการย่อยและการผสมได้ผลดีขึ้น ที่บดแล้วจะมีขนาดประมาณ 1-8 mm โดยทั่วไปข้าวโพดจัดออกเป็น 5 กลุ่ม คือ

1. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หรือข้าวโพดไร่ (Field Corn) ที่รู้จักในปัจจุบันมีข้าวโพดหัวนุ่ม (Dent Corn) และ ข้าวโพดหัวแข็ง (Flint Corn) ซึ่งเป็นการเรียกตามลักษณะเมล็ด

- ข้าวโพดหัวนุ่มหรือหัวบุบ ข้าวโพดชนิดนี้เมื่อเมล็ดแห้งแล้วตรงส่วนหัวบนสุดจะมีรอยบุ๋มลงไป ซึ่ง เป็นส่วนของแป้งสีขาว ข้าวโพดชนิดนี้สำคัญมากและนิยมปลูกกันมากใน ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะทางแถบคอร์นเบลท์ สีของเมล็ดมีตั้งแต่ขาว ไปจนถึงเหลือง เนื่องจากมีหลายสายพันธุ์มี โปรตีนน้อยกว่าพวกข้าวโพดหัวแข็ง

- ข้าวโพดหัวแข็ง ข้าวโพดพันธุ์นี้ส่วนบนสุดของเมล็ดมักมีสีเหลืองจัดและเมื่อแห้งจะแข็งมาก ภายใน เมล็ดมีสารที่ทำให้ข้าวโพดมีสีเหลืองจัดเป็นสารให้สีที่ชื่อ คริปโตแซนทีน (Cruptoxanthin) สารนี้เมื่อ สัตว์ได้รับร่างกายสัตว์จะเปลี่ยนสารนี้ให้เป็นวิตามินเอ นอกจากนี้สารนี้ยังช่วยให้ไข่แดงมีสีแดงเข้ม ช่วยให้มีผิวหนัง ปาก เนื้อ และแข้งมีสีเหลืองเข้มขึ้น เป็นที่นิยมของตลาดโดยเฉพาะแถบอเมริกา ส่วนอังกฤษนั้นนิยมใช้ข้าวโพดขาว

2. ข้าวโพดหวาน (Sweet Corn) เป็นข้าวโพดที่คนใช้รับประทานเป็นอาหารโดยไม่นิยมนำไปแปรรูป เมล็ดมักจะใส และเหี่ยวเมื่อแก่เต็มที่ เพราะมีน้ำตาลมากก่อนที่จะสุกจะมีรสหวานมากกว่าชนิดอื่นๆ จึงเรียกข้าวโพดหวาน มีหลายสายพันธุ์

3. ข้าวโพดคั่ว (Popcorn) เป็นข้าวโพดที่คนใช้รับประทาน ไม่มีการแปรรูป แต่นิยมนำไปทำข้าวโพดคั่ว เมล็ดค่อนข้างแข็ง สีดีและขนาดแตกต่างกัน สำหรับต่างประเทศ ถ้าเมล็ดมีลักษณะแหลมเรียกว่า ข้าวโพดข้าว (Rice Corn) ถ้าเมล็ดกลม เรียกว่า ข้าวโพดไข่มุก (Pearl Corn)
4. ข้าวโพดแป้ง (Flour Corn) เมล็ดมีสีหลายชนิด เช่น ขาว หรือสีน้ำเงินคล้ำ หรือมีทั้งสีขาวและสีน้ำเงินคล้ำในฝักเดียวกัน เนื่องจากกลายพันธุ์ พวกที่มีเมล็ดสีคล้ำและพวกกลายพันธุ์เรียกว่าข้าวโพดอินเดียนแดง (Squaw Corn) หรือเรียกได้อีกชื่อว่าข้าวโพดพันธุ์พื้นเมือง (Native Corn) พวกข้าวโพดสีคล้ำนี้จะมีในอาซิน สูงกว่าข้าวโพดที่มีแป้งสีขาว นิยมนำไปแปรรูปเป็นแป้งสำหรับทำอาหาร หรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้ประกอบการทำอาหาร
5. ข้าวโพดเทียน (Waxy Corn) เป็นข้าวโพดที่คนใช้รับประทาน จะมีแป้งที่มีลักษณะเฉพาะคือ นุ่มเหนียว เพราะในเนื้อแป้งจะประกอบด้วยแป้งพวกแอมมิโลเปคติน (Amylopectin) ส่วนข้าวโพดอื่นๆ มีแป้งแอมมิโลส (Amylose) ประกอบอยู่ด้วย จึงทำให้แป้งค่อนข้างแข็ง

2.2.2 ชังข้าวโพด

เนื่องจากมีปริมาณการปลูกมาก จึงทำให้มีชังข้าวโพดเกิดขึ้นจำนวนมาก โดยชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดมาใช้งานส่วนใหญ่เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในส่วนของลำต้นจะถูกตัดหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้ว ปัจจุบันการสีข้าวโพดจะใช้เครื่องจักรที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามไร่ข้าวโพด ดังนั้นจะสามารถหาชังข้าวโพดและต้นข้าวโพดได้ตามไร่ข้าวโพดทั่วไป

ชังข้าวโพดมีค่าความร้อนสูง จึงสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ดี โดยสมบัติของชังข้าวโพด และชีวมวลอื่นๆ จากการวิเคราะห์ ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) แสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 สมบัติของชังข้าวโพดและชีวมวลอื่นๆ จากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร [4]

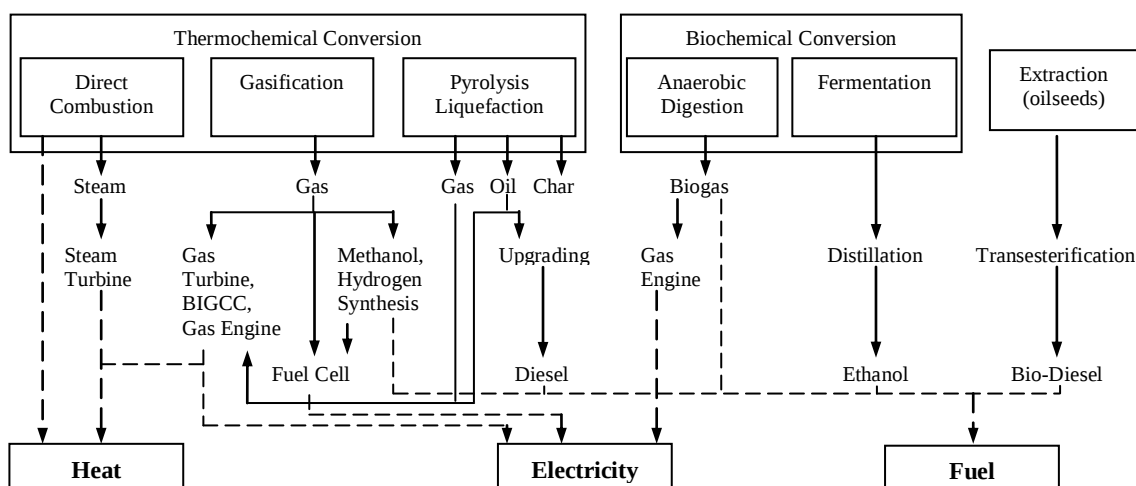
Biomass	Volatile Matter (%)	Ash (%)	Fixed Carbon (%)
Corn cob	85.4	2.8	14.6
Corn stalks	80.1	6.8	19.9
Rice husk	81.6	23.5	18.4
Rice straw	80.2	19.8	19.8
wood	85.6	0.9	14.4
Coconut shell	80.2	0.7	19.8

ตารางที่ 2.3 สมบัติของขี้ข้าวโพดและชีวมวลอื่นๆ จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ [4]

Biomass	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	HHV (MJ/kg)
Corn Cob	47.6	5.0	0.0	44.6	15.65
Corn Stalks	41.9	5.3	0.0	46.0	16.54
Rice Husk	38.9	5.1	0.6	32.0	15.29
Rice Straw	36.9	5.0	0.4	37.9	16.78
Wood	48.2	5.9	0.0	45.1	19.78
Coconut Shell	50.2	5.7	0.0	43.4	20.50

2.3 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน

การนำชีวมวลประเภทต่างๆ มาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานนั้นมีหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งแยกกระบวนการออกเป็นหมวดหมู่ ตามลักษณะวิธีการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงานได้ 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการสกัด กระบวนการทางเคมีความร้อน และกระบวนการทางชีวเคมีดังรูปที่ 2.1 ในแต่ละกระบวนการมีวิธีการและเทคนิคการเปลี่ยนรูปที่ต่างกัน ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างกันด้วย โดยกระบวนการสกัดผลที่ได้คือ น้ำมันเพื่อนำมาผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อให้ได้ไบโอดีเซล ส่วนกระบวนการทางเคมีความร้อนผลที่ได้คือ แก๊สเชื้อเพลิง น้ำมันสังเคราะห์ จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) หรือความร้อนจากการเผาไหม้ และกระบวนการทางชีวเคมี ผลที่ได้คือ แอลกอฮอล์ หรือแก๊สชีวภาพ ซึ่งเกิดจากการหมักด้วยวิธีที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.1 แผนผังการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานโดยวิธีต่างๆ [8]

2.3.1 กระบวนการสกัด

กระบวนการสกัดน้ำมัน (Extraction) เมล็ดหรือผลของพืชบางชนิด เช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง เมล็ดขนุน เมล็ดยางพารา มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน สามารถนำเอามาสกัดเอาน้ำมันที่เรียกว่า น้ำมันพืช แต่การที่จะเอาน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อน โดยการแยกหรือกำจัดส่วนประกอบจำพวกไขมันอิสระ และสิ่งเจือปนต่างๆ ซึ่งวิธีการสกัดน้ำมันพืชจะขึ้นกับชนิดและปริมาณน้ำมันของพืชเหล่านั้น โดยทั่วไปใช้กันอยู่ 2 วิธี

- การสกัดด้วยการบีบอัด (Pressing) ใช้สำหรับพืชที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบมากกว่า 25 % เช่น ถั่วลิสง มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน เมล็ดตะงู โดยการบีบอัดน้ำมันออกมาจากเมล็ดหรือผลของพืชนั้น ด้วยเครื่องสกัดแบบอัดเกลียว (Screw Press)
- การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ใช้สำหรับพืชที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า 25 % เช่น ถั่วเหลือง เมล็ดขนุน รำข้าว เมล็ดฝ้าย โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น เฮกเซน สกัดน้ำมันออกมาจากเมล็ดพืชเหล่านี้ในเครื่องสกัด

2.3.2 กระบวนการทางเคมีความร้อน

การเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานโดยอาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนทำให้โครงสร้างทางเคมีของชีวมวลเปลี่ยนไปเป็นพลังงานตามความต้องการ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

