



การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวลสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขนาดเล็กในจังหวัดเพชรบุรี

**The Power Generation by Biomass Gas Engine for Application in
Production Process of Small-Scale Industry Community Products in
Phetchaburi Province**

ศุภนันทศักดิ์ ระวังวงศ์* สุภาดา ขุนณรงค์ สุธีรัตน์ เทมวรรณ และนิรุช ฉ่ำเลิศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการได้รับทุนจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ปี 2556

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

สารบัญ

รายการ	หน้า
คำนำ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ฉ
สารบัญ	๗
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ทฤษฎี	8
2.1.1 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง	11
2.1.2 การเปลี่ยนรูปชีวมวล	17
2.1.3 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	19
2.1.4 ประเภทของแก๊สซิฟิเคชัน	19
2.1.5 เตาผลิตก๊าซ	28
2.1.6 ข้อดีของการใช้เครื่องยนต์ก๊าซ	36
2.1.7 ปัญหาในการใช้เครื่องยนต์ก๊าซ	36
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องภายในประเทศ	37
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างประเทศ	41
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ	61
3.1 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงขี้เลื่อยและแกลบ	61
3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อย	61
3.1.2 ค่าความร้อนของขี้เลื่อย	61

สารบัญ (ต่อ)

รายการ	หน้า
3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ	61
3.1.4 ค่าความร้อนของแกลบ	62
3.2 สูตรเคมีของขี้เถ้าและแกลบ	62
3.2.1 การคำนวณสูตรเคมีของขี้เถ้า	62
3.2.2 การคำนวณสูตรเคมีของแกลบ	63
3.3 การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชั่น	63
3.3.1 เชื้อเพลิงขี้เถ้า	63
3.3.2 เชื้อเพลิงแกลบ	64
3.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล	65
3.5 รายละเอียดของเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	68
3.5.1 เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก	68
3.5.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	68
3.6 การคำนวณหาค่าพลังงานและภาระของเครื่องยนต์	69
3.6.1 เครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก 4 จังหวะ	69
3.7 การคำนวณในการออกแบบเตาผลิตแก๊ส	71
3.7.1 การหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	71
3.7.2 การหาอัตราการป้อนชีวมวล	72
3.7.3 การคำนวณหาขนาดปริมาตรเตา	72
3.7.4 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก	74
3.7.5 ค่าความดันสูญเสียในเตา	75
3.7.6 การออกแบบชุด Cyclone	75
3.7.7 การออกแบบชุดลดอุณหภูมิแก๊ส	78
3.7.8 การออกแบบถังพักแก๊ส	81
3.8 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล	82
3.9 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	94
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	96
4.1 ผลการทดลอง	96
4.2 การวัดค่าความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตา	121

สารบัญ (ต่อ)

รายการ	หน้า
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	124
4.4. ผลการทดลอง	125
4.5 ผลการเทียบอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง	127
4.6 การทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	128
4.7 การทดลองการทำงานของระบบ	134
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	141
5.1 สรุปผลการทดลอง	141
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	142
5.3 ข้อเสนอแนะ	143
เอกสารอ้างอิง	143
ภาคผนวก	149
ภาคผนวก ก	149
ภาคผนวก ข	153

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กราฟแสดงพื้นที่ถือครองเพื่อการเกษตร	4
1.2	แผนที่ศักยภาพของผลิตผลแกลบในจังหวัดเพชรบุรี	4
1.3	ปริมาณผลิตผลของแกลบในจังหวัดเพชรบุรี	5
1.4	ปริมาณพลังงานจากแกลบและปริมาณเทียบเท่าน้ำมัน	5
2.1	ชีวมวลที่เป็นไม้ในรูปแบบต่างๆ [1]	9
2.2	พลังงานชีวมวลและการเปลี่ยนรูป [1]	9
2.3	ชีวมวลจากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ [1]	10
2.4	ตัวอย่างชี้ที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ [1]	10
2.5	ชี้ที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ในจังหวัดพัทลุง	10
2.6	แกลบจากโรงสีข้าวในจังหวัดพัทลุง	11
2.7	แกลบจากโรงสีข้าวในอำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง	11
2.8	กระบวนการที่เหมาะสมกับความชื้นของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้	18
2.9	สภาวะความสมดุลของปฏิกิริยา [18]	22
2.10	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น [4]	22
2.11	ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์	23
2.12	อัตราส่วนเทียบเท่าและอุณหภูมิเปลวของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นไม้ [18]	26
2.13	เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขึ้น	29
2.14	เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลลง	30
2.15	เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขวาง	31
2.16	เตาผลิตก๊าซแบบพ่นฝอยโดยตรง [22]	32
2.17	เตาผลิตก๊าซแบบพ่นฝอยในห้องเผาไหม้ [22]	32
2.18	เตาผลิตก๊าซแบบหมุนวน [22]	33
2.19	การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปของของแข็ง ของเหลวและก๊าซผ่าน กระบวนการต่างๆ [1]	35
2.20	การผลิตไฟฟ้าจากระบบแก๊สซิฟิเคชั่น	36
2.21	เตาแก๊สซิฟิเคชั่น [34-36]	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชัน โดยมีเตาผลิตก๊าซชนิดเปลวไฟไหลลงแบบ 2 ชั้น	42
2.23 เตาผลิตก๊าซแบบเบดเคลื่อนที่ (Moving Bed) ชนิดเปลวไฟไหลลงสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า 500 kW	44
2.24 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไดซ์เบดชนิด 2 ชั้น	45
2.25 เตาผลิตก๊าซสำหรับเดินเครื่องยนต์เพื่อปั่นไฟขนาด 5 kW	47
2.26 ระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	48
2.27 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันขนาด 75 kW	48
2.28 การผลิตไฟฟ้าจากระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 75 kW	49
2.29 เตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล	51
2.30 ไซโคลอนในระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล	51
2.31 ระบบทำความสะอาดในระบบก๊าซซิฟิเคชันแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล	52
2.32 การวัดก๊าซและทาร์ในระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล	53
2.33 ระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล	53
2.34 เครื่องยนต์ดีเซลในระบบผลิตไฟฟ้าจากแก๊สซิฟิเคชันแบบหลายชั้น	54
2.35 เตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซขนาดเล็กโดยใช้น้ำมัน	55
2.36 ระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กโดยใช้น้ำมัน	56
2.37 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	57
2.38 เตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซแบบเปลวไฟไหลลง	58
2.39 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	58
2.40 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในโปรคิวเซอร์ก๊าซ	59
2.41 ตัวแยกอนุภาคในระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	59
2.42 อุปกรณ์สำหรับกำจัดทาร์และอนุภาคในระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	60
2.43 การผลิตไฟฟ้าจากระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 1 MW	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชัน แบบเบดนิ่งอากาศไหลลง	66
3.2 แผนภูมิระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชัน แบบเบดนิ่งอากาศไหลลง	67
3.3 การออกแบบผนังทรงกระบอกเตาแก๊สซิฟิเคชัน	74
3.4 ค่า N _e	77
3.5 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอกการิทึม	80
3.6 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : แก๊สซิฟิเคชัน ชนิดเบดคกที่เปลวไฟไหลลง	82
3.7 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : โซโคลอน	84
3.8 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : ชุดลดอุณหภูมิแก๊ส	85
3.9 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : ชุดควบคุมอุณหภูมิ	86
3.10 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : ที่ดักเถ้า	87
3.11 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : เครื่องป้อนอากาศ	88
3.12 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : หัวเผาทดลองแก๊ส	89
3.13 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : ชุดพักแก๊ส	90
3.14 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : ชุดกรองแก๊ส	91
3.15 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล : เครื่องยนต์พร้อมเครื่องปั่นไฟฟ้า	92
3.16 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในเตาแก๊สซิฟิเคชันและตำแหน่งการวัดคุณภาพ ของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ออกจากเตาแก๊สซิฟิเคชัน	93
3.17 ระบบเตาแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดคกที่เปลวไฟไหลลง	93
3.18 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติขนาด 16 ช่องสัญญาณ	94
3.19 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียและคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก	95
4.1 ปริมาณผลิตผลของแกลบในจังหวัดเพชรบุรี	100

รูปที่	หน้า
4.2 ปริมาณพลังงานแกลบและปริมาณเทียบเท่าน้ำมัน	100
4.3 แผนที่ศักยภาพของผลิตผลแกลบในจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2553	101
4.4 แผนที่ศักยภาพทางพลังงานของแกลบในจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2553	102
4.5 แกลบจากโรงสีข้าวในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี	104
4.6 ชี้ออกจากโรงงานแปรรูปไม้ในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี	105
4.7 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยที่เผาไหม้ได้ และเถ้าในแกลบ	108
4.8 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยที่เผาไหม้ได้ และเถ้าในชี้อ้อย	108
4.9 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณ C H O N S ในแกลบ	109
4.10 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณ C H O N S ในชี้อ้อย	109
4.11 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%	110
4.12 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%	111
4.13 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%	111
4.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิ	112
4.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิ	112
4.16 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิ	113
4.17 การเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิ	113
4.18 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิ	114
4.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%	115
4.20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%	115
4.21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%	116
4.22 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%	116

รูปที่	หน้า
4.23 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%	116
4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%	117
4.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%	117
4.26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%	118
4.27 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%	118
4.28 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%	119
4.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%	119
4.30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%	119
4.31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%	120
4.32 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%	120
4.33 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%	121
4.34 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลมกับอัตราการไหลของอากาศ	122
4.35 พัดลม รุ่น Maktec MT 400	123
4.36 เครื่องวัดปริมาณอัตราการไหล	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	ศึกษาพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พ.ศ. 2543 [1-2]	2
2.1	Proximate Analysis ของชีวมวล	13
2.2	Ultimate Analysis ของชีวมวล	14
2.3	ค่าความร้อนของชีวมวล	15
2.4	กระบวนการเปลี่ยนแปลงชีวมวลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง	18
2.5	องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์ก้าซจากไม้และถ่านไม้ [18]	23
2.6	ความหนาแน่นบรรจุ (Bulk Density) ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ [22]	28
2.7	สรุปลักษณะของเครื่องผลิตก้าซชีวมวลแต่ละแบบ [15]	33
2.8	ส่วนประกอบของก้าซชีวมวลจากเตาผลิตก้าซชีวมวลแบบต่างๆ [16]	34
2.9	ส่วนประกอบของโปรตีนเซอร์ก้าซ	56
2.10	ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์ก้าซ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอน และประสิทธิภาพของระบบ	56
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อย	61
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ	62
3.3	วิธีการคำนวณสูตรเคมีของขี้เลื่อย	62
3.4	วิธีการคำนวณสูตรเคมีของแกลบ	63
3.5	การคำนวณหามวลของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg	71
3.6	การคำนวณหามวลของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg (ต่อ)	71
4.1	จำนวนผู้ประกอบการ โรงสีข้าวและโรงเลื่อยในจังหวัดเพชรบุรี	98
4.2	การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบ และขี้เลื่อยในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี	106
4.3	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบ และขี้เลื่อยในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี	106
4.4	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและขี้เลื่อย	107
4.5	ค่าความเร็วและอัตราการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 39 °C	122
4.6	คุณลักษณะของพัดลม รุ่น Maktec MT 400	123

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง	-
C_{p_g}	ความร้อนจำเพาะของแก๊สสังเคราะห์	KJ/kg.K
C_{p_i}	ศักยภาพความร้อนจำเพาะของแก๊สเฉพาะ	KJ/kg.K
E_{cdg}	พลังงานเคมี	kW
E_{sh}	พลังงานสัมผัส	kW
FA_{stoic}	สัดส่วนการเผาไหม้	-
H_{prod}	เอนทัลปีของผลิตภัณฑ์	KJ/Kg
H_{react}	เอนทัลปีของสารตั้งต้น	KJ/Kg
ΔH°_{f298}	เอนทัลปีมาตรฐานของการก่อตัวของสารประกอบ	KJ/Kg
ΔH°_{R298}	พลังงานความร้อนทั้งหมด	KJ/Kg
m	มวลของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	kg
\dot{m}_{air}	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/hr
$\dot{m}_{c,db}$	อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนในชีวมวล	kg/hr
$\dot{m}_{c,dg}$	อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนในแก๊สแห้ง	kg/hr
\dot{m}_{db}	อัตราการไหลเชิงมวลของชีวมวลแห้ง	kg/hr
\dot{m}_g	อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สสังเคราะห์	m ³ /hr
T	อุณหภูมิ	K
T_c	อุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ขณะเย็น	k
T_h	อุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์ขณะร้อน	-
V	ปริมาตรของแก๊ส	Nm ³
$V \square$	อัตราการป้อนแก๊สเชื้อเพลิง	Nm/h ³
V_{air}	อัตราการไหลของอากาศ	hr ³
V_{dg}	อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์แห้ง	m/s ³
V_m	ปริมาตรโมเลกุลของแก๊ส	Nm/kmol ³
W	น้ำหนัก	kg
X_i	สัมประสิทธิ์มวลเฉพาะแก๊สในแก๊สสังเคราะห์	-
		kg/m ³

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ρ	ความหนาแน่นของแก๊สเชื้อเพลิง	kg/m ³
Ψ_{dg}	Dry gas yield	-
η_c	ประสิทธิภาพการเปลี่ยนสภาพคาร์บอน	-
$\eta_{G(cold)}$	ประสิทธิภาพของแก๊สเย็น	-
$\eta_{G(hot)}$	ประสิทธิภาพของแก๊สร้อน	-

บทคัดย่อ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวลสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขนาดเล็กในจังหวัดเพชรบุรี
(ภาษาอังกฤษ) The Power Generation by Biomass Gas Engine for Application in Production Process of Small-Scale Industry Community Products in Phetchaburi Province

ชื่อผู้วิจัย อาจารย์สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์
สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
อาจารย์สุภาดา ชุนณรงค์
สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
อาจารย์สุรรัตน์ เทมวรรณ
สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
อาจารย์ ดร.นิรุช ล้าเลิศ
สาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภท งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2556 จำนวนเงิน 1,644,000 บาท ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ. 2555 ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2556

โครงการวิจัยนี้เป็นการมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงชีวมวลในจังหวัดเพชรบุรี สำหรับการผลิตไฟฟ้าโดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นเทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงแข็งเป็นเชื้อเพลิงก๊าซที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับชุมชนในจังหวัดเพชรบุรีโดยเริ่มต้นทำการศึกษาคูณลักษณะและศักยภาพของเชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อยซึ่งได้ทำการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุรวมทั้งการวิเคราะห์ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM ของเชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อย และได้จัดทำแผนที่

ศักยภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงแกลบและจี้เลื่อยในจังหวัดเพชรบุรี โดยใช้โปรแกรม Surfer เพื่อระบุตำแหน่งที่มีศักยภาพสูงและเหมาะที่จะก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดเล็กแบบแยกศูนย์ (Decentralized) ต่อไป โดยในโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาทั้งเชิงทดลองและการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นได้ทำการรันแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาจาก S. A. Klien and F. L. Alvarado ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดโดยใช้แกลบและจี้เลื่อยเป็นเชื้อเพลิง สำหรับการศึกษาเชิงทดลองได้ทำการออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าจากแก๊สซิฟิเคชัน ขนาดพิกัด 10 kWp ซึ่งระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดหยุดนิ่งเปลวไฟไหลลง ชุดป้อนอากาศ ไชโคลน ตัวกรอง ไชโคลน ชุดทดสอบเปลวไฟ เครื่องยนต์ก๊าซและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดพิกัด 10 kWp และได้ทำการทดสอบเดินระบบโดยใช้จี้เลื่อยเป็นเชื้อเพลิงเพื่อศึกษาอัตราส่วนสมมูลย์ (Equivalent Ratio) และเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของระบบ และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน อัตราการบริโภคเชื้อเพลิง พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพรวมของระบบ

ผลการศึกษาวิจัยพบว่าแกลบและจี้เลื่อยมีสูตรทางเคมี $CH_{1.59}O_{0.67}$ และ $CH_{1.83}O_{0.72}$ ตามลำดับ อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับเชื้อเพลิงแกลบและจี้เลื่อย 1.09 m³/hr และ 1.062 m³/hr ตามลำดับ และจากแผนที่ศักยภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงแกลบและจี้เลื่อยพบว่า อำเภอบ้านลาดเป็นอำเภอที่มีศักยภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงแกลบสูงสุด รองลงมาได้แก่อำเภอเมือง ส่วนอำเภอเขาย้อย อำเภอท่ายางและอำเภอชะอำเป็นอำเภอที่มีศักยภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจี้เลื่อยเรียงตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาคูณลักษณะทางเชื้อเพลิงของแกลบและจี้เลื่อย ผลการวิเคราะห์โดยประมาณแสดงให้เห็นว่าแกลบและจี้เลื่อยมีค่าปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้ได้ 57.3% และ 65.9% โดยปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าเท่ากันที่ 15.6% และปริมาณเถ้า 17.1% และ 1.5% ที่ค่าความชื้น 10.0% และ 17.0% ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่าแกลบและจี้เลื่อยมีค่าคาร์บอน 40.6% และ 46.4% ไฮโดรเจน 5.4% และ 7.1% ออกซิเจน 36.5% และ 44.8% ไนโตรเจน 0.33% และ 0.12% ซัลเฟอร์ 0.05% และ 0.03% ตามลำดับ ที่ค่าความชื้นเดียวกัน

ผลจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดหยุดนิ่งเปลวไฟไหลลงในกรณีฉีดไอน้ำ ในช่วงอุณหภูมิ 600-1,200 °C ของเชื้อเพลิงแกลบ ณ สภาวะอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 100 kg/hr อัตราการป้อนไอน้ำ 11.7 kg/hr และเชื้อเพลิงมีค่าความชื้น 11% จะให้องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ คาร์บอนมอนอกไซด์ 10-16%Vol. คาร์บอนไดออกไซด์ 10-16%Vol. มีเทน 3-5%Vol. ไฮโดรเจน 5-25%Vol. และค่าความร้อนด้านต่ำของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง 3.9-6.6 MJ/Nm³ ซึ่งมีค่าสูงพอสำหรับการเดินเครื่องยนต์แก๊สสำหรับการผลิตไฟฟ้า โดยมีประสิทธิภาพของกระบวนการไอน้ำ-แก๊สซิฟิเคชันจากเชื้อเพลิงแกลบในเตาแก๊สซิฟิเคชัน

ชนิดเบดหุคหนึ่งเปลวไฟไหลลงอยู่ในช่วง 60-83% และผลจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบดหุคหนึ่งเปลวไฟไหลลงในกรณีฉีดไอน้ำ ในช่วงอุณหภูมิ 200-1,200 °C โดยใช้เชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อย ณ สภาวะเดียวกัน โพรคิวเซอร์แก๊สจะมีองค์ประกอบดังนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์ 12-33% Vol. คาร์บอนไดออกไซด์ 0-20% Vol. มีเทน 3-5% Vol. ไฮโดรเจน 7-33%Vol. และค่าความร้อนด้านต่ำของโพรคิวเซอร์แก๊สมีค่าอยู่ในช่วง 3.7-8.0 MJ/Nm³ ประสิทธิภาพของแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบดหุคหนึ่งเปลวไฟไหลลงโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อยร่วมกับไอน้ำ มีค่าอยู่ในช่วง 60-90% โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิ 200 °C

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาโดยทำการทดลองระบบแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบดหุคหนึ่งเปลวไฟไหลลงในกรณีที่ไม่ฉีดไอน้ำและฉีดไอน้ำในช่วงอุณหภูมิ 80-800 °C โดยใช้ขี้เลื่อยเป็นเชื้อเพลิง พบว่าในกรณีที่ไม่ฉีดไอน้ำก๊าซผลิตภัณฑ์จะมีองค์ประกอบดังนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์ 8-12% Vol. คาร์บอนไดออกไซด์ 9-10% Vol. มีเทน 2-3% Vol. ไฮโดรเจน 6-7%Vol. และค่าความร้อนสูงของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง 6.9-8.60 MJ/Nm³ ส่วนในกรณีที่ฉีดไอน้ำก๊าซผลิตภัณฑ์จะมีองค์ประกอบดังนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์ 16-32% Vol. คาร์บอนไดออกไซด์ 17-22% Vol. มีเทน 3-4.6% Vol. ไฮโดรเจน 21-33%Vol. และค่าความร้อนสูงของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง 10.8-12.0 MJ/Nm³ ดังนั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบและค่าความร้อนสูงของก๊าซผลิตภัณฑ์พบว่าระบบแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบดหุคหนึ่งเปลวไฟไหลลงในกรณีที่ฉีดไอน้ำดีกว่าระบบแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบดหุคหนึ่งเปลวไฟไหลลงในกรณีที่ไม่ฉีดไอน้ำ ซึ่งสามารถนำไปเผาไหม้ในเครื่องยนต์แก๊สสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้ โดยมีประสิทธิภาพระบบแก๊สซิไฟเออร์เท่ากับ 74.6% ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 32% และ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเท่ากับ 17%

Abstract

The aim of this project was to utilize the biomass produced in Phatthalung province for power generation by means of gasification process which is the higher efficiency conversion technology of solid fuel into gas fuel compared to the conventional combustion process in order to provide the electricity to the OTOP building for OTOP's products production processes.

The project started from the study of characteristics and energy potential of rice husk and sawdust in Phetchaburi province. Rice husk and sawdust were analyzed based upon the ASTM standard. Furthermore, the potential mapping of rice husk and sawdust in Phetchaburi were also created using Surfer in order to identify the high potential biomass energy resources for constructing the decentralized small scale biomass based power plant.

The investigations of this research were carried out based on both simulation study and experimental investigations. For the simulation study, the mathematical model of a steam biomass gasifier developed by S. A. Klien and F. L. Alvarado was run under different conditions using rice husk and sawdust as fuel. For the experimentations, the 10 kWp steam biomass gasification system was designed. The main component of this system was 10 kWe steam generator, a first blower, a fixed bed downdraft gasifier, an ash keeper box, a cyclone, a heat exchanger, a water scrubber, a filter, a flare test section, a gas engine, a final blower and a 10 kWp generator. This system was set up and constructed at the K.S. Premier Product in Phra Nakhon Si Ayutthaya Province. The experimentations were conducted in order to investigate the optimum operating condition and the equivalent ratio. The composition of product gases was detected and analyzed using a gas tester analyzer. Efficiency of energy conversion, fuel consumption rate and overall system efficiency were also investigated and analyzed.

Results from proximate and ultimate analyses indicated that the chemical formula of rice husk and sawdust was $\text{CH}_{1.59}\text{O}_{0.67}$ and $\text{CH}_{1.83}\text{O}_{0.72}$ respectively. The optimum air flow rate for gasification process of rice husk and sawdust was $1.09 \text{ m}^3/\text{hr}$ and $1.062 \text{ m}^3/\text{hr}$ respectively. The energy potential map of rice husk and sawdust revealed that Ban Lat district was the highest potential rice husk resource. The second was Muang district. In addition, Khao Yoi district, Khao Tha Yang district and Chaam were the high potential sawdust resources.

Results from the mathematical model showed that the steam gasification under 600-1,200 °C of rice husk at 100 kg/hr feed rate, 11.7 kg/hr steam feed rate, rice husk moisture content of 11% the composition of product gas was CO 10-16%Vol., CO₂ 10-16%Vol., CH₄ 3-

5%Vol. and H₂ 5-25%Vol. as well as the low heating value of product gas was in the range of 3.9-6.6 MJ/Nm³ which was sufficient to run the gas engine for power generation. Furthermore, the model also showed that the efficiency of the steam biomass gasification process in a fixed bed downdraft gasifier was in the range of 60-83%. The operating temperature was varied between 200-1,200 °C. Results from the stationary model displayed that the compositions of producer gas were 12-33%Vol. of CO, 0-20%Vol. of CO₂, 3-5%Vol. of CH₄ and 7-33%Vol. of H₂ and the lower calorific value of producer gas was in the range of 3,700-8,000 kJ/Nm³. Finally, the results from the model showed that the efficiency of steam-gasification from rice husk and sawdust in a fixed bed downdraft gasifier was in the range of 60-90% whereas the maximum efficiency occurred at 200 °C.

Experimental results revealed that the operating temperature varied in the range of 80-800 °C. Experimental results showed that the gas composition was composed of CO approx 8-32%Vol., CO₂ approx 9-22%Vol., H₂ approx 6-33%, CH₄ approx 2-5%. The high heating value of product gas with/without steam injection was about 6.9-8.6 MJ/Nm³ and 10.8-12 MJ/Nm³. The gasification, engine-generator and electrical efficiencies were 74.6%, 32% and 17% respectively.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Fuels) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล (Biomass) ในรูปของมวลสาร (Mass) ของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าพืช สัตว์ (บางกรณีก็มีจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย) ไม่ว่าจะยังมีชีวิตอยู่หรือตายไปแล้วก็ตาม

เชื้อเพลิงชีวมวลหลัก คือ ไม้ (Wood) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเก่าแก่ที่มนุษย์รู้จักใช้กันมาตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ เมื่อครั้งที่มนุษย์รู้จักหุงต้มอาหาร ให้ความอบอุ่นเมื่อมีอากาศหนาวเย็น เชื้อเพลิงชีวมวลที่ยังคงใช้กันอยู่ทั่วไป โดยเฉพาะในชนบทในประเทศไทย คือ ไม้ (Fuel Wood) ถ่าน (Charcoal) แกลบ ซึ่งใช้ทั้งกิจกรรมในครัวเรือน และอุตสาหกรรมชนบท (Cottage Industry) เช่น อุตสาหกรรมโรงสี อุตสาหกรรมเผาอิฐ โถงน้ำ กระจ่าง และเตาหุงต้ม เป็นต้น แม้แต่ในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้พลังงานจากไม้ฟืน ถึง 1 ใน 7 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด (โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนา) เช่น ประเทศบราซิล ใช้ไม้ฟืนเป็นพลังงานถึง 0.8 ตันต่อคนต่อปี คิดเป็นร้อยละ 29 ของพลังงานที่ใช้ในประเทศทั้งหมด ส่วนในกรณีของประเทศไทยนั้นมีการใช้ไม้ฟืนมากถึง 1.1 ตันต่อคนต่อปี

การใช้พลังงานจากชีวมวลจึงเป็นการใช้พลังงานจากสิ่งมีชีวิตอันได้แก่ พืชและสัตว์ โดยอาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเคมี (Thermochemical) หรือ ชีวเคมี (Biochemical)

ชีวมวลที่ได้จากพืชสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้เป็น 5 จำพวก คือ

1. ไม้ชนิดต่างๆ ซึ่งรวมถึง ไม้เนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง
2. วัสดุทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง
3. วัชพืชบกและวัชพืชน้ำ เช่น หญ้า ผักตบชวา
4. ผลิตภัณฑ์ที่มาจากพืช เช่น น้ำมันพืช (ถั่วลิสงและเมล็ดสบู่ดำ)
5. สิ่งเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เศษ ไม้ ขี้เลื่อย แกลบ และขานอ้อย เป็นต้น

ชีวมวลที่ได้จากสัตว์ ได้แก่ มูลสัตว์ต่างๆ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีแหล่งเชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานในประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพิจารณาถึงแหล่งของชีวมวลเพื่อศึกษาถึงเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาการใช้พลังงานจากชีวมวลจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศให้พึ่งพาตนเองได้ทั้งในด้านของเทคโนโลยีและลดการนำเข้าแหล่งพลังงานจากต่างประเทศ

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลักที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ได้แก่ แกลบ และฟางข้าว ชานอ้อย กากและกะลาปาล์ม และกะลามะพร้าว ฯลฯ จากการประเมินศักยภาพของ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากพืช 10 ชนิดที่มีศักยภาพสูง ได้แก่ อ้อย ข้าว น้ำมันปาล์ม มะพร้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่วลิสง ฟ้าย ถั่วเหลืองและข้าวฟ่าง ในปี พ.ศ. 2543 พบว่าปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ประมาณ 63 ล้านตัน โดยถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและใช้เพื่อวัตถุประสงค์ อื่นๆ ประมาณ 16 ล้านตัน ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ส่วนที่ยังไม่ได้ใช้เท่ากับ 42 ล้านตัน เทียบเท่าพลังงาน 604.82 เพตาจูล (6.04×10^{17} จูล) โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พ.ศ. 2543 [1-2]

ชนิด	ผลผลิต ต่อปี (10^6 กก.)	วัสดุเหลือใช้	อัตราส่วน วัสดุเหลือใช้ ต่อผลผลิต	วัสดุเหลือใช้ ที่เกิดขึ้น (10^6 กก.)	แฟกเตอร์ ของการใช้ เป็น พลังงาน	ปริมาณ วัสดุเหลือใช้ ที่ใช้เป็น พลังงาน (10^6 กก.)	แฟกเตอร์ วัสดุเหลือใช้ ที่ยังไม่มีการใช้	ปริมาณ วัสดุเหลือใช้ ที่ยังไม่มีการใช้ (10^6 กก.)	ค่าความร้อน (เมกกะจูล/ กก.)	พลังงาน (เทรา จูล)
1. อ้อย	53,494	ชานอ้อย ส่วนชอคและใบ	0.291	15,567	0.793	12344	0.207	3,222	14.40	46,401
			0.302	16,155	0.000	0	0.986	15,929	17.39	277,006
2. ข้าว	24,172	แกลบ ฟาง (ส่วนบน)	0.230	5,560	0.507	2819	0.493	2,741	14.27	39,112
			0.447	10,805	0.000	0	0.684	7,391	10.24	75,679
3. ปาล์มน้ำมัน	3,256	ทะลายน้ำมันเปล่า เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม ก้าน ทะลายน้ำมัน	0.428	1,394	0.030	42	0.584	814	17.86	14,535
			0.147	479	0.858	411	0.134	64	17.62	1,130
			0.049	160	0.588	94	0.037	6	18.46	109
			2.604	8,479	0.000	0	1.000	8,479	9.83	83,345
			0.233	759	0.000	0	1.000	759	16.33	12,389
4. มะพร้าว	1,400	เปลือก กะลามะพร้าว ทะลายน้ำมัน พางมะพร้าว	0.362	507	0.289	146	0.595	302	16.23	4,894
			0.160	224	0.413	93	0.378	85	17.93	1,518
			0.049	69	0.144	10	0.843	58	15.40	891
			0.225	315	0.159	50	0.809	255	16.00	4,077
5. มันสำปะหลัง	19,064	ลำต้น	0.088	1,678	0.000	0	0.407	683	18.42	12,577
6. ข้าวโพด	4,286	ชังข้าวโพด	0.273	1,170	0.193	226	0.670	784	18.04	14,142
7. ถั่วลิสง	138	เปลือก	0.323	45	0.000	0	1.000	45	12.66	564
8. ฟ้าย	36	ลำต้น	3.232	116	0.000	0	1.000	116	14.49	1,686
9. ถั่วเหลือง	319	ลำต้น ใบ เปลือก	2.663	849	0.007	6	0.760	646	19.44	12,551
10. ข้าวฟ่าง	142	ใบ ต้น	1.252	178	0.118	21	0.648	115	19.23	2,215
รวมทั้งหมด										604,822

ปัจจุบันทั้งภาครัฐและภาคเอกชนได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการประหยัดพลังงาน เนื่องมาจากพลังงานที่เราใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานซึ่งมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล จนมาถึงปัจจุบัน เชื้อเพลิงประเภทนี้มีราคาสูงและมีจำนวนลดลงเรื่อยๆ จึงส่งผลให้หลายๆ หน่วยงานได้พยายามหา

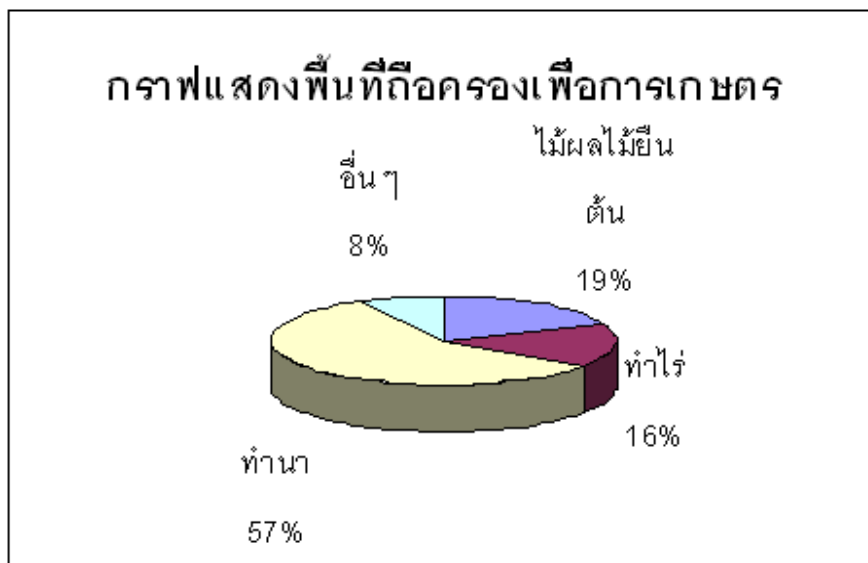
พลังงานทดแทนมาใช้ ซึ่งพลังงานทดแทนเหล่านี้ได้แก่พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซชีวภาพ และพลังงานน้ำ

ปัจจุบันพลังงานหมุนเวียนกำลังได้รับความสนใจทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชนเป็นอย่างมาก โดยได้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อนำมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น สภาวะเรือนกระจก ปัญหาโลกร้อน ตลอดจนปัญหาฝนกรดจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ประเทศไทยประสบปัญหาดังกล่าวจากกรณีโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากเหตุผลหลายๆ ประการด้วยกันทำให้ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องมีความกระตือรือร้นที่จะหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พลังงานหมุนเวียนต่างๆ เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังน้ำและพลังงานจากชีวมวลกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Fuel) เนื่องจากมีศักยภาพสูงและมีปริมาณแหล่งเชื้อเพลิงอยู่มาก จังหวัดเพชรบุรีเป็นจังหวัดหนึ่งที่มีกิจกรรมทางด้านเกษตรกรรมค่อนข้างสูงและมีวิสัยทัศน์ที่จะมุ่งเน้นเป็นเมืองเกษตรกรรม ดังนั้นจึงมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว แกลบ และอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้จำพวกขี้เลื่อยขี้สับเป็นจำนวนมาก

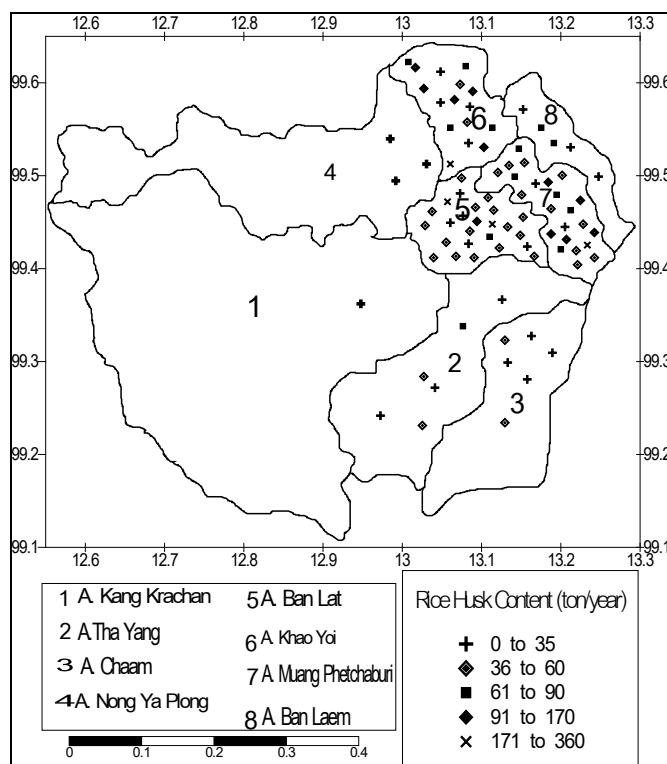
จากการที่จังหวัดเพชรบุรีมีศักยภาพทางด้านชีวมวลสูงมาก เนื่องจากส่วนใหญ่จะประกอบอาชีพเกษตรกรรมการทำนาเป็นหลัก และในแต่ละปีจะมีเศษไม้ยางพาราหลายล้านตัน ซึ่งเศษไม้เหล่านี้มีอยู่หลายรูปแบบ เช่น ในรูปของ ปีกไม้ ขี้เลื่อย ขี้กบ ปลายไม้ และรากไม้ เป็นต้น ซึ่งเศษไม้เหล่านี้เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนหรือไม่ก็นำมาผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นทางสาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี เป็นอีกหน่วยงานหนึ่งที่มีความสนใจที่จะนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นเชื้อเพลิงก๊าซและผลิตกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงรูปกราฟแสดงพื้นที่ถือครองเพื่อการเกษตร ในปี 2547