- การเผาไหม้ (Combustion) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารที่ติดไฟได้กับออกซิเจนซึ่งในการเผาไหม้จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อนและแสงสว่าง โดยในการเกิดปฏิกิริยาจะใช้ปริมาณออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณที่มากเกินไป ในการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 900 °C สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลคือ ความชื้นที่มีอยู่ในชีวมวล เพราะในการเผาไหม้จะต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการระเหยความชื้นออกจากชีวมวลให้หมดก่อน จากนั้นชีวมวลที่ถูกเผาไหม้จึงสามารถให้พลังงานออกมาได้
- การแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) เป็นกระบวนการผลิตแก๊สจากชีวมวล โดยการเผาไหม้ชีวมวลในที่จำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจน (Partial Combustion) หรือการใช้ออกซิเจนบางส่วนในการทำปฏิกิริยา (ประมาณร้อยละ 30 ของปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้) โดยกระบวนการจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 600-900 °C แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้จะประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เป็นหลัก ซึ่งถือว่าเป็นแก๊สที่ให้พลังงานได้ โดยสามารถนำแก๊สที่ได้ไปเผาให้ความร้อนโดยตรง หรือทำให้ควบแน่นแล้วนำไปกลั่นเป็นเมทานอล นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สนี้ไปแยกองค์ประกอบแล้วใช้ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติของแก๊สแต่ละชนิด
- การย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) เป็นการสลายพันธะเคมีของวัสดุชีวมวลด้วยความร้อนโดยไม่พึ่งพาออกซิเจนหรืออากาศในการทำปฏิกิริยา โดยเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-600 °C

ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ เช่น การทำถ่าน ผลที่ได้จากกระบวนการนี้ประกอบด้วยของแข็ง 30-50 % ของเหลว 18-20 % และแก๊ส 20-30 % ปริมาณผลผลิตแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับกำหนดยุณหภูมิของอัตราการให้ความร้อน เวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิสูงสุด ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน [9]

Type	Residence Time	Heating Rate (°C/s)	Max Temperature (°C)	Major Product
Slow Pyrolysis	Hrs-day	Very low	400	Solid (Carbon)
	5-30 min	<10	600	Solid, Liquid and Gas
Fast Pyrolysis	0.5-5 sec	10-100	600-650	Solid, Liquid and Gas
Flash Pyrolysis	<0.5 sec	>100 or 1000	1000	Gas

2.3.3 กระบวนการทางชีวเคมี

การเปลี่ยนรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานโดยกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical Conversion) เป็นการใช้ประโยชน์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ กระบวนการนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองรูปแบบ คือ

- กระบวนการหมักในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) พลังงานในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเรียกว่า แก๊สชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญเป็น แก๊สมีเทน 40-60 % แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 30-40 % และแก๊สอื่นๆ 2-3 % มีค่าความร้อนประมาณ 19-22 MJ/m³
- การหมักผลิตแอลกอฮอล์ หรือการผลิตเอทานอล (Ethanol Fermentation) การเปลี่ยนรูป ชีวมวลประเภทคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์ หรือยีสต์เป็นตัวทำปฏิกิริยาย่อยสลาย ปกติมีแอลกอฮอล์ประกอบประมาณ 11-14 % โดยปริมาตร เมื่อนำไปกลั่นจะได้แอลกอฮอล์เข้มข้นสูงกว่า 90 % นำไปเป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบทางเคมีได้ มีค่าความร้อนประมาณ 23.54 MJ/L

2.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

เป็นกระบวนการผลิตแก๊สจากชีวมวลเกิดขึ้นในภาชนะปิดเรียกว่า เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ในภาวะที่จำกัดปริมาณออกซิเจน (Partial Oxidation) กระบวนการผลิตแก๊สเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบ Heterogeneous คือสารที่มี 2 สถานะมาทำปฏิกิริยากัน เช่นการผลิตแก๊สจากเชื้อเพลิง

แก๊ส (ของแข็งกับแก๊ส) โดยการผลิตแก๊สจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) สามารถแบ่งตามตัวกลางที่ใช้ทำปฏิกิริยา และขั้นตอนในการเผาไหม้ ออกได้เป็น 4 ชนิด [10]

- Air-Blown Gasification กระบวนการชนิดนี้เกิดขึ้นโดยใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในชั้นเผาไหม้ ได้รับความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วถูกส่งต่อไปเพื่อผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะได้แก๊สที่ค่าความร้อนไม่สูงนักเนื่องจากมีไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศ เป็นองค์ประกอบอยู่ในแก๊สเชื้อเพลิง 70 % และแก๊สที่ให้พลังงานคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน รวมถึงสารระเหยต่างๆ รวมกันประมาณ 30 %
- Oxidative Gasification ลักษณะของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ แทนอากาศ ซึ่งทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง เพราะไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในแก๊สเชื้อเพลิง การควบคุมกระบวนการเผาไหม้สามารถทำได้ดีกว่า แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาของออกซิเจนบริสุทธิ์มีราคาสูง
- Steam Gasification ในกระบวนการนี้ใช้น้ำเข้าช่วยทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ซึ่งจะช่วยให้ค่าความร้อนให้กับแก๊สเชื้อเพลิง โดยเป็นการเพิ่มไฮโดรเจน แต่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาจะต้องสูง ซึ่งไม่ควรต่ำกว่า 800 °C จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้
- Hydrogen Gasification เป็นกระบวนการที่ใช้ไฮโดรเจนแทนอากาศทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง โดยไม่มีการใช้อากาศหรือออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ปกติจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C และภายใต้ความดันที่สูง 20 MPa โดยแก๊สที่ได้ประกอบด้วยมีเทนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการนี้จะสร้างขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิง (Synthetic Fuel) และเชื้อเพลิงที่นิยมนำมาใช้ผลิตแก๊สคือ ถ่านหินเนื่องจากมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

โดยปกติกระบวนการผลิตแก๊สตามหลักการเคมีต้องพิจารณาเงื่อนไข Chemical Kinetics และ Chemical Equilibrium แต่เงื่อนไขแรกมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์ ดังนั้นทั่วไปจะใช้เงื่อนไข Chemical Equilibrium เป็นหลัก โดยการสมมติให้ปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล (Equilibrium) หมายถึงขอบเขตสุดท้ายของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และระดับอุณหภูมิสูงเพียงพอ

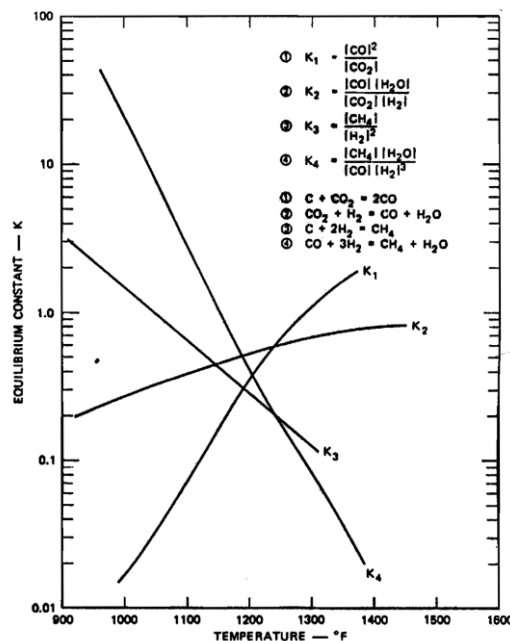
Equilibrium Constant คือ ค่าคงที่สมดุล (K) เป็นตัวแปรที่ใช้ประเมินสถานะของปฏิกิริยา และระดับการเข้าใกล้สมดุลซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิโดยตรง องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งจุดสมดุลของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังตัวอย่างปฏิกิริยา Boudouard Reaction ในสมการที่ 2.1



ระดับการเกิดปฏิกิริยาประเมินได้จากค่าคงที่สมดุล (K_{co}) ซึ่งเป็นอัตราส่วน โมล ของแก๊สที่ผลิตได้ต่อแก๊สที่เข้าทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.2

$$K_{co} = \frac{(CO)^2}{(CO_2)} \quad (2.2)$$

การวิเคราะห์องค์ประกอบ แก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) และการวัดอุณหภูมิ ทำให้สามารถทราบสถานะของปฏิกิริยาจากกราฟความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่ง K_1 , K_2 คือค่าคงที่สมดุลของ Boudouard Reaction และ Water Shift Reaction ตามลำดับ ในขณะที่ K_3 , K_4 คือ ค่าคงที่สมดุลของ Methane Reaction ซึ่งการเข้าสู่สถานะสมดุลของปฏิกิริยามีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะของเตาผลิตแก๊ส ระดับอุณหภูมิ และสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง เช่น ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง ขนาดและอัตราส่วนความต่างขนาดของเชื้อเพลิง ความเร็วในการไหลของแก๊ส

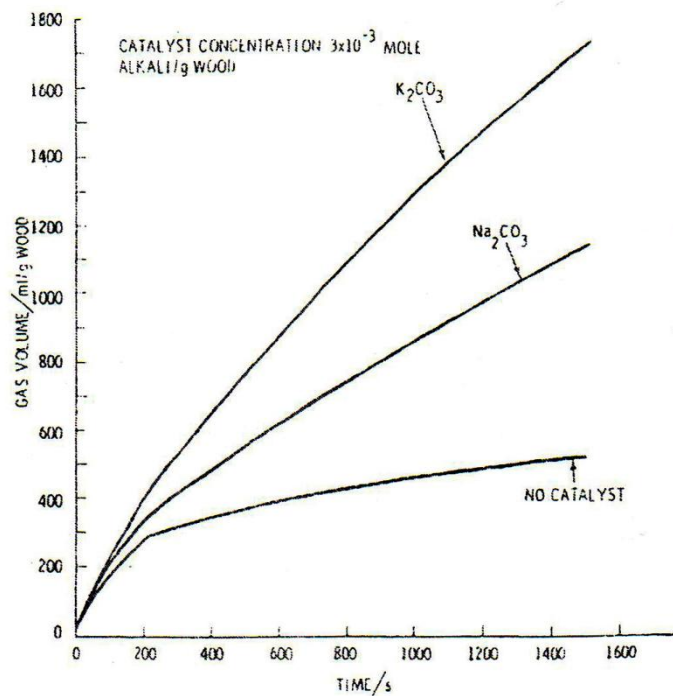


รูปที่ 2.2 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาต่างๆ [11]

2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาการเพิ่มปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องการคุณภาพแก๊สสูงๆ และต้องการปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ในปริมาณมาก เช่น การผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas) ซึ่งนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากในถ่านหินมีองค์ประกอบของคาร์บอนที่สูง และเพื่อให้คุ้มค่างับมูลค่าของเชื้อเพลิงที่นำมา

ผลิตแก๊สจึงต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อเพิ่มคุณภาพและปริมาณแก๊สที่จะผลิต ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลมีองค์ประกอบของคาร์บอนต่ำ ทำให้แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่ให้คุณภาพแก๊สไม่สูงเมื่อเทียบกับแก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงถ่านหิน โดยทั่วไปในการผลิตแก๊สต้องการที่จะให้ได้ปริมาณแก๊สมากที่สุด จากการควบคุมปริมาณอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยา แต่ในการเพิ่มปริมาณแก๊สที่ผลิตได้สามารถทำได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เข้าช่วยในการทำปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้กันก็คือ Alkali Carbonate และ Potassium Carbonate ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองตัวนี้มีข้อดีคือ ราคาไม่แพงไม่เกิดสารตกค้างในแก๊สเชื้อเพลิงโดยจะใช้ 3 โมล ของ Alkali ต่อไม้ 1 kg ในระบบการผลิตแก๊สแบบ Steam Gasification ที่อุณหภูมิ 923 K [12] ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ผลิตได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา[12]

ในการตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาพบว่า การใช้ Potassium Carbonate เข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนถึง 53 % โดยถ้าไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนเพียง 20 % ในระบบการผลิตแก๊สแบบ Steam Gasification ที่อุณหภูมิ 923 K ดังในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสัดส่วนโดยประมาณขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไม้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [12]

Component (%)	Steam Gasification		
	No Catalyst	Na ₂ CO ₃	K ₂ CO ₃
H ₂	20	49	53
CO	49	10	8.6
CO ₂	20	35	34
CH ₄	10	5	3.4
C ₂ species	2.1	1	0.6
N ₂	-	-	-

2.5 ปฏิกิริยาเคมีในการผลิตแก๊ส

ปฏิกิริยาในการผลิตแก๊สโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็นชั้นที่สำคัญได้ 4 ชั้นซึ่งสามารถแบ่งได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิ ปฏิกิริยาที่เกิด และผลผลิตที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้น โดยที่ความเป็นจริงแต่ละชั้นอาจอยู่เลื่อมล้ำกัน (Overlap) กันอยู่ก็ได้ [10]

2.5.1 ชั้นการเผาไหม้ (Hearth Zone or Combustion Zone)

ในบริเวณชั้นนี้เป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนทำปฏิกิริยาเคมีกัน โดยที่คาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะเผาไหม้กับออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4



ปฏิกิริยาในชั้นการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) อุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ระหว่าง 900-1300 °C โดยความร้อนที่ได้ในชั้นนี้ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) และชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) ผลพลอยได้ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในชั้นนี้คือ ความร้อน และไอน้ำ

2.5.2 ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone or Gasification Zone)

ชั้นรีดักชัน หรือชั้นปฏิกิริยาก่อนเกิดแก๊ส เชื้อเพลิง เป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ได้แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ที่ได้จากชั้นการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นนี้ ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดแก๊สที่เกิดขึ้นในชั้นนี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) โดยชั้นนี้จะเปลี่ยนแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ (CO_2 และ H_2O) ให้กลายเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) โดยมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น 3 กลุ่มปฏิกิริยา คือ

1. ปฏิกิริยาบาร์ดัวร์ (Boudouard Reaction) เป็นปฏิกิริยาหลักในการผลิตแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างคาร์บอน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.5



2. ปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊ส (Water Gas Reaction) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำ และคาร์บอนเปลี่ยนเป็น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 900°C



ในกรณีที่มีปริมาณไอน้ำในการทำปฏิกิริยามากเกินไป ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่าปฏิกิริยาอวเตอร์ซิฟ ดังสมการที่ 2.7 มีผลทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง



ถ้าไอน้ำมีปริมาณสูงมาก ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อุณหภูมิประมาณ $500-600^\circ\text{C}$ ดังสมการที่ 2.8 ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ทำให้ความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งถูกใช้ไป ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง



3. ปฏิบัติการการผลิตมีเทน (Methane Production) เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับแก๊สไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.9 ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C เป็นต้นไป แต่ในภาวะความดันบรรยากาศ โอกาสเกิดแก๊สมีเทนเป็นไปได้น้อย



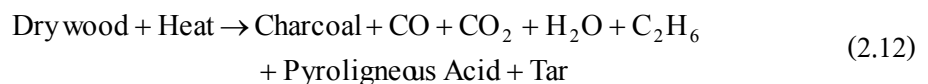
ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ กับแก๊สไฮโดรเจนมีโอกาสดังสมการที่ 2.10 และ 2.11



แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นมีน้อยมาก และโอกาสที่เกิดขึ้นในชั้นกลั่นสลายมากกว่า แต่ถ้าคาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C จะไม่ทำให้เกิดแก๊สมีเทน ปฏิบัติการเกิดแก๊สมีเทนที่เหมาะสมจะต้องอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C และในภาวะความดันสูง [10]

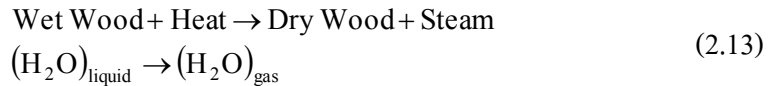
2.5.3 ชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone or Distillation Zone)

ในชั้นนี้เชื้อเพลิงจะถูกย่อยสลายด้วยความร้อนโดยไม่มีออกซิเจนเลย โดยเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งได้รับความร้อนจากชั้นรีดักชัน เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงให้ได้สารระเหย (Volatile Matter) ต่างๆ ออกมาประกอบด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน เป็นต้น โดยที่อุณหภูมิในชั้นนี้เกิดขึ้นระหว่าง $135-600^{\circ}\text{C}$ ของแข็งที่เหลืออยู่จากกระบวนการนี้คือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะถูกนำไปใช้ต่อในกระบวนการรีดักชัน และกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นไม้ สามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 2.12



2.5.4 ชั้นลดความชื้น (Drying Zone)

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชั้นนี้ยังไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการกลั่นสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยความร้อนที่ใช้ในชั้นนี้เป็นความร้อนที่ได้มาจากชั้นกลั่นสลาย ซึ่งสามารถที่จะระเหยความชื้นที่มีอยู่ภายในตัวเชื้อเพลิงออกมาในรูปของไอน้ำ ดังสมการที่ 2.13 อุณหภูมิของชั้นนี้เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิบรรยากาศไปจนถึงอุณหภูมิ 135°C



2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

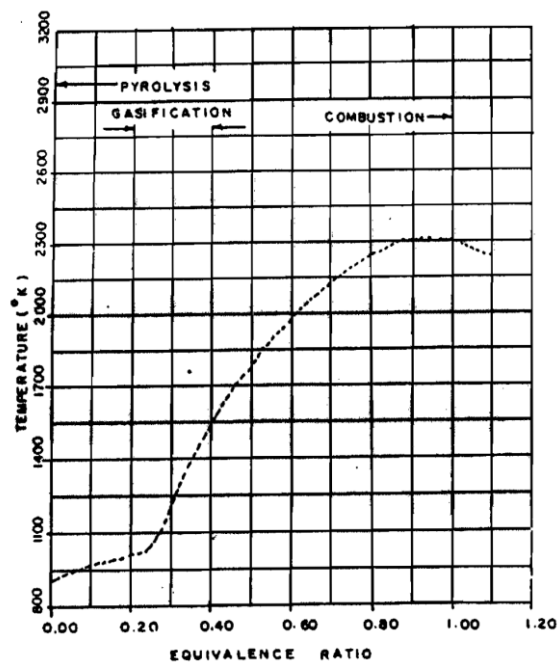
ในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิ และความดันจะเป็นสภาวะที่กำหนดให้เกิดปฏิกิริยาบางปฏิกิริยา และเกิดแก๊ส หรือสารประกอบตามสภาวะสมดุลทางเคมี กระบวนการทางกายภาพ เช่น การคลุกเคล้าของแก๊สที่จะทำปฏิกิริยากับธาตุคาร์บอนจะตอบสนองไม่ทันกับกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นรวดเร็ว ภายในระบบผลิตแก๊สจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นมากมายในสภาวะอุณหภูมิ และความดันต่างๆ พื้นที่ที่ถูกจำกัดภายในระบบผลิตแก๊สจะทำให้กระบวนการทางกายภาพทำหน้าที่คลุกเคล้าส่งถ่ายมวลสารได้ดีเพียงใด ล้วนเป็นปัจจัยส่งผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น [10] แต่ยังมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงดังนี้

2.6.1 Equivalent Ratio

Equivalent Ratio หรือค่า ER คือ ค่าที่บอกถึงการเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยอ้างอิง โดยค่า ER แสดงได้ดังสมการที่ 2.14

$$\text{ER} = \frac{(\text{Weight of Oxidant} / \text{Weight of Dry Fuel})}{(\text{Oxidant} / \text{Fuel (Stoichiometric Weight Ratio)})} \quad (2.14)$$

ER มีผลต่อองค์ประกอบ และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง โดยปกติจะมีตัวแปร 3 อย่างคือ อุณหภูมิเปลว (Adiabatic Flame Temperature) ค่า ER และอุณหภูมิภายในเตา ซึ่งส่งผลต่อพลังงานเคมี และค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิง โดยค่า ER ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สในภาวะสมดุลอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.4 ซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial Oxidation) กรณีที่ ER เท่ากับ 1 จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และทำให้อุณหภูมิเปลวสูงขึ้นดังรูปที่ 2.4 สำหรับค่า ER ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สจากไม้ คือ 0.25 เป็นภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลวที่ Equivalence Ratio ต่างๆ [10]

การปรับค่า ER ในทางปฏิบัติทำได้ 2 วิธี คือ การปรับอัตราการป้อนอากาศ และการเปลี่ยนแปลงขนาดท่ออากาศเข้าสู่ชั้นเผาไหม้ในเตาผลิตแก๊ส ทั้งสองวิธีจะทำให้ขนาดของชั้นเผาไหม้เกิดการขยายและหดตัวตามปริมาณอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้เปลี่ยนแปลงจึงทำให้ระดับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นอุณหภูมิในชั้นเผาไหม้จึงเปลี่ยนแปลงตามค่า ER

2.6.2 ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moisture Content)

ความชื้นของเชื้อเพลิงทำให้สัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊ส และค่าความร้อน ของแก๊สเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ ลดลง ความชื้นของเชื้อเพลิง ชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง แหล่งที่มา และการดัดแปลงสภาพก่อนนำมาผลิตแก๊ส ความชื้นในเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ความชื้นที่อยู่ในเนื้อชีวมวล สามารถอยู่ในรูเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 96-97 % ความชื้นที่ผิว เป็นส่วนที่สิ้นเปลืองจากความชื้นในรูเปิดของเซลล์ชีวมวล ความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200-250 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ระเหยความชื้นที่ผิวและความชื้นที่อยู่ภายในชีวมวล ถ้าต้องการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน ความชื้นไม่ควรเกิน 50 %