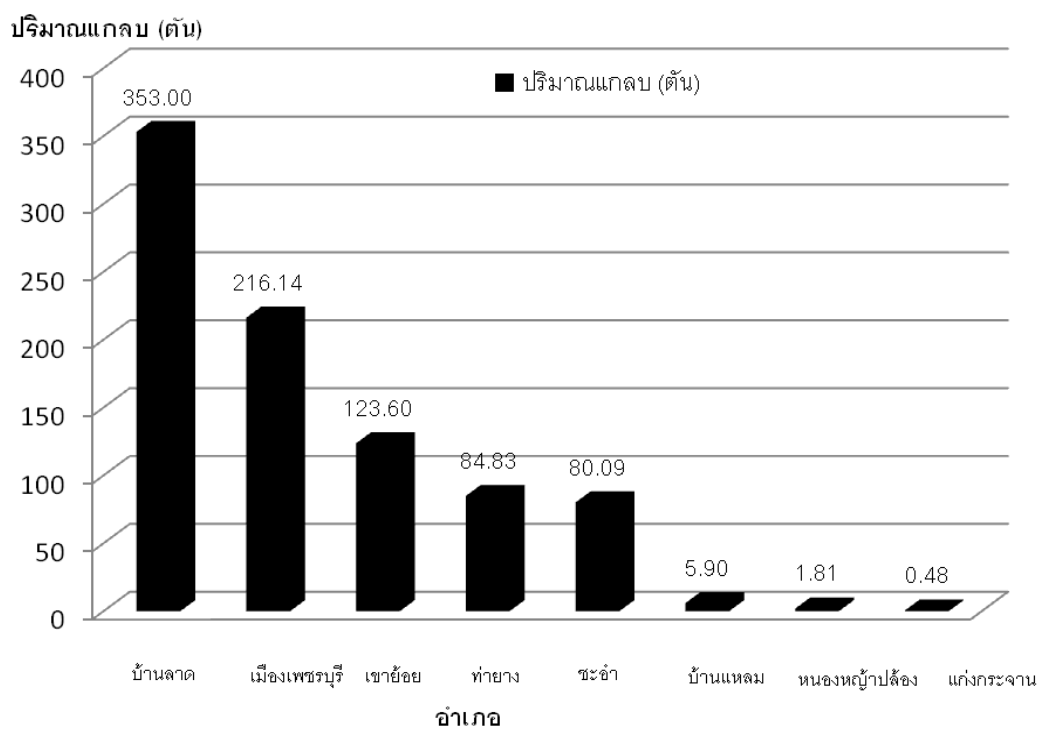
จากการศึกษาข้อมูลถึงการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์ พบว่ามีอยู่ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกคือนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงแล้วให้ความร้อนกับน้ำซึ่งจะได้ไอน้ำแล้วใช้ความร้อนจากไอน้ำนี้ หรือไม่นำไอน้ำที่ได้ไปผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนวิธีที่สองคือ เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Technology) แก๊สซิฟิเคชันเป็นการเผาไหม้โดยควบคุมอากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้ในปริมาณจำกัดทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะได้ก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นหลัก หลังจากนั้นก็นำก๊าซชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ หรือ ไม่นำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ (Engine) แล้วนำกำลังที่ได้ไปผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป



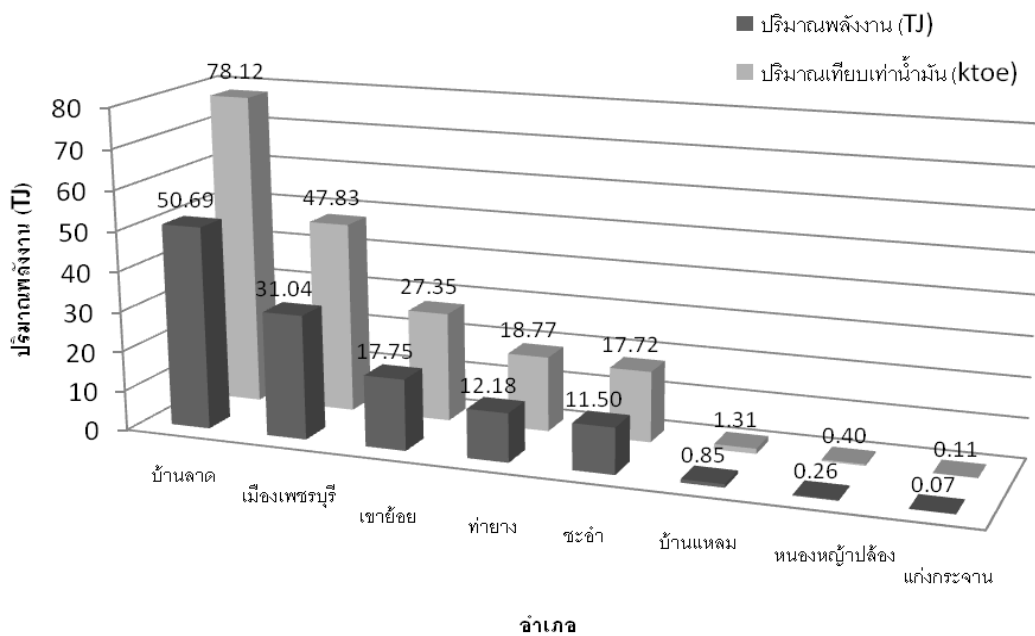
รูปที่ 1.1 กราฟแสดงพื้นที่ถือครองเพื่อการเกษตร
ที่มา: สำนักงานเกษตรจังหวัดเพชรบุรี



รูปที่ 1.2 แผนที่ศึกษาภาพของผลิตผลเมล็ดในจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2553
ที่มา: สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์ 2553



รูปที่ 1.3 ปริมาณผลิตผลของแกลบในจังหวัดเพชรบุรี
ที่มา: ศูนย์ทศกิติ์ ะวังวงศ์ 2553



รูปที่ 1.4 ปริมาณพลังงานจากแกลบและปริมาณเทียบเท่าน้ำมัน
ที่มา: ศูนย์ทศกิติ์ ะวังวงศ์ 2553

โครงการวิจัยนี้ได้เสนอการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยเฉพาะส่วนของขี้เถ้าและแกลบมาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) เพื่อผลิตก๊าซชีววมวล (Product Gas) แล้วนำก๊าซชีววมวลที่ได้ไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ โดยนำกำลังที่ได้ไปผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบของเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นแบบอากาศไหลลง (Downdraft Gasifier) เนื่องจากเตาชนิดนี้สามารถกำจัดน้ำมันดิน (Tar) ได้ดี เนื่องจากต้องนำก๊าซชีววมวลที่ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ ซึ่งถ้าหากก๊าซชีววมวลที่ได้มีปริมาณของน้ำมันดินอยู่มากก็จะทำให้เครื่องยนต์ทำงานมีประสิทธิภาพต่ำ โดยปกติแล้วเครื่องยนต์จะทำงานได้ดีเหมือนกับการใช้น้ำมันจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ก๊าซชีววมวลจะต้องมีปริมาณของน้ำมันดินน้อยกว่า 10 mgNm^{-3} ดังนั้นระบบผลิตก๊าซชีววมวลต้องมีระบบควบคุมคุณภาพก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีววมวลโดยใช้เชื้อเพลิงชีววมวลในรูปของขี้เถ้าและแกลบจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้และโรงสีข้าวในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี โดยเน้นถึงจุดประสงค์ดังนี้

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีววมวลที่มีรูปแบบเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีววมวล ขี้เถ้าและแกลบ สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบของก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการนำก๊าซชีววมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซสำหรับเครื่องยนต์ โดยศึกษาถึงความเหมาะสมและเน้นถึงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการนำกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์เชื้อเพลิงชีววมวลไปผลิตกระแสไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้ในโครงการนี้ได้แก่ ขี้เถ้าและแกลบ ที่รวบรวมได้จากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้และโรงสีข้าวในพื้นที่จังหวัดพัทลุง
- 1.3.2 ไม่มีการควบคุมปริมาณความชื้นเริ่มต้นในเชื้อเพลิงชีววมวลแต่จะเลือกใช้เชื้อเพลิงชีววมวลทั้ง 2 ชนิดที่มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน
- 1.3.3 ขนาดของเครื่องยนต์ที่ใช้มีขนาดความจุของกระบอกสูบไม่เกิน $1,600 \text{ cc}$ และขนาดของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า (Generator) ไม่เกิน 10 kWe
- 1.3.4 เตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้เป็นแบบอากาศไหลลง (Downdraft gasifier)
- 1.3.5 ใช้ขี้เถ้าเป็นตัวกลางในระบบกรองก๊าซ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงลักษณะที่เหมาะสมของเตาผลิตก๊าซชีววมวลจากขี้เลื่อยและแกลบที่เหมาะสมที่สุด
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงส่วนประกอบของก๊าซชีววมวลที่ได้จากขี้เลื่อยของไม้ยางพาราและแกลบ
- 1.4.3 ทำให้ได้ทราบถึงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องยนต์โดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีววมวลที่ได้จากขี้เลื่อยของไม้ยางพาราและแกลบ
- 1.4.4 ทำให้ทราบข้อมูลทางด้านเทคนิคของการใช้เครื่องยนต์เชื้อเพลิงก๊าซชีววมวลที่ได้จากขี้เลื่อยและแกลบสำหรับนำไปเป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า
- 1.4.5 เป็นเครื่องต้นแบบสำหรับให้กับหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องหรือผู้ประกอบการเพื่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีววมวล โดยเฉพาะจากเศษของไม้ที่ได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้

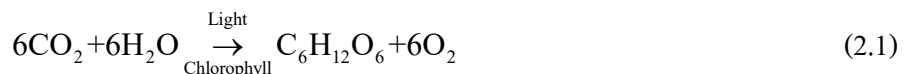
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

เมื่อพิจารณาถึงแหล่งพลังงานของโลกแล้ว จะเห็นว่าแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใหญ่และสำคัญที่สุด คือ ดวงอาทิตย์ และการที่สิ่งมีชีวิตจะนำพลังงานจากดวงอาทิตย์มาใช้นั้นก็ต้องผ่านทางกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเกือบทั้งสิ้น ดังนั้น กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชจึงนับว่ามีความสำคัญต่อความอยู่รอดของโลกเป็นอย่างมาก

การสังเคราะห์แสงของพืช หมายถึง การที่พืชดูดเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศเข้าไปเพื่อเปลี่ยนให้เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีพลังงานในตัวสูงพอที่พืชจะเก็บไว้ใช้งานต่อไป โดยใบพืชเป็นแหล่งของสารสีเขียว (Chlorophyll) ที่สามารถดูดกลืนรังสีอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ และในเวลาเดียวกันก็เปลี่ยนรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในอากาศ ให้เป็นออกซิเจน (O_2) (ซึ่งเป็น Building Block สำหรับใช้สร้างอินทรีย์สารรูปอื่นๆ) ที่เก็บเอาพลังงานศักย์ทางเคมี (Potential Chemical Energy) ไว้ในรูปของตัวขนส่งพลังงาน (Energy Carrier) เพื่อใช้ในกิจกรรมทางเมตาโบลิซึมของพืชโดยทันทีหรือสำรองได้ กระบวนการทางชีวเคมีที่สลับซับซ้อนนี้เรียกว่า การสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) โดยมีสมการการสังเคราะห์แสงของพืชแสดงดังสมการที่ 2.1



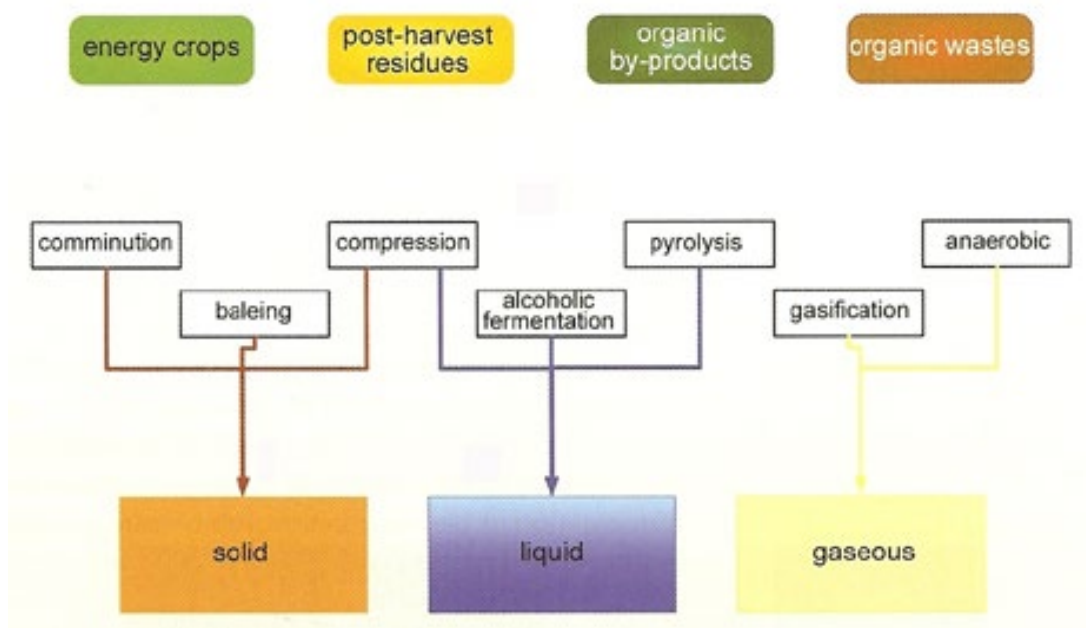
โดยทั่วไปเราจะถือว่า พลังงานจากพืชเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานแสงอาทิตย์

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนมากเป็นเซลลูโลส ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) และลิกนิน ($\text{C}_{40}\text{H}_{44}\text{O}_6$) แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ ชีวมวลชนิดไม้ (Woody Biomass) และชีวมวลชนิดไม้ใช้ไม้ (Non-Woody Biomass) ชีวมวลชนิดไม้ (ทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง) เช่น กิ่งไม้ (Limb Wood) เศษไม้ (Wood Chips) ขี้เลื่อย (Sawdust) ถ่านไม้ (Charcoal) เศษเยื่อกระดาษ (Pulp Waste) เป็นต้น ส่วนชีวมวลชนิดไม้ใช้ไม้ เช่น แกลบ (Husks) ชานอ้อย (Bagasse) ก้านรวงข้าว (Stalks) เปลือกเมล็ด (Pits) และมูลสัตว์แห้ง (Manure) เป็นต้น ชีวมวลที่เป็นไม้มีตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.1

ชีวมวลเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นเชื้อเพลิงก๊าซโดยอาศัยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลอื่นๆ เช่น การเผาไหม้โดยตรง กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการหมัก และอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ชีวมวลที่เป็นไม้ในรูปแบบต่างๆ [1]



รูปที่ 2.2 พลังงานชีวมวลและการเปลี่ยนรูป [1]

รูปที่ 2.3 แสดงชีวมวลที่เป็นไม้ซึ่งเกิดจากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ โดยมีตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยรูปที่ 2.5 เป็นเชื้อเพลิงจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ในจังหวัดเพชรบุรี



รูปที่ 2.3 ชีวมวลจากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ [1]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างชี้เลื่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ [1]



รูปที่ 2.5 ชี้เลื่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ในจังหวัดเพชรบุรี



รูปที่ 2.6 แกลบจากโรงสีข้าวในจังหวัดเพชรบุรี



รูปที่ 2.7 แกลบจากโรงสีข้าวในอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี

2.1.1 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง [2]

เนื่องจากในโครงการวิจัยนี้เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานชีวมวลในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel) ได้แก่ จี้เลื่อยและแกลบให้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous Fuel) โดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ดังนั้นการวิเคราะห์คุณลักษณะ (Characteristic) ของเชื้อเพลิงจึงเป็นสิ่งจำเป็น การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการตาม

มาตรฐาน ASTM ซึ่งในที่นี้จะขอกกล่าวถึงแต่เฉพาะที่เกี่ยวข้อง เช่นการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ค่าความร้อน (Heating Value) และอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (Ash Fusion Temperature) ของชีวมวลเป็นต้น

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3172 จะระบุปริมาณ ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณ สารระเหยที่เผาไหม้ได้ (Volatile Combustible Matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และปริมาณเถ้า (Ash Content) ในการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว เชื้อเพลิงแข็งจะถูกบดเป็นผงและนำไปอบให้แห้งในเตาอบภายใต้อุณหภูมิประมาณ 105-110 °C จนได้น้ำหนักคงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักเดิมคือปริมาณความชื้น จากนั้นเชื้อเพลิงแข็งที่แห้งแล้วจะถูกทำให้ร้อนในภาชนะปิด (เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน) ภายใต้อุณหภูมิ 900 °C เพื่อไล่สารระเหยที่เผาไหม้ได้ จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไปคือปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้นั่นเอง จากนั้นนำเชื้อเพลิงแข็งที่ได้ไปอบในภาชนะเปิด ภายใต้อุณหภูมิ 750 °C เพื่อให้เกิดการเผาไหม้จนได้น้ำหนักที่เหลือคงที่และเป็นน้ำหนักของเถ้า ในขณะที่น้ำหนักส่วนที่หายไปคือปริมาณของคาร์บอนคงตัวนั่นเอง การวิเคราะห์แบบประมาณมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น โดยระบุในลักษณะ %db และไม่คิดเถ้า ปริมาณคาร์บอนและปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถูกกำหนดโดยการเผาเชื้อเพลิงตัวอย่างในภาชนะที่ปิดบรรจุออกซิเจนไว้อย่างเพียงพอแล้ววัดองค์ประกอบของไอเสียเพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคาร์บอน (C) และปริมาณไฮโดรเจน (H) ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้น ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) จะถูกกำหนดโดยอาศัยวิธีการทางเคมีในขณะที่ออกซิเจน (O) จะถูกระบุโดยค่า 100 ลบด้วยปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

การกำหนดค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิง (ASTM D2105) ทำได้โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ซึ่งจะได้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ค่าปริมาตรคงที่แต่ว่าแทบจะไม่แตกต่างไปจากค่าที่ความดันคงที่แต่อย่างใด

การกำหนดอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (ASTM D1857) โดยการนำเถ้าของเชื้อเพลิงแข็งที่พิจารณา (ภายหลังจากที่ถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายใต้อุณหภูมิ 850 °C แล้ว) มาผสมกับสารละลายของเดกซ์ทริน (Dextrin) เพื่อทำให้เป็นของเหลวหนืดแล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มาตรฐานตามที่กำหนดเพื่อทำให้เป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม จากนั้นนำเถ้ารูปทรงทรงแปดเหลี่ยมขึ้นดังกล่าวไปทำให้ร้อนขึ้นอย่างช้าๆ ในเตาอบแบบเปิดสู่อากาศ (Oxidizing) หรือแบบลดอากาศ (Reducing) ก็ได้ แล้วแต่กำหนดแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปทรงทรงแปดเหลี่ยมของเถ้า อุณหภูมิ

ของเหลวของเถ้าจะมีหลายค่า กล่าวคือ อุณหภูมิของเหลวของเถ้าที่ค่าต่างๆ กัน (จากน้อยไปหามาก) ที่ทำให้เถ้าเริ่มเปลี่ยนรูปทรงเป็นแบบต่างๆ กันตามลำดับ คือ กรวยปลายมนเล็กน้อยหลอมเป็นแท่ง กรวยกระบอกปลายมนหลอมเป็นรูปครึ่งวงกลม และสุดท้ายหลอมละลายแบนราบติดกับพื้น อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเถ้า เช่น เถ้าที่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ TiO_2 จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูง ในขณะที่เถ้าที่ประกอบด้วยออกไซด์มูลฐาน เช่น Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O และ K_2O เป็นต้น จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าจะต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟ แต่จะสูงกว่าอุณหภูมิของไอน้ำและผนังเตา

จากการสำรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการวิเคราะห์องค์ประกอบและค่าความร้อนของชีวมวลบางประเภท ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันอยู่บ้างแต่ค่าองค์ประกอบและค่าความร้อนสำหรับชีวมวลชนิดเดียวกันจะอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันแสดงดังตารางที่ 2.1-2.3 โดยที่ MC = ปริมาณความชื้น AC = ปริมาณเถ้า VM = ปริมาณสารระเหย FC = ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ตารางที่ 2.1 Proximate Analysis ของชีวมวล

Biomass	MC	FC	VM	AC
Wheat Straw [3]	30.0	18.0	46.0	6.0
Barley Straw [3]	16.0	21.0	59.0	4.0
Rice Straw [4]	9.93	5.701	69.11	5.23
Rice Straw [5]	-	-	81.3	6.6
Paddy Straw [6]	12.7	24.8	54.1	21.1
Paddy Husk [6]	9.0	17.4	68.5	14.1
Rice Husk [7]	11.7	20.4	53.1	14.8
Coconut Shell [8]	10.46	18.29	67.67	3.58
Coconut Shell [6]	8.7	19.6	73.9	6.5
Coconut Shell [9]	7.02	21.60	70.20	1.18
Coconut Husk [6]	10.3	23.0	73.0	4.0
Coir Dust [6]	15.0	26.0	62.0	12.0
Charcoal Pieces [9]	0.27	76.15	20.38	3.20
Sawdust [6]	7.0	16.5	82.8	0.7
Sawdust [10]	12.27	0.83	70.55	16.36
Sawdust [11]	10.63-12.93	11.26-15.30	73.74-77.22	0.09-0.51
Sawdust [12]	10.4	17.9	70.4	1.3
Hazelnut Shell [13]	12.45	24.08	62.70	0.77
Rubber Wood [14]	-	19.2	80.1	0.7

Wood [5]	-	-	83.0	1.8
Wood [3]	20.0	17.0	82.0	1.0
Bark [5]	-	-	76.0	7.0
Paper [4]	-	-	-	6.0
Peat [5]	-	-	74.2	2.7
Bagasse [6]	20.0	19.2	74.1	6.7
Bituminous Coal [5]	-	-	34.7	8.3
Bituminous Coal [3]	11.0	45.0	35.0	9.0
Lignite Coal [3]	34.0	31.0	29.0	6.0
Municipal Waste [15]	-	-	-	12.0
Rape Oil [5]	-	-	100.0	0.0
Olive Waste [16]	7.04	19.37	67.63	5.96
Ethyl Alcohol [5]	-	-	100.0	0.0
Methyl Alcohol [5]	-	-	100.0	0.0

ตารางที่ 2.2 Ultimate Analysis ของชีวมวล

Biomass	C	H	O	N	S
Rice Straw [3]	33.96	5.01	34.67	1.07	0.10
Rice Straw [5]	49.0	6.0	44.0	0.8	0.2
Paddy Straw [6]	41.4	5.0	39.9	0.7	0.1
Paddy Husk [6]	43.1	4.9	37.3	0.5	0.1
Rice Husk [7]	36.74	5.51	42.55	0.28	0.55
Coir Dust [6]	46.0	7.0	46.0	1.0	0.0
Sawdust [6]	47.0	6.0	41.3	2.0	0.0
Sawdust [1]	45.66	4.86	34.94	1.38	0.06
Sawdust [11]	50.91-52	6.07-6.13	41.55-42.14	0.23-0.28	-
Sawdust [12]	46.2	5.1	35.4	5.1	1.5
Hazelnut Shell [13]	46.76	5.76	45.83	0.22	0.67
Eucalyptus [17]	63.9	6.2	25.8	0.8	1.7
Straw Pulping [18]	45.8	4.49	25.8	1.29	0.55
Spruce Wood [18]	34.2	4.1	38.0	0.2	4.0
Rubber Wood [14]	50.6	6.5	42.0	0.2	0.7
Wood [15]	50.0	6.0	44.0	0.0	0.0
Wood [5]	50.5	6.1	43.0	0.3	0.1

Wood Chips [19]	50.0	5.8	43.2	-	1.0
Bark [5]	50.5	5.8	43.2	0.4	0.1
Paper [15]	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2
Peat [5]	52.6	5.8	40.6	0.9	0.1
Bagasse [6]	47.0	6.0	43.0	2.0	-
Bituminous Coal [5]	82.4	5.1	10.3	1.4	0.8
Municipal Waste [15]	47.6	6.0	32.9	1.2	0.3
Rape Oil [5]	77.0	12.0	10.9	0.1	0.0
Olive Waste [16]	40.34	5.173	53.68	0.763	0.034
Ethyl Alcohol [5]	52.0	13.0	35.0	0.0	0.0
Methyl Alcohol [5]	38.0	12.0	0.0	0.0	50.0

ตารางที่ 2.3 ค่าความร้อนของชีวมวล

Biomass	MC	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
Wheat Straw [20]	-	16,670	15,360
Wheat Straw [4]	30.0	-	16,100
Barley Straw [3]	16.0	-	17,300
Rice Straw [3]	9.96	-	15,175
Rice Straw [5]	-	-	18,200
Rice Straw [20]	-	15,240	13,970
Paddy Straw [6]	12.7	-	16,000
Paddy Straw [21]	8.17	-	8,830
Grain Straw [20]	-	16,310	15,010
Paddy Husk [15]	-	-	402,133 kJ/kmol
Paddy Husk [21]	8.83	-	12,850
Paddy Husk [6]	9.0	-	14,000
Rice Husk [7]	11.7	15,700	-
Rice Husk [17]	-	21,200	-
Oil Palm: Empty Bunches [21]	8.81	-	16,440
Oil Palm: Fiber [21]	10.11	-	16,190
Oil Palm: Shell [21]	13.0	-	17,000
Oil Palm: Frond [21]	48.34	-	7,970
Oil Palm: Male Bunches [21]	13.82	-	14,860
Cassava Stalk [21]	-	-	16,990

Maize Corn Cob [21]	8.65	-	16,630
Maize Seeds: Maize Stalks [6]	20.0	-	12,600
Maize Seeds: Maize Cobs [6]	7.5	-	16,300
Corn Stalk [20]	-	16,900	15,540
Groundnut Shell [21]	-	-	11,230
Soybean: stalk, Leaves&Shell [21]	-	-	18,000
Bean Stalk [20]	-	17,590	16,150
Sorghum: Leaves&Stem [21]	-	-	17,800
Sorghum Stalk [20]	-	16,370	15,070
Cotton Stalk [21]	9.33	-	13,070
Cotton Stalk [20]	-	17,370	16,00
Coconut Shell [4]	10.46	-	18,450
Coconut Shell [6]	8.7	-	18,100
Coconut Shell [9]	7.02	-	18,450
Coconut Shell [21]	11.79	-	16,480
Coconut Husk [21]	12.53	-	14,710
Coconut Husk [6]	10.3	-	18,600
Coconut Empty Bunches [21]	13.03	-	13,940
Coconut Frond [21]	11.21	-	14,550
Coir Dust [6]	15.0	-	13,400
Sawdust [6]	7.0	-	19,400
Sawdust [11]	10.63-12.93	-	20,100-21.001
Sawdust [12]	10.4	-	18,810
Nut Shell [17]	-	25,400	-
Hazelnut Shell [13]	12.54	-	17,360
Pine [17]	-	29,700	-
Eucalyptus [17]	-	30,200	-
Wood [15]	-	-	449,568 kJ/kmol
Wood [5]	-	-	18,700
Wood [3]	20.0	-	18,600
Bark [5]	-	-	16,200
Paper [15]	-	-	454,864
Peat [5]	-	-	19,000
Sugarcane: Bagasse [21]	50.0	-	6,430

Bagasse [6]	20.0	-	20,000
Sugarcane: Top&Trash [21]	50.0	-	6,820
Sugarcane: Top [6]	11.0	-	15,800
Cherry Stone [17]	-	30,200	-
Vine Pruning [17]	-	26,900	-
Almond Shelf [17]	-	21,100	-
Bituminous Coal [5]	-	-	31,800
Bituminous Coal [3]	11.0	-	34,000
Lignite Coal [3]	34.0	-	26,800
Municipal Waste [15]	-	-	433,034 kJ/kmol
Rape Oil [5]	100.0	-	35,800
Olive Waste [16]	-	18,430	-
Ethyl Alcohol [5]	-	-	26,900
Methyl Alcohol [5]	-	-	19,500

หมายเหตุ: MC = ปริมาณความชื้น HHV = ค่าความร้อนสูง LHV = ค่าความร้อนต่ำ

2.1.2 การเปลี่ยนรูปชีวมวล [22]

ในสภาวะปัจจุบันที่ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมมีราคาเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีความต้องการที่จะใช้พลังงานจากชีวมวลมาทดแทนเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณของชีวมวลที่มีการผลิตได้นั้นยังไม่เพียงพอกับความต้องการ ดังนั้นการใช้ชีวมวลจึงควรจะต้องเลือกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับชนิดของชีวมวลและความต้องการตามสภาพท้องถิ่นๆ ซึ่งการนำพลังงานเชื้อเพลิงชีวมวลออกมาใช้โดยเฉพาะในแง่ของความร้อนสามารถกระทำได้หลายวิธี คือ

1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)
2. การใช้ความร้อนสลายโมเลกุล (Thermochemical Conversion) ซึ่งสามารถแบ่งตามกระบวนการได้ 3 วิธี คือ

- 2.1 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)
- 2.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)
- 2.3 กระบวนการลิกวิดแฟกชัน (Liquidfaction)

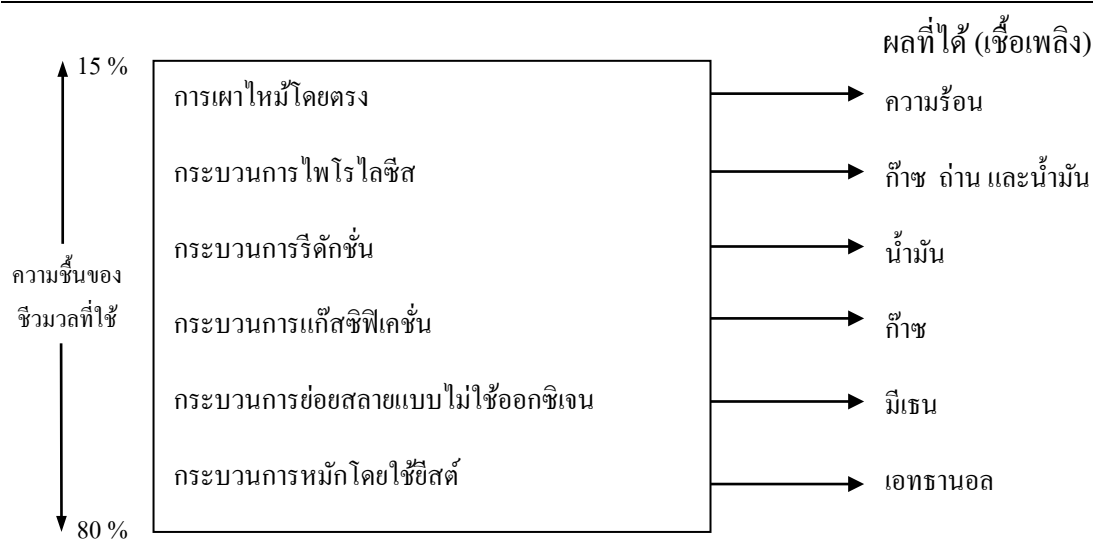
3. การใช้ชีวเคมีสลายโมเลกุล (Biochemical Conversion) ซึ่งสามารถแบ่งตามกระบวนการได้ 2 วิธี คือ

- 3.1 กระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)
- 3.2 กระบวนการหมัก (Yeast Fermentation)

สรุปกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลเมื่อนำมาแปรรูปเป็นพลังงานที่ได้จากกระบวนการที่แตกต่างกันจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัันนั่นเอง โดยผลิตภัณฑ์ของแต่ละกระบวนการแสดงดังตารางที่ 2.4 และตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งของความเหมาะสมในการนำเอาชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานคือ ความชื้น โดยความสัมพันธ์ของความชื้นที่เหมาะสมในการนำเอาชีวมวลมาใช้กับกระบวนการต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.8 และยังแสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ อีกด้วย

ตารางที่ 2.4 กระบวนการเปลี่ยนแปลงชีวมวลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง

กระบวนการ	ผลิตภัณฑ์
ก. กระบวนการที่ใช้ความร้อน	
- กระบวนการเผาไหม้ (Combustion)	CO ₂ H ₂ O เถ้า ความร้อน ไอน้ำ และ ไฟฟ้า
- กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)	ถ่าน น้ำมัน และ ก๊าซ
- กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)	CO และ H ₂
- กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันกับแคเตอร์ไลติก (Gasification + Catalytic Synthesis)	เมทานอล และ ไฮโดรคาร์บอน
ข. กระบวนการที่ใช้ชีวเคมี	
- กระบวนการหมักด้วยยีสต์ (Yeast Fermentation)	เอทานอล และ CO ₂
- กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)	มีเทน และ CO ₂



รูปที่ 2.8 กระบวนการที่เหมาะสมกับความชื้นของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.1.3 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [22]

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน คือ กรรมวิธีการสลายโมเลกุลชีวมวลด้วยความร้อนในเตาผลิตก๊าซ (Gasifier) โดยการเผาวัสดุในที่มีอากาศน้อยหรือจำกัดอากาศ (Gasification by Partial Combustion) และโดยเทคนิคนี้จะทำให้ได้ก๊าซที่มีไนโตรเจนสูงแต่มีค่าความร้อนต่ำประมาณร้อยละ 10 – 15 ของก๊าซธรรมชาติ เราเรียกก๊าซนี้ว่าก๊าซผลิตภัณฑ์ (โปรดิวเซอร์ก๊าซ) โดยก๊าซนี้จะมีส่วนประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 20 – 30 ไฮโดรเจนร้อยละ 5 – 15 ไนโตรเจนร้อยละ 50 – 60 (ได้จากอากาศในเตาเผา) นอกจากนี้ยังมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนอีกเล็กน้อย โดยในสมัยสงครามโลกครั้งที่สองได้มีการนำระบบนี้มาใช้กับรถยนต์และเครื่องยนต์เพื่อทดแทนน้ำมันที่ขาดแคลน

เราอาจจะปรับปรุงคุณภาพของก๊าซโดยใช้ออกซิเจนทดแทนอากาศในเตาผลิตก๊าซ ซึ่งโดยปกติความร้อนที่เกิดขึ้นในโซนที่มีการเผาไหม้ (Combustion Zone) จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนระหว่าง 900–1,300 °C อาจจะมีอุณหภูมิสูงถึง 2,000 °C ขึ้นอยู่กับการออกแบบเตา ก๊าซที่ได้สามารถใช้เป็นความร้อนในกระบวนการ (Process Heat) สำหรับกิจกรรมในโรงงานและเดินเครื่องยนต์ที่ติดตั้งกับที่ ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้งานระบบดังกล่าวในโรงสีข้าว โรงงานแป้งมัน และโรงไฟฟ้าขนาดเล็กในท้องถิ่นทุรกันดาร

สิ่งสำคัญในการใช้ระบบดังกล่าวก็คือเตาผลิตก๊าซจะต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างสม่ำเสมอ เชื้อเพลิงโดยทั่วไปจะมีการสับเป็นชิ้นเล็กๆ และทำให้แห้ง ในกรณีที่ไม่มีเชื้อเพลิงพวกฟืน (Non-Woody Biomass) แต่มีเชื้อเพลิงพวกเศษพืชอาจจะนำมาอัดเป็นแท่งก่อนแล้วจึงใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่วิธีการนี้ทำให้ต้นทุนสูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม การใช้เตาผลิตก๊าซจะต้องระวังอย่าให้เกิดมีการรั่วของก๊าซขึ้น เพราะก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นอันตรายต่อชีวิต

การผลิตก๊าซจากชีวมวลเกิดขึ้นในภาชนะปิดเรียกว่าเตาผลิตก๊าซ (Gasifier) โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ในสถานะจำกัดปริมาณออกซิเจน เรียกว่า Partial Combustion ซึ่งระบบแก๊สซิฟิเคชันสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานในชีวมวลไปเป็นก๊าซได้ 50-70%

2.1.4 ประเภทของแก๊สซิฟิเคชัน [22]

การผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซนั้นเป็นการสมมติให้เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนขณะเกิดการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนควบคู่ไปด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ถ่านคาร์บอนและไอน้ำ ส่วนสารระเหยในเชื้อเพลิงจะไม่นำมาพิจารณา

ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1.1 Oxidative Gasification ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการทำปฏิกิริยา โพรคิวเซอร์ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ $7.45-13.04 \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$

1.2 Air-Blown Gasification ใช้อากาศซึ่งมีออกซิเจนประมาณ 21%Vol. ในการทำปฏิกิริยา โพรคิวเซอร์ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ $2.98-5.59 \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$

1.3 Hydro Gasification ใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา กระบวนการนี้ต้องการความดันสูงและอุณหภูมิประมาณ 750°C โพรคิวเซอร์ก๊าซที่ได้มี CH_4 เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เรียกว่า Synthesis Gas ค่าความร้อนประมาณ $15-20 \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$

การผลิตโพรคิวเซอร์ก๊าซโดยหลักการต้องพิจารณาทั้งจลนศาสตร์และสมดุลเคมี แต่เนื่องจากมีความยุ่งยาก ดังนั้น โดยทั่วไปจะใช้เงื่อนไขสมดุลเคมีเป็นหลักโดยการสมมติให้ปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล (Equilibrium) หมายถึง ขอบเขตสุดท้ายของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยาและระดับอุณหภูมิสูงเพียงพอ

Equilibrium Constant ค่าคงที่สมดุล (K) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินสถานะของปฏิกิริยาและระดับการเข้าใกล้สมดุลซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิโดยตรง องค์ประกอบของโพรคิวเซอร์ก๊าซจะขึ้นอยู่กับระดับการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งจุดสมดุลของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงดังตัวอย่างปฏิกิริยา Boudouard Reaction ในสมการที่ 2.2



ระดับการเกิดปฏิกิริยาจะประเมินได้จากค่าคงที่สมดุล (K_{co}) ซึ่งเป็นอัตราส่วนโมลของโพรคิวเซอร์ก๊าซต่อก๊าซที่ทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.3

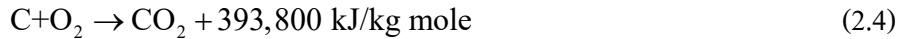
$$K_{co} = \frac{(\text{CO})^2}{(\text{CO}_2)} \quad (2.3)$$

การวิเคราะห์องค์ประกอบและการวัดอุณหภูมิของโพรคิวเซอร์ก๊าซทำให้สามารถทราบสถานะของปฏิกิริยาจากกราฟความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุลกับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่ง K_1 และ K_2 คือ ค่าคงที่สมดุลของ Boudouard Reaction และ Water Shift Reaction ตามลำดับ ในขณะที่ K_3 และ K_4 คือ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยามีเทน

การเข้าสู่ภาวะสมดุลของปฏิกิริยามีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะของ Gasifier ระดับอุณหภูมิและคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง เช่น ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง ขนาดและอัตราส่วนความต่างขนาดของเชื้อเพลิงและความเร็วการไหลของก๊าซ

ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซ (Gasification Reaction) ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญ 4 ปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.10

1. ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นการเผาไหม้ระหว่างสารสองสถานะ (Heterogeneous Reaction) คือ คาร์บอนกับออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้เขียนเป็นสมการ คือ

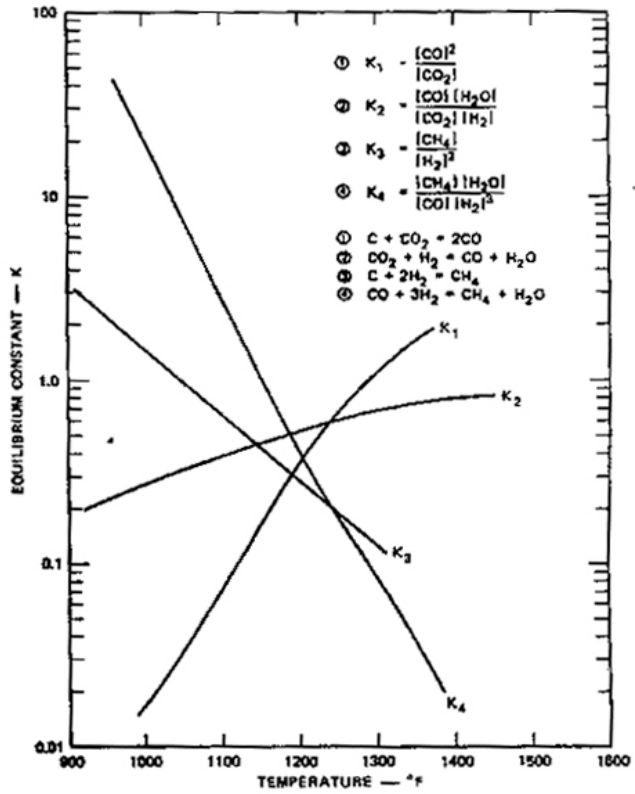


ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (เครื่องหมายบวก) ดังสมการที่ 2.4 เชื้อเพลิงในโซนการเผาไหม้เป็นถ่านที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ถ้าเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คาร์บอนทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

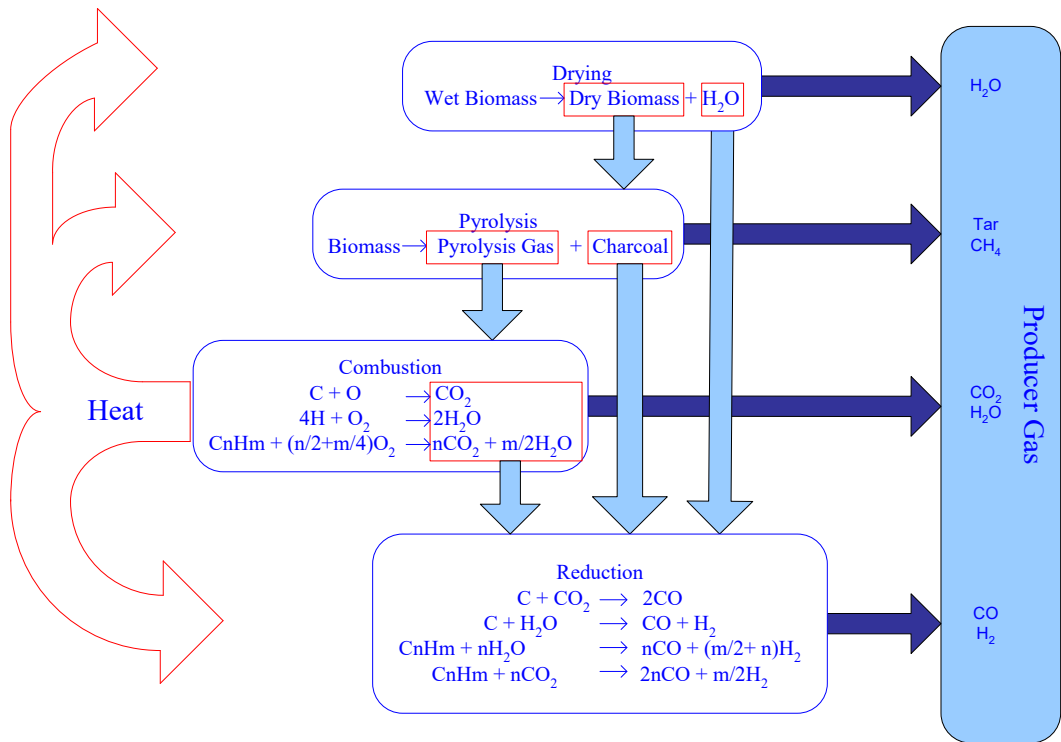
ปฏิกิริยาการเผาไหม้แบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการทางเคมีและกระบวนการถ่ายเทมวล (Mass Transfer) การถ่ายเทมวลโดยการฟุ้งกระจายและการพา (Diffusion and Convection) ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเชื้อเพลิงและการไหลของก๊าซ ขอบเขตของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยปฏิกิริยาการถ่ายเทมวลและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction Rates)

2. Boudouard Reaction เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ดังสมการที่ 2.5 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (เครื่องหมายลบ) การเกิดปฏิกิริยาจะแปรตามระดับอุณหภูมิ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จาก Air-Blown Gasifier ปกติจะต่ำกว่าร้อยละ 35 เนื่องจากข้อจำกัดของปฏิกิริยาการถ่ายเทมวล

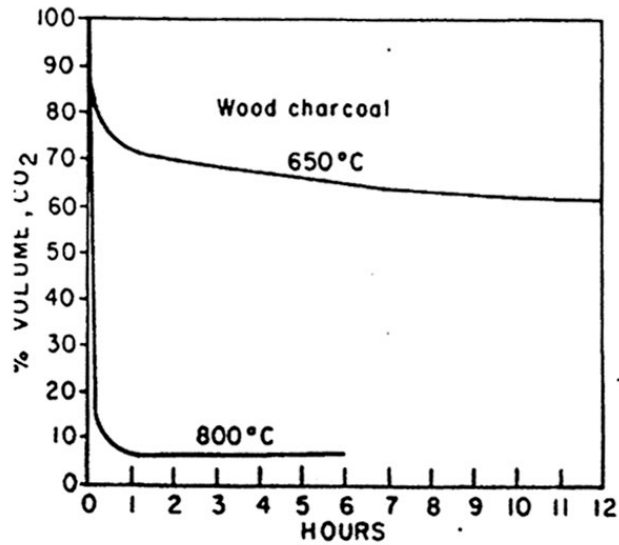
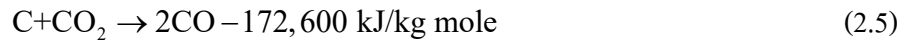
การเข้าสู่สภาวะสมดุลของ Boudouard Reaction มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา (Residence Time) ของคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์และระดับอุณหภูมิดังรูปที่ 2.11 สำหรับถ่านไม้ที่อุณหภูมิ 800 °C ต้องการ Residence Time ประมาณ 1 ชั่วโมง แต่ที่อุณหภูมิ 650 °C ต้องใช้เวลามากกว่า 10 ชั่วโมง ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 2.9 สถานะความสมดุลของปฏิกิริยา [18]



รูปที่ 2.10 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [4]



รูปที่ 2.11 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์

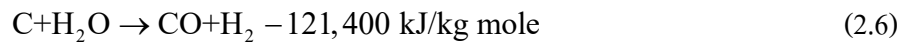
องค์ประกอบโดยเฉลี่ยของโปรคิวเซอร์ก๊าซจากไม้และถ่านไม้ที่สภาวะความดันบรรยากาศปกติแสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งก๊าซที่ผลิตจากไม้ปกติจะมีไฮโดรเจนสูงกว่าแต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่าเนื่องจากไม้มีความชื้นสูงกว่าถ่านแต่มีองค์ประกอบของคาร์บอนน้อยกว่าถ่าน เมื่อความชื้นเกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 900°C จึงเป็นตัวทำให้เกิดไฮโดรเจน

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของโปรคิวเซอร์ก๊าซจากไม้และถ่านไม้ [18]

ก๊าซ	ไม้ (%db)	ถ่านไม้ (%db)
N_2	50-54	60-63
CO	20-22	23-33
CO_2	9-11	3-7
H_2	12-15	4-14
CH_4	2-3	-

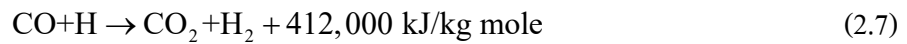
ในระบบเตาแก๊สซิฟิเคชันขนาดใหญ่ Boudouard Reaction จะเข้าใกล้สภาวะสมดุลได้ดีกว่าเตาแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็ก เนื่องจากโชนรีดักชันมีขนาดใหญ่ ดังนั้นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์มีมากขึ้น

3. Water Gas Reaction อากาศประกอบด้วย ออกซิเจน ไอน้ำและก๊าซเฉื่อยต่างๆ ซึ่งถือว่าไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ไอน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอุณหภูมิสูงได้ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน



Water Gas Reaction จะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900°C แต่การผลิตก๊าซในสภาวะความชื้นสูงมีผลให้ปฏิกิริยาลดลงอย่างรวดเร็วและไอน้ำที่ไม่เกิดการสลายตัวจะปะปนอยู่ในโปรดิวเซอร์ก๊าซซึ่งมีผลทำให้ค่าความร้อนลดลง

กรณีไอน้ำในการทำปฏิกิริยาสูงเกินไปจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เรียกว่า Water Shift Reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนดังสมการที่ 2.7 มีผลให้ค่าความร้อนจำเพาะของโปรดิวเซอร์ก๊าซลดลง



ถ้าไอน้ำสูงมากจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อุณหภูมิประมาณ $500\text{-}600^\circ\text{C}$ ดังสมการที่ 2.8 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา จึงมีผลให้อุณหภูมิภายในเตาแก๊สซิฟิเคชันลดลง



4. ปฏิกิริยาผลิตมีเทน คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดมีเทน ดังสมการที่ 2.9 จะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C เป็นต้นไป แต่ในสภาวะความดันบรรยากาศปกติโอกาสเกิดมีเทนเป็นไปได้ค่อนข้างน้อย



ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนมีโอกาสเกิดมีเทนเช่นกันดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งโอกาสเกิดขึ้นจะสูงกว่าปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน



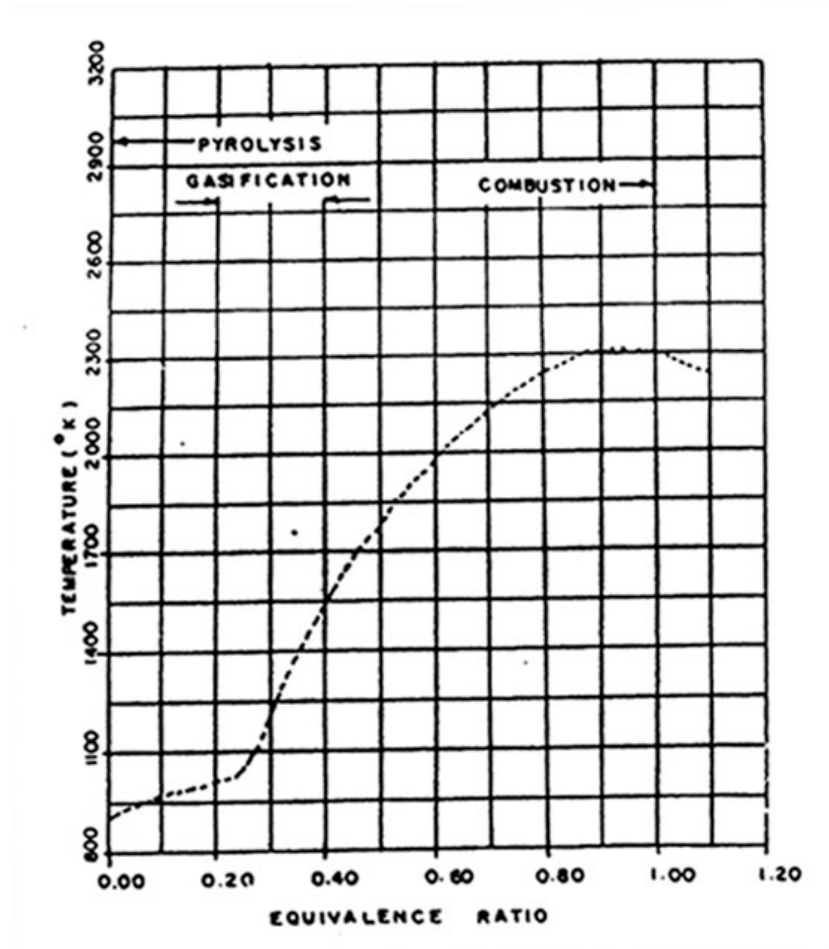
มีเทนเกิดขึ้นน้อยมากและโอกาสจะเกิดขึ้นในโปรคิวเซอร์ก๊าซมากกว่าไซนริคค์ชั้นแต่ถ้าคาร์บอนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า $1,000^\circ\text{C}$ ที่ระดับความดันบรรยากาศจะไม่เกิดมีเทน ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนที่เหมาะสมจะต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความดันสูงแต่มีอุณหภูมิต่ำ

ปฏิกิริยาที่กล่าวมาเป็นปฏิกิริยาหลัก ไม่ได้เป็นผลจากปฏิกิริยาการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซทั้งหมด ผลิตภัณฑ์จากโปรคิวเซอร์ก๊าซมีมากกว่า 200 ชนิด อาจมีการทำปฏิกิริยากันอย่างอิสระของผลิตภัณฑ์ในชั้นอื่นๆ ได้ การประเมินค่าโปรคิวเซอร์ก๊าซโดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงและอากาศโดยสมมติเงื่อนไขในสภาวะสมดุลคลาดเคลื่อนได้ง่าย โดยปกติการวิเคราะห์จะอ้างอิงอุณหภูมิและ Equivalent Ratio เป็นสำคัญ

4. Equivalent Ratio, *ER* การเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยอ้างอิง Equivalent Ratio แสดงดังสมการที่ 2.12

$$ER = \frac{(\text{Weight of Oxidation/Weight of Dry Fuel})}{(\text{Oxidation/Fuel (Stoicheometric Weight Ratio)})} \quad (2.12)$$

ER มีผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์ก๊าซ โดยปกติพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ อุณหภูมิเปลว (Adiabatic Flame Temperature) *ER* และอุณหภูมิมิผลต่อพลังงานเคมีและ Sensible Energy ของ โปรคิวเซอร์ก๊าซ ค่า *ER* ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตก๊าซที่สภาวะ Steady State อยู่ระหว่าง 0.2-0.4 ซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial Combustion) กรณี *ER* = 1.0 จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete Combustion) อุณหภูมิเปลวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.12 โดยจะเกิดความผิดปกติขึ้นในเตาแก๊สซีไฟเออร์สำหรับการผลิตก๊าซจากไม้ ค่า *ER* = 0.255 จะเป็นสภาวะที่เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด



รูปที่ 2.12 อัตราส่วนเทียบเท่าและอุณหภูมิเปลวของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไม้ [18]

การปรับค่า ER ในทางปฏิบัติทำได้ 2 วิธี คือ การปรับอัตราการป้อนอากาศและการเปลี่ยนขนาดท่ออากาศเข้าสู่โซนการเผาไหม้ ทั้งสองวิธีจะทำให้ขนาดโซนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial Combustion Zone) เกิดการขยายตัวและหดตัวตามปริมาณอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เปลี่ยนแปลง จึงทำให้ระดับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้น อุณหภูมิในโซนการเผาไหม้จึงแปรตามค่าของ ER

5. คุณสมบัติเชื้อเพลิง (Fuel Properties) การผลิตก๊าซจาก Lignocelulosic หรือ Carbonaceous ประเภทต่าง ๆ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเพื่อสามารถเลือกใช้รูปแบบการผลิตก๊าซและชนิดเตาผลิตก๊าซที่เหมาะสม องค์ประกอบเชื้อเพลิงที่ควรพิจารณาประกอบด้วย

1. Energy Content กระบวนการเคมีในเตาแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการความดันคงที่ และต้องการพลังงานในการระเหยความชื้น การคำนวณค่าพลังงานจำเพาะของเชื้อเพลิงได้จากสมการที่ 2.13

$$\text{Heating Value, kJ/kg} = -8,419.7 + 479.3C + 667.6H + 58.8O - 1,207.7S \quad (2.13)$$

เมื่อ C H O และ S คือ ร้อยละของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ

2. Moisture Content ความชื้นในเชื้อเพลิงมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของ โพรคิวเซอร์ก๊าซ โดยต้องใช้ความร้อนประมาณ 2,283 kJ/kgH₂O ในการระเหยความชื้นที่อุณหภูมิระหว่าง 200-225 °C

3. Fuel Size มีผลต่อค่าความดันตกคร่อมในเตาแก๊สซิไฟเออร์ซึ่งการผลิตก๊าซต้องการให้อากาศสัมผัสกับผิวเชื้อเพลิงมากที่สุดเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซ (Gasification Rate) และเพิ่มความเร็วของปฏิกิริยา ขนาดเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการไหลผ่านของออกซิเจนและการไหลเลื่อนใน Fuel Hopper

4. Fuel Form มีผลต่อ Bulk Density ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาตรของ Fuel Hopper เชื้อเพลิงที่มีรูปร่างเป็นแท่งกลมจะลดการเกิดการยึดเกาะตัวกัน ทำให้การไหลเลื่อนของชีวมวลในเตาผลิตก๊าซดีขึ้น

5. Bulk Density ขึ้นอยู่กับรูปร่างเชื้อเพลิงซึ่งมีผลต่อระยะเวลาที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาในโซนการเผาไหม้ความเร็วในการไหลเลื่อน ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงและอัตราการไหลของก๊าซ Bulk Density ของเชื้อเพลิงบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งฟางข้าวจะมีค่า Bulk Density ต่ำมาก ต้องปรับปรุงโดยการอัดแท่งก่อนนำมาใช้เพื่อความสะดวกและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น

6. Volatile Matter สารระเหยจะถูกขับออกจากเชื้อเพลิงในโซนไพโรไลซิสที่อุณหภูมิระหว่าง 100-600 °C ปริมาณสารระเหยสูงจะมีปัญหาน้ำมันดินและน้ำมันซึ่งปะปนอยู่ในโพรคิวเซอร์ก๊าซและจะกลั่นตัวที่อุณหภูมิ 120-150 °C

7. Ash องค์ประกอบของเถ้ามีผลต่อการทำงานและการเลือกรูปแบบของเตาผลิตก๊าซสำหรับเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง ปริมาณเถ้าไม่ควรมีค่าสูงกว่า 6%wt. เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงในโซนการเผาไหม้จะทำให้เถ้าเกิดการหลอมละลายเกิดเป็นน้ำแฉะ (Slagging)

8. Ultimate Analysis คุณสมบัติของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนรวม (Total Carbon) สูงจะผลิตก๊าซที่มีน้ำมันดินต่ำเนื่องจากสัดส่วนสารระเหยต่ำนั่นเอง

ตารางที่ 2.6 ความหนาแน่นบรรจุ (Bulk Density) ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ [22]

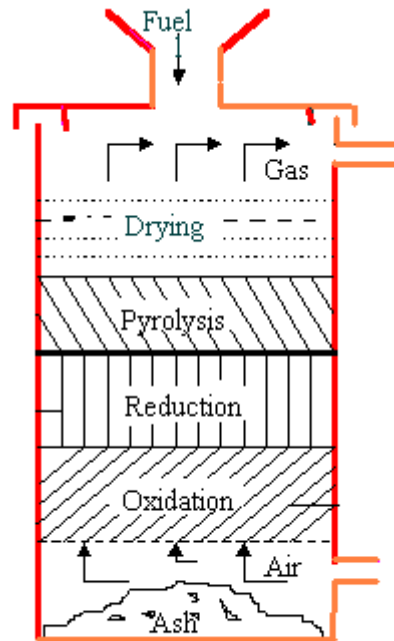
ชนิดเชื้อเพลิง	คุณภาพ	ความหนาแน่นบรรจุ (kg/m ³)
Sawdust	ทั่วไป	177
	อัดแท่ง	555
Charcoal	Beech	210-230
	Birch	180-200
Wood	ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood)	330
	ไม้เนื้ออ่อน (Softwood)	250
Rice Straw	ทั่วไป	80
	มัดเป็นฟ่อน	320

2.1.5 เตาผลิตก๊าซ [22]

การผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซจากชีวมวลเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีของสารสองสถานะ คือ ของแข็งกับก๊าซ และสารสถานะเดียวกันคือก๊าซกับก๊าซรวมอยู่ด้วย โดยอากาศซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเป็นสารทำปฏิกิริยาเริ่มต้น เตาผลิตก๊าซสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์หรือกระบวนการทางความร้อน แบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1. เตาผลิตก๊าซเบดหยุดนิ่ง (Fixed Bed Gasifier) เชื้อเพลิงภายในเตาแก๊สซิไฟเออร์มีตัวรองรับ เช่น ตะแกรง จึงเปรียบเสมือนอยู่กับที่ตลอดเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับการไหลของก๊าซหรืออากาศ เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบหยุดนิ่งแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงได้ 3 ชนิด

1.1 เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขึ้น (Updraft Gasifier) โดยอากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างไหลขึ้นด้านบนในขณะที่เชื้อเพลิงจะเคลื่อนลงด้านล่างซึ่งลักษณะสวนทางกัน จึงอาจเรียกอีกชื่อว่า Counter Current Gasifier แสดงดังรูปที่ 2.13 ชั้นของปฏิกิริยาจะแบ่งเรียงเป็นลำดับจากระดับอุณหภูมิสูงในโซนการเผาไหม้ไปสู่อุณหภูมิต่ำในโซนอบแห้ง



รูปที่ 2.13 เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขึ้น

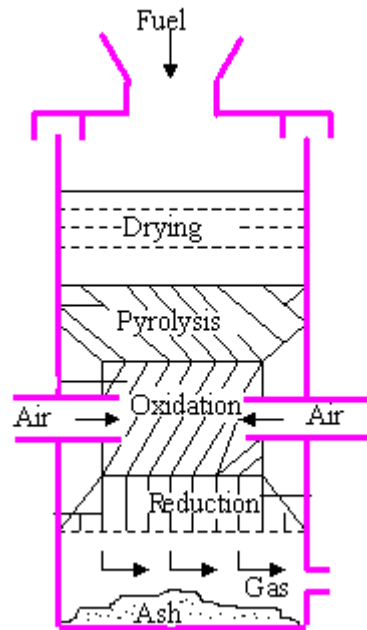
เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขึ้นมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงเนื่องจากก๊าซร้อนที่เกิดจากโซนการเผาไหม้ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิง ความร้อนสัมผัสจะถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิงก่อนไหลลงสู่โซนรีดักชันและโซนไฟโรไลซิสต่อไป ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไฟโรไลซิสและการอบแห้งจะปะปนอยู่ในโปรคิวเซอร์ก๊าซ และเมื่อออกจากเตาผลิตก๊าซอุณหภูมิโปรคิวเซอร์ก๊าซจะลดลง น้ำมันดินและ Oil จะกลั่นตัวเป็นของเหลว ดังนั้นโปรคิวเซอร์ก๊าซจึงมีสิ่งปนเปื้อนสูง

การผลิตก๊าซโดยเตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขึ้นอาจจะป้อนน้ำเข้าไปช่วยในการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนและช่วยควบคุมอุณหภูมิโซนการเผาไหม้กรณีเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงไม่จำเป็นต้องป้อนไอน้ำ พารามิเตอร์สำคัญประกอบด้วย วิธีการป้อนอากาศ ตำแหน่งก๊าซไหลออก ชนิดและขนาดของตะแกรง การบุนนวนในโซนการเผาไหม้ ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง และค่า Specific Gasification Rate (*SGR*)

SGR หมายถึง อัตราส่วนปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาผลิตก๊าซในเวลา 1 ชั่วโมง (kg/hr) ต่อพื้นที่หน้าตัดของตะแกรง (m^2) ขึ้นอยู่กับชนิดเชื้อเพลิง การออกแบบและการทำงานของเตาแก๊สซิไฟเออร์ค่า *SGR* ของเตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขึ้นอยู่ระหว่าง $100\text{-}300 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}^2$

1.2 เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลลง โดยอากาศไหลลงทิศทางเดียวกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงจึงอาจเรียกว่า Co-Current Gasifier เตาชนิดนี้มีจุดประสงค์ให้ผลิตภัณฑ์จากโซนไฟโรไล

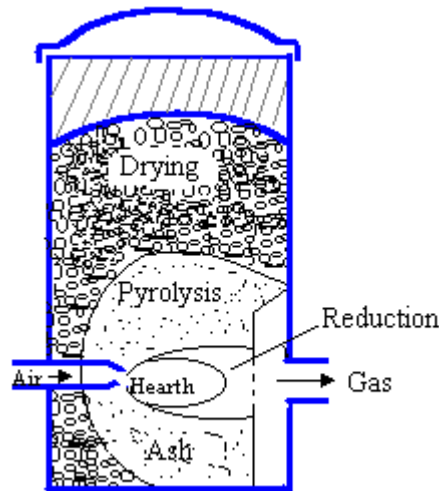
ชีสไหลผ่าน โชนการเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นก๊าซก่อนที่จะไหลออกจากเตาผลิตก๊าซ ดังรูปที่ 2.14 โพรคิวเซอร์ก๊าซจึงมีน้ำมันดินต่ำแต่มีอุณหภูมิสูง 300-500°C ลักษณะเด่นของเตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลลงอยู่ที่ โชนการเผาไหม้รูปแบบของตะแกรงและวิธีการป้อนอากาศ



รูปที่ 2.14 เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลลง

วิธีการป้อนอากาศและรูปร่างของ โชนการเผาไหม้ที่เล็กลงโดยการลดพื้นที่หน้าตัด ตำแหน่งป้อนอากาศเพื่อให้อุณหภูมิมีค่าสูงเพียงพอในการสลายน้ำมันดินเชื้อเพลิงที่มีเถ้าสูงกว่า 6% และความชื้นสูงกว่า 20% ไม่เหมาะสมกับเตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลลง เนื่องจากเถ้าอาจจะหลอมละลายติดกับคอคอดขัดขวางการไหลของเชื้อเพลิงและก๊าซ อัตราผลิตก๊าซที่เหมาะสมมีค่า SGR 2,900-3,900 kg/hr · m²

1.3 เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขวาง เป็นระบบที่อากาศไหลในทิศทางขวางกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงดังรูปที่ 2.15 ลักษณะชั้นปฏิกิริยาโดยเฉพาะ โชนการเผาไหม้และ โชนรีดักชันจะอยู่ใกล้ชิดกันมาก ดังนั้นจะสามารถผลิตก๊าซได้อย่างรวดเร็วและแปรผันได้ง่าย ปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเตาผลิตก๊าซ แต่ขอบเขตของการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้นเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้น

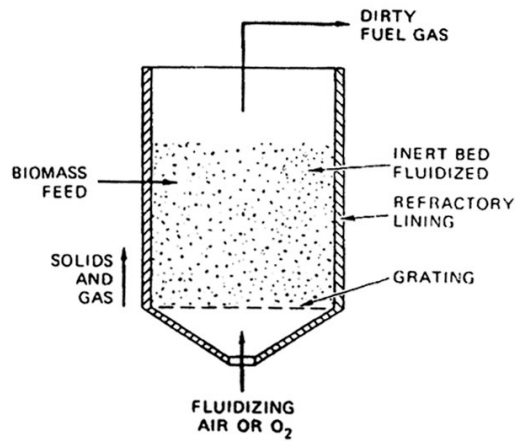


รูปที่ 2.15 เตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขวาง

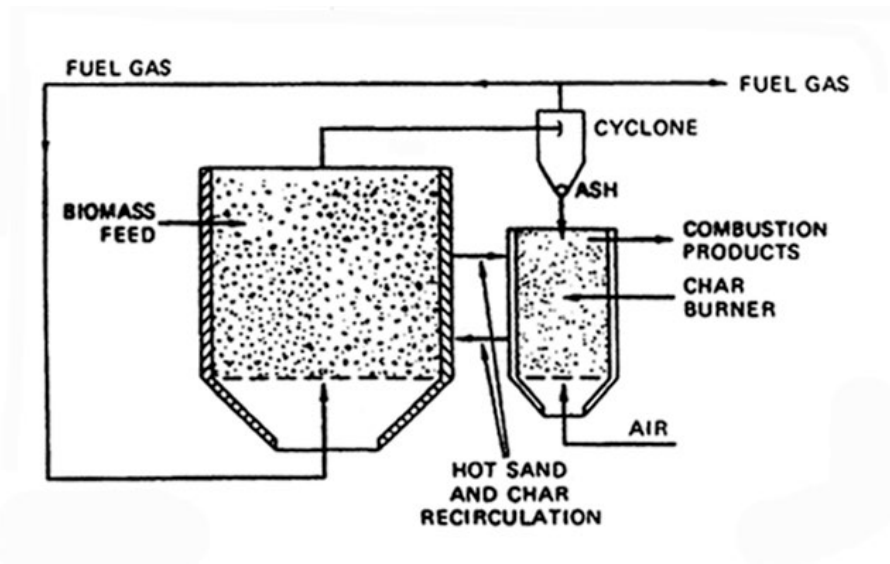
จุดสำคัญของเตาผลิตก๊าซแบบอากาศไหลขวาง คือ การออกแบบรูปร่างของ Tuyeres ซึ่งมีความสำคัญต่อความเร็วอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาและขอบเขตของโซนการเผาไหม้ซึ่งปกติความเร็วอากาศจะมีค่าสูงและเกิดอุณหภูมิการเผาไหม้สูง โปรคิวเซอร์ก๊าซที่ออกจากเตาผลิตก๊าซมีอุณหภูมิสูงและสิ่งปนเปื้อนสูง โดยปกติโซนนี้นักชนมีขนาดเล็กจึงทำให้ Residence Time สั้น การเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างต่ำ ดังนั้น โปรคิวเซอร์ก๊าซจะมีค่าความร้อนต่ำ แต่เมื่อป้อนอากาศที่ความเร็วสูงมากจะมีผลต่อองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์ก๊าซ โดยอัตราการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเข้าไปสู่ภาวะสมดุล

2. เตาผลิตก๊าซแบบพ่นฝอยมีรูปแบบและความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงบางชนิด เช่น เชื้อเพลิงมีขนาดเล็กโดยธรรมชาติ มีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณของเถ้าสูงและอุณหภูมิการหลอมเหลวของเถ้าต่ำ ในระบบเตาผลิตก๊าซแบบพ่นฝอยการสัมผัสระหว่างอากาศ สารตัวกลาง (Bed) กับ เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นสามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ $800-900^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้

เตาผลิตก๊าซแบบพ่นฝอยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้สำรอง ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ ในสถานะการทำงานแบบสถานะคงตัว (Steady State) อุณหภูมิของสารตัวกลาง เช่น ทราย ถ่านหรือวัสดุอื่นๆ จะมีการกระจายสม่ำเสมออย่างทั่วถึง การเผาไหม้และการผลิตก๊าซจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับสถานะการพ่นฝอยของสารตัวกลาง แต่เนื่องจากเตาผลิตก๊าซแบบพ่นฝอยต้องการอากาศที่ความเร็วสูง ดังนั้น เกิดการสูญเสียเชื้อเพลิงไปกับอากาศบางส่วนและ โปรคิวเซอร์ก๊าซจะมีอุณหภูมิสูง



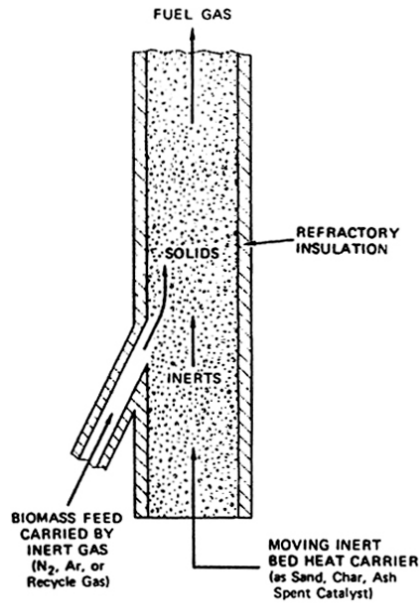
รูปที่ 2.16 เตาผลิตก๊าซแบบฟ้นฝอยโดยตรง [22]



รูปที่ 2.17 เตาผลิตก๊าซแบบฟ้นฝอยในห้องเผาไหม้ [22]

3. เตาผลิตก๊าซแบบหมุนวน (Entrained Bed Gasifier) หรืออาจเรียกว่า Moving Bed Gasifier เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง การทำงานในการถ่ายเทความร้อนคล้ายกับเตาผลิตก๊าซแบบฟ้นฝอย โดยปกติควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $482-593^{\circ}\text{C}$

เตาผลิตก๊าซแบบหมุนวนมีประสิทธิภาพสูงในการทำปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับก๊าซ ลักษณะเชื้อเพลิงที่เหมาะสม เช่น ผงถ่านหินและชีวมวลที่มีขนาดเล็กๆ การทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเกิดขึ้นในช่องปฏิกิริยาแบบหมุนวน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เตาผลิตก๊าซแบบหมุนวน [22]

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7 ซึ่งได้แสดงลักษณะของข้อดี-เสียของเตาผลิตก๊าซชีววมวล ส่วนตารางที่ 2.8 เป็นการสรุปลักษณะและส่วนประกอบของก๊าซชีววมวลที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.7 สรุปลักษณะของเครื่องผลิตก๊าซชีววมวลแต่ละแบบ [15]