2.6.3 ขนาดของเชื้อเพลิง (Fuel Size)

ขนาดของเชื้อเพลิงจะมีผลกับการเกิดความดันลด (Pressure Drop) ภายในเตาผลิตแก๊ส ถ้าเกิดความดันลดภายในเตามากเกินไปทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำเอาอากาศเข้า และพาแก๊สที่ผลิตได้ออกจากเตาผลิตแก๊สมาก พัดลมจะต้องมีแรงมากพอที่จะเอาชนะความดันลดของระบบทั้งหมด ในทางทฤษฎีอากาศควรสัมผัสกับพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สที่เพิ่มขึ้น ถ้าเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีปริมาณช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงมาก เป็นผลทำให้ปริมาณอากาศไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามลงไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กเกินไปก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น

2.6.4 การกระจายขนาด (Size Distribution)

เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาในเตาผลิตแก๊ส ต้องมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ถ้ามีขนาดแตกต่างกันมากอากาศ และแก๊สจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ และขนาดเล็กซ้อนทับกัน ทำให้บางบริเวณเกิดการเผาไหม้รุนแรง บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมาทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน (Clinker)

2.6.5 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

เป็นค่าที่แสดงลักษณะการเปลืองเนื้อที่ของเชื้อเพลิงนั้นๆ กล่าวคือ เมื่อเทเชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดลงในภาชนะ รูปทรงของแต่ละเม็ดจะทำให้พื้นที่ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงแนบกันไม่ได้ นั่นคือ เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงขึ้น ทำให้เปลืองเนื้อที่ภายในภาชนะ เนื่องจากมีช่องว่างอากาศทำให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง

2.6.6 สารระเหยในเชื้อเพลิง (Volatile Matter)

สารระเหยที่ออกมาในชั้นกลั่นสลายที่อุณหภูมิ 135-600 °C ประกอบด้วย น้ำ น้ำมันดิน (Tar) และน้ำมันที่กลั่นตัวต่างๆ ถ้าเชื้อเพลิงมีสารระเหยมากจะสร้างปัญหามาก เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของสารพวกนี้จะไปอุดตันตามระบบการส่งจ่ายแก๊ส และสารระเหยพวกนี้ยังมีฤทธิ์กัดกร่อนที่สร้างปัญหาให้กับการใช้งานของแก๊สเชื้อเพลิง

2.6.7 จีเถ้า (Ash)

จีเถ้าเกิดจากสารแร่ธาตุที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนอิสระขณะเผาไหม้ ในความเป็นจริงอาจมีคาร์บอนที่ถูกเผาครึ่งๆกลางๆ ที่เรียกว่า ชาร์ (Char) สัดส่วนของจีเถ้าในเชื้อเพลิง จะมีผลต่อการ

ทำงานของเตาผลิตแก๊ส ถ้าสัดส่วนชี้เข้าในเชื้อเพลิงมีค่าสูงจะทำให้พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากถ้าเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของชี้เข้าสูงแสดงว่าในเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของคาร์บอนที่ต่ำลงไปตามสัดส่วน และถ้าภายในเตามีอุณหภูมิสูงอาจเกิดการหลอมตัวของชี้เข้าเกิดเป็น Slag ไปจับเกาะที่ตัวเตาซึ่งการนำ Slag ออกจากตัวเตาทำได้ลำบาก

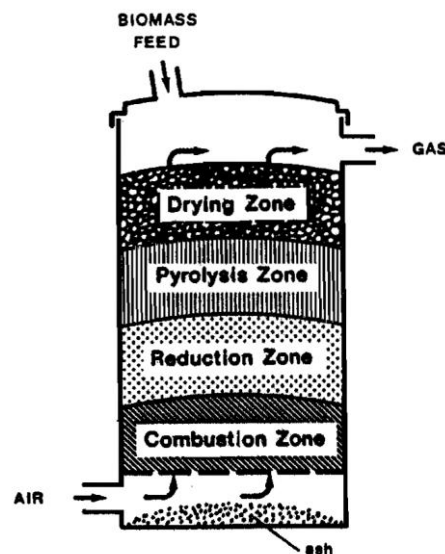
2.7 ชนิดของเตาผลิตแก๊ส

เตาผลิตแก๊สสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงซึ่งในปัจจุบันเตาผลิตแก๊สที่ใช้กันในเชิงพาณิชย์มีอยู่ 5 ชนิด ซึ่งขึ้นกับการออกแบบและเทคโนโลยีที่ใช้ ได้แก่

- เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifier หรือ Counter-Current Fixed Bed)
- เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier หรือ Co-Current Fixed Bed)
- เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขวาง (Cross Flow Gasifier หรือ Cross-Current)
- เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier)
- Entrained Flow Gasifier (Moving Bed Gasifier)

2.7.1 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifier หรือ Counter-Current Fixed Bed)

เตาชนิดนี้เชื้อเพลิงถูกป้อนจากด้านบน ในขณะที่อากาศใช้สำหรับการเผาไหม้ถูกป้อนจากด้านล่าง เป็นลักษณะไหลแบบสวนทางกันดังรูปที่ 2.5 อากาศถูกป้อนผ่านตะแกรงเข้าทางด้านล่างของเตา ซึ่งบริเวณเหนือตะแกรงเป็นชั้นของการเผาไหม้ (Combustion Zone) ของเชื้อเพลิง โดยทำปฏิกิริยากับอากาศที่ป้อนเข้ามาได้ผลผลิตเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ไหลเข้าไปยังชั้นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Zone) ในชั้นนี้เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วได้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังจากนั้นแก๊สที่ได้ไหลต่อไปยังชั้นกักสลาย (Pyrolysis Zone) และชั้นอบแห้ง (Drying Zone) ซึ่งในขั้นตอนนี้ความร้อนสัมผัสของแก๊สถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิง ทำให้อุณหภูมิของแก๊สที่ได้ลดลง และมีผลผลิตจากชั้นกักสลาย (Pyrolysis Zone) เช่น น้ำมันดินและสารระเหยต่างๆ ปนออกมากับแก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) อีกด้วย



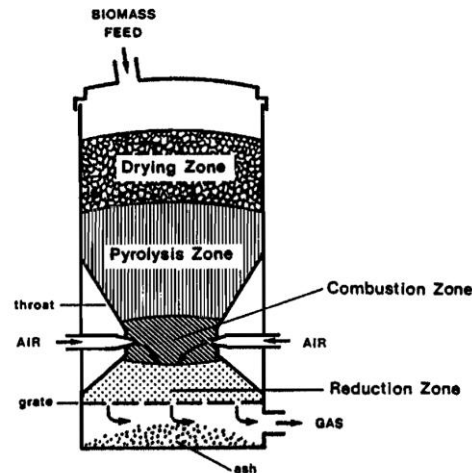
รูปที่ 2.5 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น [13]

จุดเด่นของเตาชนิดนี้คือ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแบบนี้จะมีอุณหภูมิไม่สูง เตามีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด และยังสามารถป้อนไอน้ำเข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาการเกิดแก๊ส เพื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน (H_2) ในแก๊สเชื้อเพลิง อีกทั้งยังช่วยควบคุมอุณหภูมิในชั้นของการเผาไหม้ แต่มีข้อเสียตรงที่แก๊สเชื้อเพลิงสกปรก จึงต้องมีชุดทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญของการเกิดแก๊สของเตาชนิดนี้ประกอบด้วย วิธีการป้อนอากาศ ตำแหน่งที่แก๊สไหลออก ชนิด และขนาดของตะแกรง ความหนาของชั้นใส่เชื้อเพลิงและค่า Specific Gasification Rate (SGR) โดย SGR หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงที่ใช้ทำปฏิกิริยาผลิตแก๊สใน 1 ชั่วโมง (kg/hr) ต่อพื้นที่หน้าตัดตะแกรง (m^2) โดยการกำหนดค่าตัวแปรเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง การออกแบบ และการทำงานของเตาผลิตแก๊ส

2.7.2 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier หรือ Co-Current Fixed Bed)

เตาชนิดนี้อากาศที่ใช้ทำปฏิกิริยาไหลทางเดียวกันกับเชื้อเพลิงคือ ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง และเนื่องจากเหตุผลนี้เองทำให้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จึงมีส่วนประกอบของสารระเหย (Volatile Matter) ต่ำ เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) จะถูกเผาไหม้ในชั้นของการเผาไหม้ (Combustion Zone) ดังรูปที่ 2.6 เพราะฉะนั้นแก๊สเชื้อเพลิง ที่ได้จากเตาชนิดนี้จึงมีความสะอาดมากกว่าเตาแบบไหลขึ้น จึงเหมาะที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engines) แต่เตาผลิตแก๊สชนิดนี้จำเป็นต้องใช้วัสดุทนไฟอย่างดี เนื่องจากอุณหภูมิในชั้นของการเผาไหม้มีค่าสูงมากกว่าเตาแบบไหลขึ้นเนื่องจากมีสารระเหยต่าง ๆ มาเผาไหม้ด้วย ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างของเตาแบบไหลลงก็คือ มีพวกเถ้าฝุ่นละอองต่างๆ ปนออกมากับแก๊สเชื้อเพลิงจำนวน

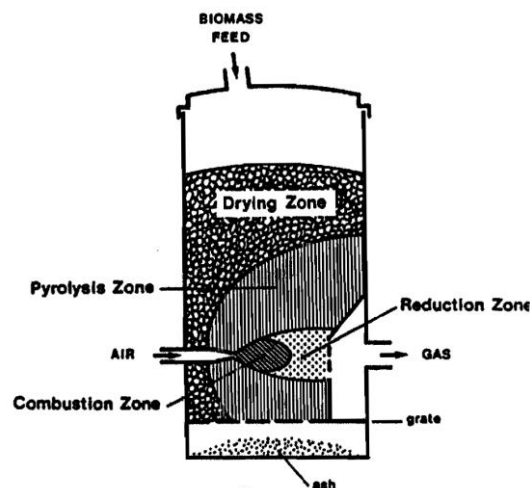
มาก เนื่องจากบริเวณทางออกของแก๊สที่ผลิตได้อยู่ใกล้กับชั้นของการเผาไหม้ และไถ่ถ่านอาจหลอมละลายแล้วเกาะอยู่ชั้นในของการเผาไหม้ด้วย ซึ่งในการนำแก๊สที่ผลิตได้ไปใช้งานจำเป็นจะต้องใช้เครื่องกรองฝุ่นผงที่มีประสิทธิภาพสูง และต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอีกด้วย



รูปที่ 2.6 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง [13]

2.7.3 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขวาง (Cross Flow Gasifier หรือ Cross-Current)

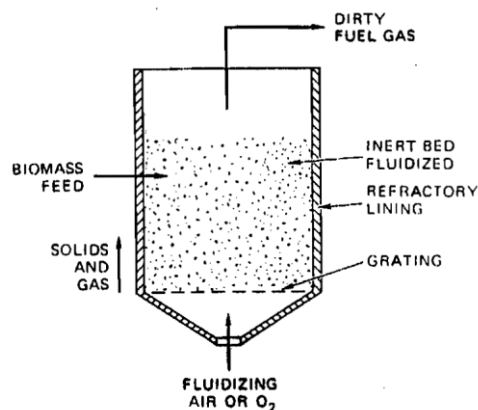
เป็นเตาผลิตแก๊สที่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของภาระความต้องการได้ โดยการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าทางด้านบน และป้อนอากาศให้มีทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.7 ทำปฏิกิริยาคายความร้อนได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ไหลเข้าสู่ชั้นถัดไปตรงใกล้ทางออกคือ ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) ทำปฏิกิริยาคูดความร้อนจนได้แก๊สเชื้อเพลิงไหลออกบริเวณกลางเตาโดยผ่านตะแกรง ซึ่งอยู่ในแนวตั้งใกล้บริเวณทางออกของเตา ซึ่งชั้นเผาไหม้ (Combustion Zone) และชั้นรีดักชันจะเป็นส่วนเล็กๆ ภายในเตา โดยบริเวณรอบๆ ทั้งสองชั้นนี้จะเป็นบริเวณของชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) ซึ่งสารระเหยที่ได้จากการกลั่นสลายของชั้นนี้จะผ่านชั้นเผาไหม้ และชั้นรีดักชันก่อนที่จะออกจากเตา ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีสารระเหย (Volatile Matter) น้อย และอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิง ที่ได้ค่อนข้างสูงเนื่องจากที่ทางออกของแก๊สที่ผลิตได้อยู่ใกล้กับชั้นที่ทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.7 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขวาง [13]

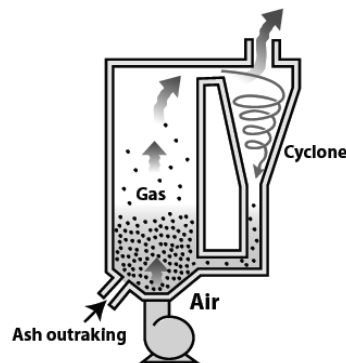
2.7.4 เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier)

เตาผลิตแก๊สชนิดนี้ออกแบบมาเพื่อขจัดปัญหาของเตาผลิตแก๊สที่ได้กล่าวมาแล้วนั่นก็คือ การทำงานของเตาที่กล่าวมาขึ้นอยู่กับคุณภาพทางเคมี และฟิสิกส์ โดยปัญหาที่มักพบก็คือ การหลอมละลายของเถ้าทำให้เกิดการอุดตันในเตาผลิตแก๊ส ซึ่งปัญหานี้จะไม่เกิดกับเตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไซ์เบด โดยการทำงานของเตาชนิดนี้จะให้อากาศไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง และเมื่อให้ความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้เชื้อเพลิงที่อยู่ในห้องเผาไหม้เกิดการลอยตัวขึ้น นั่นหมายความว่า เชื้อเพลิงมีการประพฤติตัวเหมือนของไหล (Fluid) ดังรูปที่ 2.8 โดยมีข้อจำกัดอยู่ที่ขนาดของเชื้อเพลิงที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยปกติภายในห้องเผาไหม้จะใส่วัสดุเฉื่อย (Inert Material) ลงไป เช่น ทราย หรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา เช่น หินปูน เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อน คลุกเคล้าเชื้อเพลิงและช่วยทำความสะอาดภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ 2.8 เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไซ์เบด (Fluidize Bed Gasifier) [13]

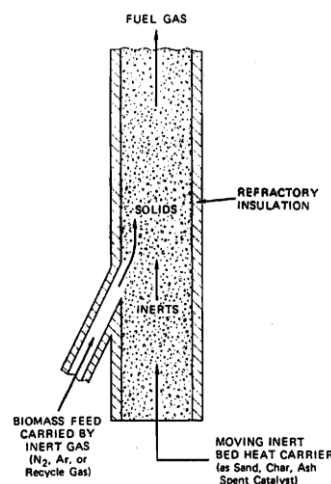
เตาแบบนี้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอม เหลวของเถ้าได้ จึงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากได้ แต่แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดนี้จะมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่หมด เช่น เถ้าและฝุ่นผงปนออกมาเนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตาสูง จึงต้องมีระบบกำจัดฝุ่นผงซึ่งก็ได้มีการออกแบบระบบของเตาเพื่อกำจัดปัญหานี้ โดยการติดตั้งไซโคลนเพื่อดักจับเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดแล้วส่งกลับไปเผาไหม้ใหม่อีกดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเตาผลิตแก๊สที่ได้มีการปรับปรุงใหม่นี้เรียกว่า เตาผลิตแก๊สฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed Gasifier, CFB Gasifier)



รูปที่ 2.9 Circulating Fluidized Bed Gasifier (CFB Gasifier) [14]

2.7.5 Entrained Flow Gasifier (Moving Bed Gasifier)

กระบวนการผลิตแก๊สระบบนี้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงการทำงานของ การถ่ายเทความร้อน คล้ายกับระบบเตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไอซ์เบด โดยปกติช่วงอุณหภูมิการทำงานอยู่ระหว่าง 482-593 °C ซึ่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สระบบนี้คือ พง่านหิน และชีวมวลที่มีขนาดเล็ก การทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเกิดขึ้นในช่องปฏิกิริยาแบบหมุนวนดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Entrained Flow Gasifier (Moving Bed Gasifier) [10]

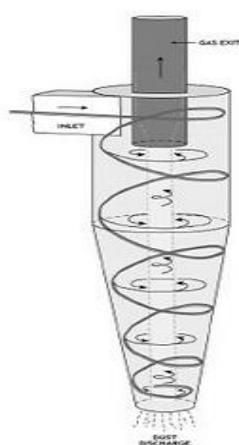
โดยทั่วไปเตาผลิตแก๊สชนิดเบดนิ่งถูกออกแบบมาให้มีรูปแบบที่ง่ายต่อการใช้งานมีความแข็งแรง คงทนและบำรุงรักษาได้ไม่ยาก ซึ่งหลักการออกแบบง่ายๆ ของเตาผลิตแก๊สชนิด เบดนิ่งคือ ควรให้ ลักษณะของเตาเป็นรูปทรงกระบอกโดยให้ความสูงของตัวเตามีขนาดประมาณ 3-4 เท่าของขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเตา

2.8 การทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊ส นอกจากมีส่วนประกอบเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้แล้ว ยังมีฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ น้ำมันดิน (Tar) และไอน้ำ ปะปนออกมาด้วย การนำแก๊สไปใช้งาน ทันทีจะทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้น ก่อนที่จะนำแก๊สที่ผลิตได้ไปใช้งาน จะต้องมีการกำจัดฝุ่นละออง น้ำมันดิน และไอน้ำ ออกเสียก่อน

2.8.1 ไซโคลน (Cyclone)

ระบบกำจัดฝุ่นละอองก็มีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ แต่รูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากออกแบบ ได้ไม่ยุ่งยาก และสามารถใช้งานได้ง่ายกับงานเกือบทุกประเภท ระบบที่ว่าเป็นคือ ระบบไซโคลน ไซโคลน เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแยกอนุภาคของฝุ่นออกจากแก๊สที่ต้องการได้ โดยอาศัยหลักการของ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยแก๊สและฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ไซโคลนจะถูกทำให้หมุนวนซึ่งเกิดจากความเร็ว ของแก๊สที่ไหลเข้าตัวไซโคลน การหมุนของแก๊สภายในตัวไซโคลนจะทำให้อนุภาคของฝุ่นเคลื่อนที่ เข้าสู่ผนังของตัวไซโคลน เมื่อฝุ่นเคลื่อนที่เข้าสู่ผนังของไซโคลนก็จะตกลงด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง ของโลก จากนั้นแก๊สที่แยกฝุ่นออกแล้วจะไหลขึ้นสู่ทางออกไซโคลนที่ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



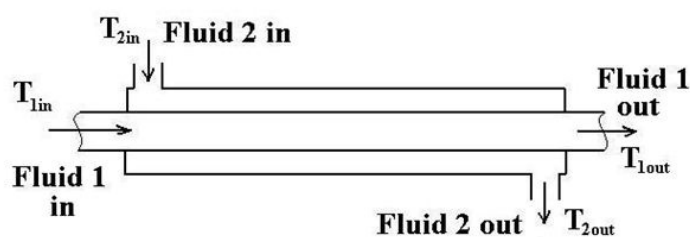
รูปที่ 2.11 การทำงานของไซโคลน [9]

การออกแบบไซโคลนจะคำนึงถึงประเด็นหลักอยู่ 3 ประการ คือ การหาขนาดหรือสัดส่วนไซโคลนที่เหมาะสม การประเมินความดันตกไซโคลนตามที่ต้องการไว้ รวมถึงขนาดของอนุภาคฝุ่นที่ต้องการแยกก็มีผลต่อการออกแบบไซโคลนเช่นกัน ซึ่งทั้ง 3 สิ่งล้วนมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยขนาดหรือสัดส่วนของไซโคลนจะมีผลต่อพื้นที่ติดตั้ง และจะมีผลต่อความดันตกด้วย ซึ่งถ้าขนาดของไซโคลนมีขนาดใหญ่มากก็จะเกิดความดันตกมากเช่นกัน โดยความดันตกจะส่งผลถึงขนาดของพัดลมที่ใช้ เพื่อให้สามารถทำงานได้เหนือความดันตก ขนาดของฝุ่นก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพของไซโคลน เพราะถ้าหากใช้งานกับขนาดอนุภาคของฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดที่ออกแบบเอาไว้ ประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลนก็จะลดลงด้วย [9]