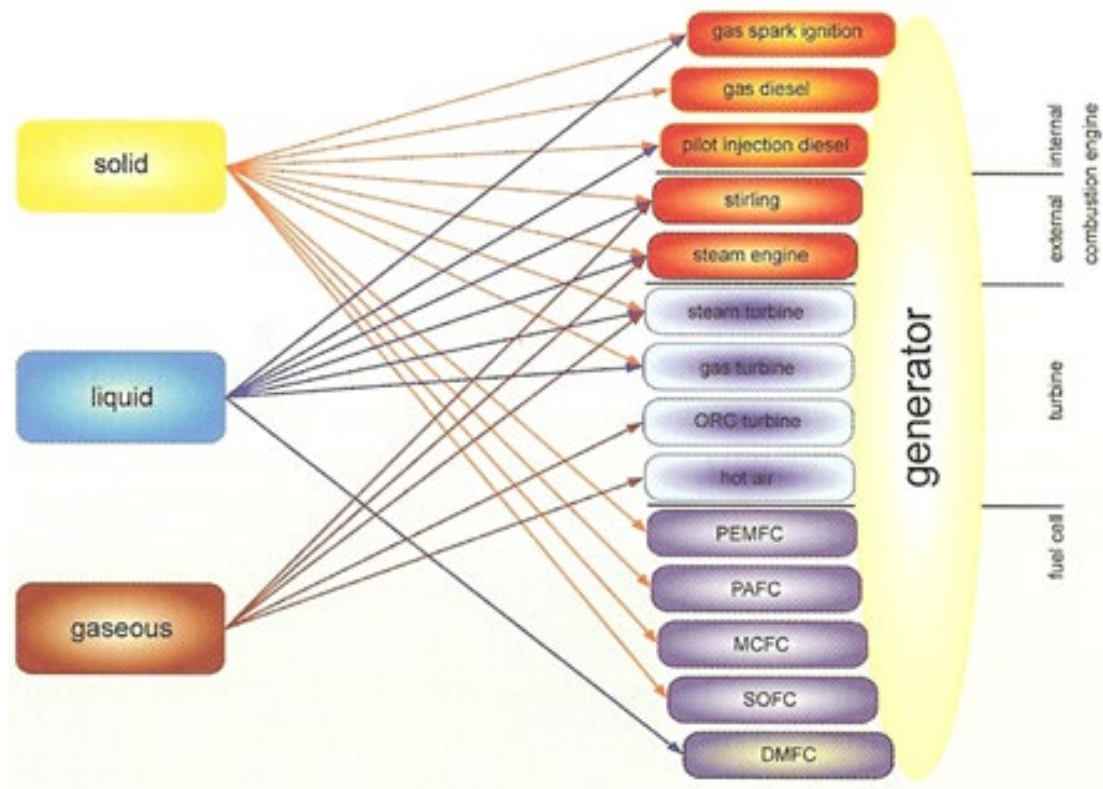
ข้อดี (Advantages)	ข้อด้อย (Disadvantages)
<p>Fixed/Moving Bed, Updraft</p> <ul style="list-style-type: none"> - มีโครงสร้างแบบง่าย ไม่สลับซับซ้อน - อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งทางออก ประมาณ 250 °C - ทำงานได้ดีภายใต้ความดันที่ไม่สูง - การเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมีประสิทธิภาพสูง - มีฝุ่นผงจำนวนเล็กน้อยผสมอยู่ในก๊าซ - มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - มีปริมาณ น้ำมันดิน (Tar) มาก - เชื้อเพลิงชีววมวลต้องมีขนาดเล็กๆ - สักยภาพการผสมผสานน้อย
<p>Fixed/Moving Bed, Downdraft</p> <ul style="list-style-type: none"> - มีกระบวนการอย่างง่าย - มีปริมาณ น้ำมันดิน (Tar) น้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ำ - มีขอบเขตของจีเอ็นในเชื้อเพลิงชีววมวล - มีขอบเขตของการเพิ่มให้มีความใหญ่ขึ้น - สักยภาพการผสมผสานต่ำ

Fluidized Bed - สามารถปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอาจจะมีขี้เถ้าได้ - สามารถทำงานภายใต้ความดันสูงได้ - มีก๊าซมีเทน (CH ₄) อยู่ในก๊าซชีวมวลสูง - มีประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสูง - สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย	- มีขอบเขตของอุณหภูมิอันเนื่องมาจาก Ash Clinkering - ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิสูง - มีปริมาณน้ำมันดิน (Tar) และอนุภาคขนาดเล็ก ในก๊าซชีวมวลสูง - มีปริมาณของคาร์บอน (C) อยู่ในขี้เถ้าสูง
Circulating Fluidized Bed - มีขบวนการที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่าย - อุณหภูมิการทำงานสูงถึง 850 °C	- มีปัญหาในเรื่องการฟุกร้อน - มีการควบคุมการทำงานที่ไม่ดีเมื่อใช้กับเชื้อเพลิง ชีวมวล
Double Fluidized Bed - ไม่จำเป็นต้องมีออกซิเจน - มีปริมาณมีเทนสูง	- มีปริมาณน้ำมันดิน (Tar) มาก เมื่อเบดมีอุณหภูมิ ต่ำ - ยุ่งยากในการปฏิบัติภายใต้ความดัน
Entrained Bed - มีปริมาณน้ำมันดินและคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมาก - สามารถเก็บปริมาณเชื้อเพลิงได้ง่าย	- มีก๊าซมีเทนต่ำ - มีระบบการควบคุมที่ยุ่งยาก - มีการสูญเสียคาร์บอนเนื่องจากขี้เถ้า - เกิด Slag ของขี้เถ้า (Ash Slagging)

ตารางที่ 2.8 ส่วนประกอบของก๊าซชีวมวลจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบต่างๆ [16]

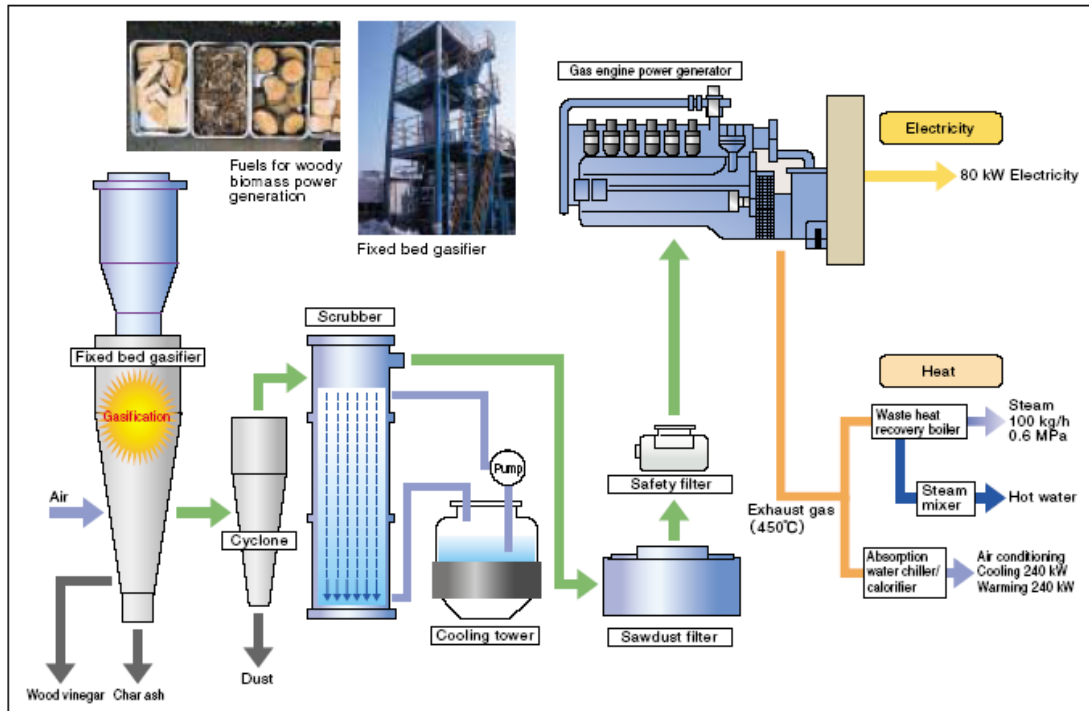
ชนิดของเตาผลิตก๊าซ	ส่วนประกอบของก๊าซชีวมวล (% โดยปริมาตร)					HHV MJ/m ³	คุณภาพก๊าซ	
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂		น้ำมันดิน	ฝุ่นผง
Fluid bed , air-blown	9	14	20	7	50	5.4	ปานกลาง	แย่มาก
Updraft, air-blown	11	24	9	3	53	5.5	แย่มาก	ดี
Downdraft, air-blown	17	21	13	1	48	5.7	ดี	ปานกลาง
Downdraft, air- oxygen	32	48	15	2	3	10.4	ดี	ดี
Multi-solid fluid bed,	15	47	15	23	0	16.1	ปานกลาง	แย่มาก
Twin fluid bed	31	48	0	21	0	17.4	ปานกลาง	แย่มาก

การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซสามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกันแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบของของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ผ่านกระบวนการต่างๆ [1]

การนำเอาก๊าซชีวมวลมาใช้เป็นเสมือนน้ำมันก๊าซโซลีนซึ่งอาศัยหลักการโดยการอัดไอดี (ไอดีคือส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง โดยปกติแล้วจะมีอัตราส่วนอยู่ที่ 8-14:1) ให้มีความดันสูง หลังจากนั้นก็ใช้ประกายไฟจากหัวเทียนเป็นตัวจุดระเบิด ปล่อยพลังงานจากการระเบิดไปผลักดันให้หัวลูกสูบเลื่อนลงมาแล้วถ่ายทอดพลังงานไปยังเพลลาซึ่งต่อร่วมกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ หลักการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบแก๊สซิฟิเคชัน แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การผลิตไฟฟ้าจากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

2.1.6 ข้อดีของการใช้เครื่องยนต์ก๊าซ

ข้อดีของการใช้เครื่องยนต์ก๊าซในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

1. เทคโนโลยีของเครื่องยนต์ได้รับการพัฒนามานานแล้ว สามารถดัดแปลงใช้กับโปรคิวเซอร์ก๊าซได้เลย
2. กลไกของเครื่องยนต์ไม่ยุ่งยากและสามารถนำมาใช้สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก (50 - 200 kW) ได้
3. โดยปกติแล้วประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 600 kW จะอยู่ที่ 38% ซึ่งสูงกว่าการใช้กังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ 20% ในการผลิตไฟฟ้าที่ขนาดเท่ากัน

2.1.7 ปัญหาในการใช้เครื่องยนต์ก๊าซ

อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยเครื่องยนต์มีข้อเสียบางประการดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษาจะสูงกว่าการใช้กังหันไอน้ำ (Steam Turbine) และ กังหันก๊าซ (Gas Turbine)

2. เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้สูง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน NO_x ซึ่ง ออกไซด์ของไนโตรเจนเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดมะเร็ง
3. การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เนื่องมาจากลักษณะของเครื่องยนต์ทำให้ปล่อยไอเสียออกมา
4. ระหว่างผนังกระบอกสูบและผิวด้านข้างของลูกสูบจำเป็นต้องมีการหล่อลื่น ซึ่งในระหว่างการเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นนี้จะระเหยและเผาไหม้ออกมาพร้อมกับไอเสียด้วย
5. ปัญหาซึ่งเกิดมาจากปริมาณของน้ำมันดินที่ผสมอยู่ในก๊าซชีววมวล ซึ่งน้ำมันดินจะไม่เผาไหม้แต่จะรวมตัวกันเป็นยางเหนียว ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ลดลง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องภายในประเทศ

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซจะมีแนวทางการศึกษาและวิจัยหลากหลาย เช่น การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซ การทดลองผลิตก๊าซในเชื้อเพลิงสำหรับติดเครื่องยนต์ที่สันดาปภายในเพื่อเป็นต้นกำลังหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตก๊าซเพื่อใช้ในการผลิตเซรามิกส์และการอบแห้งใบชา ผลงานวิจัยเหล่านี้จะกล่าวโดยสังเขป ดังนี้

สุริย์ จรูญศักดิ์ [23] ศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากโปรคิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตจากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลงขนาด 0.28 m^3 ผลิตความร้อนได้สูงสุด 82 MJ/hr ระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาเซรามิกส์ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) การทดลองผลิตก๊าซที่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน แบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 1.0×10^{-3} 3.0×10^{-3} $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (ที่ 30°C 1 atm) โดยมีค่าความร้อนสูง (HHV) ของโปรคิวเซอร์ก๊าซและปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ย 3.13 3.26 3.52 $\text{MJ/N} \cdot \text{m}^3$ และ 20.99% 22.12% 25.60% ตามลำดับ (2) การทดลองผลิตก๊าซเพื่อใช้ในการเผาเซรามิกส์แบ่งออกเป็น 3 การทดลองคือ การเผาดิบ การเผาเคลือบ และการเผาแกร่ง ผลการทดลองเผาดิบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 800°C โดยใช้เวลา 480 นาที หลังการเผามีความแข็งแรงสามารถนำไปชุบเคลือบต่อไปได้ ผลการเผาเคลือบที่อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ $1,102^\circ\text{C}$ โดยใช้เวลาเผา 540 นาที เซรามิกส์ที่ได้มีลักษณะเนื้อดินหดรตัวมีขนาดตามต้องการแต่ผิวเคลือบมีลักษณะด้านไม่เปลี่ยนสภาพเป็นเนื้อแก้ว เนื่องจากอุณหภูมิสุดท้ายต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำเคลือบเซรามิกส์ (Under Firing) ผลการเผาแกร่งใช้เวลาเผา ที่อุณหภูมิสุดท้าย $1,030^\circ\text{C}$ 540 นาที เซรามิกส์ที่ได้มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับเซรามิกส์ที่ได้จากโรงงานแต่ความชัดเจนของสีลายกระที่ผิวเนื้อดินน้อยกว่า ส่วนการทดลองเผาที่อุณหภูมิ $1,110^\circ\text{C}$ เซรามิกส์ที่ได้จะหดรตัวจนมีขนาดเล็กกว่าเซรามิกส์จากโรงงาน

วิทยา จงเจริญ และ บุญเลี้ยง ชิมศรีสกุล [24] ทำการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซเพื่อที่จะใช้ในการเดินเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน โดยเผาไหม้ถ่านไม้ในเตาที่มีอากาศจำกัดได้โปรคิวเซอร์ก๊าซที่มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณร้อยละ 20-30 จากนั้นให้โปรคิวเซอร์ก๊าซไหลผ่านเครื่องทำความสะอาดก๊าซ เครื่องหล่อเย็นแล้วผสมกับอากาศป้อนเข้าไปในเครื่องยนต์ขนาด 1,300 cc 4 จังหวะ 4 สูบ พบว่าเมื่อเครื่องยนต์ทำงานโดยอาศัยพลังงานจากโปรคิวเซอร์ก๊าซอย่างเดียวและที่ความเร็วรอบ 1,330 rpm ในสภาวะที่ไม่มีภาระในการทำงานจะใช้ถ่านไม้ 1.5 kg แทนน้ำมัน 1 ลิตร ได้

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน [25] ได้ศึกษาเตาเผาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ที่นำเข้ามาจากประเทศจีน รุ่น RSL-I-8 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพความร้อนของเตาผลิตก๊าซและความเป็นไปได้ในการนำความร้อนจากเตาผลิตก๊าซนี้ไปใช้กับอุตสาหกรรมชนบทของไทย โดยทำการทดสอบด้วยการใช้เชื้อเพลิงแข็ง 4 ชนิด คือ ไม้พิน ช้างข้าวโพด แกลบอัดแท่งและจี้เลื่อยอัดแท่ง ผลการทดสอบพบว่าไม้พินและช้างข้าวโพดให้คุณภาพก๊าซจากเตาเผา ซึ่งมีประสิทธิภาพความร้อนในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงประมาณ 70-80% และความร้อนที่ได้ออกมาประมาณ 100,439 kcal/hr ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำความร้อนจากเตาผลิตก๊าซนี้มาปรับปรุงและนำไปใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมชนบทของประเทศไทยที่เกี่ยวกับการใช้ความร้อน อาทิเช่น การอบเมล็ดพันธุ์พืชและการอบยาง เป็นต้น

บวรพรรณ คติการ [26] ออกแบบสร้างเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลงโดยใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาความเหมาะสมการทำความสะดวกโปรคิวเซอร์ก๊าซโดยใช้วัสดุทรง 5 ชนิด ประกอบด้วย ไนลอน แกลบ ไฟเบอร์กลาส ฝ้าดิบ และสำลี โดยพิจารณาประสิทธิภาพในการกักก๊าซที่ผลิตได้ การทดลองกำหนดความเร็วอากาศเฉลี่ย 0.65 m/s และ 2.5 m/s โดยป้อนอากาศเข้าโชนการเผาไหม้ตรงกลางจากด้านบนจุดเดียวจากการทดลองพบว่า แกลบเป็นวัสดุทรงที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บฝุ่นสูงที่สุด เฉลี่ย 98% การสูญเสียความดันต่ำสุด 0.5-1.5 cm น้ำส่วนในลอนมีประสิทธิภาพต่ำสุดจากการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบก๊าซ พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์แปรค่าตามความเร็วอากาศโปรคิวเซอร์ก๊าซประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ 12.3-22.6% คาร์บอนไดออกไซด์ 7.6-12.5% น้ำ 12-22.9%

วิภาวรรณ แสงสง่า [27] ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเซรามิกส์โดยใช้พลังงานความร้อนที่ได้จากเตาก๊าซซีไฟเออร์แบบ Updraft และ Downdraft ซึ่งเตาก๊าซซีไฟเออร์แบบ Downdraft เคยมีผู้ทดลองทำมาก่อนหน้านี้ โดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงศึกษาเตาก๊าซชนิดไหลขึ้นขนาด 0.309 m³ ทดลองผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซที่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน 3 ระดับคือ 3.0x10³ 4.0x10³ และ 5.0x10³ m³/s (ที่ 30 °C 1 atm) โดยมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นดังนี้ 26.79 31.78 29.55% และมีค่าความร้อนสูง (HHV) 4,072.32 4,391.87

3,857.35 kJ/N·m³ ตามลำดับ จะเห็นว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 4.0×10^{-3} m³/s เหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ การทดลองผลิตก๊าซเผาเซรามิกส์แบ่งออกเป็น 3 การทดลองคือ การเผาดิบ การเผาเคลือบการเผาแกร่งเป็นดังนี้ ผลการทดลองเผาดิบเตาผลิตก๊าซทั้งชนิดไหลขึ้นและชนิดไหลลงจะได้เซรามิกส์ที่มีคุณภาพสามารถนำไปชุบเคลือบได้ ผลการทดลองเผาเคลือบที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลขึ้นและไหลลง อุณหภูมิสุดท้ายที่ทำได้คือ 1,185.6 °C และ 1,102 °C ระยะการเผา 600 และ 540 นาที ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลขึ้นนั้นมีลักษณะรูปร่างและสีเช่นเดียวกับโรงงานผลิตเซรามิกส์ ส่วนเซรามิกส์ที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลงจะมีลักษณะ Under Firing ผลการทดลองเผาแกร่งชนิดไฟเดียวได้ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับเซรามิกส์ที่เผาโดยโรงงานแต่แตกต่างกันที่สีเนื้อดิน แสดงให้เห็นว่าโปรคิวเซอร์ก๊าซที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลขึ้นสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนในโรงงานเซรามิกส์ได้ และให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง

ธรรกร สกกุลพานิช และ ปิยะวงษ์ ชาติธิวงษ์ [28] ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวลจากกะลามะพร้าว โดยใช้เครื่องผลิตก๊าซชีววมวลชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier) ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้กับไม้ฟืน โดยศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อปริมาณถ่านและก๊าซที่ผลิตได้คือ อัตราการไหลของอากาศซึ่งอยู่ในช่วง 7.7-30.6 m³/hr ขนาดกะลามะพร้าว 1.25-5 cm เวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซ 3-6 hr จากการทดลองพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการผลิตก๊าซ 4 hr จะได้ปริมาณสูงสุด 30% จากการวิเคราะห์ก๊าซพบว่าไม่มีส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้เลยสาเหตุเนื่องจากปริมาณอากาศป้อนเข้าเครื่องผลิตก๊าซมากเกินไปและการไม่ยอมเคลื่อนตัวลงของกะลามะพร้าวส่วนล่างของเตา อย่างไรก็ตามถ่านที่ได้มีคุณภาพดี

Arthayukti, W. [29] ศึกษาการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซจากเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลงแบบท่อตรงโดยซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงอากาศไหลเข้าด้านบนของท่อเหล็กขนาด 15 cm ยาว 150 cm ซังข้าวโพดมีองค์ประกอบ FC 20.46% VM 70.3%, AC 2.48% S 0.07% HHV 4,137.97 cal/g พบว่าอัตราการไหลของอากาศ 17.5 Nm³/hr สามารถผลิตก๊าซมีค่าความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 1,008 kcal./Nm³ ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ 12.7 %, H₂ 11.1 % และ CH₄ 3.0%

Hoi W. K. และคณะ [30] ศึกษากระบวนการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซจากไม้ยางพาราโดยเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลงขนาด 35 kW โดยออกแบบตามรูปแบบของ Swedish Academy of Engineering Science ใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราขนาด 3x3x3 cm³ ความชื้น 7.9% และ HHV 18.44 MJ/kg อัตราการไหลโปรคิวเซอร์ก๊าซเฉลี่ย 89.3 Nm³/hr ได้ค่าความร้อนสูงของโปรคิวเซอร์ก๊าซประมาณ 4.975 MJ/Nm³ อัตราความสิ้นเปลือง 33.5 kg/hr และโปรคิวเซอร์ก๊าซประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ 18.9% ไฮโดรเจน 18.4% มีเทน 0.6% และ ไนโตรเจน 49.8% ทดลองใช้

โปรคิวเซอร์ก๊าซร่วมกับน้ำมันดีเซลในการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถทดแทนน้ำมันดีเซลได้ 68.9%

จงจิตร หิรัญลาภ และคณะ [31] ทำการอบแห้งพริกโดยใช้โปรคิวเซอร์ก๊าซจากเตาผลิตก๊าซแบบไหลขึ้น โดยระบบอบแห้งนี้ประกอบด้วย ระบบผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซ ระบบทำความสะอาดก๊าซ ห้องเผาไหม้เครื่องอบแห้ง พัดลมเป่าอากาศ และส่วนประกอบที่สำคัญของโปรคิวเซอร์ก๊าซ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ซึ่งจะมีค่าความร้อน $17,319 \text{ kJ/N} \cdot \text{m}^3$ และตู้บรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้งมีความกว้าง 0.6 m ยาว 1 m สูง 1 m สามารถวางถาดบรรจุภัณฑ์ได้ 8 ถาดมีระบบควบคุมอัตราการไหลอากาศภายในห้องอบแห้งได้ตามต้องการและเมื่อทำการอบแห้งพริกชี้ฟ้าแดงที่มีการผ่านเมล็ดออก 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.

การศึกษาการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซจะเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซ รวมทั้งองค์ประกอบที่สำคัญของโปรคิวเซอร์ก๊าซซึ่งเป็นตัวแปรในการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใต้เตาผลิตก๊าซและบางงานวิจัยยังศึกษาถึงการนำโปรคิวเซอร์ก๊าซไปใช้ในรูปแบบต่างๆ เช่น ใช้ติดเครื่องยนต์สันดาปภายใน [32] และใช้ในการผลิตเซรามิกส์และสามารถออกแบบระบบเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการอบผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น พริก กระเทียม [33] ชาเขียวใบหม่อน [34-36] ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานยิ่งขึ้น รูปที่ 2.21 เป็นเตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซสำหรับใช้ในกระบวนการอบชาเขียวใบหม่อน



รูปที่ 2.21 เตาแก๊สซีฟิเคชั่น [34-36]

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างประเทศ

Blasi, C. D. [37] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซชนิดเปลวไฟไหลลงแบบสถานะไม่คงตัว (Unsteady State) 1 มิติ โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนและมวลผ่านเบดโดยพิจารณาการระเหยของแข็ง การไพโรไลซิสของชีวมวล การเผาไหม้ถ่านและแก๊สซีฟิเคชั่น จากแบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าวสามารถทำนายอิทธิพลของพารามิเตอร์ในแบบจำลองค่าคงที่จลนศาสตร์และตัวแปรสำหรับดำเนินการในกระบวนการพลศาสตร์ โครงสร้างของปฏิกิริยาและคุณภาพของก๊าซ ผลจากแบบจำลองพบว่าค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) ที่ค่าสูงๆ จะทำให้กระบวนการเกิดการสเถียรบริเวณส่วนบนของเตาเป็นผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานมีค่าสูงตามไปด้วยและส่งผลทำให้ได้โปรคิวเซอร์ก๊าซที่มีคุณภาพสูง และเมื่อลดอัตราการไหลของอากาศต่ำกว่าค่าวิกฤตจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดการสเถียรบริเวณตะแกรง นอกจากนี้การทำนายองค์ประกอบของก๊าซและโปรไฟล์อุณหภูมิในแนวแกนของเตามีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง

Giltrap et al. [38] ได้พัฒนาแบบจำลองของแก๊สซีฟิเคชั่นชนิดเปลวไฟไหลลงภายใต้สถานะคงตัวเพื่อทำนายองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์ก๊าซ ผลจากแบบจำลองพบว่าปริมาณมีเทนที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่าความถูกต้องของแบบจำลองถูกจำกัดโดยข้อมูลของเงื่อนไขเริ่มต้นบริเวณโซนรีดักชั่น

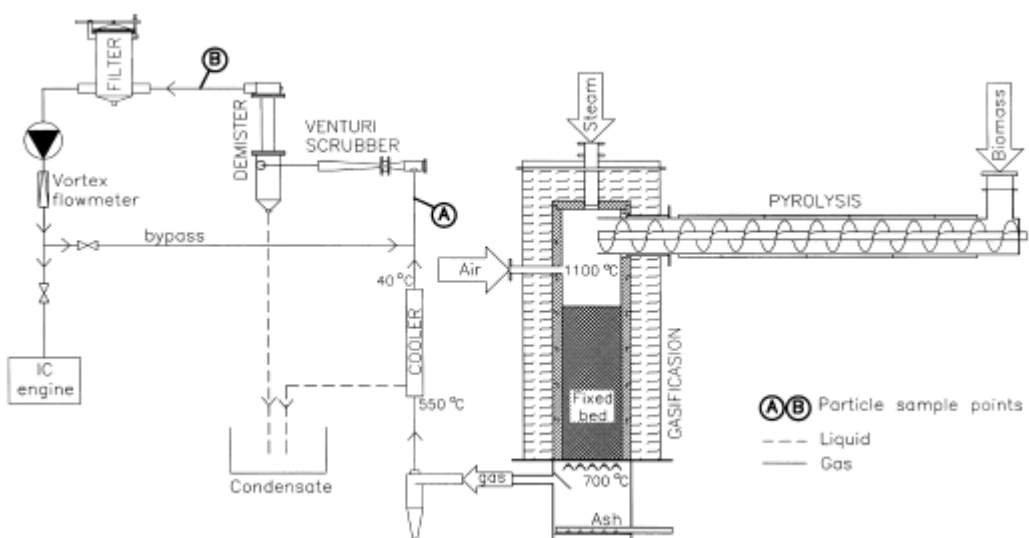
Chmielniak, T. และ Sciazko, M. [39] ได้ทำการศึกษากระบวนการแก๊สซีฟิเคชั่นจากถ่านหินและชีวมวลสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยวัฏจักรความร้อนร่วมและ

กระบวนการผลิตเมทานอล ผลจากการศึกษาพบว่าปริมาณก๊าซส่วนเกินสามารถนำไปใช้ในการตั้งเครื่องเมทานอลเพื่อให้ประสิทธิภาพรวมของระบบมีค่าสูงขึ้นและมีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

McKendry, P. [40-42] ได้รายงานเกี่ยวกับการผลิตชีวมวลและสมบัติของพืชเทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปพลังงานโดยเน้นที่กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงก๊าซสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า และได้ทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวลที่ปลูกเพื่อเป็นพืชพลังงานกับชีวมวลที่เป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Hindsgaul et al. [43] ได้ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์โปรตีนเซอร์ก๊าซที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชนิดเปลวไฟไหลลงแบบ 2 ชั้น (แยกกันระหว่างไฟโรไลซิสกับแก๊สซิฟิเคชัน) แสดงดังรูปที่ 2.22 และได้ศึกษาความเข้มข้นและองค์ประกอบทางเคมีของก๊าซดังกล่าวเพื่อนำไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ผลปรากฏว่ามีฝุ่นละอองถึง 85% เจือปนอยู่ในโปรตีนเซอร์ก๊าซ โดยฝุ่นละอองดังกล่าวเมื่อนำไปส่องกล้อง SEM พบว่ามีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 70 nm

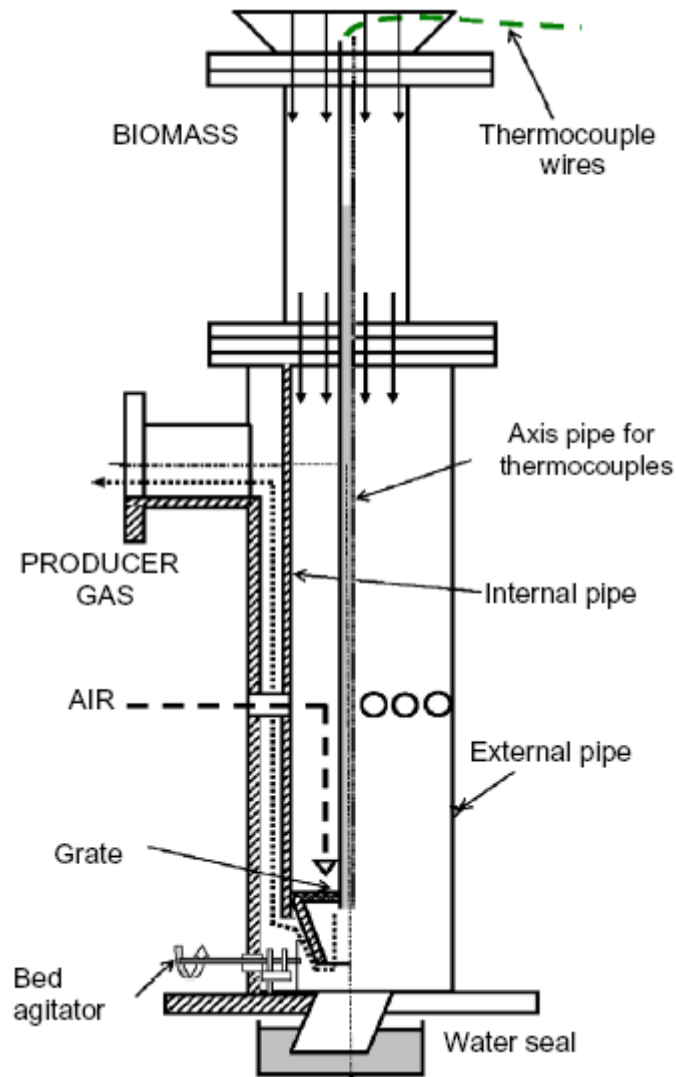
Gañana et al. [17] เสนอผลการวิเคราะห์สัณยภาพของพลังงานชีวมวลและการปลูกพืชพลังงานในประเทศสเปนและได้ทำการทดลองผลิตแก๊สซิฟิเคชันจากแกลบ เปลือกถั่วและไม้ยูคาลิปตัส นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ Ultimate Analysis และ Proximate Analysis รวมทั้งค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงดังกล่าวด้วย โดยในขณะที่ทำการทดลองได้กำหนดเงื่อนไขในการทดลองดังนี้ อัตราการไหลของอากาศ 200 ml/min ที่อุณหภูมิ 800 °C ซึ่งทำให้ได้ก๊าซปริมาณ 1.3-1.9 m³/kg ภายใต้สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ 2.22 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชัน โดมิตาผลิตก๊าซชนิดเปลวไฟไหลลงแบบ 2 ชั้น

Tinaut et al. [43] ได้ทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซซึ่งผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้เตาผลิตก๊าซแบบเบดเคลื่อนที่ (Moving Bed) ชนิดเปลวไฟไหลลงสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า 500 kW แสดงดังรูปที่ 2.23 โดยโปรคิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้จะถูกนำไปผสมกับอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้เพื่อให้ได้ส่วนผสมตามทฤษฎี (Stoichiometric Mixture) โดยใช้พารามิเตอร์ Engine Fuel Quality, EFQ สำหรับพิจารณาสมรรถนะของเครื่องยนต์ ก๊าซดังกล่าว ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นผลรวมเนื่องจากอิทธิพลของ A/F และค่าความร้อนของ Stoichiometric Mixture ซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของโปรคิวเซอร์ก๊าซ ในการศึกษาดังกล่าวได้ทำการประมาณกำลังของเครื่องยนต์ ณ สภาวะภาระเต็ม (Full Load) และพบว่า EFQ มีค่าลดลงเหลือ 2 ใน 3 ของการใช้เชื้อเพลิงทั่วไป

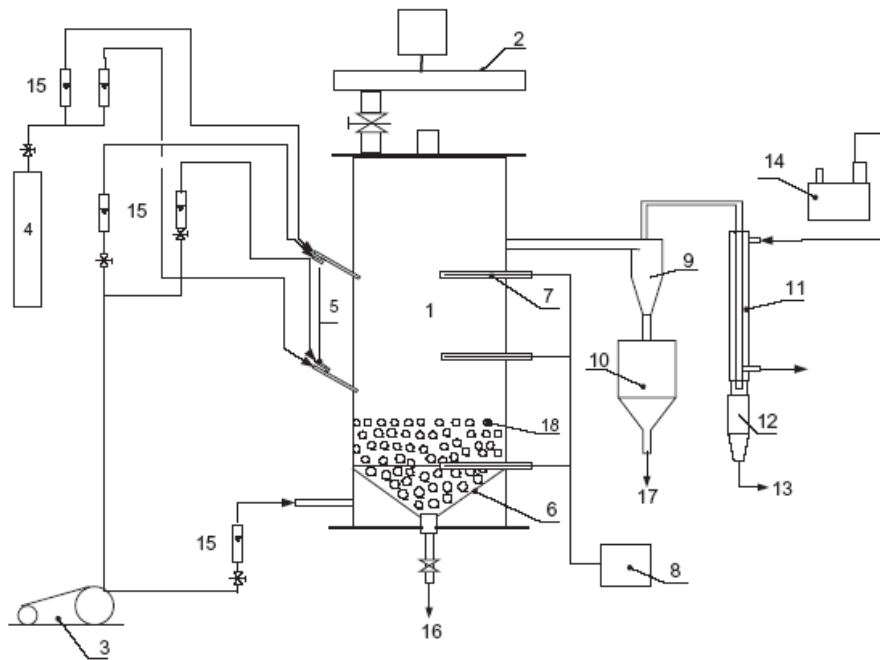
Sanz, A. และ Corella, J. [44] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับ 1 มิติ โดยทำนายตัวแปรของกระบวนการ เช่น ส่วนประกอบของก๊าซ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้น H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_n , H_2O และ O_2 ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ ปริมาณความเข้มข้นของทาร์ ปริมาณถ่าน โดยผลที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง



รูปที่ 2.23 เตาผลิตก๊าซแบบเบดเคลื่อนที่ (Moving Bed) ชนิดเปลวไฟไหลลง
สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า 500 kW

Cao et al. [12] ได้เสนอแนวทางในการผลิต โปรคิวเซอร์ก๊าซที่มีปริมาณคาร์ต่ำ โดยเสนอแนะให้ใช้อากาศในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อจำกัดปริมาณคาร์ และได้ทำการสร้าง เตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงภายใต้สภาวะทางความร้อน แบบอัตโนมัติ (Autothermic Condition) แสดงดังรูปที่ 2.24 โดยเตาผลิตก๊าซจะแยกโซนของไพโรไลซิสกับแก๊สซิฟิเคชันและโซนของการเผาไหม้เป็น 2 โซนหลักๆ และมีการป้องกันทางด้านล่างและป้องกันเชื้อเพลิงทางด้านบนของตัวเตาเพื่อป้องกันการผลิตก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงจากการถูกเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงจะถูกไพโรไลซ์และทำให้เกิดถ่านในส่วนบนของชั้นรีดักชันของตัวเตาและต่อมาถ่านก็จะถูกเผาไหม้บริเวณส่วนล่างของเตาในสภาวะออกซิเคชัน โดย

มีการฉีดเชื้อเพลิงก๊าซเข้าไปในตัวเตาบริเวณส่วนบนสำหรับช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิ ผลการทดลองสรุปได้ว่าสามารถผลิตก๊าซจากชี้เลี้ยงในปริมาณ $3 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$ โดยโปรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าความร้อนประมาณ $5 \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$ ปริมาณความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนน้ำและมีเทน ในโปรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าประมาณ 9.27% 9.25% และ 4.21% ตามลำดับ และสามารถควบคุมการเกิดทาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปริมาณต่ำกว่า $10 \text{ mg/N} \cdot \text{m}^3$ โดยมีค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนของระบบและประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชั่นประมาณ 87.1% และ 56.9% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการทำนายค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์ก๊าซอีกด้วย โดยพบว่าถ้าระบบมีการขยายสเกลขึ้นไปอีกจะทำให้ได้โปรคิวเซอร์ก๊าซที่มีค่าความร้อนประมาณ $8 \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$



(1) lab-scale gasification reactor, (2) biomass rotating disc feeder, (3) air pump, (4) assisting gas tank, (5) air/gas nozzles, (6) air distributor, (7) temperature sensors, (8) temperature recorder, (9) cyclone, (10) ash storage tank, (11) water cooler, (12) ice trap, (13) fuel gas, (14) cooling water pump, (15) flow meter, (16) sand discharger, (17) ash discharger, and (18) sand bed material.

รูปที่ 2.24 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชั่นแบบฟลูอิดไดซ์เบดชนิด 2 ชั้น

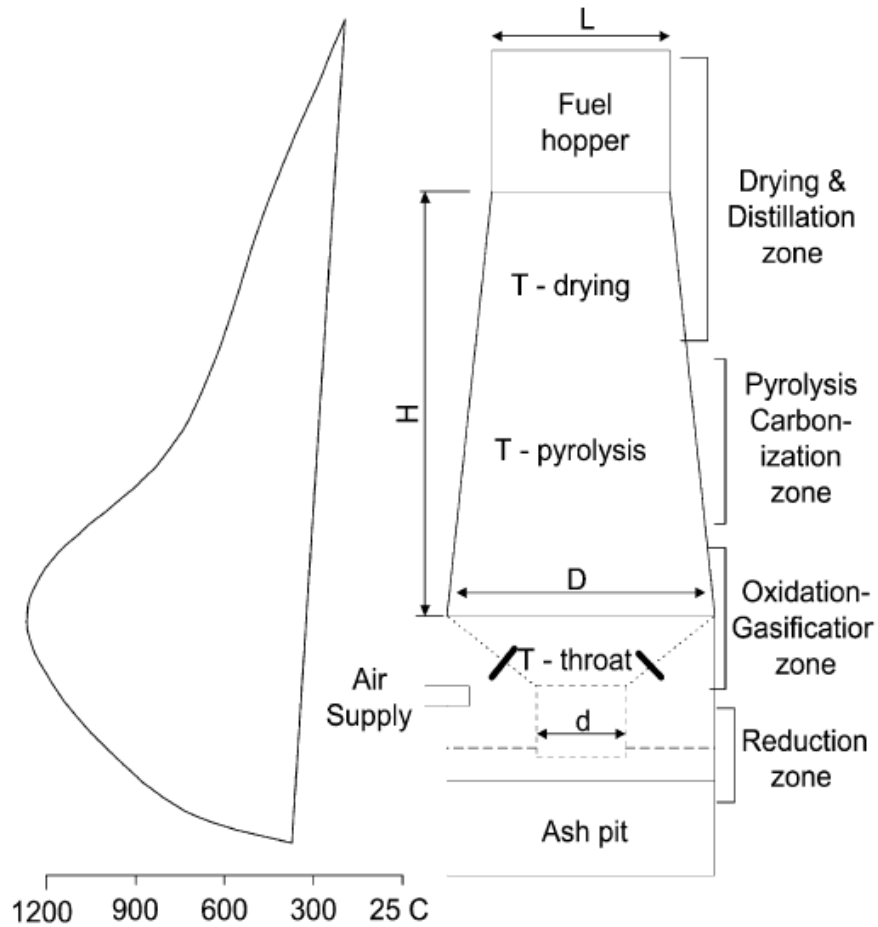
Ganan et al. [16] ได้ทำการออกแบบโรงงานผลิตแก๊สซิฟิเคชั่นสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสำหรับการประยุกต์ใช้ก๊าซเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส (H_2 , CO , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6) สำหรับการผลิต

พลังงานไฟฟ้าโดยมีกำลังการผลิต 250 kg/h ได้ผ่านประมาณ 16% และมีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้า 1.05 MW

Gonzalez et al. [45] ได้ทำการศึกษาการผลิตไฟฟ้าของโรงงานแก๊สซิฟิเคชันจากวัสดุเหลือทิ้งจากถั่วอัลมอนต์ โดยเตาผลิตก๊าซเป็นแบบเบดอยู่กับที่และได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศในช่วง 50-400 cm³/min และอุณหภูมิ 650-800 °C ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเปลือกถั่วอัลมอนต์ จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะเงื่อนไขการทำงานของเตาที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ ที่อัตราการไหล 200 cm³/min อุณหภูมิ 800 °C ซึ่ง ณ ที่สภาวะดังกล่าวจะทำให้ได้โปรดิวเซอร์ก๊าซที่มีคุณภาพมากที่สุด และ ณ ที่สภาวะนี้จะได้โปรดิวเซอร์ก๊าซที่มีส่วนประกอบดังนี้ O₂ 2.9%, N₂ 52.2%, H₂ 13.3%, CO 14.3%, CO₂ 11.3%, CH₄ 4.8% และ C₂H₂ C₂H₄ C₂H₆ รวมกันเท่ากับ 1.2% จากการทดลองทำให้ได้โปรดิวเซอร์ก๊าซที่มีปริมาณ 1.66 1.85 และ 1.71 N·m³/kg สำหรับส่วนต่างๆ ของถั่วอัลมอนต์ได้แก่ เปลือกใน เปลือกนอกและส่วนจากต้น และโปรดิวเซอร์ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนเท่ากับ 5.8 6.5 และ 6.4 MJ/N·m³ ตามลำดับ จากการศึกษาการออกแบบระบบพบว่าเมื่อใช้ตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาด 1.99 MW จะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 25%

Hoque, M. M. และ Bhattacharya, S. C. [8] ได้ทำการศึกษาการผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซจากกะลามะพร้าวโดยใช้เตาแบบสเปาเต็ดเบดและแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่มีผลต่อส่วนประกอบของก๊าซ ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้และค่าความร้อนของก๊าซสำหรับเตาผลิตก๊าซทั้งสองชนิด ผลปรากฏว่าเตาผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซที่มีปริมาณมากกว่าและมีค่าความร้อนสูงกว่าเตาแบบสเปาเต็ดเบดเพียงเล็กน้อย

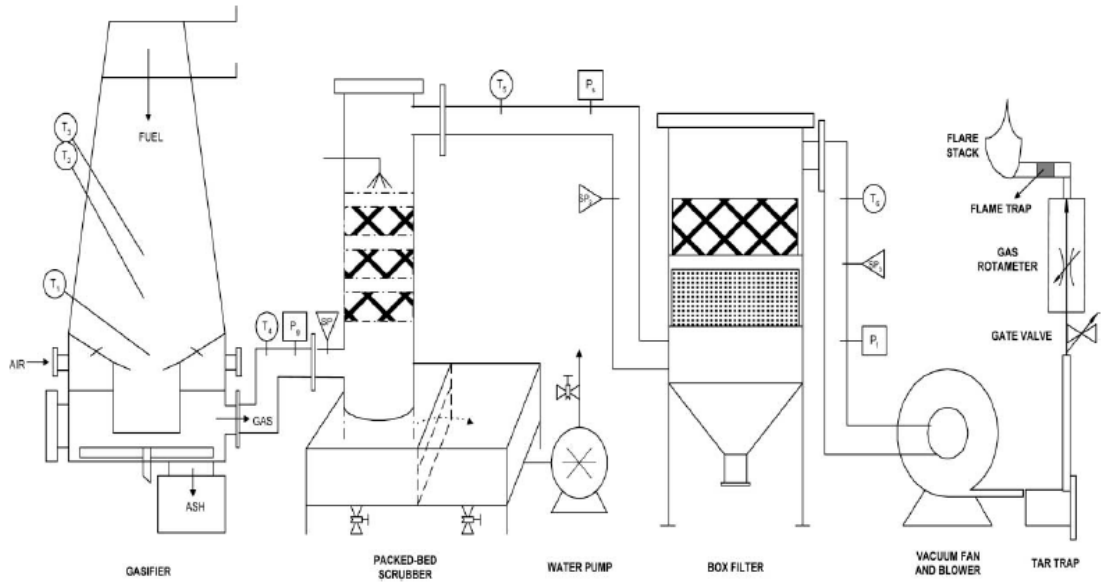
Dogru et al. [13] ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สซิฟิเคชันจากเปลือกถั่วโดยอาศัยเตาผลิตก๊าซแบบเปลวไฟไหลลงแสดงดังรูปที่ 2.25 โปรดิวเซอร์ก๊าซที่ได้ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ในเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้าขนาด 5 kWe โดยมีอุปกรณ์ในระบบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.26 ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซได้แก่ ที่อัตราการไหลของอากาศ 4.06 kg/h และ 4.48 kg/h จะทำให้ได้โปรดิวเซอร์ก๊าซ 1.44 N·m³/kg และ 1.47 N·m³/kg โดยโปรดิวเซอร์ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนเท่ากับ 5 MJ/m³



รูปที่ 2.25 เตาผลิตก๊าซสำหรับเดินเครื่องยนต์เพื่อปั่นไฟขนาด 5 kW

Henriksen et al. [46] ได้ออกแบบ สร้างและทดสอบระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตไฟฟ้าขนาด 75 kW แสดงดังรูปที่ 2.27 โดยอาศัยเตาผลิตก๊าซแบบไวคิง (Viking Gasifier) ชนิด 2 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.28 โดยทำการทดสอบการทำงานเป็นเวลา 465 ชั่วโมง ในระหว่างการทดสอบพบว่าไม่มีเครื่องยนต์ทำงานเป็นปกติดีและสามารถผลิต โพรคิวเซอร์ก๊าซที่มีคุณภาพดีและสะอาดเนื่องจากการนำไปกรองผ่านห้องดูดกรอง

Zainal et al. [15] ได้ทำการทำนายกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตก๊าซแบบเปลวไฟไหลลง โดยได้ทำการหาส่วนประกอบและค่าความร้อนของโพรคิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้ และได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นในเชื้อเพลิงไม้และอุณหภูมิในชั้นแก๊สซิฟิเคชันที่มีต่อค่าความร้อน ผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยค่าความร้อนของโพรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเริ่มต้นในไม้มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความร้อนของโพรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าลดลงเช่นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีค่าเพิ่มขึ้น

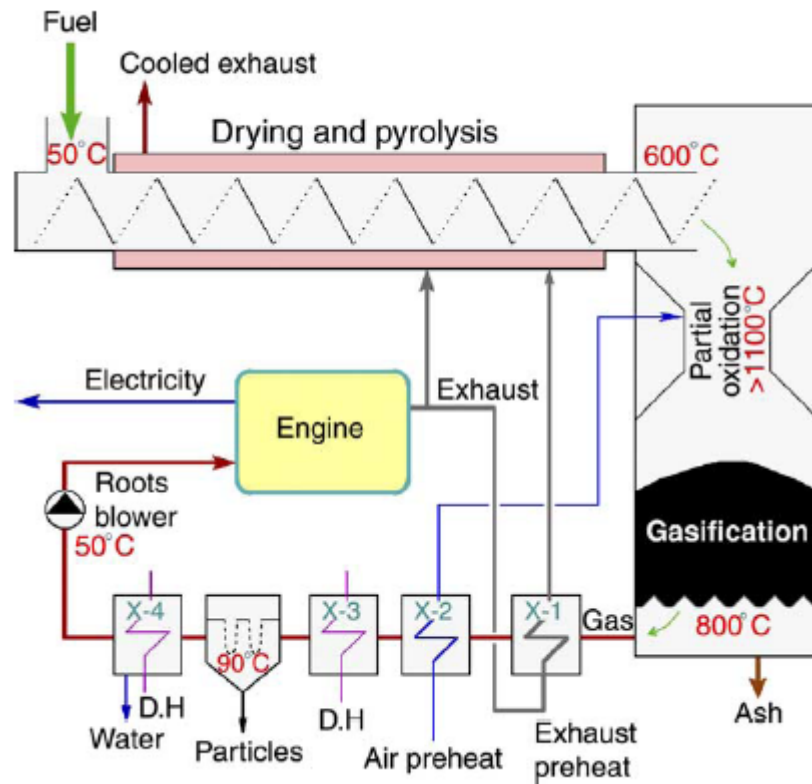


(T_1 : throat (oxidation) zone temperature, T_2 : pyrolysis zone temperature, T_3 : drying zone temperature, T_4 : gasifier outlet temperature, T_5 : scrubber outlet temperature, T_6 : box filter outlet temperature, P_g : pressure drop across the gasifier, P_s : pressure drop across the scrubber, P_f : pressure drop across the box filter, SP1: gas sampling point at the gasifier outlet, SP2: gas sampling point at the scrubber outlet, SP3: gas sampling point at the box filter outlet.

รูปที่ 2.26 ระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.27 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันขนาด 75 kW



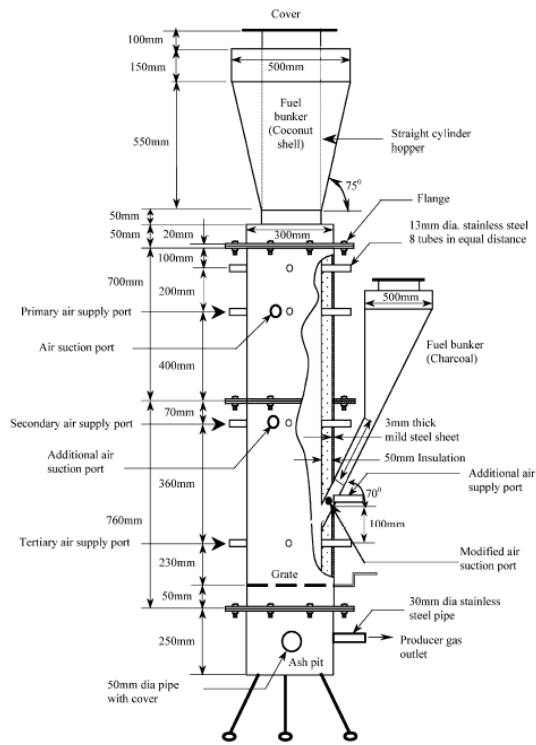
รูปที่ 2.28 การผลิตไฟฟ้าจากระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 75 kW

Chen et al. [47] ได้เสนอข้อเสียของระบบแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value) ปานกลาง ในงานอุตสาหกรรมและงานก่อสร้างระบบ เช่น ก๊าซที่ผลิตได้มีปริมาณต่ำ การกักเก็บของอุปกรณ์เนื่องจากความเข้มข้นของทาร์ที่อยู่ในโปรคิวเซอร์ก๊าซ จากข้อเสียดังกล่าว Chen et al. จึงได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการดำเนินการสำหรับการไฟโรไลซิสในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยหลักการสมดุลความร้อนของก๊าซซึ่งมีค่าคงที่ พารามิเตอร์ในการดำเนินการได้แก่ อุณหภูมิในปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อนของเตาและการปรับปรุงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลของเตา ผลการศึกษาพบว่าการผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซจากชีวมวลมีผลอ่อนไหวต่อพารามิเตอร์ในการดำเนินการดังกล่าวและค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าสูงอยู่ในช่วง $13-15 \text{ MJ/N} \cdot \text{m}^3$

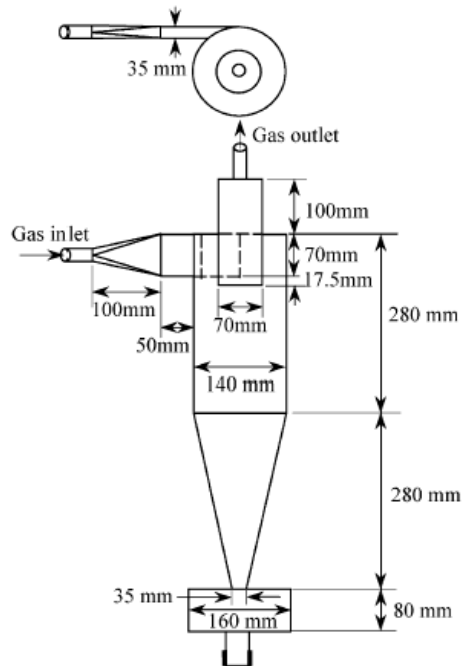
Babu และ Sheth [48] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาโปรไฟล์อุณหภูมิและส่วนประกอบของก๊าซในสถานะคงตัวสำหรับชั้นรีดักชันของเตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซแบบเปลวไฟไหลลง ผลปรากฏว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายส่วนประกอบของก๊าซ

และโปรไฟล์อุณหภูมิในชั้นของรีดักชันได้ดี โดยเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองจริง

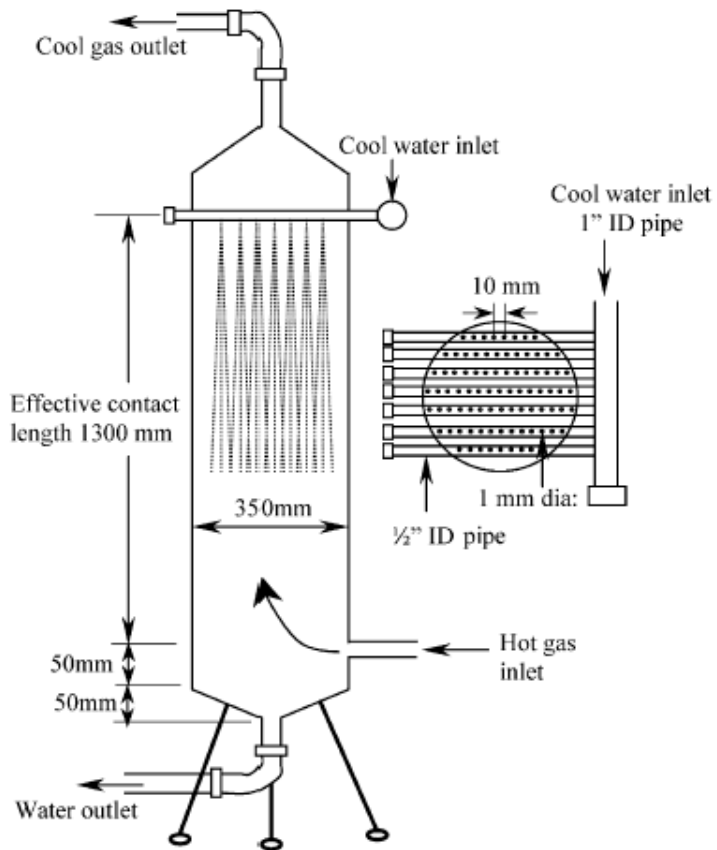
Bhattacharya et al. [9] ได้เสนอผลการศึกษาแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล-ถ่านจากเตาแบบหลายชั้นแสดงดังรูปที่ 2.29 เพื่อผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซที่มีปริมาณความเข้มข้นของทาร์ต่ำ โดยชีวมวลที่ใช้ได้แก่กะลามะพร้าว โปรคิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้จะถูกนำไปผ่านไซโคลนเพื่อกรองเถ้าและฝุ่นละอองโดยมีรายละเอียดของไซโคลนแสดงดังรูปที่ 2.30 หลังจากนั้นก๊าซที่ผ่านไซโคลนจะถูกทำให้เย็นโดยการผ่านหอพ่นน้ำแสดงดังรูปที่ 2.31 โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการวัดก๊าซและภาพรวมของระบบแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวลและถ่านแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซลแสดงดังรูปที่ 2.32 และรูปที่ 2.33 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้อภิปรายเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบเครื่องยนต์ก๊าซ-เตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซ สมรรถนะของระบบทำความเย็นและระบบทำความสะอาดก๊าซและเครื่องยนต์ดีเซล ผลปรากฏว่าปริมาณความเข้มข้นของทาร์ในระบบผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าประมาณ 28 Nm^{-3} โดยการใช้หอคอยพ่นน้ำ (Spray Tower) สำหรับระบบทำความเย็นจะทำให้โปรคิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้มีอุณหภูมิลดลง 40°C โดยทำให้โปรคิวเซอร์ก๊าซที่ผ่านระบบทำความเย็นแล้วมีปริมาณทาร์ลดลง หลังจากนั้นได้ทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลแบบ Perkins ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.34 ณ ระดับความเร็วคงที่ 1,500 rpm โดยการใช้เชื้อเพลิงแบบผสมและดีเซลเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน ผลการทดสอบปรากฏว่า 81% ของพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์สามารถใช้โปรคิวเซอร์ก๊าซเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลได้และให้กำลังการผลิตไฟฟ้าประมาณ 11.44 kWe



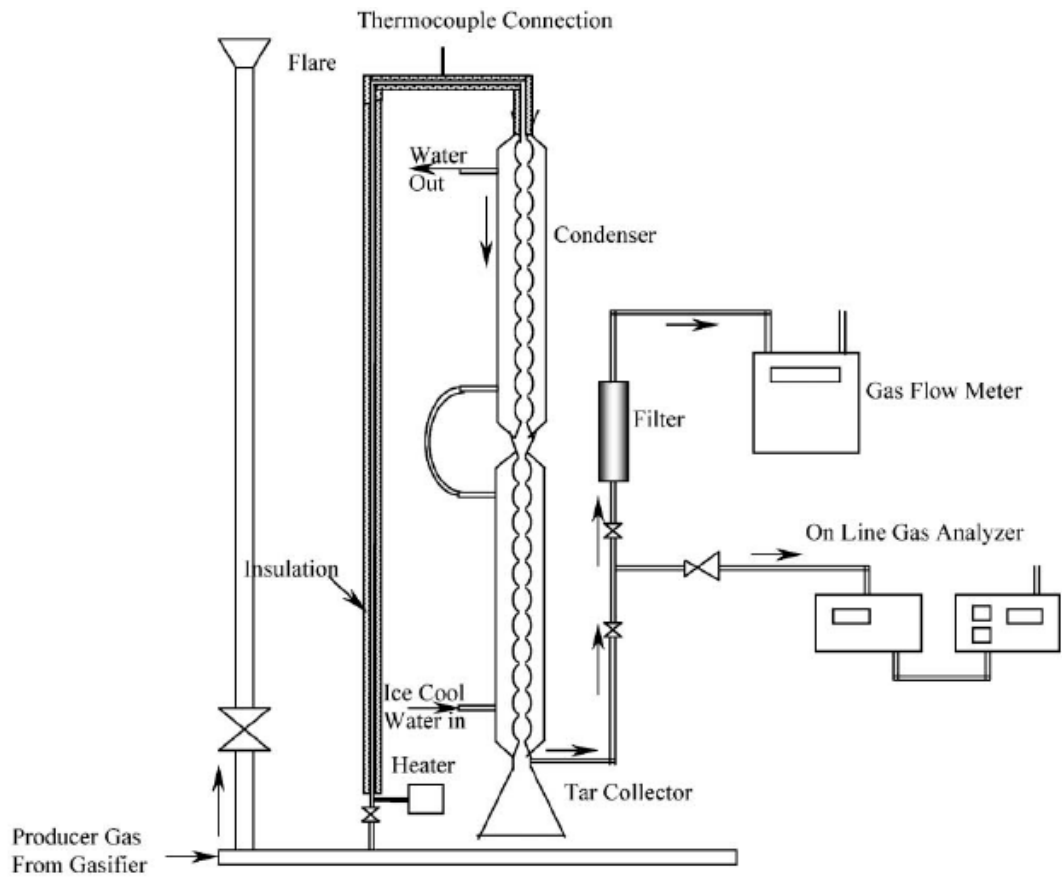
รูปที่ 2.29 เตาผลิตโปรดีวเซอร์ก๊าซแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล



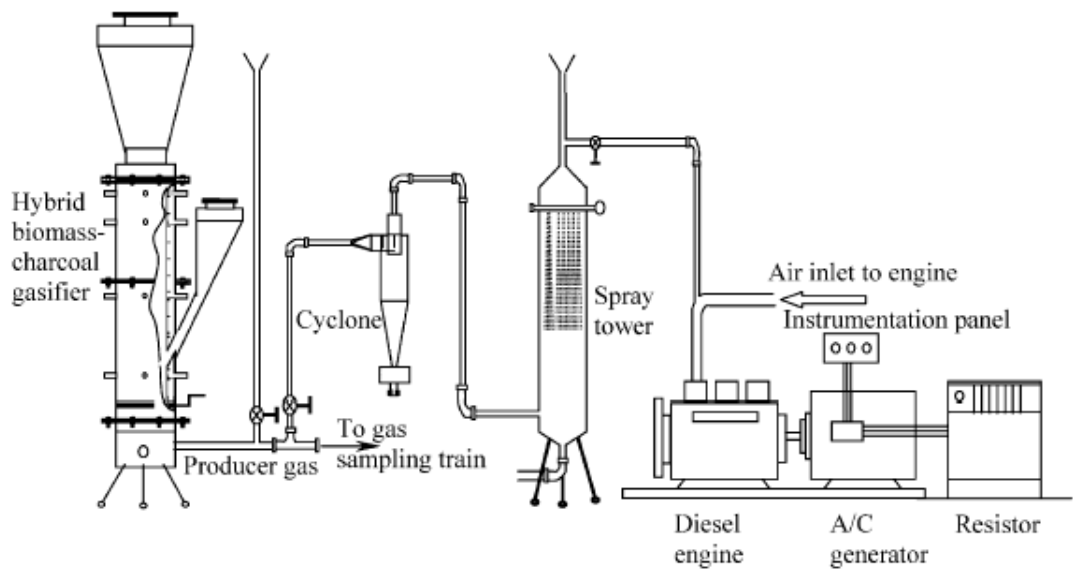
รูปที่ 2.30 ไซโคลนในระบบแก๊สซิฟิเคชั่นแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล



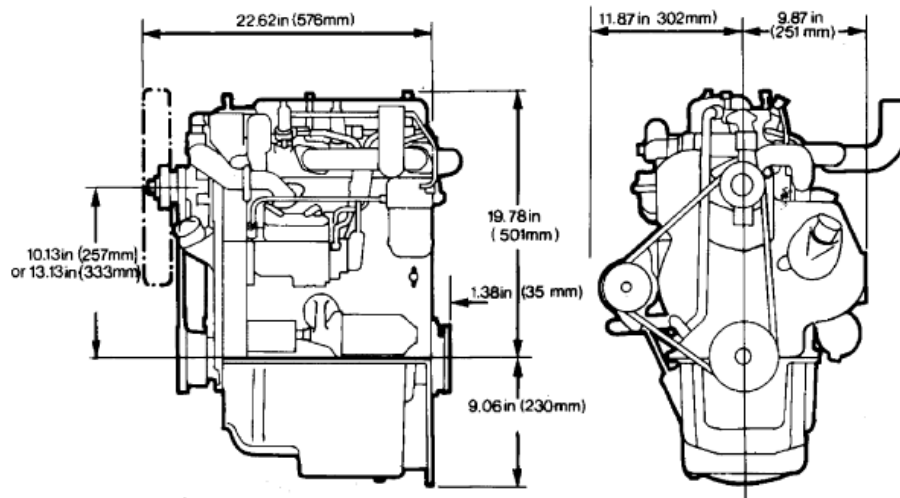
รูปที่ 2.31 ระบบทำความเย็นในระบบแก๊สซีฟิเคชันแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องขุดดีเซล



รูปที่ 2.32 การวัดก๊าซและทาร์ในระบบแก๊สซิฟิเคชั่นแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 2.33 ระบบแก๊สซิฟิเคชั่นแบบหลายชั้นสำหรับเดินเครื่องยนต์ดีเซล



General data of 49 bhp Perkins engine

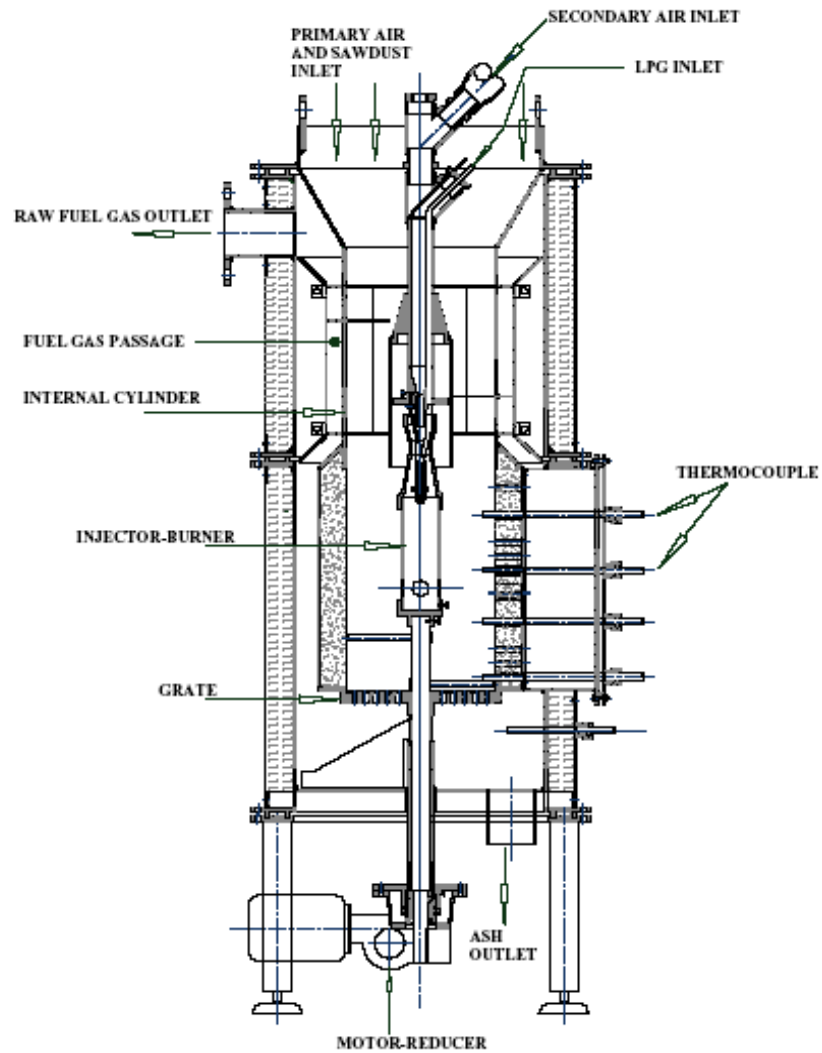
Bore/Stroke	91.4 mm/127 mm
No. of cylinders	3 Vertical in line
Cubic capacity	2.5 liter
Combustion system	Direction Injection
Compression ratio	18.5 : 1
Max Revolution (rpm)	2500
Maximum Power	36.6 kW (49 bhp)

รูปที่ 2.34 เครื่องยนต์ดีเซลในระบบผลิตไฟฟ้าจากแก๊สซิฟิเคชันแบบหลายขั้น

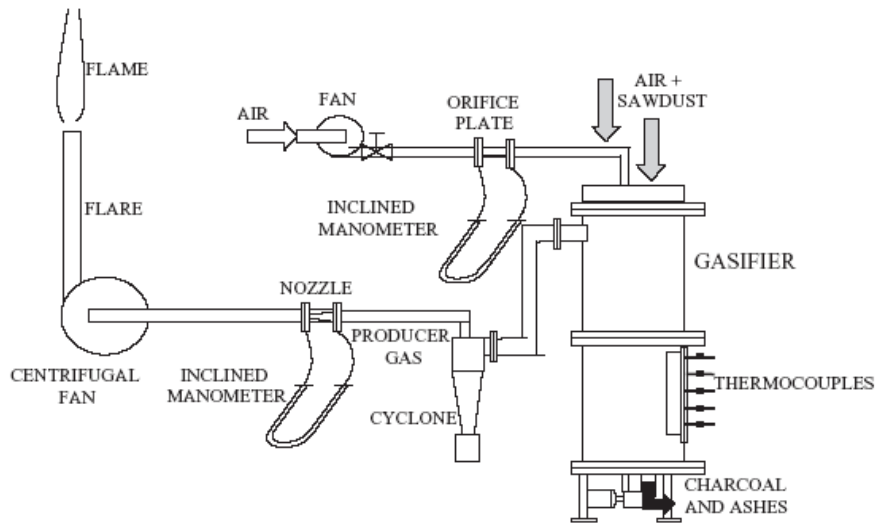
Wander et al. [11] ได้ทำการประเมินสมรรถนะของระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กจากขี้เลื่อย จากการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันจากไม้สามารถผลิตโปรคิวเซอร์สำหรับใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ ในการประเมินสมรรถนะดังกล่าวได้ทำการสร้างเตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซแบบเปลวไฟไหลลงชนิดเบดอยู่กับที่และมีที่เปิดด้านบนขนาด 12 kg/h แสดงดังรูปที่ 2.35 โดยภาพรวมของระบบแก๊สซิฟิเคชันดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.36 ผลการทดสอบพบว่าโปรคิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้มีส่วนประกอบแสดงดังตารางที่ 2.9 และมีค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์ก๊าซประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนและประสิทธิภาพของระบบแสดงดังตารางที่ 2.10

Jayah et al. [14] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองของระบบแก๊สซิฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 2.37 เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการคัดแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์และลักษณะของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูป โปรแกรมประกอบไปด้วยโมเดลย่อย 2 โมเดลของชั้นไพโรไลซิสและชั้นแก๊สซิฟิเคชัน โดยโมเดลย่อยในชั้นไพโรไลซิสถูกใช้ในการหาอุณหภูมิสูงสุดและส่วนประกอบของโปรคิวเซอร์ก๊าซที่กำลังจะเคลื่อนเข้าไปสู่ชั้นแก๊สซิฟิเคชัน ผลการศึกษาพบว่าควรรใช้เศษไม้ที่มี

ขนาด 3-5 cm และควรมีความชื้นต่ำกว่า 15%db สำหรับเตาผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซรูปแบบนี้ และควรหลีกเลี่ยงการป้อนชีวมวลที่มีปริมาณคาร์บอนคงที่สูงกว่า 30% และการสูญเสียความร้อนมากกว่า 15% โดยยังพบอีกว่าชั้นแก๊สซิฟิเคชันควรมีความสูงประมาณ 33 cm เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปอยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 2.35 เตาผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซขนาดเล็ก โดยใช้เชื้อเพลิง



รูปที่ 2.36 ระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กโดยใช้ขี้เลื่อย

ตารางที่ 2.9 ส่วนประกอบของโปรดิวเซอร์ก๊าซ

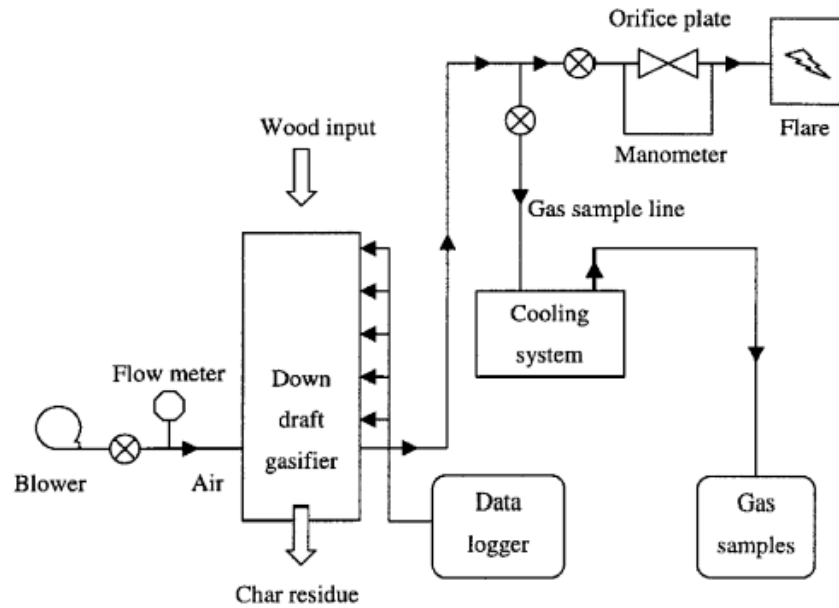
Fuel gas composition (vol %)								
Test	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	Total
GSR1 (3 samples)	16.00	10.93	2.58	56.71	13.22	0.50	0.06	100.0
GSR2 (2 samples)	18.69	10.63	3.41	52.25	14.10	0.76	0.16	100.0
GSR3 (3 samples)	22.71	13.01	2.91	45.91	14.57	0.79	0.10	100.0
GSR4 (3 samples)	20.84	10.27	1.08	55.98	11.43	0.26	0.14	100.0
GSR5 (2 samples)	20.32	15.64	3.65	47.61	11.81	0.80	0.17	100.0
GCR1 (3 samples)	20.95	14.38	2.38	51.63	9.73	0.67	0.26	100.0
GCR2 (3 samples)	20.20	17.38	2.18	46.85	12.79	0.51	0.09	100.0
GCR3 (3 samples)	15.77	10.27	2.05	60.92	10.29	0.59	0.11	100.0
GCR4 (3 samples)	19.54	13.13	2.40	52.23	11.98	0.59	0.13	100.0
GCR5 (0 samples)	—	—	—	—	—	—	—	—
GCR6 (1 sample)	19.48	18.89	3.96	44.95	12.01	0.61	0.10	100.0
GCR7 (3 samples)	17.23	10.93	1.28	57.97	11.94	0.53	0.12	100.0

ตารางที่ 2.10 ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์ก๊าซ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนและประสิทธิภาพของระบบ

Heating values and efficiencies								
Test	Mol. Mass (kg kmol ⁻¹)	Density (kg Nm ⁻³)	HHV (MJ Nm ⁻³)	Gas prod. (Nm ³ bs ⁻¹) ^a	η_{conv}^b (%)	$\eta_{\text{cold gas}}$ (%)	η_{global} (%)	C closure (%)
GSR1	26.9790	1.1028	4.3938	3.42	97.16	63.41	66.96	113.18
GSR2	27.1005	1.1078	5.1858	1.61	85.29	41.46	63.19	82.06
GSR3	26.6151	1.0879	5.7253	2.49	97.40	67.31	70.96	104.77
GSR4	27.0452	1.1055	4.2430	2.87	93.96	60.51	69.44	103.89
GSR5	25.4031	1.0384	6.0766	1.79	93.38	52.24	61.71	75.39
GCR1	25.5546	1.0446	5.5281	2.39	90.69	63.89	77.29	95.03
GCR2	25.2817	1.0334	5.5125	2.32	97.87	63.65	66.79	84.74
GCR3	26.7466	1.0933	4.1786	3.26	92.32	67.67	79.02	104.68
GCR4	26.2322	1.0723	5.0940	2.60	93.32	65.82	75.69	99.07
GCR5	—	—	—	2.09	91.39	—	—	87.13
GCR6	24.5515	1.0036	6.3206	1.99	94.00	62.50	71.36	77.44
GCR7	26.9300	1.1009	4.1177	2.54	96.29	52.03	57.52	82.74

^aDry sawdust.