2.8.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

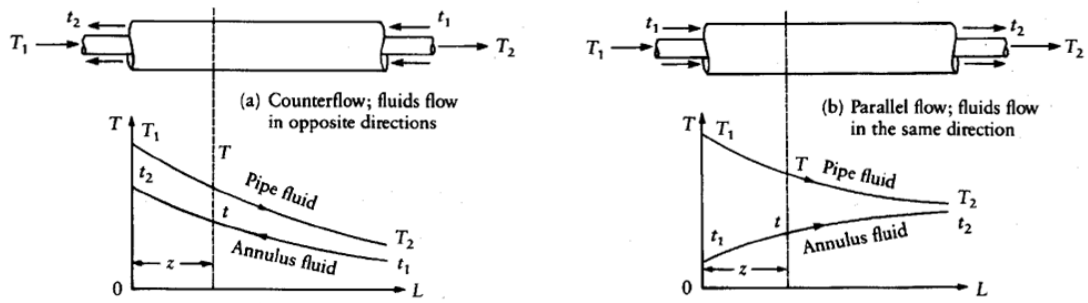
หลังจากแก๊สเชื้อเพลิงผ่านไซโคลนเพื่อกำจัดฝุ่นออกจากแก๊สแล้ว แก๊สเชื้อเพลิงยังคงมีไอน้ำและน้ำมันดินปะปนอยู่ด้วย การแยกไอน้ำและน้ำมันดินออกจากแก๊สเชื้อเพลิงทำได้โดยผ่านแก๊สเชื้อเพลิงเข้าไปในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อทำการลดอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงลงจนทำให้ไอน้ำและน้ำมันดินกลั่นตัวแยกออกมาจากแก๊สเชื้อเพลิง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการออกแบบง่าย และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น มีลักษณะเป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันซ้อนกัน [15] ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น [15]

ลักษณะการไหลของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มี 2 แบบ คือ การไหลของของไหลทิศทางเดียวกัน (Co-Current Flow) หรือการไหลแบบสวนทางกัน (Countercurrent Flow) ซึ่งลักษณะทิศทางการไหลที่แตกต่างกันนี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น [15]

อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นซึ่งแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำซึ่งมีอุณหภูมิสูงและอากาศซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า สามารถคำนวณได้จาก

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2.15)$$

$$Q = (UA) \Delta T_{LMTD} \quad (2.16)$$

ในการคำนวณจะกำหนดให้ (UA) ในสมการ 2.16 เป็นค่าที่รวมแฟกเตอร์แก้ไข (Correction Factor) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีได้เป็นแบบไหลสวนทาง หรือไหลตามกันอย่างแท้จริงเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นในกรณีนี้ค่าอุณหภูมิแตกต่างเชิงลอการิทึม (ΔT_{LMTD}) สามารถคำนวณได้จาก

กรณีไหลสวนทางกัน

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{wi} - T_{ao}) - (T_{wo} - T_{ai})}{\ln \left(\frac{T_{wi} - T_{ao}}{T_{wo} - T_{ai}} \right)} \quad (2.17)$$

กรณีไหลตามกัน

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{wi} - T_{ai}) - (T_{wo} - T_{ao})}{\ln \left(\frac{T_{wi} - T_{ai}}{T_{wo} - T_{ao}} \right)} \quad (2.18)$$

2.9 ส่วนประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง

ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงส่วนประกอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ในขั้นตอนการผลิต และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด เช่น องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวล ความชื้น สารระเหย ปริมาณเถ้า ซึ่งการที่จะทราบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดประกอบด้วยธาตุใดบ้าง ทำได้โดยการวิเคราะห์ส่วนประกอบของชีวมวล ซึ่งใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ

- การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) เป็นการวัดค่าสารระเหย ความชื้น คาร์บอนคงตัว และเถ้าของเชื้อเพลิง แสดงในตารางที่ 2.6

- การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุโดยละเอียด ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ดังตารางที่ 2.7

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดปริมาณความร้อน (Bomb Calorimeter) โดยทั่วไปค่าความร้อนที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวล จะมีค่าต่ำกว่าค่าความร้อนจากแก๊สที่ได้จากการหมักชีวมวล เนื่องจากแก๊สที่ได้จากการหมักส่วนใหญ่เป็นมีเทน ซึ่งมีค่าความร้อนมากกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวล [16]

ส่วนประกอบ	ถ่านไม้ (% โดยมวล)	ไม้สน (% โดยมวล)
ความชื้น (Moisture)	6.3	10.5
เถ้า (Ash)	3.6	0.5
สารระเหย (Volatile Matter)	19.4	68.3
คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)	70.7	20.9
ค่าความร้อน (kJ/kg)	28,700	17,241

ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวล [16]

ส่วนประกอบ	ถ่านไม้ (% โดยมวล)	ไม้สน (% โดยมวล)
Carbon (C)	79.6	43.1
Hydrogen (H)	3	6.8
Oxygen (O ₂)	13.2	49.3
Nitrogen (N ₂)	0.29	0.17
Sulfur (S)	0.28	0.14

ส่วนค่าความร้อน และองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากถ่านไม้ และไม้ แสดงในตารางที่ 2.8 โดยจะเห็นได้ว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากไม้ มีค่าความร้อนสูงกว่าค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านไม้ เนื่องจากในไม้มีสารระเหยที่สามารถใช้ในการเผาไหม้ได้ จึงเป็นการเพิ่มค่าความร้อนให้แก่เชื้อเพลิงที่ได้จากไม้

ตารางที่ 2.8 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจากแหล่งผลิตต่างๆ [16]

องค์ประกอบ	แก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านไม้	แก๊สเชื้อเพลิงจากไม้
CO ₂	3.0	9.5-9.7
C _x H _y	0.1	0-0.3
CO	28.7	20.5-22.2
H ₂	3.8	12.3-15.0
CH ₄	0.2	2.4-3.4
N ₂	62.9	50.0-53.8
Heating Values of Gas	4105 kJ/m ³	5952 kJ/m ³

2.10 การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) สามารถนำไปใช้งานแทน น้ำมัน ปิโตรเลียมหรือเชื้อเพลิงต่างๆ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้ดังนี้

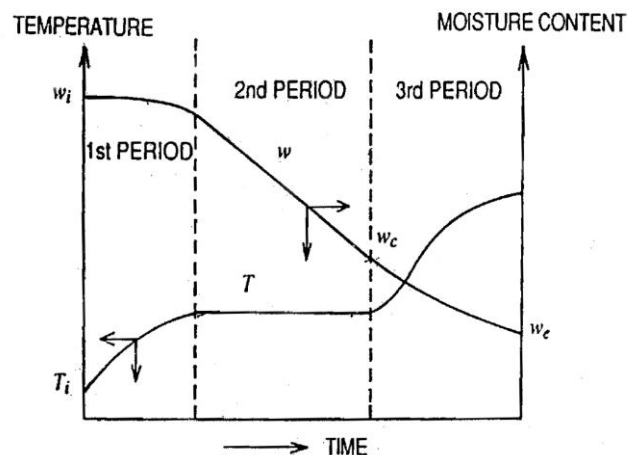
- ใช้ผลิตไฟฟ้าและเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ เราสามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มาผลิตไฟฟ้าได้ โดยการใช้แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงไปขับกังหัน (Turbine) หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ พลังงานกลที่ได้จากเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถนำไปผลิตไฟฟ้าหรือนำไปเป็นต้นกำลังสำหรับเครื่องจักรต่างๆ ได้
- ใช้ในการผลิตความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงสามารถที่นำมาใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เป็นของเหลวหรือแก๊สได้ โดยการปรับแต่งหัวเผาเล็กน้อย ก็สามารถใช้งานได้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อน เช่น เตาเผาเครื่องปั้นดินเผา หม้อไอน้ำ โรงเลื่อย โรงงานน้ำตาล การอบแห้งต่างๆ
- ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งโดยหลักการแล้วแก๊สเชื้อเพลิงสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นเมทานอลได้ โดยการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันสูง และมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนจะได้เมทานอล ดังสมการที่ 2.15



2.11 กระบวนการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นโดยถ่ายเทความร้อน และถ่ายเทมวลระหว่างผิวของของแข็งและของไหล กล่าวคือเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากของไหลที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้น้ำระเหยออกมาจากวัสดุ ดังนั้นกระบวนการอบแห้งจึงขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการถ่ายเทความร้อน เช่น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน เป็นต้น และกระบวนการถ่ายเทมวลที่เป็นลักษณะการพาแบบบังคับ ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นพร้อมกัน [17]

การถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการอบแห้งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกรรมวิธีของการอบแห้ง อย่างไรก็ตามลักษณะพื้นฐานทั่วไปจะเหมือนกัน โดยจะพิจารณาลักษณะพื้นฐานของการอบแห้งด้วยการพาของอากาศร้อนเป็นแบบอย่างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เมื่อวัสดุที่มีความชื้น สัมผัสกับอากาศที่มีอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วคงที่ วัสดุจะถูกอบแห้งโดยกระบวนการอบแห้งจะแบ่งเป็น 3 ช่วง [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการอบแห้งวัสดุ [18]

ในช่วงแรกวัสดุจะร้อนขึ้น อุณหภูมิวัสดุจะสูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นไปยังอุณหภูมิภาวะอบแห้ง ในช่วงนี้เรียกว่าช่วงการอุ่นวัสดุ (Warm-Up Period) ช่วงที่สอง อุณหภูมิของวัสดุจะค่อนข้างคงที่ และปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างเป็นเส้นตรง ทำให้อัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ที่เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราคงที่ (Constant Rate Period) ในช่วงสุดท้าย อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เป็นช่วงที่ความชื้นในวัสดุเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ชั้นของเหลวที่ปกคลุมอยู่ไม่สม่ำเสมอ อัตราการแห้งจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ความชื้นจะลดลง อัตราการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลง สุดท้ายปริมาณความชื้นจะไปถึงระดับที่สมดุลกับสภาวะการอบแห้ง ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period)

ปริมาณความชื้นที่จุดเปลี่ยนจากอัตราการอบแห้งคงที่ไปเป็นการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content, M_c) และปริมาณความชื้นที่สมดุลกับภาวะอบแห้งเรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, M_{eq}) วัสดุจะไม่สามารถถูกอบแห้งให้มีความชื้นต่ำกว่า M_{eq} ได้ ดังนั้น ปริมาณความชื้นที่สามารถถูกระเหยได้คือ $M_m - M_{eq}$ หรือเรียกว่าปริมาณความชื้นอิสระ (Free Moisture Content)

การระบุค่าความชื้น ของวัสดุที่นำมาอบแห้งโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis) กับความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) การระบุค่าความชื้นทั้งสองแบบเป็นการใช้ฐานในการเปรียบเทียบแตกต่างกันโดย ความชื้นมาตรฐานเปียก หมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนัก รวมของวัสดุและความชื้น ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักของ วัสดุเท่านั้น