^bOnly solid losses (100 – sol./sawdust).

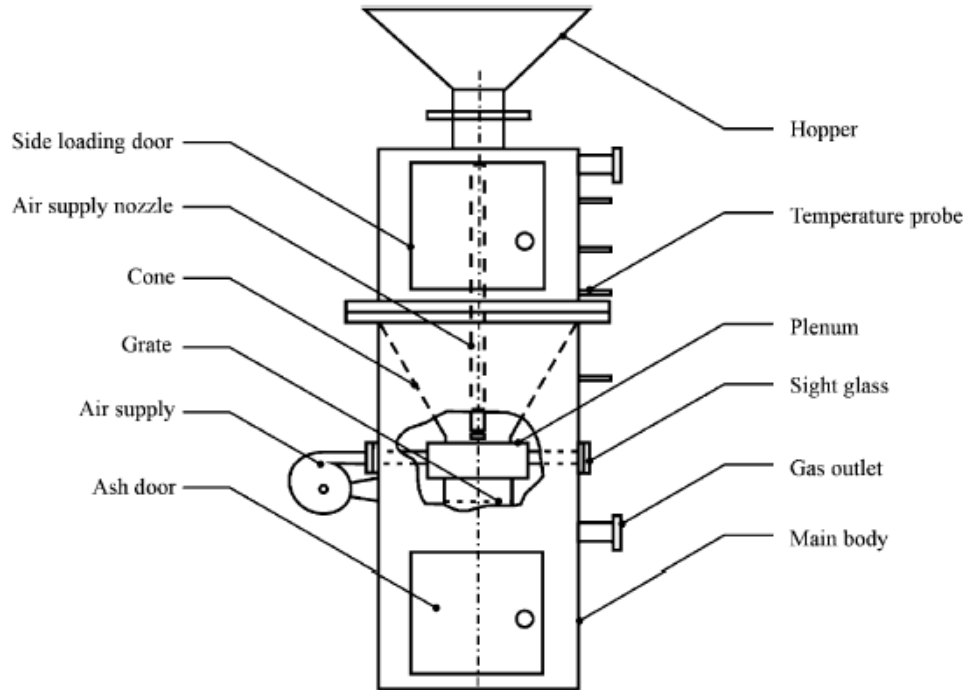


รูปที่ 2.37 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

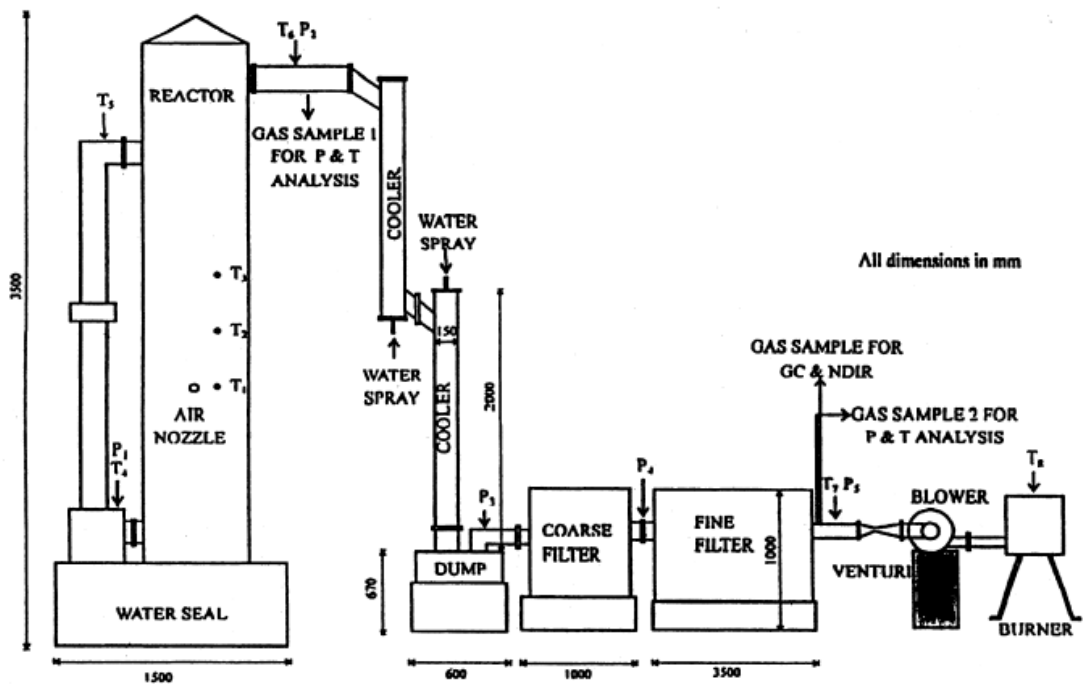
Zainal et al. [50] ศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลย์ (Equivalence Ratio) ที่มีต่อส่วนประกอบ ค่าความร้อน และอัตราการผลิตของโปรคิวเซอร์ก๊าซในเตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซ แสดงดังรูปที่ 2.38 ผลปรากฏว่าค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลย์ ณ ตอนเริ่มต้นมีค่าสูงสุดและค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์ก๊าซมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนสมมูลย์มีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของก๊าซต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นเทียบกับอัตราส่วนสมมูลย์

Hasler และ Nussbaumer [50] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์และสารแขวนลอยในโปรคิวเซอร์ก๊าซก่อนนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับการผลิตไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของระบบแสดงดังรูปที่ 2.39 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงกำลังผลิต 100-500 kW โดยใช้ทรายเป็นตัวกรองในหอทำความสะอาดก๊าซ โดยทำการศึกษาถึงรูปแบบของตัวแยกอนุภาคแบบหมุน (Rotational Particle Separator, RPS) และตัวแยกอนุภาคแบบเบดอยู่กับที่ (Fixed Bed) โดยรูปที่ 2.40 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในโปรคิวเซอร์ก๊าซ และรูปที่ 2.41 แสดงรายละเอียดของตัวแยกอนุภาคและรูปที่ 2.42 แสดงรายละเอียดของตัวกรองหรือตัวกำจัดคาร์และอนุภาคแขวนลอยในโปรคิวเซอร์ ผลการศึกษาพบว่า การทำความสะอาดก๊าซโดยการกำจัดอนุภาคแขวนลอยให้ออกไปในสัดส่วนที่มากกว่า 90% โดยอาศัยเทคโนโลยีในปัจจุบันแล้ว

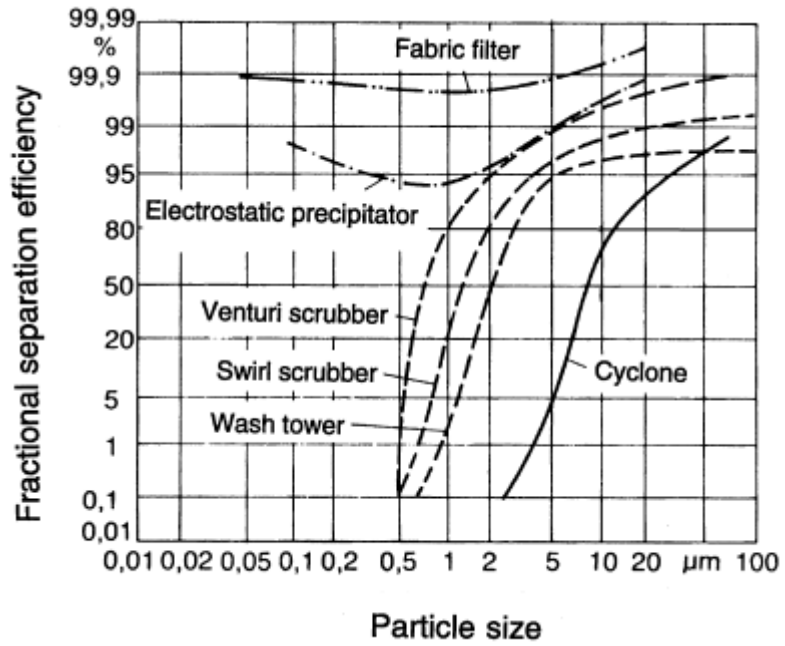
ยังค่อนข้างทำได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานความสะอาดก๊าซโดยการกำจัดทาร์ออกไปในสัดส่วนที่มากกว่า 90%



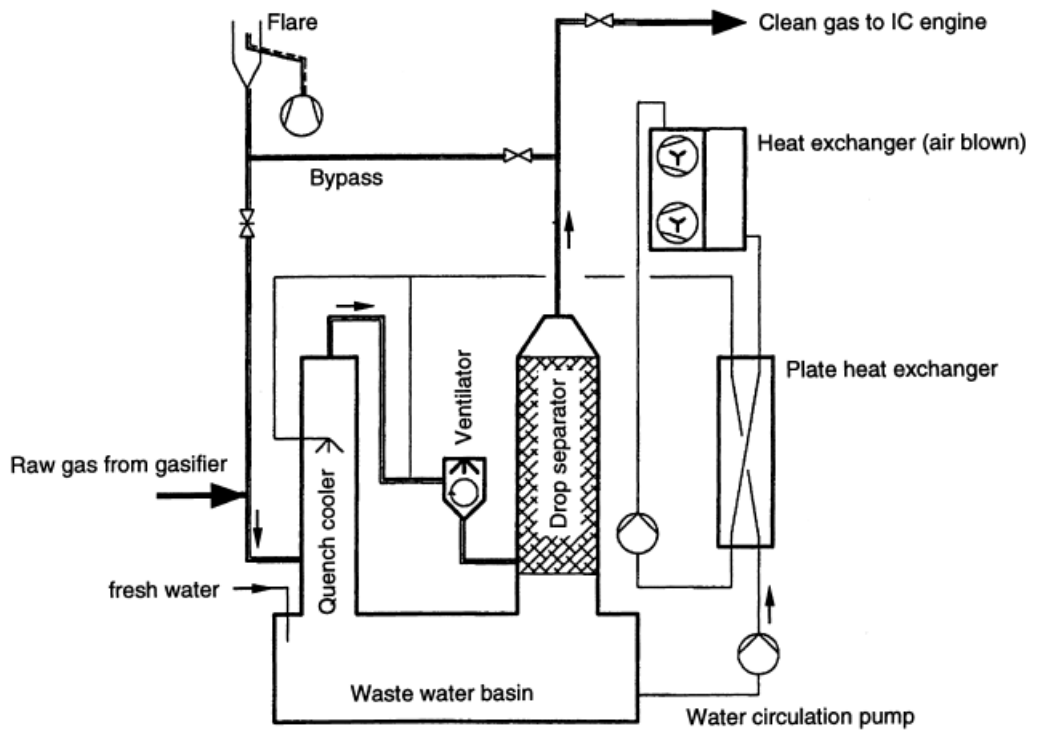
รูปที่ 2.38 เตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซแบบเปลวไฟไหลลง



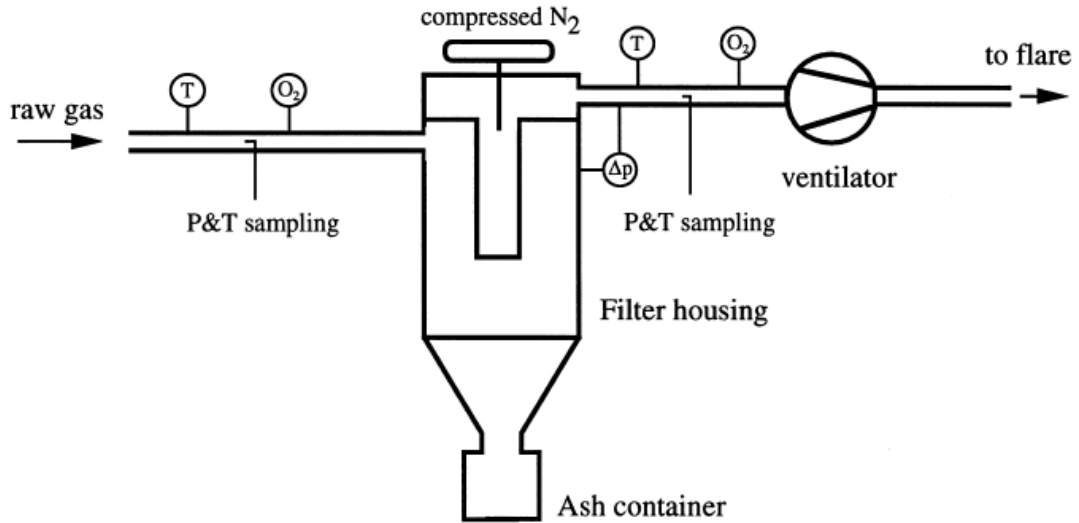
รูปที่ 2.39 ระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชั่นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.40 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในโปรคิวเซอร์ก๊าซ

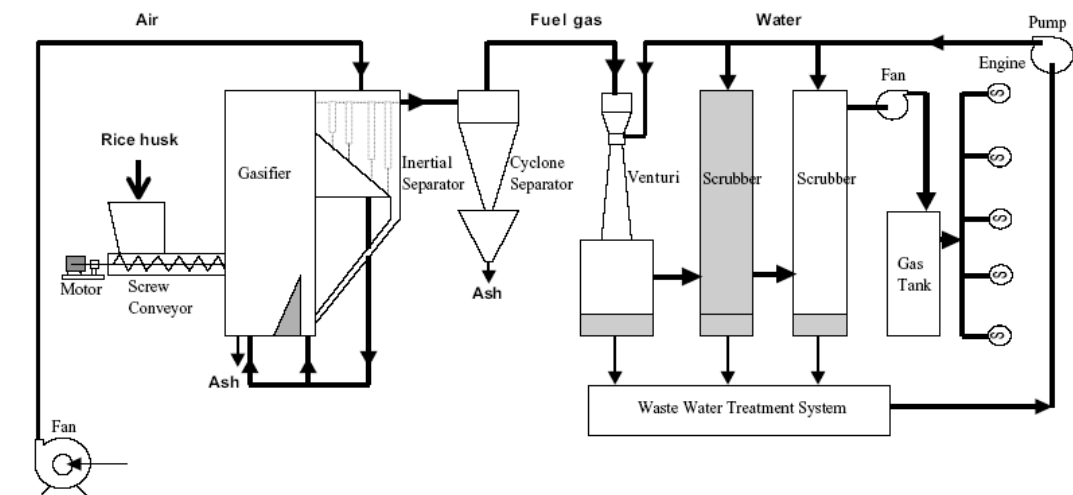


รูปที่ 2.41 ตัวแยกอนุภาคในระบบแก๊สซิฟิเคชั่นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.42 อุปกรณ์สำหรับกำจัดทาร์และอนุภาคในระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

Yin et al. [51] ได้ทำการออกแบบระบบผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซจากแกลบโดยอาศัยเตาแบบเบดไหลวน (Circulating Fluidized Bed) สำหรับการผลิตไฟฟ้า และได้ทำการติดตั้งเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 150 t/d ระบบประกอบไปด้วยเตาผลิตโปรคิวเซอร์ก๊าซ ตัวทำความสะอาดก๊าซซึ่งรวมถึงตัวแยกอนุภาค ไชโคลนและสครับเบอร์แบบอาศัยน้ำ (Water Scrubber) เครื่องยนต์ก๊าซขนาด 200 kW โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.43 ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถดำเนินไปได้อย่างเสถียรในช่วงอุณหภูมิ 700-850 °C โดยมีสถานะเงื่อนไขที่เหมาะสมในขณะที่การะมีค่าประมาณ 800 kW ระบบมีประสิทธิภาพประมาณ 65% สำหรับกำลังการผลิต 1,500 kg/h โดยมีการใช้แกลบในอัตรา 1.7-1.9 kg kWh⁻¹



รูปที่ 2.43 การผลิตไฟฟ้าจากระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 1 MW

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

3.1 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงขี้เลื่อยและแกลบ

3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อย

องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อยสามารถวิเคราะห์ได้จาก Proximate Analysis และ Ultimate Analysis โดยได้ทำการส่งตัวอย่างขี้เลื่อยในจังหวัดเพชรบุรีมวล 1 kg เพื่อนำไปวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อย

Proximate Analysis (%)		Ultimate Analysis (%)	
Volatile Matter	65.9	Carbon	46.4
Fixed Carbon	15.6	Hydrogen	7.1
Ash	1.5	Nitrogen	0.12
Moisture	17.0	Sulfur	0.03
		Oxygen	44.8

3.1.2 ค่าความร้อนของขี้เลื่อย

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของขี้เลื่อยโดยอาศัยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการพบว่าขี้เลื่อยมีค่าความร้อน (Gross Calorific Value) เท่ากับ 3,845 cal/g

3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

องค์ประกอบทางเคมีของแกลบก็สามารถวิเคราะห์ได้จาก Proximate Analysis และ Ultimate Analysis เช่นเดียวกัน โดยได้ทำการส่งตัวอย่างแกลบในจังหวัดเพชรบุรีมวล 1 kg เพื่อนำไปวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.2

3.1.4 ค่าความร้อนของแกลบ

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของแกลบโดยอาศัยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการพบว่าแกลบมีค่าความร้อน (Gross Calorific Value) เท่ากับ 3,419 cal/g

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

Proximate Analysis (%)		Ultimate Analysis (%)	
Volatile Matter	57.3	Carbon	40.6
Fixed Carbon	15.6	Hydrogen	5.4
Ash	17.1	Nitrogen	0.33
Moisture	10.0	Sulfur	0.05
		Oxygen	36.5

3.2 สูตรเคมีของขี้เลื่อยและแกลบ

3.2.1 การคำนวณสูตรเคมีของขี้เลื่อย

ตารางที่ 3.3 วิธีการคำนวณสูตรเคมีของขี้เลื่อย

Substance	%	Kg/(kg/mole)	Mole	Mole/mole of C
C	46.4	46.4/12	3.86	1
H	7.1	7.1/1	7.1	1.83
O	44.8	44.8/16	2.8	0.72
N	0.12	0.12/14	0.0085	0.0022
S	0.03	0.03/32	0.00093	0.00024

3.2.2 การคำนวณสูตรเคมีของแกลบ

ตารางที่ 3.4 วิธีการคำนวณสูตรเคมีของแกลบ

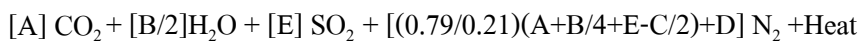
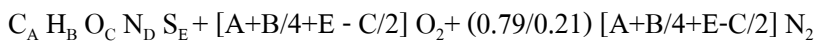
Substance	%	Kg/(kg/mole)	Mole	Mole/mole of C
C	40.6	40.6/12	3.38	1
H	5.4	5.4/1	5.4	1.59
O	36.5	36.5/16	2.28	0.67
N	0.33	0.33/14	0.023	0.0068
S	0.05	0.05/32	0.0015	0.00044

3.3 การคำนวณหาอัตราการใช้ของอากาศสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน

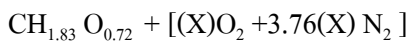
3.3.1 เชื้อเพลิงขี้เลื่อย

การคำนวณปริมาณอากาศเผาไหม้สมบูรณ์

สมการเผาไหม้



ปริมาณอากาศทางทฤษฎี

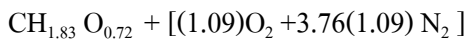


เมื่อ

$$X = A+B/4+E - C/2$$

$$X = 1+1.83/4+0.00024-0.72/2$$

$$= 1.09$$



$$25.35 \quad 149.63$$

$$1 \quad 5.90$$

ขี้เลื่อย 1 kg ต้องการอากาศเผาไหม้สมบูรณ์ตามทฤษฎี 5.90 kg

$$\text{Equivalent Ratio} = 0.225$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศในการผลิตก๊าซจากเชื้อเพลิง 1 kg} &= 0.225 \times 5.90 \\ &= 1.327 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{เชื้อเพลิง 1 kg ต้องการอากาศ} = 1.327$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นอัตราส่วน Air/Fuel Ratio, A/F} &= 1.327/1 \\ &= 1.327 \text{ kg Air/kg Fuel} \end{aligned}$$

$$\text{อากาศที่ } 30^\circ\text{C } 1 \text{ atm, ค่าความหนาแน่น, } p = 1.217 \text{ kg/m}^3$$

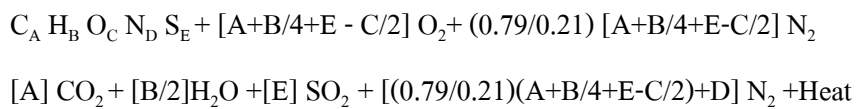
$$\begin{aligned} \text{ต้องการอากาศในการผลิตก๊าซ} &= 1.327/1.217 \\ &= 1.09 \text{ m}^3 \text{ Air/kg Fuel} \end{aligned}$$

ดังนั้นเชื้อเพลิง 1 kg ต้องการใช้ปริมาณอากาศ 1.09 m³ เพื่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

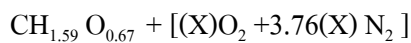
3.3.2 เชื้อเพลิงแกลบ

การคำนวณปริมาณอากาศเผาไหม้สมบูรณ์

สมการเผาไหม้



ปริมาณอากาศทางทฤษฎี

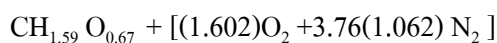


เมื่อ

$$X = A+B/4+E - C/2$$

$$X = 1+1.59/4+0.00044-0.67/2$$

$$= 1.062$$



$$24.31 \quad 45.92$$

$$1 \quad 6.31$$

แกลบ 1 kg ต้องการอากาศเผาไหม้สมบูรณ์ตามทฤษฎี 6.001 kg

Equivalent Ratio = 0.225

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศในการผลิตก๊าซจากแกลบ 1 kg} &= 0.225 \times 6.001 \\ &= 1.5306336 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{แกลบ 1 kg ต้องการอากาศ} = 1.5306336$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นอัตราส่วน Air/Fuel Ratio, A/F} &= 1.5306336/1 \\ &= 1.5306336 \text{ kg Air/} \ddot{e}\text{g Fuel} \end{aligned}$$

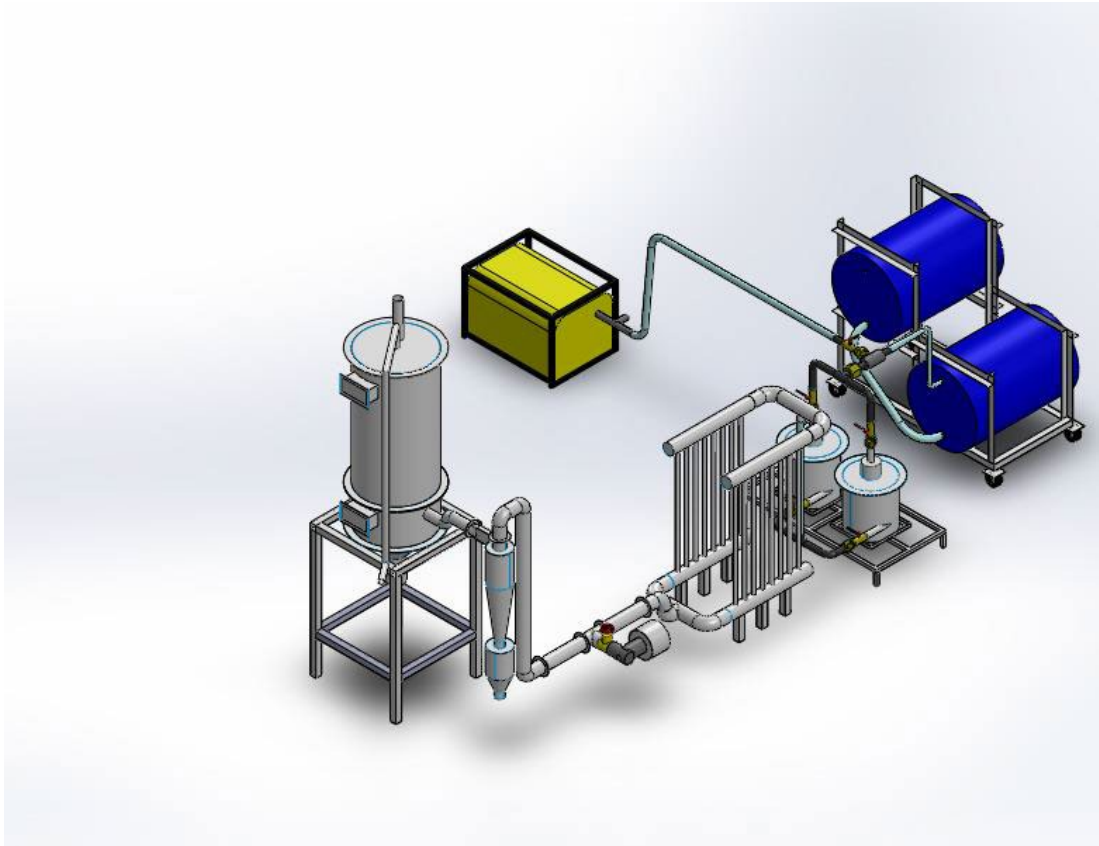
อากาศที่ 30°C 1 atm, ค่าความหนาแน่น, $\rho = 1.44 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned} \text{ต้องการอากาศในการผลิตก๊าซ} &= 1.5306336/1.44 \\ &= 1.062 \text{ m}^3 \text{ Air/kg Fuel} \end{aligned}$$

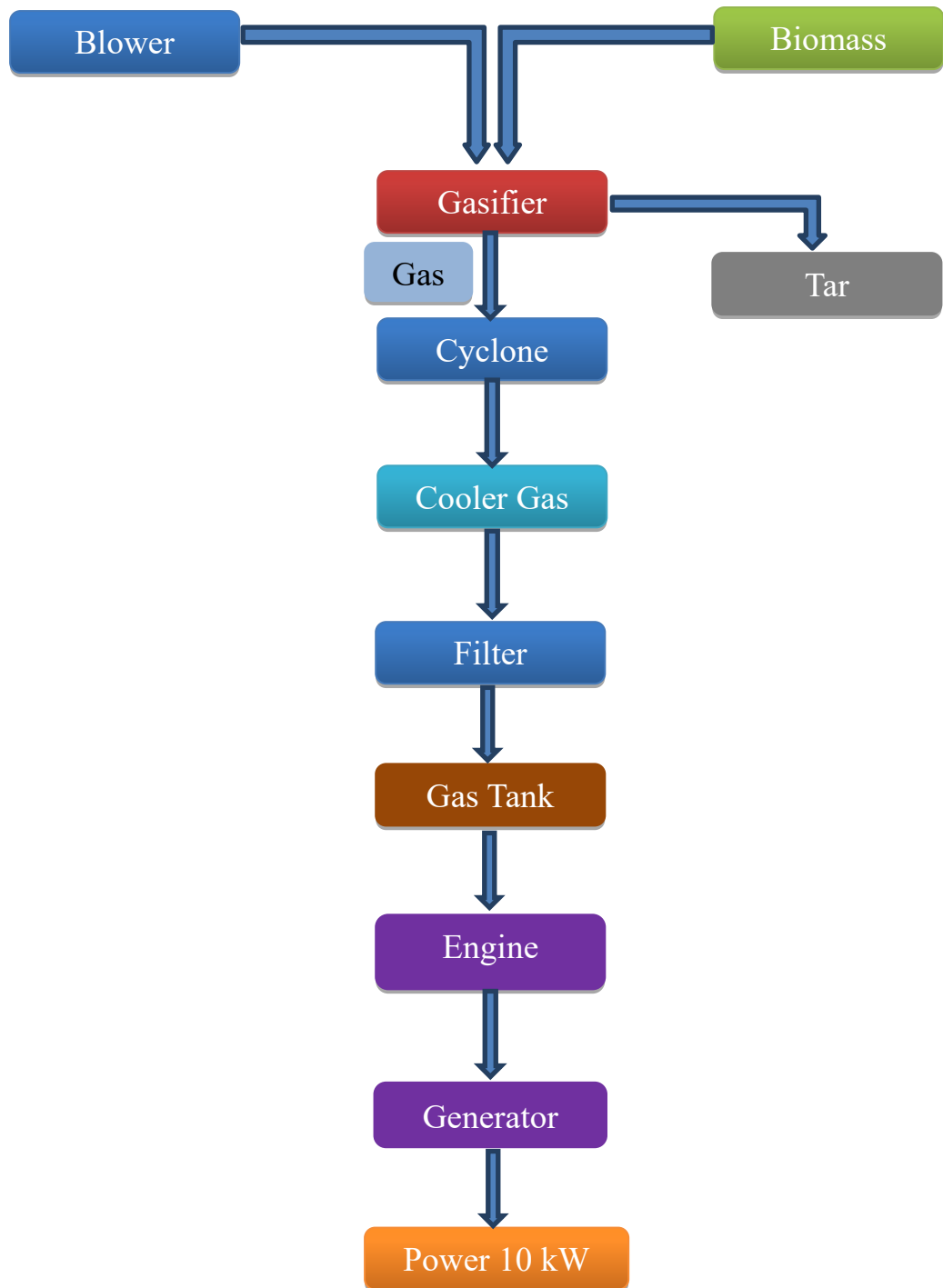
ดังนั้นแกลบ 1 kg ต้องการใช้ปริมาณอากาศ 1.062 m³ เพื่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

3.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล

การคำนวณและการออกแบบส่วนต่างๆของระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลสำหรับชุมชนด้วยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งอากาศไหลลงนั้น เป็นการออกแบบโดยจะป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเข้าไปในเตาผลิตแก๊ส จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แล้วได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ออกมา ซึ่งจะนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก 4 จังหวะ ถูกสูบเคียวและสามารถผลิตเป็นไฟฟ้าได้ การคำนวณและการออกแบบนั้น เป็นการออกแบบเพื่อศึกษาแฟลคเตอร์ต่างๆของระบบที่ทำให้ระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดจากการใช้ชีวมวลอัดเม็ดตามวัตถุประสงค์ ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลสำหรับชุมชนด้วยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งอากาศไหลลงนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิของระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบเบดนิ่ง
อากาศไหลลง



รูปที่ 3.2 แผนภูมิ ระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบเบดนิ่ง
อากาศไหลลง

3.5 รายละเอียดของเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.5.1 เครื่องยนต์ดีเซล ขนาดเล็ก (Small Diesel Engine)

มีข้อมูลทางเทคนิค

- เครื่องยนต์/รุ่น : TGD 1100
- แบบเครื่องยนต์ : เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ลูกสูบเดี่ยว
- ขนาดกระบอกสูบ × ช่วงชัก : 92×90 mm
- ปริมาตรช่วงชัก : 598 cm³
- ความจุน้ำมันหล่อลื่น : 2.3 liter
- อัตราส่วนการอัด : 21:1
- กำลังงานสูงสุด : 8.21 KW , at 2400 rpm.
- กำลังที่กำหนดต่อเนื่อง : 7.09 KW , at 2400 rpm.
- แรงบิดสูงสุด : 3.5 kg-m , at 1800 rpm
- ระบบฉีดน้ำมันและปั๊ม : Bosch
- ลักษณะห้องเผาไหม้และหัวฉีด : ห้องเผาไหม้ช่วยแบบ Swirl chamber
- แบบระบบระบายความร้อน : หม้อน้ำรังผึ้ง
- ชนิดของระบบเริ่มการเดินเครื่อง : มือหมุนสตาร์ท
- น้ำหนักเครื่องยนต์ : 117 kg.

3.5.2 เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative Generator)

มีข้อมูลทางเทคนิคต่อไปนี้

- ยี่ห้อ : Super Folk - จำนวนเฟส : 1 Phase
- ชนิด : AC Alternative
- ความเร็วรอบสูงสุด : 1500 rpm.
- กำลังสูงสุด : 5 KW.
- แรงดัน : 220 VAC
- กระแสไฟฟ้า : 22.5 Amp
- ความถี่กระแส : 50 Cycle

3.6 การคำนวณหาค่าพลังงานและภาระของเครื่องยนต์

3.6.1 เครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก 4 จังหวะ

3.6.1.1 ขนาดความจุของเครื่องยนต์ขนาดเล็ก

เครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก 4 จังหวะ ขนาด 1 ลูกสูบ โดยมีข้อมูลดังต่อไปนี้

- ขนาดกำลังสูงสุด 8.21kW, 2,400rpm.
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ 92 mm.
- ระยะชัก (Stroke) 90mm.
- ปริมาตรกระบอกสูบ 598cm³

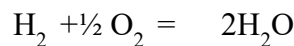
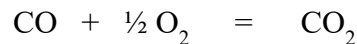
3.6.1.2 การคำนวณปริมาณอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์

เมื่อเครื่องยนต์เบนซินทำงานโดยการจ่ายเชื้อเพลิงแบบร่วมของน้ำมันเบนซินร่วมกับแก๊สชีวมวล

ถ้าใช้ V_{air} = อัตราการไหลของอากาศ

V_{gas} = อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล

สำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของ แก๊สชีวมวล ในเครื่องยนต์



- ความต้องการ O_2 / gas ratio, สำหรับการเผาไหม้ CO

$$\begin{aligned} &= \frac{16(\frac{1}{2} O_2 \text{ moles}) \times 25(CO \%) \times 100(O_2 \%)}{28(1 \text{ CO moles})} \\ &= 0.143 \end{aligned}$$

- ความต้องการ O_2 / gas ratio, สำหรับการเผาไหม้ H_2

$$\begin{aligned} &= \frac{16(\frac{1}{2} O_2 \text{ moles}) \times 10(H_2 \%) \times 100(O_2 \%)}{2(1 \text{ H}_2 \text{ moles})} \\ &= 0.8 \end{aligned}$$

∴ ค่าอัตราความต้องการโดยรวม = 0.143 + 0.8 = 0.943

3.6.1.3 การหาอัตราการบรรจุเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์เบนซิน

การหาอัตราการบรรจุเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ โดยกำหนด อัตราส่วนการเผาไหม้สมบูรณ์เป็น 1 : 1 ทำงานที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ซึ่งสัมพันธ์กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ 0.9 สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 50 Hz และเครื่องยนต์มี ประสิทธิภาพ 0.2 ซึ่งต้องการผลิตไฟฟ้าขนาด 10 kW

$$\begin{aligned} \text{หาการทำงานของเพลาส่งกำลัง} \quad \text{Shaft Work} &= 10 \text{ kW} / 0.9 \\ &= 11.11 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หาปริมาณเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สซิเคชั่น} \quad \text{Fuel Gas} &= 11.11 \text{ kW} / 0.2 \\ &= 55 \text{ kW} \end{aligned}$$

การหาอัตราการบรรจุเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์เบนซิน จาก

$$\begin{aligned} Q &= \frac{55 \text{ kW}}{4000 \text{ kJ/m}^3} \times \frac{3600 \text{ kJ/hr}}{1 \text{ kW}} \\ Q &= 49.5 \text{ m}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

เมื่อ อัตราส่วนการเผาไหม้สมบูรณ์เป็น 1 : 1

ดังนั้น

$$Q_a = Q_g$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{อัตราการบรรจุเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์หาจาก} \quad Q_a + Q_g &= 49.5 + 49.5 = 99 \text{ m}^3/\text{hr.} \\ &\approx 100 \text{ m}^3/\text{hr.} \end{aligned}$$

หาขนาดของเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ

$$\text{จาก} \quad D_v \times \frac{N}{2} \times 60 = 100 \text{ m}^3/\text{hr}$$

เมื่อ D_v คือ ขนาดของเครื่องยนต์

N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์

$$\begin{aligned} D_v \times \frac{1500}{2} \times 60 &= 100 \text{ m}^3/\text{hr.} \\ D_v &= 2.22 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \\ &= 2.22 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times \frac{1000 \text{ liter}}{1 \text{ m}^3} \\ D_v &= 2.2 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ขนาดของเครื่องยนต์เบนซินคือ 2.2 ลิตร

3.7 การคำนวณในการออกแบบเตาผลิตแก๊ส

3.7.1 การหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

จากการศึกษาประเภทของชีวมวล จะใช้ชีวมวลจากแกลบและขี้เลื่อย เนื่องจากมีค่าความร้อนสูง และมีปริมาณขี้เถ้าต่ำ โดยอากาศจะประกอบไปด้วยออกซิเจน (O_2) = 23% ซึ่งจะสามารถหาค่าของส่วนประกอบทางเคมีได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.5 การคำนวณหาปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง	% โดยมวล	สมการการไหล	มวลของออกซิเจนที่ต้องการต่อเชื้อเพลิง 1 kg
C	50.3	$C + O_2 = CO_2$ (12+32=44)	$\frac{50.3}{100} \times \frac{32}{12} = 1.3413$
H ₂	5.7	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$ 4+32 = 36	$\frac{5.7}{100} \times \frac{32}{4} = 0.4560$
S	2.7	$S + O_2 = SO_2$ 32+32 = 64	$\frac{2.7}{100} \times \frac{32}{32} = 0.0027$

ตารางที่ 3.6 การคำนวณหาปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg (ต่อ)

ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง	% โดยมวล	สมการการไหล	มวลของออกซิเจนที่ต้องการ / เชื้อเพลิง 1 kg
O ₂	41.0	-	$\frac{41}{100} = 0.4100$
N ₂	0.2	-	-

มวลของ O₂ ทั้งหมด = 1.3413 + 0.4360 + 0.027 = 1.8kg

แต่เชื้อเพลิงมี O₂ อยู่แล้ว 0.41 kg

ดังนั้น น้ำหนักออกซิเจนที่ต้องการจริงๆ คือ

$$1.8 - 0.41 = 1.39 \text{ kg}$$

ในอากาศมี O₂ 23% เพราะฉะนั้นปริมาณอากาศจะเท่ากับ

$$\frac{100}{23} \times 1.39 = 6.0435 \text{ kg} \approx 6 \text{ kg}$$

ดังนั้น ในการเผาไหม้ชีวมวล 1 kg ในแบบปกติจะใช้ปริมาณอากาศ 6 kg

3.7.2 การหาอัตราการป้อนชีวมวล

กำหนดให้ปริมาณเชื้อเพลิง สามารถใช้งานได้กับเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า ขนาด 10 kW. และมีค่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์เป็น 0.2 ซึ่งสามารถหาปริมาณเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้จาก

$$m_{\text{fuel}} = (10 \text{ kW}) \left(\frac{3600 \text{ kJ/hr}}{1 \text{ kW}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{15 \text{ MJ}} \right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{1000} \right) \left(\frac{1}{0.2} \right)$$

$$m_{\text{fuel}} = 12 \text{ kg/hr}$$

หลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในแต่ละครั้ง จะได้เศษขี้เถ้าและถ่าน 40% และในส่วนที่เหลือ 60% จะเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งสามารถคำนวณหา ปริมาณชีวมวลที่ป้อนเข้าเตาผลิตแก๊ส ได้จาก

$$m_{\text{Biomass Feed}} = \left(12 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \times \left(\frac{1}{0.6} \right) = 20 \text{ kg/hr}$$

3.7.3 การคำนวณหาขนาดปริมาตรเตา

เนื่องจากอัตราการป้อนชีวมวลที่คำนวณออกมาได้นั้น เป็นอัตราส่วนน้ำหนักต่อเวลา แต่ในการออกแบบเตาผลิตแก๊สนั้น จำเป็นต้องทราบปริมาตรที่เหมาะสม จึงต้องมีการคำนวณหาอัตราส่วนปริมาตรต่อเวลา ซึ่งหาได้จาก

$$Q_{\text{biomass feed}} = \frac{\text{Mass Flow Rate}}{\text{Density}}$$

$$= 20 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{600 \text{ kg}}$$

$$Q_{\text{biomass feed}} = 0.0333 \text{ m}^3/\text{hr.}$$

กำหนดให้มีการป้อนชีวมวลทุกๆ 2 ชั่วโมง สามารถหาค่าปริมาตรของชีวมวลได้จาก

$$V_{\text{biomass}} = Q_{\text{biomass feed}} \times t$$

$$=0.0333 \frac{\text{m}^3}{\text{hr.}} \times 2 \text{ hr.}$$

$$=0.0666 \text{ m}^3$$

ภายในเตาจะมีท่อส่งอากาศเข้าเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.072 m. ยาว 0.75 m. สามารถหาปริมาตรของท่อได้จาก

$$\begin{aligned} V_{\text{pipe}} &= \pi r^2 h \\ &= \pi \times \left(\frac{0.072}{2} \right)^2 \times 0.75 \\ &= 0.0031 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ปริมาตรของเตา} &= V_{\text{biomass}} + V_{\text{pipe}} \\ &= 0.0666 + 0.0031 \\ &= 0.0697 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

ดังนั้นจะสามารถหารัศมีของเตาผลิตแก๊สได้จากสมการ โดยจะกำหนดให้ความสูงของเตาคือ 1 m.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\frac{V}{\pi h}} \\ &= \sqrt{\frac{0.0697 \text{ m}^3}{\pi \times 1 \text{ m}}} \\ &= 0.149 \approx 0.15 \text{ m} \end{aligned}$$

∴ขนาดของเตาผลิตแก๊ส คือ สูง 1 m. และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 m.

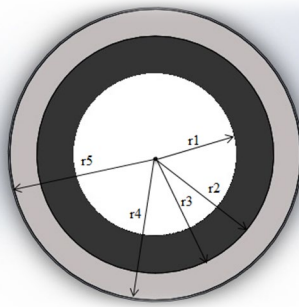
3.7.4 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก

โดยมีค่า k ของฉนวนชนิดต่างๆดังนี้

ค่า k ของเหล็ก = 44.96 W/m·K

ค่า k ของเซรามิกไฟเบอร์ = 0.220 W/m·K

ค่า k ซีเมนต์ทันทไฟ = 1.87 W/m·K



รูปที่ 3.3 การออกแบบผนังทรงกระบอกเตาแก๊สซีไฟเออร์

จากสมการหาอัตราการนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้นของทรงกระบอก

$$\dot{Q} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) / 2\pi L K} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{R_{\text{cond}}}$$

รัศมีของเตาและฉนวนทั้งหมด

R1=150 mm. R2= 220 mm. R3=223 mm. R4=270 mm. R5=273 mm.

$$\dot{Q} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 4})}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L K_{\text{ซีเมนต์}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L K_{\text{เหล็ก}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L K_{\text{เซรามิกไฟเบอร์}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi L K_{\text{เหล็ก}}}}$$

$$\dot{Q} = \frac{(1200 - 35)}{\frac{\ln\left(\frac{220}{150}\right)}{2\pi \times 1 \times 1.87} + \frac{\ln\left(\frac{223}{220}\right)}{2\pi \times 1 \times 44.96} + \frac{\ln\left(\frac{270}{223}\right)}{2\pi \times 1 \times 0.220} + \frac{\ln\left(\frac{273}{270}\right)}{2\pi \times 1 \times 44.96}}$$

$\dot{Q} = 6811.28 \text{ W. หรือ } 6.81128 \text{ kW.}$

3.7.5 ค่าความดันสูญเสียในเตา

จาก
$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

โดยที่เตาสูง 1 m. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 m. พนักภายในทำจาก คอนกรีตทนไฟมีค่าความขรุขระ 3 mm.

เมื่อ
$$Q = AV$$

ดังนั้น
$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.02}{0.07068} = 0.2829 \text{ m/s}$$

และ
$$Re = \frac{\rho DV}{\mu}$$

เมื่อ
$$\rho = 0.42095$$

$$\mu = 3.43 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

$$Re = \frac{0.42095 \times 0.30 \times 0.2829}{3.43 \times 10^{-5}}$$

$$= 1041.575$$

ค่าเรย์โนลด์มีเบอร์มีค่าต่ำกว่า 2000 ถือเป็นการไหลแบบราบเรียบ ดังนั้นค่า

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1041.575} = 0.0614$$

จะได้
$$h_{L3-4} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$= 0.0614 \frac{1}{0.3} \frac{0.2829^2}{2 \times 9.81}$$

$$= 0.0008348 \text{ m.}$$

3.7.6 การออกแบบชุด Cyclone

เนื่องจากแก๊สที่ได้จากเตามีอุณหภูมิสูง จึงทำให้ปริมาตรของแก๊สขยายตัวมากขึ้น ดังนั้น อัตราการไหลของแก๊สจึงเพิ่มขึ้นด้วย จากกฎของแก๊ส ที่แปรผันตามอุณหภูมิ

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{V_1}{700+273} = \frac{49.5 \text{ m}^3/\text{hr.}}{30+273}$$

$$V_1 = 158 \text{ m}^3/\text{hr.}$$

เมื่อ $V_1 = Q = 158 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ (} 0.043 \text{ m}^3/\text{s)}$

$$V = 15 \text{ m/s}$$

หาขนาด Cyclone จากสมการ

$$D = 3.162 \times \sqrt{\frac{Q}{V}}$$

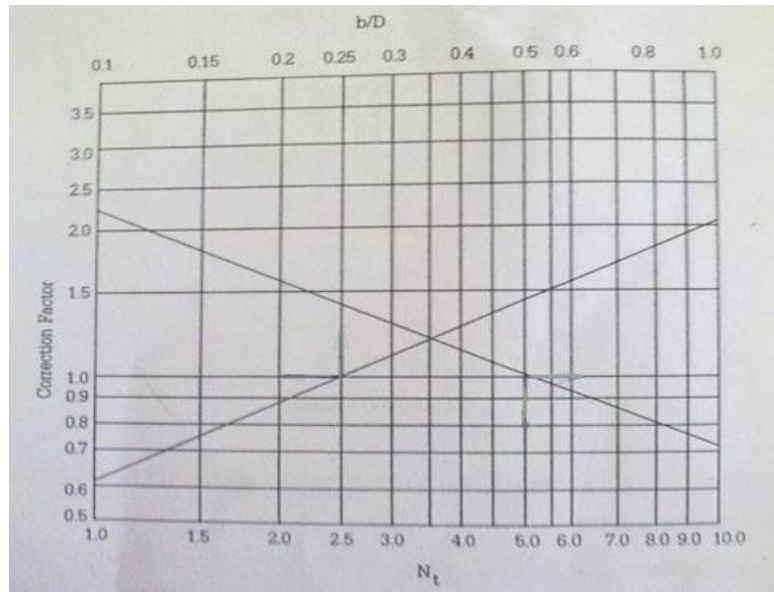
เมื่อ $Q = \text{อัตราการไหล}$

$V = \text{ความเร็วก่อนเข้า Cyclone}$

$$\begin{aligned} \therefore D &= 3.162 \times \sqrt{\frac{0.043}{15}} \\ &= 0.17 \text{ m.} \end{aligned}$$

หาความดันสูญเสียของไซโคลน (พรชัย จงจิตรไพศาล. พศจิกายน 2548)

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0.002 \times \rho \times v^2 \times N_H \\ \text{เมื่อ } N_H &= 6.4 \quad \text{จะได้ } \Delta p = 0.002 \times 1.2 \times 15^2 \times 6.4 \\ \Delta p &= 3.456 \text{ inch H}_2\text{O} \end{aligned}$$



รูปที่ 3.4 ค่า N_t

จากรูปที่ 3.4 เมื่อ $b = 3.4\text{cm}$, $D = 17\text{ cm}$ จะได้ $b/D = 0.2$ และ correction Factor = 1.6 และ $N_t = 2.0$

$$N_t = 2.0 \times 1.6 = 3.2$$

หาค่า
$$d_c = \sqrt{\frac{96.8 \cdot \eta \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N_t \cdot v \cdot (\rho_p - \rho_f)}}$$

เมื่อ $\rho_p = 850\text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 0.457\text{ kg/m}^3$, $\eta = 3.55 \times 10^{-5}$ และวัสดุมีขนาดเฉลี่ย $60\text{ }\mu\text{m}$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\frac{96.8 \cdot 3.55 \times 10^{-5} \cdot 0.034}{2 \cdot \pi \cdot 32 \cdot 15 \cdot (850 - 0.457)}} \\ &= 6.75 \times 10^{-6}\text{m.} \end{aligned}$$

หาค่าประสิทธิภาพของไซโคลน จาก

$$\begin{aligned} \eta_{\text{eff}} &= \frac{d}{d + d_c} \\ &= \frac{60}{60 + 6.75} \\ &= 0.89 \\ &= 89\% \end{aligned}$$

3.7.7 การออกแบบชุดลดอุณหภูมิแก๊ส(Gas Cooler)

เนื่องจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีอุณหภูมิที่สูง จึงได้มีการคำนวณออกแบบชุดลดอุณหภูมิแก๊สขึ้นมาเพื่อที่จะลดอุณหภูมิแก๊สให้ลดลง เพื่อที่จะนำไปเข้าเครื่องยนต์ต่อไป โดย

กำหนดให้อุณหภูมิแก๊สที่เข้าคูลเลอร์อยู่ที่ $T_i=400^\circ\text{C}$ ด้วยความเร็ว $u=7.7$ m/s อุณหภูมิแก๊สที่ออกจากคูลเลอร์ $T_o=50^\circ\text{C}$ และไหลในท่อเหล็กผนังบางเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_i=2.54$ cm. โดยการพาความร้อนผ่านอากาศ $T_\alpha=37^\circ\text{C}$ และมีความเร็ว 0.1 m/s ความยาวท่อเป็น 1 m. โดยจะทำการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ความร้อนที่สูญเสีย และความยาวท่อทั้งหมด

ซึ่งคุณสมบัติของแก๊สจะเทียบกับตารางคุณสมบัติของอากาศ โดยจะทำการประมาณค่าออกมา จะได้

Gas @ 400°C ; 673 K

$$\rho=0.5246 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1.0688 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$\mu=3.2483 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

$$\nu=62.07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k=0.05080 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Pr=0.683$$

หาค่า Reynolds Number ของแก๊ส

$$\text{จากสมการ} \quad Re = \frac{\mu D_i}{\nu} = \frac{7.7 \times 0.0254}{62.07 \times 10^{-6}} = 3150.95$$

เนื่องจาก $Re > 2000$ จึงถือว่าเป็นการไหลแบบ Turbulence

จากสมการของ Dittus-Borlter ใช้หาค่า h_i

$$h_i = N_u \frac{k}{D_i}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad N_u &= 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.3} \\ &= 0.023(3150.95)^{0.8}(0.683)^{0.3} \\ &= 12.9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าใน} \quad h_i &= 12.9 \frac{0.05080}{0.0254} \\ &= 25.8 \text{ W/m}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

และทำการประมาณค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง

$$T_f = \frac{(400+37)}{2} = 218.5 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 220 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Air @ 220°C; 673 K

$$v = 36.84 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$k = 0.0398 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Pr = 0.6805$$

หาค่า Reynolds Number ของอากาศ เมื่อ $u_{\text{อากาศ}} = 0.1 \text{ m/s}$

$$\text{จากสมการ} \quad Re = \frac{u}{v} D = \frac{0.1 \times 0.0254}{36.84 \times 10^{-6}} = 68.94$$

เนื่องจาก $Re < 2000$ จึงถือว่าเป็นการไหลแบบ Laminar โดยจะใช้ค่า $Nu = 3.66$ เพื่อหาค่า h_o

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad h_o &= Nu \frac{k}{D_o} \\ &= 3.66 \frac{0.0398}{0.0254} \\ &= 5.7 \text{ W/m}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

โดยไม่คิดค่าความต้านทานความร้อนของผนังท่อ

หาค่าประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนจากสมการ

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{25.8} + \frac{1}{5.7}} \\ &= 4.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

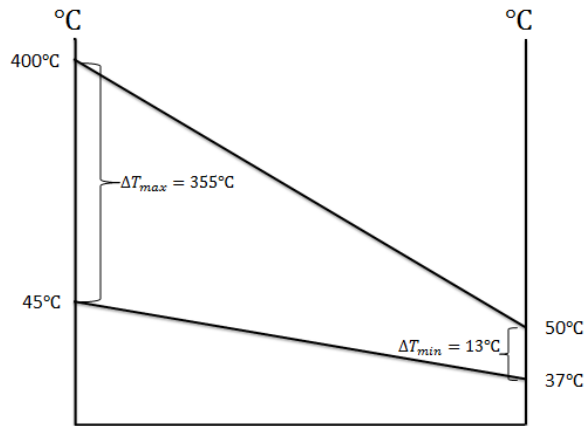
หาอัตราการสูญเสียความร้อน จากสมการ

$$\begin{aligned} Q_L &= AU\Delta T \\ &= (\pi)(0.0254)(4.6)(400-37) \\ &= 133.24 \text{ W/m} \end{aligned}$$

พื้นที่การกระจายอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะหาได้จากผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม

$$\begin{aligned} \text{หาค่า} \quad \Delta T_{\ln} &= \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \\ &= \frac{(400-45) - (50-37)}{\ln \frac{(400-45)}{(50-37)}} \end{aligned}$$

$$\Delta T_{\ln} = 103.4$$



รูปที่ 3.5 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอกการิทึม

หาพื้นที่สำหรับการกระจายอุณหภูมิ จากสมการ

$$Q = AU\Delta T_{ln}$$

จะได้

$$A = \frac{Q}{U\Delta T_{ln}} = \frac{133.24}{4.6 \times 103.4} = 0.28 \text{ m}^2$$

หาอัตราการสูญเสียความร้อนของแก๊ส จากสมการ

$$Q_{\text{Gas}} = m \cdot c_p (T_i - T_o)$$

$$= 3.33 \times 10^{-3} (1068.8)(400 - 50)$$

$$= 1245.6 \text{ W.}$$

หาความยาวของท่อทั้งหมด จาก

$$L = \frac{Q_{\text{Gas}}}{Q_L}$$

$$= \frac{1245.6 \text{ W}}{133.24 \text{ W/m}}$$

$$= 9.3 \text{ m.}$$

เพราะฉะนั้น จะได้จำนวนท่อที่ใช้ในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 9 ท่อ

3.7.8 การออกแบบถังพักแก๊ส (Gas Tank)

จากการคำนวณหาปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์พบว่า ใน 1 ชั่วโมงใช้เชื้อเพลิง 12 kg. โดยต้องการการสำรองแก๊สได้ประมาณ 5 นาที ต้องใช้เชื้อเพลิง 1 kg. โดยความหนาแน่นของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ 0.493 kg/m^3 (สุวิทย์ ม่วงคุณ, 2552) จะสามารถหาปริมาตรของถังพักแก๊สได้จากสมการหาความหนาแน่น

$$\rho = \frac{m}{v}$$

จะได้เป็น

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$v = \frac{1}{0.493}$$

$$V = 2.028 \text{ m}^3$$

หาขนาดของถังพักแก๊ส โดยกำหนดให้ขนาดของถังพักแก๊สใกล้เคียงกับความสูงของเตา คือ 1.8 m. สามารถหาได้จากสมการหาปริมาตรทรงกระบอก

$$v = \pi r^2 h$$

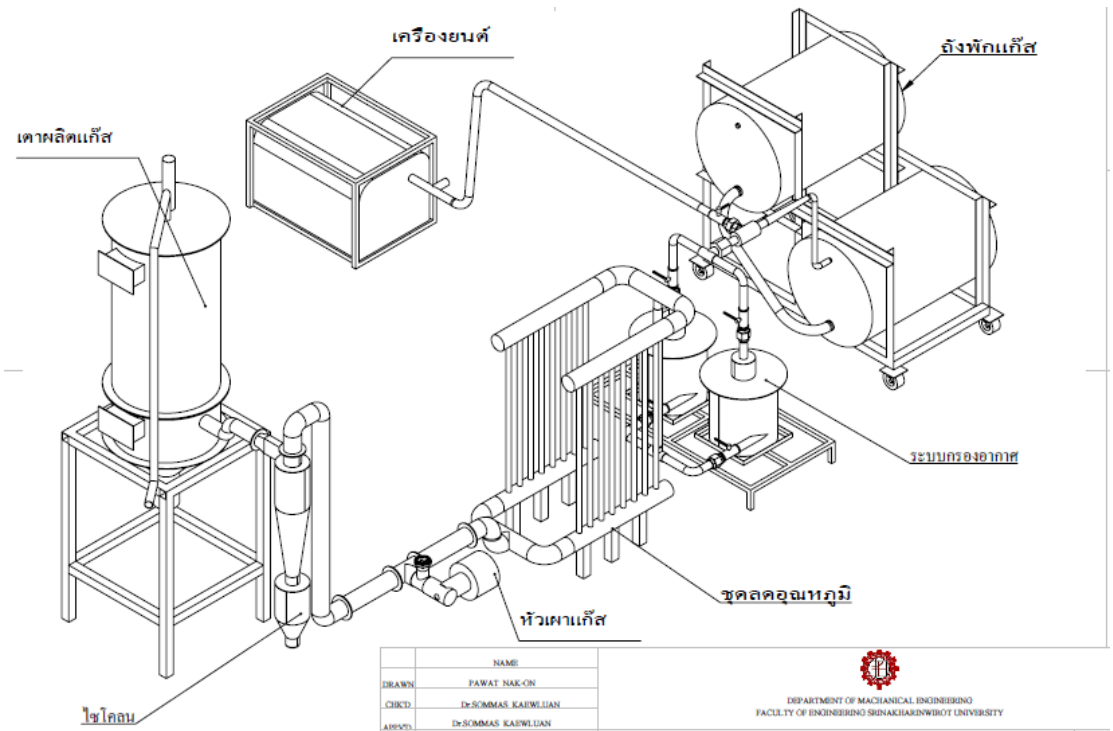
แทนค่า $2.028 = \pi r^2 \times 1.8$

$$r = 0.598 \text{ m.}$$

$$D = 1.19 \text{ m.} \approx 1.2 \text{ m}$$

∴ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังพักแก๊สคือ 1.2 เมตร ความสูงคือ 1.8 m.

3.8 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล



รูปที่ 3.6 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: แก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดคงที่เปลวไฟไหลลง



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: แก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบดคงที่
เปลวไฟไหลลง



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: ไชโคลอน



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องย่นไส้ขั้วมวล: ชุดลดอุณหภูมิแก๊ส



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: ชุดควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: ที่ดักเถ้า



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์สามมวล: เครื่องป้อนอากาศ



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: หัวเผาทดลองแก๊ส



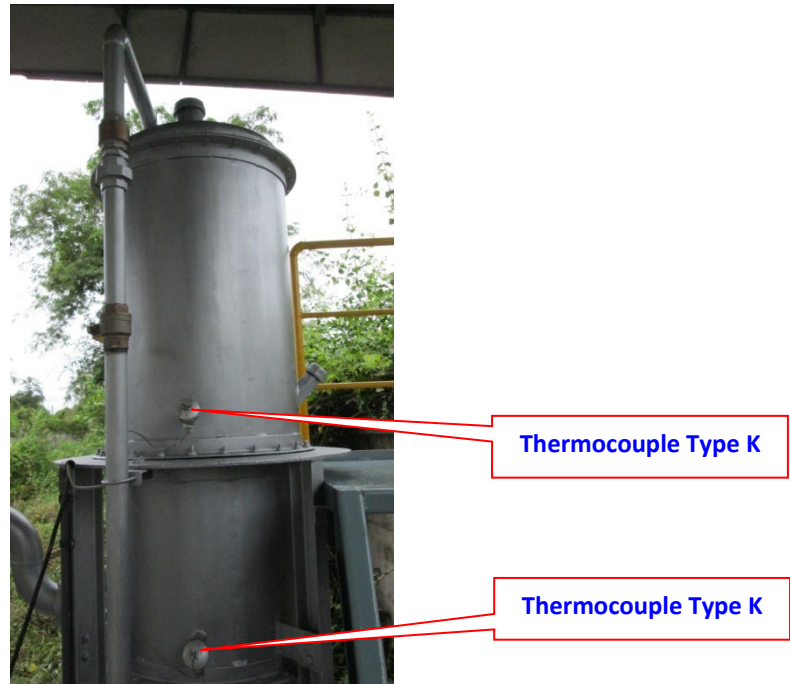
รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: ชุดพักแก๊ส



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: ชุดกรองแก๊ส



รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ชีวมวล: เครื่องยนต์พร้อม
เครื่องปั่นไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในเตาแก๊สซีฟเออร์และตำแหน่งการวัดคุณภาพของโปรคิวเซอร์ก๊าซที่ออกจากเตาแก๊สซีฟเออร์



รูปที่ 3.17 ระบบเตาแก๊สซีฟเออร์ชนิดเบดคงที่เปลวไฟไหลลง

3.9 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติขนาด 16 ช่องสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.18 เครื่องวิเคราะห์คุณภาพของโปรติวเซอร์ก๊าซแสดงดังรูปที่ 3.19 และเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำแบบอัลตราโซนิก

3.9.1 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติขนาด 16 ช่องสัญญาณ

อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบันทึกอุณหภูมิภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์ อุณหภูมิของโปรติวเซอร์ก๊าซก่อนเข้าสู่ชุดทำความเย็นให้กับโปรติวเซอร์ก๊าซและหลังออกจากชุดทำความเย็นให้กับโปรติวเซอร์ก๊าซ อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติดังกล่าวมีขนาด 16 ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ SUBCON โดยเชื่อมต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิลซึ่งทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.18 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติขนาด 16 ช่องสัญญาณ

3.9.2 เครื่องวิเคราะห์คุณภาพโปรติวเซอร์ก๊าซ

เครื่องวิเคราะห์คุณภาพโปรติวเซอร์ก๊าซที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์คุณภาพของโปรติวเซอร์ก๊าซในรูปของปริมาณส่วนในล้านส่วน (ppm) ขององค์ประกอบดังต่อไปนี้ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน



รูปที่ 3.19 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียและคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก

3.9.3 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำแบบอัลตราโซนิก

เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำแบบอัลตราโซนิกที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้สามารถวัดอัตราการไหลของน้ำในรูปของอัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s) และอัตราการไหลเชิงมวล (kg/s) โดยมีหลักการทำงานที่อาศัยการสะท้อนของคลื่นเสียงซึ่งมีตัวส่งและตัวรับสัญญาณอีกทีหนึ่ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลการทดลอง

พลังงานชีวมวลมีการใช้งานกันเป็นส่วนใหญ่ในชนบทของประเทศไทยมากกว่าหลายทศวรรษ จากการที่ประเทศมีความเจริญก้าวหน้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พลังงานชีวมวลมีแนวโน้มที่จะถูกนำไปใช้ในการผลิตพลังงานในรูปแบบที่ทันสมัยมากขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศต่อหัวในระหว่างปี ค.ศ. 1980-1996 มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่าตัว โดยมีการใช้พลังงานจากชีวมวลเพิ่มขึ้นถึง 68% นั่นแสดงให้เห็นว่ามีโรงไฟฟ้าที่ทำการผลิตพลังงานโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และจากการที่ภาครัฐได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้งานพลังงานชีวมวลทั้งในรูปแบบของการบูรณาการงบประมาณ การส่งเสริมการลงทุนและการออกกฎระเบียบที่เอื้ออำนวยต่อการดำเนินการตั้งแต่ปี ค.ศ. 1992 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ซึ่งในปัจจุบันมูลค่าของการนำเข้าของพลังงานมีค่าประมาณ 7% ของมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ ในปี ค.ศ. 2003 ประเทศไทยบริโภคพลังงานรวมกันเป็นเงินมูลค่าประมาณ 1,000 พันล้านบาท ซึ่งคิดเป็น 15% ของ มูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ โดยมีมูลค่าการนำเข้าพลังงานประมาณ 500 พันล้านบาท (Prasertsan 2006) จากการที่เศรษฐกิจมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงขึ้นและการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานในสัดส่วนที่สูงแต่ในขณะที่ศักยภาพทางพลังงานของชีวมวลก็มีค่าสูงอย่างมาก เช่นเดียวกันส่งผลให้ภาครัฐจำเป็นต้องมีการพัฒนาการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อลดความเสี่ยงทางด้านอุปทานของพลังงานและเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ในต่างประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในภูมิภาคเอเชียได้มีการประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นชีวมวลแบบไม่มีการปลูกสำหรับเป็นพืชพลังงานโดยเฉพาะเจาะจง (Non-Plantation Biomass) เช่นในประเทศศรีลังกาได้วิเคราะห์ศักยภาพของชีวมวลที่อยู่ในรูปของวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและจากอุตสาหกรรมไม้ มูลค่าจากปศุสัตว์ขนาดใหญ่ ขยะเทศบาลและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าศักยภาพทางพลังงานชีวมวลสำหรับปี ค.ศ. 1997 2005 และ 2010 มีค่าประมาณ 120 PJ 133 PJ และ 142 PJ ตามลำดับ โดยเมื่อนำชีวมวล

ดังกล่าวมาผลิตพลังงานไฟฟ้าจะได้ปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดประมาณ 8.34 TWh 9.24 TWh และ 9.85 TWh ตามลำดับ และคิดประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานที่ 25% (Perera et al. 2005) สำหรับการประเมินศักยภาพของพลังงานชีวมวลในประเทศฟิลิปปินส์นั้นพบว่าชีวมวลส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มูลสัตว์จากปศุสัตว์ เชื้อเพลิงไม้และถ่าน โดยในปี ค.ศ. 2010 พลังงานชีวมวลดังกล่าวจะมีค่าประมาณ 431 PJ (Elauria et al. 2005) ในประเทศอินเดียชีวมวลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเชื้อเพลิงไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและมูลสัตว์ ชีวมวลดังกล่าวมีศักยภาพทางพลังงาน โดยพิจารณาจากข้อมูลในปี ค.ศ. 1997 ประมาณ 5.14 EJ และมีค่าเพิ่มขึ้นในปี ค.ศ. 2010 เป็น 8.26 EJ (Ravindranath et al. 2005) โดยในส่วนของประเทศจีนพลังงานชีวมวลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มูลสัตว์จากปศุสัตว์ เชื้อเพลิงไม้ ขยะเทศบาลและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยชีวมวลดังกล่าวมีค่าพลังงานประมาณ 8.1 EJ และ 8.9 EJ ในปี ค.ศ. 2005 และปี ค.ศ. 2010 ตามลำดับ (Junfeng et al. 2005) สำหรับประเทศไทยได้มีการประเมินศักยภาพของพลังงานชีวมวลโดยพบว่าชีวมวลส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มูลสัตว์จากปศุสัตว์ เชื้อเพลิงไม้ ขยะเทศบาลและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีค่าพลังงานทั้งหมดในปี ค.ศ. 1997 ปี ค.ศ. 2005 และปี ค.ศ. 2010 ประมาณ 525 PJ 705 PJ และ 821 PJ ตามลำดับ (Sajakulnukit et al. 2005) จากการที่ประเทศไทยมีศักยภาพของพลังงานจากชีวมวลสูงดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงแหล่งพลังงาน (Energy Resource) และศักยภาพทางพลังงาน (Energy Potential) ของแกลบและขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในจังหวัดเพชรบุรี โดยจังหวัดเพชรบุรีเป็นจังหวัดที่มุ่งเน้นผลิตผลผลิตทางการเกษตรเช่นข้าวและแปรรูปไม้เป็นต้น โดยทำการพิจารณาผลผลิต (Yield) ของขี้เลื่อยที่ได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ และผลผลิตของแกลบที่ได้จากโรงสีข้าวในจังหวัดเพชรบุรีแล้วนำมาคำนวณหาค่าพลังงานของเชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อย (Energy Yield) หลังจากนั้นจึงนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณเทียบเท่าน้ำมัน (Ton Oil Equivalent) และจัดทำเป็นแผนที่ศักยภาพของแหล่งเชื้อเพลิงแกลบและแผนที่ศักยภาพทางพลังงานของแกลบต่อไป

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับศักยภาพทางพลังงานของแกลบและขี้เลื่อยในจังหวัดพัทลุง ได้อาศัยข้อมูลปริมาณแกลบและขี้เลื่อยเฉลี่ยต่อวัน (kg/day) จากสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดเพชรบุรีในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2550-2554 (2007-2011) ซึ่งมีผู้ประกอบการ โรงสีข้าวและโรงเลื่อย

รวมกันทั้งสิ้น 217 รายในปี พ.ศ. 2554 โดยมีรายละเอียดของจำนวนผู้ประกอบการ โรงสีข้าวและโรงเลื่อยแสดงดังตารางที่ 4.1

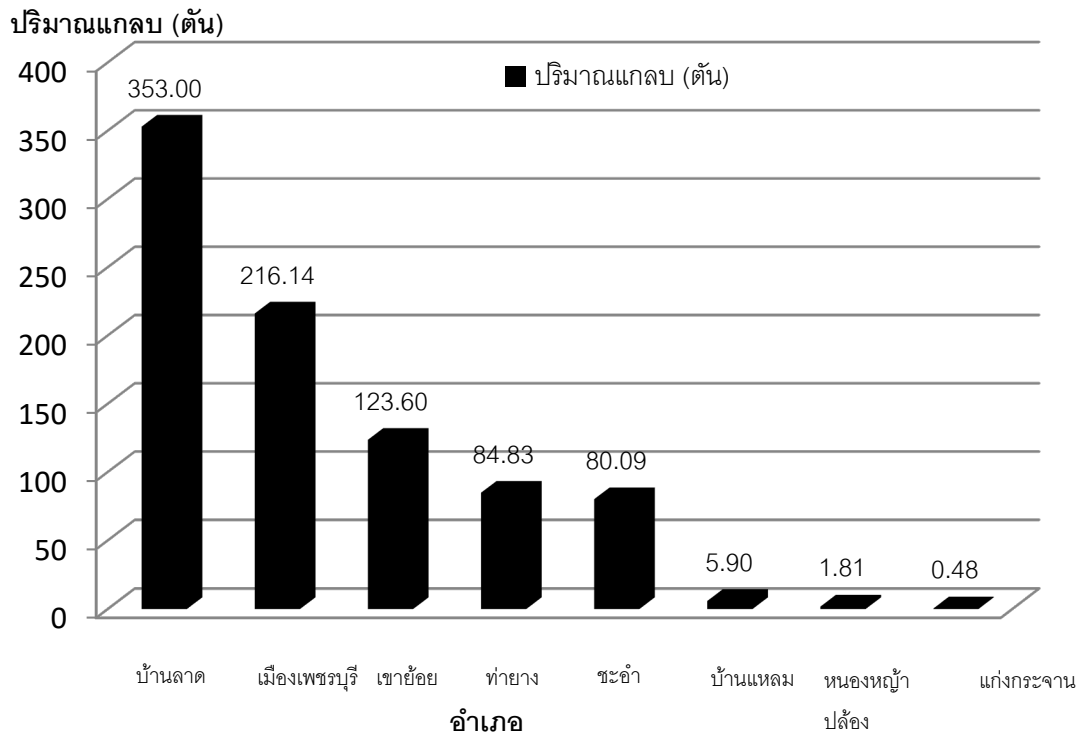
ตารางที่ 4.1 จำนวนผู้ประกอบการ โรงสีข้าวและโรงเลื่อยในจังหวัดเพชรบุรี

ปี พ.ศ.	2550	2551	2552	2553	2554
โรงสีข้าว	156	165	171	173	174
โรงเลื่อย	38	38	39	40	43