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส

ฐิติกร บุญชูวงศ์ [9] ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น โดยใช้เชื้อเพลิง ต่างกันสองชนิด คือ เศษผักแห้ง และแกลบ และนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปเผาทำลายกลีเซอริน เพื่อนำ ความร้อนที่ได้ไปใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผา เตาผลิตแก๊สที่ใช้ทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 cm สูง 60 cm ฐานสำหรับนำจีเถ้าออกขนาด 30×15 cm เตาสามารถบรรจุ เชื้อเพลิงเศษผัก และแกลบได้ 0.9 kg และ 1.2 kg ตามลำดับ ในงานวิจัยเป็นการทดลองผลของอัตรา การไหลอากาศ 3 ระดับ คือ 0.738×10^{-3} , 2.026×10^{-3} และ 2.435×10^{-3} m^3/s ที่มีต่อปริมาณแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทน และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ในส่วนของการเผา กลีเซอรินเพื่อผลิตเครื่องปั้นดินเผา เป็นการศึกษาลักษณะการติดไฟของกลีเซอริน และแนวโน้มความ เป็นไปได้ในการนำความร้อนมาผลิตเครื่องปั้นดินเผา จากผลการทดลองหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากเศษผักแห้ง และแกลบ พบว่ามีค่าความร้อน 12.39 MJ/kg และ 14.4 MJ/kg ที่ความชื้น 2.24 % และ 1.38 % มาตรฐานเปียก ตามลำดับ เมื่อนำมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงพบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ เศษผักมี แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 15.64 % แก๊สมีเทน 0.29 % และมีค่าความร้อน 1911.92 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ 2.026×10^{-3} m^3/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดของเชื้อเพลิงเศษผัก ในขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้แกลบมี แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 16.34 % แก๊สมีเทน 1.14 % และมีค่าความร้อน 2305.44 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ 2.026×10^{-3} m^3/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ เหมาะสมที่สุดของเชื้อเพลิงแกลบ

Tanthansakun [16] ได้ศึกษากระบวนการกำเนิดแก๊สเชื้อเพลิง จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นโดยใช้ไอน้ำเข้าช่วย ในการทดลองมีการใช้ไอน้ำที่ค่าต่างๆ ผสมกับอากาศป้อนเข้าไปในเตาผลิตแก๊ส ที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นถ่าน และไม้สน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ ที่มีต่อการกำเนิดแก๊ส ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิอากาศเข้า และผลของการหุ้มฉนวนพบว่า การป้อนไอน้ำเข้าช่วย มีผลให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ป้อนไอน้ำมากเกินไป แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ผลิตได้จะมีปริมาณน้อยลง ในการกำเนิดแก๊สที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงแบบหุ้มฉนวน และไม่หุ้มฉนวน พบว่าการหุ้มฉนวนเตาผลิตแก๊สจะทำให้ได้แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงสุด เพิ่มขึ้นจาก 800 kJ/min เป็น 860 kJ/min และมีอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงที่ทางออกระหว่าง 100-120 °C นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อัตราการไหลอากาศ 222.5 g/min เป็นภาวะที่เหมาะสมที่จะผลิตแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ การเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าจะทำให้ปริมาณการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ลดลง

อรรถพล โกตะกะ [19] ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินในเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นโดยใช้ไอน้ำเข้าช่วย โดยการจำลองบริเวณชั้น รีดักชันจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นเพื่อศึกษาปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันถ่านหิน ที่มีอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา และอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแปรศึกษา จากการหาภาวะที่เหมาะสมพบว่า ที่อุณหภูมิ 875°C อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 121.25 cm³/min เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันถ่านหิน โดยมีสัดส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นองค์ประกอบสูงสุด 91.26 % มีค่าความร้อนสูงเฉลี่ย 9551.81 kJ/m³ และนำภาวะดังกล่าวมาทำปฏิกิริยา แก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ พบว่าที่อัตราการไหลไอน้ำที่ 20 cm³/min เป็นภาวะที่องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด โดยเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงเฉลี่ย 10551.86 kJ/m³

สุรพงษ์ คล้ายมุข [20] ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นและไหลลง โดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง การทดลองมีการปรับอัตราการไหลอากาศต่างกับ 3 ระดับ คือ 3.59×10^{-3} 4.31×10^{-3} และ 5.03×10^{-3} m³/s ในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นและ 2.33×10^{-3} 3.42×10^{-3} และ 4.66×10^{-3} m³/s ในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง เพื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสูงของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ โดยผลการทดลองนั้นพบว่า เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น ให้ค่าความร้อนสูง 4545.9 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ 4.31×10^{-3} m³/s และแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงได้ค่าความร้อนสูง 2135.76 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ 3.42×10^{-3} m³/s ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลอากาศ 4.31×10^{-3} m³/s ของเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นมีความเหมาะสมที่จะนำเอาแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากปฏิกิริยาต่างๆ ทางทฤษฎีของเตาชนิดไหลขึ้น เกิดได้ดีกว่าเตาชนิดอื่นจึงทำให้เกิดค่าความร้อนสูงมากที่สุด

อนวรรณ เกตุคง [21] ศึกษาวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลคือไม้ยูคาลิปตัส เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือผลิตภัณฑ์แก๊ส ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนโดโลไมต์เพื่อช่วยการแตกตัวน้ำมันทาร์และรีฟอร์มมีเทน โดยจะศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิ 500-800 °C และอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล 0.01-0.07 g/min/g_{biomass} สัดส่วนของนิกเกิลบนโดโลไมต์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล โดยปริมาณไม้ยูคาลิปตัสที่ป้อนคือ 15 g จากผลการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล /โดโลไมต์ คือที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล 0.01 g/min/g_{biomass}, อุณหภูมิ 700 °C, สัดส่วนนิกเกิล/โดโลไมต์ คือ 9.32 % ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g โดยแก๊สผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบเมื่อทำการแก๊สซิฟิเคชันเปรียบเทียบระหว่างไม้ยูคาลิปตัสและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ พบว่า หลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์พบองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 42.75 % เป็น 56.45 % และไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 41.23 % เป็น 45.26 % อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่า 0.58

Sharma และคณะ [22] ได้ศึกษาการนำถ่านหินชนิดที่มีจีเถ้าต่ำมาผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้เทคนิคการผลิตแก๊สแบบใช้ไอน้ำเข้าช่วย (Steam Gasification) โดยในการทดลองใช้ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าน้อยกว่า 0.05 %wt และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา K_2CO_3 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 650-775 °C เพื่อให้ได้องค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ปริมาณมาก ซึ่งผลการทดลองพบว่า ในแก๊สสังเคราะห์มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ 63 % คาร์บอนมอนอกไซด์ 6 % และคาร์บอนไดออกไซด์ 30 % โดยปริมาตร โดยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำรีไซเคิลใช้ใหม่ได้ และผลการทดลองเปลี่ยนความดันย่อยของไอน้ำพบว่า ความดันย่อยไอน้ำ 0.05 atm ให้ค่าอัตราส่วน H_2/CO เป็น 1.9 และเมื่อเปลี่ยนความดันย่อยของไอน้ำเป็น 0.5 atm ค่าอัตราส่วน H_2/CO เพิ่มขึ้นเป็น 9.5

วิรัช อรุณลักษณ์ดำรง [23] ศึกษาเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นเพื่อผลิตแก๊สเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ให้ความร้อนโดยตรง เตาผลิตแก๊สขนาดสูง 175 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 65 cm ใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้โกงกาง พบว่าเชื้อเพลิงที่มีขนาดยาวมีอัตราการไหลของอากาศสูง จะทำให้อุณหภูมิภายในชั้นต่างๆ สูง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีขนาดสั้นมีอุณหภูมิในเตาดำกว่า แต่ให้อัตราส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงกว่า นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศก็มีผลต่อการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศจะขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่าขนาดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมมีความยาวอยู่ที่ 2-3 cm โดยมีปริมาณอากาศที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.44-0.51 kg/min ซึ่งจะทำให้ให้อัตราส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่ต่ำกว่า 28.7 %

Umeki และคณะ [24] ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยไอน้ำ อุณหภูมิสูง (High Temperature Steam Gasification) ซึ่งมีการใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 1200 K ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงขนาด 1.2 ton/day ใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้ ในการทดลองพบว่า อุณหภูมิไอน้ำ และสัดส่วนโมลของไอน้ำต่อปริมาณคาร์บอน (S/C Ratio) มีผลต่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และส่งผลต่อส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ โดยที่ค่าสัดส่วนโมล ของไอน้ำต่อปริมาณคาร์บอน 5.5 ทำให้ได้สัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด คือ 55 %

Saravanakumar และคณะ [25] ได้จำลองศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากไม้ท่อนยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm ยาว 68 cm มีความชื้นของไม้ 25 % ใช้เครื่องเป่าลมขนาด 180 W และจำลองการปรับอัตราการไหลของอากาศ ระหว่าง 25-45 m³/h พบว่า ภายในเตาผลิตแก๊ส มีช่วงชั้นไพโรไลซิส และชั้นรีดักชันสูง 37 cm และ 36 cm ตามลำดับ มีสัดส่วนการผลิตแก๊สมากที่สุดต่อน้อยที่สุด (Turn Down Ratio) ประมาณ 2 มีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 9-10 kg/h และมีอุณหภูมิภายในเตาจากชั้นเผาไหม้ 1185 K จนถึง ชั้นอบแห้งที่ 400 K

Ponzio และคณะ [26] ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคการใช้อากาศ และไอน้ำอุณหภูมิสูง (High Temperature Air/Steam Gasification) โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้ ผสมกับพลาสติก ใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น ป้อนอากาศผสมกับไอน้ำด้วยอุณหภูมิ 1400 °C อัตราการไหล 102 Nm³/h และเปลี่ยนส่วนผสมไอน้ำ ระหว่าง 4-82 % จากผลการทดลองพบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความร้อนต่ำประมาณ 9.5 MJ/Nm³ ได้ปริมาณแก๊สมากที่สุด 3.4 Nm³/kg ซึ่งปริมาณค่าความร้อนที่มากขึ้น เป็นผลมาจากส่วนผสมพลาสติกในเชื้อเพลิง ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และพบว่าการผสมไอน้ำในปริมาณที่มากขึ้น (จาก 5-53 % และ 82 %) จะทำให้ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ลดลง

Gordillo และ Annamalai [27] ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น จากกากนมวัว โดยใช้ไอน้ำเข้าช่วย ในการทดลองเป็นการศึกษาผลของ Equivalence Ratio (ER) สัดส่วนไอน้ำต่ออากาศ ค่าความร้อนสูง และองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าการเพิ่ม ER และสัดส่วนไอน้ำต่ออากาศ เป็นการลดอุณหภูมิภายในเตา เพิ่มสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่จะลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยค่าความร้อนสูงของแก๊สเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับ ER เป็นหลัก ซึ่งการเพิ่มค่า ER จะทำให้ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น แต่จะมีสัดส่วนน้ำมันดินในแก๊สเชื้อเพลิงมากขึ้นด้วย

Plis และ Wilk [28] ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล ด้วยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น โดยศึกษาผลของความชื้นของชีวมวล ปริมาณอากาศ ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงพบว่า เตาผลิตแก๊สมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 4.1-16.0 kg/h มีค่าความร้อนต่ำระหว่าง 3.84-5.47 MJ/Nm³ ขึ้นอยู่กับความชื้นในเชื้อเพลิง โดยปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเชื้อเพลิงจะมากที่สุดกรณีที่เชื้อเพลิงมีความชื้นน้อย ในขณะที่ความชื้นในเชื้อเพลิงเพิ่ม จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และลดปริมาณแก๊สที่เผาไหม้ได้ในแก๊สเชื้อเพลิง ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง

Smolinski และคณะ [28] ได้ทำการทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยไอน้ำ (Steam Gasification) ใช้เชื้อเพลิงเป็นธัญพืช ในเตาผลิตแก๊สชนิดเบดนิ่ง ทดลองในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 650-900 °C พบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบหลักเป็นแก๊สไฮโดรเจน ประมาณ 60 % แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 30 % และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 10 % โดยปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นจาก 54-64 % เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สจาก 650-900 °C และแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูงอยู่ระหว่าง 9581-14032 kJ/kg

Yoon และคณะ [29] ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันชีวมวลไม้ ด้วยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง ด้วยเทคนิคการป้อนไอน้ำผสมกับอากาศ ทำการทดลองที่อุณหภูมิภายในเตา 900-1020 K ค่า Equivalence Ratio (ER) ระหว่าง 0.3-0.4 สัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงชีวมวล 0-0.6 จากผลการทดลองพบว่า ได้ค่าประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊ส 35 % การแปลงคาร์บอนในเชื้อเพลิงเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด 83 % ที่ค่า ER และสัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงชีวมวล เป็น 0.4 และ 0.6 ตามลำดับ ค่าความร้อนต่ำของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้อยู่ระหว่าง 2.0-3.4 MJ/Nm³ โดยการเพิ่มค่า ER และสัดส่วนไอน้ำต่อเชื้อเพลิงชีวมวล จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น

Zhou และคณะ [30] ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ออกซิเจน และใช้เชื้อเพลิงเป็นแกลบ ในการทดลองเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ภายในเตา และสัดส่วนออกซิเจนต่อเชื้อเพลิง ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตแก๊ส จากผลการทดลองที่ได้พบว่า อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 % เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 1000-1400 °C การเปลี่ยนคาร์บอนในเชื้อเพลิงเป็นแก๊สเชื้อเพลิง จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยเวลาที่เหมาะสมในการทดลองนี้อยู่ที่ 1.6 sec การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา จะทำให้การเปลี่ยนคาร์บอนในเชื้อเพลิง เป็นแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง โดยค่าสัดส่วนระหว่างออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมคือ 0.4

Svoboda และคณะ [31] ได้ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไชด์เบด ใช้เชื้อเพลิงเป็นถ่านหิน และใช้ตัวกลางในการทำปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ แก๊สออกซิเจนผสมไอน้ำ และ แก๊สออกซิเจนผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่า กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินด้วยเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไชด์เบด โดยใช้ตัวกลางเป็นแก๊สออกซิเจนผสมไอน้ำ ($ER=0.2$) ที่อุณหภูมิประมาณ $800-900^{\circ}\text{C}$ สามารถผลิตแก๊สที่มีปริมาณมีเทนสูง และมีค่าความร้อนต่ำ (LHV) สูงที่สุดคือ $18-20 \text{ MJ/m}^3$ เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตแก๊สด้วยตัวกลางแก๊สออกซิเจนผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ $800-925^{\circ}\text{C}$ ($ER=0.2$) พบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนต่ำประมาณ $8-10 \text{ MJ/m}^3$ โดยค่าความร้อนที่น้อยกว่ากรณีใช้แก๊สออกซิเจนผสมไอน้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาเนื่องจาก มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงจำนวนมาก

Hosseini และคณะ [32] ได้ทำการจำลองศึกษากระบวนการผลิตแก๊สโดยใช้เชื้อเพลิงเป็นชี้เลื้อย และใช้ตัวกลางในการทำปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ อากาศ และไอน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และเอกเซอร์จี (Exergy) ของกระบวนการผลิตแก๊สพบว่า อุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สมีการเปลี่ยนแปลงตามตัวกลางที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และเอกเซอร์จีของตัวกลางอากาศมีค่าสูงกว่าตัวกลางไอน้ำ โดยประสิทธิภาพเชิงเอกเซอร์จีของระบบที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางมีค่าอยู่ระหว่าง 19.1% ถึง 18.4% เมื่อทดลองที่สัดส่วนอากาศ (ER) 0.15 ถึง 0.2 ส่วนการทดลองใช้ตัวกลางเป็นไอน้ำมีประสิทธิภาพเชิงเอกเซอร์จีระหว่าง 17.8% ถึง 16.4% ที่สัดส่วนไอน้ำ (น้ำหนักไอน้ำต่อน้ำหนักเชื้อเพลิง) ระหว่าง 0.15 ถึง 0.25 และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบยังขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงเอกเซอร์จีลดลงในกระบวนการผลิตแก๊สของทั้งสองตัวกลาง

Mitsuoka และคณะ [33] ได้ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สจากถ่านไม้ โดยใช้ตัวกลางเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ $1123-1223 \text{ K}$ และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ $20-80 \text{ vol}\%$ จากการทดลองพบว่า ผลของการผสมโพแทสเซียม และแคลเซียม กับถ่านไม้ ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สเร็วขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้อัตราการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง $1173-1223 \text{ K}$ ในขณะที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 1123 K) อัตราการเกิดแก๊สจะมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 80% โดยสาเหตุที่ทำให้อัตราการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงลดลงเกิดจากที่อุณหภูมิต่ำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอน ซึ่งปฏิกิริยาเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูง

Ahmed และ Gupta [34] ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกระด้างแข็ง โดยใช้ตัวกลางในการทำปฏิกิริยาเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คงที่อัตราเดียว ซึ่งในการทดลองผลิตแก๊สในแต่ละครั้งในช่วงแรกเชื้อเพลิงจะถูกให้ความร้อนและเกิดกระบวนการไพโรไลซิสจนกลายเป็นถ่าน จากนั้นจึงเกิดกระบวนการผลิตแก๊สจากถ่าน (Char Gasification) และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการผลิตแก๊สทำให้เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สได้มากขึ้น โดยการทดลองที่อุณหภูมิ 800 °C มีการเปลี่ยนจากเชื้อเพลิงเป็นแก๊สน้อย ในขณะที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 °C กระบวนการผลิตแก๊สมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมาก จากผลกาคำนวณอัตราการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการผลิตแก๊สสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาบาร์ดัวเกิดได้ดี ส่งผลให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดมากขึ้น และจากอัตราการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงพบว่า ในการทดลองทั้ง 3 อุณหภูมิ การเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะมีอัตราเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนถึงประมาณ 3 นาที จะมีอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนสูงสุด จากนั้นอัตราการเกิดแก๊สจะลดลงอีกประมาณ 2 นาที และหลังจากนั้นจะแทบไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลย

Seo และคณะ [35] ได้ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สจากถ่านไม้ โดยใช้ตัวกลางเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในการทดลองจะนำไม้ใส่ในเตาผลิตแก๊สแล้วเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 850 °C โดยใช้เวลา 40 นาที แล้วคงอุณหภูมิไว้อีก 17 นาที จากนั้นใช้เวลาอีก 3 นาที เพิ่มอุณหภูมิในเตาไปที่อุณหภูมิระหว่าง 850-1050 °C จากนั้นจึงฉีดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในเตา จากการทดลองพบว่าเชื้อเพลิงไม้จะเปลี่ยนเป็นถ่านทั้งหมดเมื่อสารไฮโดรคาร์บอนระเหยออกจากไม้ทั้งหมด โดยใช้เวลาประมาณ 60 นาที และจากการทดลองผลิตแก๊สปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในเตาสูงขึ้น

2.12.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้ง

จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ [36] ได้ศึกษาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิววัสดุที่ส่งผลต่อคุณภาพเปลือกอบแห้ง โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความเร็วลม และลักษณะพื้นผิวของเปลือกที่มีผลต่อคุณภาพของการอบแห้งเปลือก ขนาดกว้างและยาวด้านละ 3 cmหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 50-700 °C และความเร็วลม 0.5-1 m/s จนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 4-9 % d.b. พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำ และที่อุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งเดียวกัน เปลือกแผ่นผิวเรียบจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเปลือกแผ่นผิวลอน

คำหนึ่ง วาทยธา [37] ได้ศึกษาการอบแห้งชิ้นมันสำปะหลังด้วยไมโครเวฟและลมร้อน โดยเป็นการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งแบบชั้นบางของชิ้นมันสำปะหลังด้วยลมร้อน และอิทธิพลของไมโครเวฟต่อคุณลักษณะการอบแห้งแบบชั้นบางของชิ้นมันสำปะหลังด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน วิธีการศึกษาใช้ขนาดชิ้นมันสำปะหลัง 3 ระดับขนาด (3-4, 4-5 และ 5-6 มิลลิเมตร) ความหนาของชิ้นการอบแห้งเท่ากับ 3 เซนติเมตร อุณหภูมิอากาศร้อน 60 °C ความเร็วการไหลของอากาศผ่านพื้นที่หน้าตัดการอบ 4 ระดับ (0.2, 0.3, 0.4, และ 0.5 เมตรต่อวินาที) และความชื้นไมโครเวฟ 3 ระดับ (0.18, 0.30 และ 0.45 วัตต์ต่อกรัม) พบว่าพฤติกรรมการอบแห้งแบบชั้นบางเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศมีค่าตั้งแต่ 0.4 เมตรต่อวินาที ทุกระดับความชื้นไมโครเวฟไม่มีอิทธิพลต่อการลดลงของความชื้นในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ภควรรณ เสมอใจ และ กนกอร โพธิ์นันธ์ [38] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งกลีบกุหลาบด้วยเทคนิคสเปา-เต็ดเบด โดยใช้ความเร็วลม 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 m/s และอุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับ 50, 55, 60, 65 และ 70 °C จากผลการทดลองพบว่า ว่าความเร็วลมที่ 3.0 m/s และอุณหภูมิ 70 °C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งกลีบกุหลาบโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบด ซึ่งจะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 18 นาที โดยในกรณีของอุณหภูมินั้นพบว่า มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคืออุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยลดความชื้นของกลีบกุหลาบได้เร็วขึ้น จากอัตราการถ่ายความร้อนที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองความเร็วลมที่ 5.0 m/s สามารถลดเวลาการอบแห้งสั้นที่สุด แต่เนื่องจากการสังเกตลักษณะกลีบกุหลาบที่ได้พบว่าความเร็วลมสูง นั้นจะทำให้กลีบกุหลาบแตกและฉีกขาดมากกว่าที่ความเร็วลมต่ำ