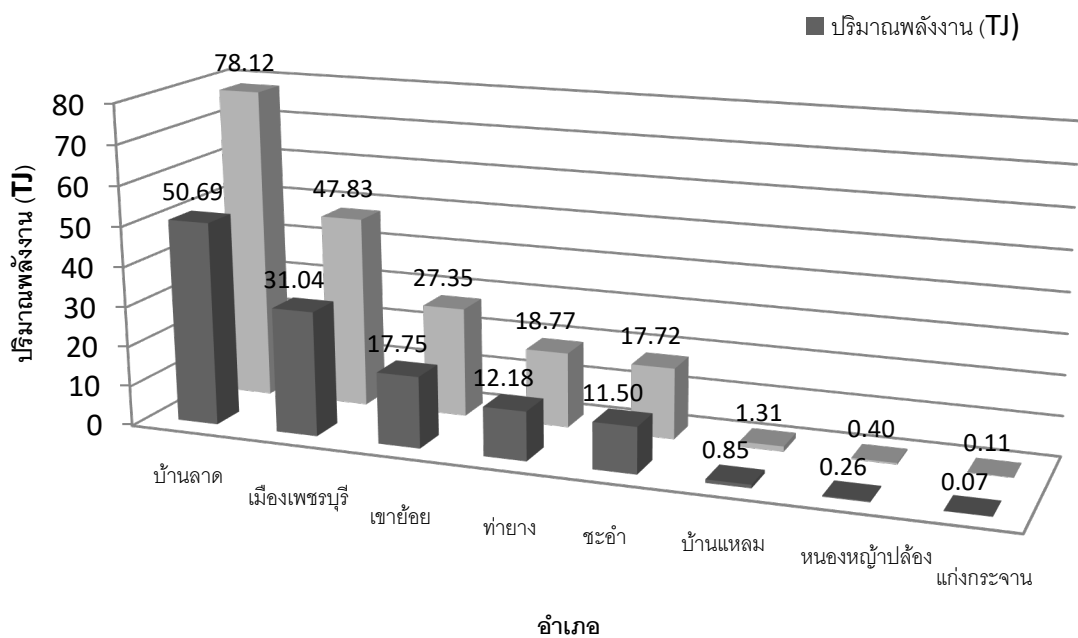
ในการหาผลผลิตของแกลบและจี้เลื่อยรายปีได้ใช้ข้อมูลปริมาณแกลบและจี้เลื่อยเฉลี่ยต่อวันแล้วนำมาคำนวณกับจำนวนวันทำการของโรงเลื่อยและโรงสีข้าวจะได้ปริมาณผลผลิตของแกลบและจี้เลื่อยในหน่วยตันต่อปี หลังจากนั้นจึงนำไปคำนวณกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแกลบและจี้เลื่อยที่ได้จากการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2105 โดยแกลบและจี้เลื่อยมีค่าความร้อนเท่ากับ 14,360 J/kg และ 16,149 kJ/kg ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำค่าผลผลิตทางพลังงานของแกลบในหน่วยล้านล้านจูล (TJ) และจี้เลื่อยในหน่วยล้านจูล (MJ) ที่ได้มาทำการเทียบเท่ากับน้ำมันโดยใช้ตัวแปลง 1 ton oil equivalent (toe) = 10,800 cal/kg โดยที่ 1 cal = 4.184 J สำหรับปริมาณเทียบเท่าน้ำมันของแกลบแสดงอยู่ในรูปของตันเทียบเท่าน้ำมัน (ktoe) และปริมาณเทียบเท่าน้ำมันของจี้เลื่อยแสดงอยู่ในรูปของกิโลตันเทียบเท่าน้ำมัน (ktoe) โดยในส่วนตัวสุดท้ายได้ทำการสร้างแผนที่ปริมาณผลผลิต (Yield) และแผนที่ศักยภาพทางพลังงาน (Energy Yield) ของแกลบโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป SURFER32

เมื่อนำปริมาณแกลบมาคำนวณหาปริมาณผลผลิตทั้งปีโดยพิจารณาจำนวนวันทำการของโรงสีข้าวจะได้ว่าในปี พ.ศ. 2553 ปริมาณแกลบในจังหวัดเพชรบุรีมีค่าประมาณ 90-110 ตันต่อปี โดยภาพที่ 1 เป็นการแสดงถึงปริมาณแกลบในแต่ละอำเภอของจังหวัดเพชรบุรีซึ่งพบว่า อำเภอบ้านลาดมีปริมาณแกลบเท่ากับ 353.00 ตัน อำเภอเมืองเพชรบุรีมีปริมาณแกลบเท่ากับ 216.14 ตัน อำเภอเขาย้อยมีปริมาณแกลบเท่ากับ 123.60 ตัน อำเภอท่ายางมีปริมาณแกลบเท่ากับ 84.83 ตัน อำเภอชะอำมีปริมาณแกลบเท่ากับ 80.09 ตัน อำเภอบ้านแหลมมีปริมาณแกลบเท่ากับ 5.90 ตัน อำเภอหนองหญ้าปล้องมีปริมาณแกลบเท่ากับ 1.81 ตัน และอำเภอแก่งกระจานมีปริมาณแกลบเท่ากับ

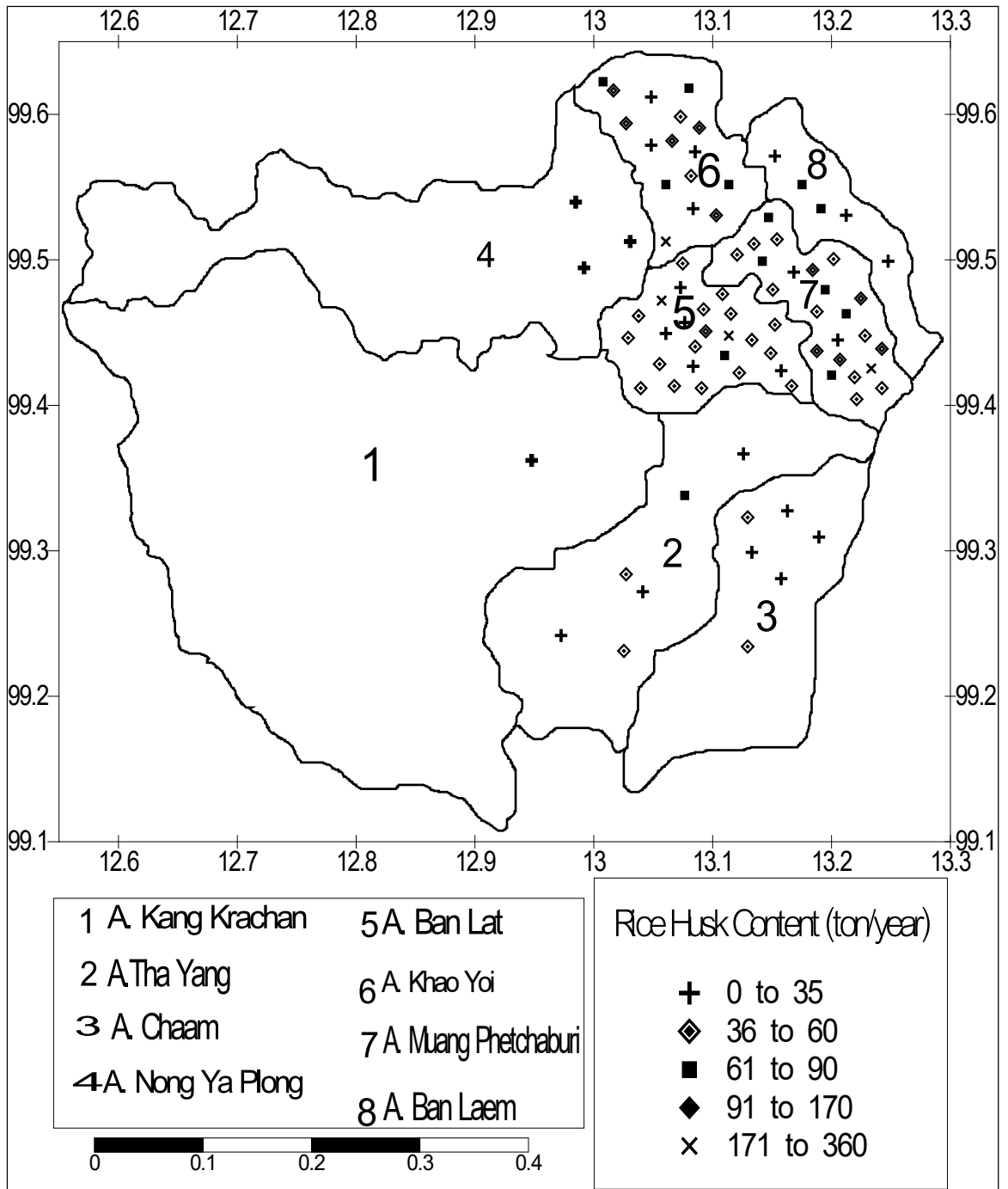
0.48 ตัน เมื่อนำปริมาณแกลบมาคำนวณหาพลังงานของแกลบพบว่าอำเภอบ้านลาดมีพลังงานเท่ากับ 50.69 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 78.12 อำเภอเมืองเพชรบุรีมีพลังงานเท่ากับ 31.04 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 47.83 อำเภอเขาย้อยมีพลังงานเท่ากับ 17.75 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 27.35 อำเภอท่ายางมีพลังงานเท่ากับ 12.18 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 18.77 อำเภอชะอำมีพลังงานเท่ากับ 11.50 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 17.72 อำเภอบ้านแหลมมีพลังงานเท่ากับ 0.85 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 1.31 อำเภอหนองหญ้าปล้องมีพลังงานเท่ากับ 0.26 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 0.40 และอำเภอแก่งกระจานมีพลังงานเท่ากับ 0.07 เทระจูล มีปริมาณเทียบเท่าน้ำมันเท่ากับ 0.11 ซึ่งพบว่าปริมาณแกลบมีมากที่สุด ในอำเภอบ้านลาด อำเภอเมืองเพชรบุรีและอำเภอเขาย้อยตามลำดับ สำหรับภาพที่ 3 แสดงศักยภาพของผลิตผลแกลบในจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2553 ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของปริมาณแกลบจะอยู่ที่อำเภอบ้านลาด อำเภอเมืองเพชรบุรีและอำเภอเขาย้อย ส่วนภาพที่ 4 เป็นแผนที่แสดงศักยภาพทางพลังงานของแกลบในจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2553 ซึ่งพบว่าศักยภาพทางพลังงานของแกลบมีมากใน 3 อำเภอ คือ อำเภอบ้านลาด อำเภอเมืองเพชรบุรีและอำเภอเขาย้อยตามลำดับ



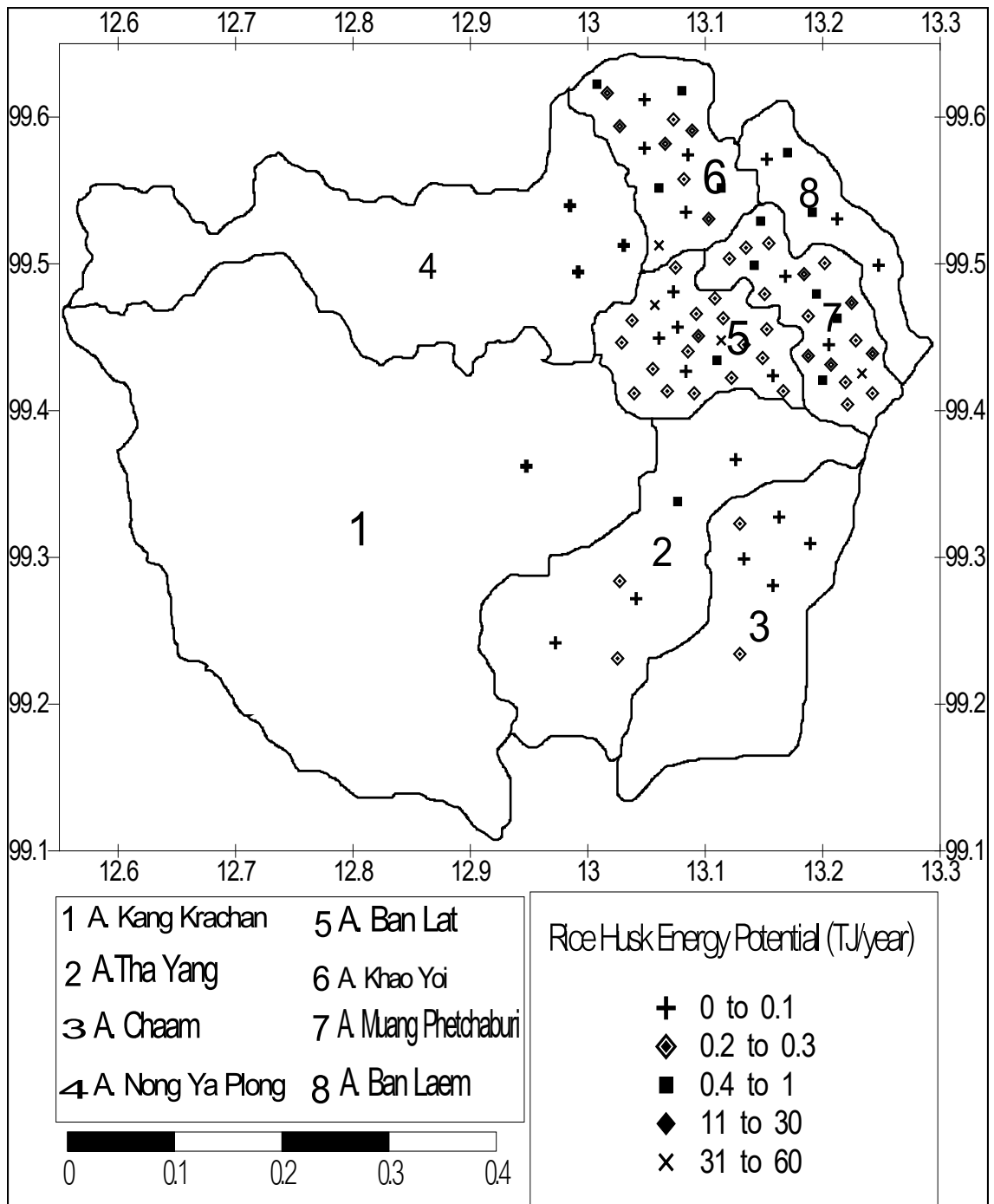
รูปที่ 4.1 ปริมาณผลิตผลของแกลบในจังหวัดเพชรบุรี



รูปที่ 4.2 ปริมาณพลังงานจากแกลบและปริมาณเทียบเท่าน้ำมัน



รูปที่ 4.3 แผนที่ศักยภาพของผลิตผลแกลบในจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2553



รูปที่ 4.4 แผนที่ศักยภาพทางพลังงานแกลบในจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2553

ปัจจุบันพลังงานหมุนเวียนกำลังได้รับความสนใจทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชนเป็นอย่างมาก โดยได้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อนำมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่ง

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายๆ ด้านด้วยกัน เช่น ภาวะเรือนกระจก ปัญหาโลกร้อน ตลอดจนปัญหาฝนกรดจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ประเทศไทยประสบปัญหาดังกล่าวจากกรณีโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยภาครัฐได้ตั้งเป้าหมายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนให้ได้ 8% จากปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในปี พ.ศ. 2554 จากเหตุผลหลายๆ ประการด้วยกันทำให้ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องมีความกระตือรือร้นที่จะหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พลังงานหมุนเวียนต่างๆ เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังน้ำและพลังงานจากชีวมวล เมื่อพิจารณาถึงชีวมวลแล้วนักวิจัยมักจะแบ่งชนิดของชีวมวลออกเป็น 4 ชนิดหลักๆ ดังนี้ 1. พืชตระกูลไม้ (Woody Plants) 2. พืชสมุนไพรและหญ้า (Herbaceous Plants/Grasses) 3. พืชน้ำ (Aquatic Plants) 4. มูลสัตว์ (Manures) โดยความชื้นในชีวมวลจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการเลือกเทคโนโลยีของกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวล ยกตัวอย่างเช่น ชีวมวลที่มีความชื้นสูงมักจะอาศัยกระบวนการหมักในการเปลี่ยนรูปพลังงานสำหรับชีวมวลที่มีความชื้นต่ำมักจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน กระบวนการไพโรไลซิสหรือการเผาไหม้เป็นต้น ชีวมวลซึ่งกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Fuel) จำพวกแกลบเนื่องจากมีศักยภาพและปริมาณแหล่งเชื้อเพลิงอยู่มากในจังหวัดเพชรบุรี (สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์ 2554) ซึ่งมีกิจกรรมทางด้านเกษตรกรรมค่อนข้างสูงและมีวิสัยทัศน์ที่จะมุ่งเน้นเป็นเมืองเกษตรกรรม นอกจากนี้จังหวัดเพชรบุรียังเป็นแหล่งผลิตสินค้าเกษตรที่สำคัญแห่งหนึ่งในภาคตะวันตก ประชากรส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 83 ประกอบอาชีพทางด้านเกษตรกรรม พืชที่สำคัญมีทั้งพืชสวน พืชไร่และพืชผัก ผลผลิตนอกจากจะใช้ในการบริโภคภายในจังหวัดแล้ว ส่วนใหญ่ยังส่งไปจำหน่ายยังจังหวัดใกล้เคียงอีกด้วย ทำให้การใช้ที่ดินส่วนใหญ่เป็นการใช้เพื่อเกษตรกรรม ซึ่งมีการทำนาและการทำสวนยางเป็นหลัก ดังนั้นจึงทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว แกลบ และเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้จำพวกขี้เลื่อยอยู่เป็นจำนวนมาก รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงแกลบจากโรงสีข้าวและขี้เลื่อยจากโรงงานแปรรูปไม้ในจังหวัดพัทลุง ด้วยเหตุนี้จึงได้มุ่งศึกษาการใช้ประโยชน์จากชีวมวล แกลบและขี้เลื่อยเพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซซึ่งจะทำให้ได้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนสูงกว่ากระบวนการเผาไหม้โดยตรง อย่างไรก็ตามในการออกแบบระบบแก๊สซิฟิ

เคชั่นสำหรับการใช้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจำเป็นต้องทำการศึกษาคุณลักษณะทางเชื้อเพลิงของชีวมวลดังกล่าวก่อนเพื่อที่จะทำให้การออกแบบระบบและการทำงานของระบบมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากชีวมวลมักจะประกอบไปด้วยเซลลูโลสและลิกนินอยู่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ส่วนประกอบของชีวมวลจะส่งผลต่อการเลือกใช้เทคโนโลยีในการเปลี่ยนรูปพลังงานชีวมวลอีกด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาคุณลักษณะทางเชื้อเพลิงของชีวมวลแกลบและจี้เลื่อยในจังหวัดเพชรบุรี โดยมุ่งเน้นศึกษาหาปริมาณความชื้น ค่าความร้อน สัดส่วนของปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยที่เผาไหม้ได้และปริมาณเถ้ารวมทั้งเป็นการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และค่าความร้อน



รูปที่ 4.5 แกลบจากโรงสีข้าวในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี



รูปที่ 4.6 ชี้เลื่อยจากโรงงานแปรรูปไม้ในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี

เชื้อเพลิงชีวมวลในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel) ในการศึกษานี้ได้แก่ ชี้เลื่อยและแกลบซึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous Fuel) โดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยจะมีค่าความร้อนที่สูงกว่าการนำเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปของแข็งไปเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) ดังนั้นการวิเคราะห์คุณลักษณะ (Characteristics) ของเชื้อเพลิงจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชัน การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งในที่นี้จะขอล่าถึงแต่เฉพาะมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เช่น การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และการหาค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและชี้เลื่อยในจังหวัดเพชรบุรี

จากการสำรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุรวมทั้งการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและชี้เลื่อย อย่างไรก็ตามจากการที่เชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและชี้เลื่อยในแต่ละท้องถิ่น ปริมาณความชื้นต่างกันก็จะทำให้ผลการวิเคราะห์ทั้งการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีความแตกต่างกัน

ได้จากการวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ <http://www.dss.go.th> กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและจี้เลื่อยแสดงดังตารางที่ 4.2-4.4 ตามลำดับ โดยในแต่ละตารางได้รวมเอาผลจากการศึกษาที่ได้จากการสำรวจเอกสารเพื่อทำการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและจี้เลื่อยในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี

Biomass	MC	FC	VM	AC
แกลบ*	10.0	15.6	57.3	17.1
แกลบ (Pereraa et al.)	9.0	17.4	68.5	14.1
แกลบ (Yin et al.)	11.7	20.4	53.1	14.8
จี้เลื่อย*	17.0	15.6	65.9	1.5
จี้เลื่อย (Pereraa et al.)	7.0	16.5	82.8	0.7
จี้เลื่อย (Wander et al.)	10.63-12.93	11.26-15.30	73.74-77.22	0.09-0.51
จี้เลื่อย (Cao et al.)	10.4	17.9	70.4	1.3

หมายเหตุ* หมายถึงในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและจี้เลื่อยในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี

Biomass	MC	C	H	O	N	S
แกลบ*	10.0	40.6	5.4	36.5	0.33	0.05
แกลบ (Pereraa et al.)	9.0	43.1	4.9	37.3	0.5	0.1
แกลบ (Yin et al.)	11.7	36.74	5.51	42.55	0.28	0.55
จี้เลื่อย*	17.0	46.4	7.1	44.8	0.12	0.03
จี้เลื่อย (Pereraa et al.)	7.0	47.0	6.0	41.3	2.0	0.0
จี้เลื่อย (Cao et al.)	10.4	46.2	5.1	35.4	5.1	1.5
จี้เลื่อย (Wander et al.)	10.63-12.93	50.91-52	6.07-6.13	41.55-42.14	0.23-0.28	-

หมายเหตุ * หมายถึงในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี

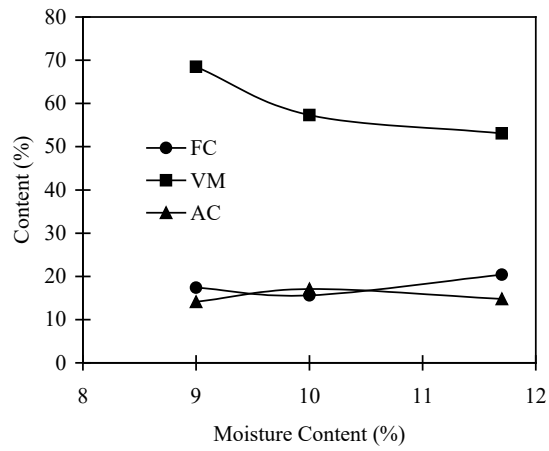
รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยที่เผาไหม้ได้และเถ้าในแกลบและขี้เลื่อยตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อก๊าซคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ในแกลบและขี้เลื่อยตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและขี้เลื่อย

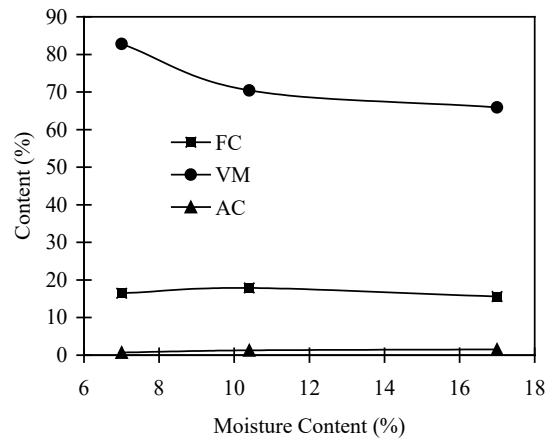
Biomass	MC	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
แกลบ*	10.0		14,360
แกลบ (Pereraa et al.)	9.0	-	14,000
แกลบ (Yin et al.)	11.7	15,700	-
แกลบ (Zainal et al.)	-	-	402,133 kJ/kmol
แกลบ (Ganana et al.)	-	21,200	-
แกลบ (Sajjakulnukita et al.)	8.83	-	12,850
ขี้เลื่อย*	17.0		16,149
ขี้เลื่อย (Pereraa et al.)	7.0	-	19,400
ขี้เลื่อย (Cao et al.)	10.4	-	18,810
ขี้เลื่อย (Wander et al.)	10.63-12.93	-	20,100-21.001

หมายเหตุ * หมายถึงในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี

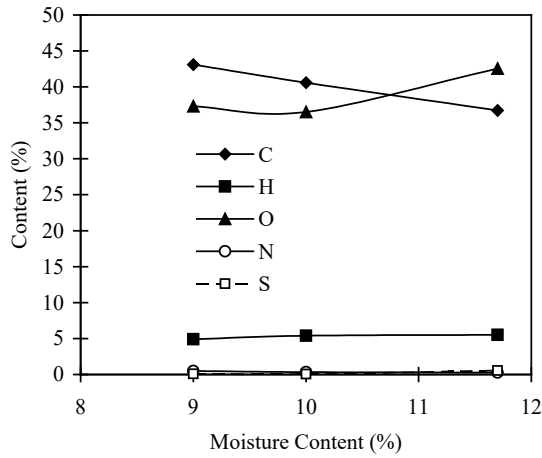
HHV = ค่าความร้อนสูง LHV = ค่าความร้อนต่ำ



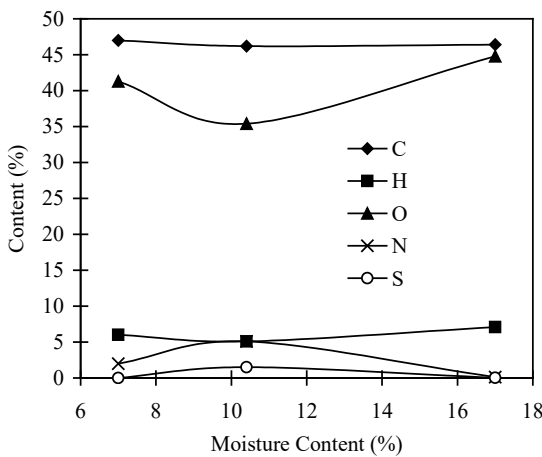
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยที่เผาไหม้ได้ และถ่านในแกลบ



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยที่เผาไหม้ได้ และถ่านในขี้เถ้า



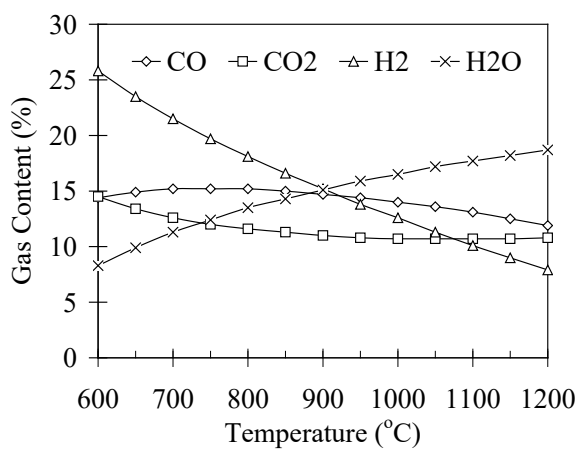
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณ C H O N S ในแกลบ



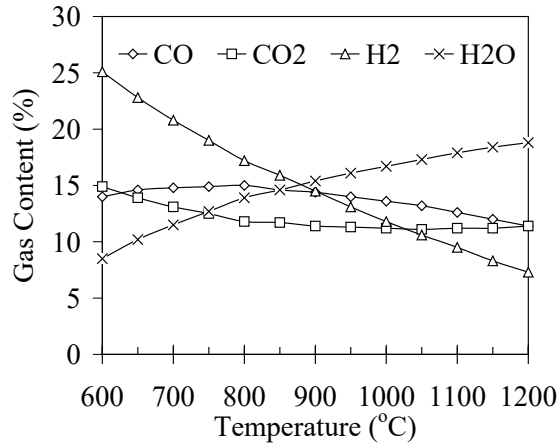
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อปริมาณ C H O N S ในจี้เลื่อย

ในการหาประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอุณหภูมิสูง ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหยุดนิ่ง (Stationary Model) พบว่ากระบวนการไอน้ำ-แก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงในช่วง 600-1,200 °C ของเชื้อเพลิงแกลบ ณ สภาวะอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 100 kg/h อัตราการป้อนไอน้ำ 11.7 kg/h และเชื้อเพลิงมีค่าความชื้น 11% ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหยุดนิ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของก๊าซผลิตภัณฑ์ ณ

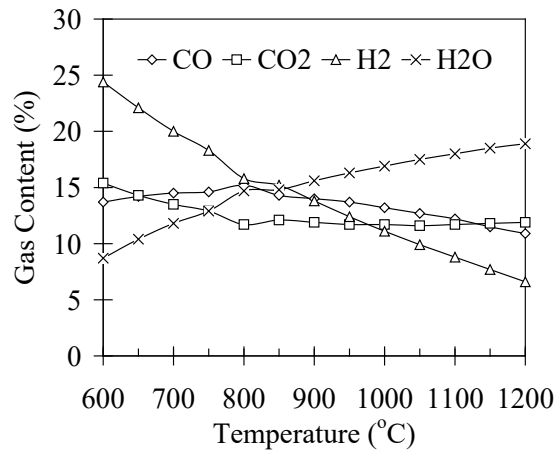
อุณหภูมิต่างๆ ที่ค่ามีเทน 3-5%Vol. แสดงดังรูปที่ 4.11-4.13 ที่สภาวะดังกล่าวจะให้องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงระหว่างค่าดังต่อไปนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 10-16%Vol. โดยมีค่าสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 600-800 °C แสดงดังรูปที่ 4.14 คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 10-16%Vol. โดยมีค่าสูงสุดที่ 600 °C และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.15 มีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 3-5%Vol. ไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 5-25%Vol. โดยมีค่าสูงสุดที่ 600 °C และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.16 และมีค่าความร้อนด้านต่ำของก๊าซผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 3.9-6.6 MJ/Nm³ แสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งสูงพอสำหรับการเดินเครื่องยนต์แก๊สสำหรับการผลิตไฟฟ้าต่อไป นอกจากนี้ประสิทธิภาพของกระบวนการไอน้ำ-แก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงมีค่าอยู่ในช่วง 60-83% โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิ 600 °C และค่าประสิทธิภาพมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.18



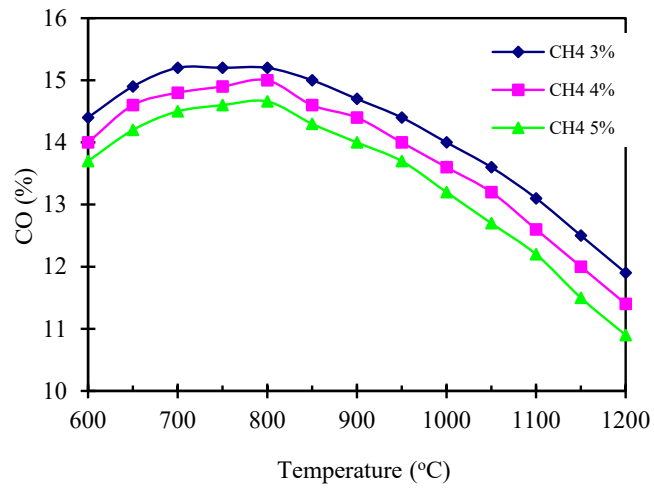
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%



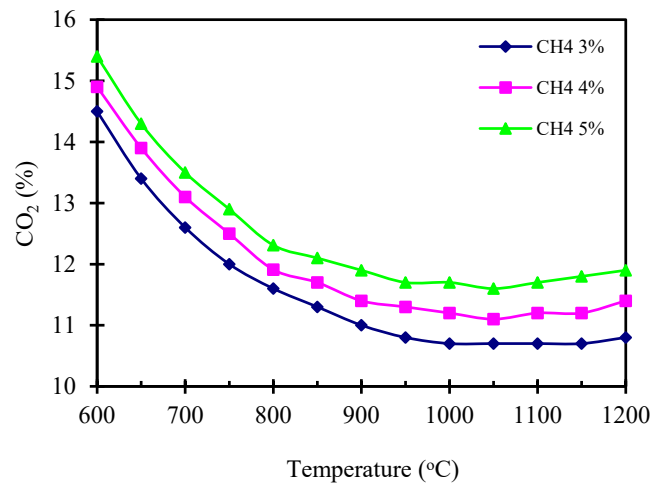
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%



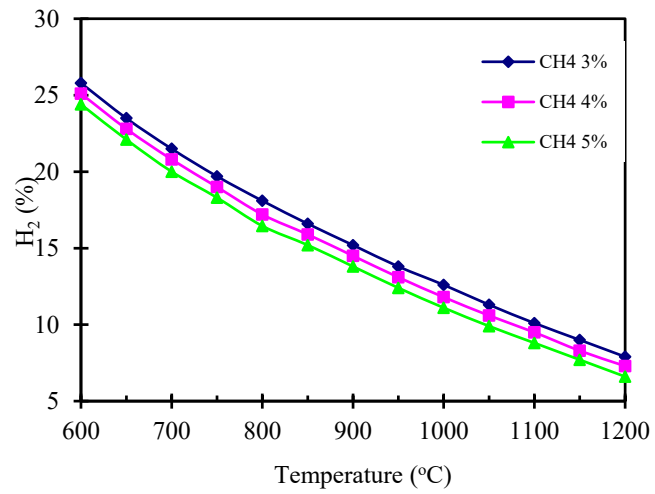
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%



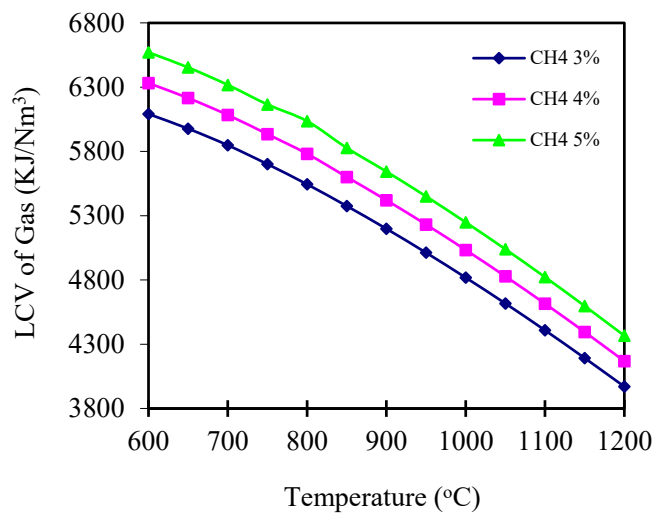
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิ



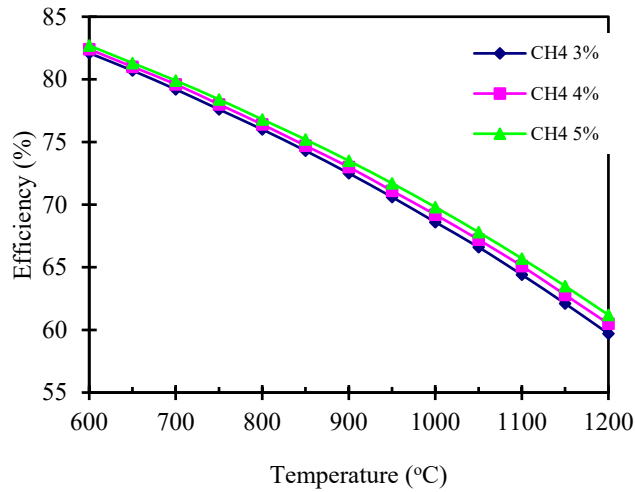
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิ



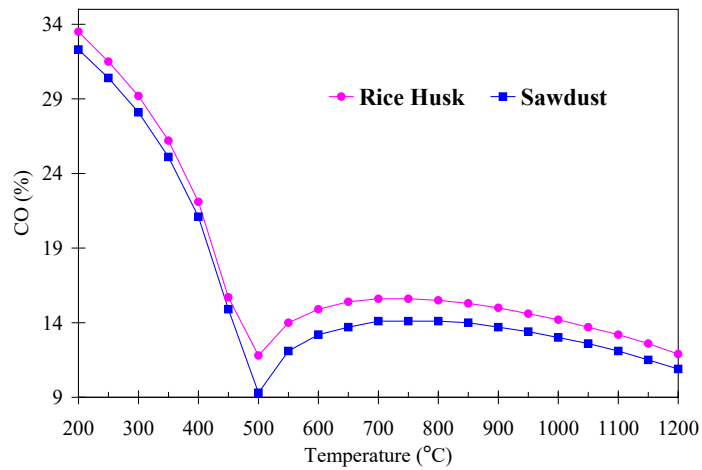
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์เทียบกับอุณหภูมิ



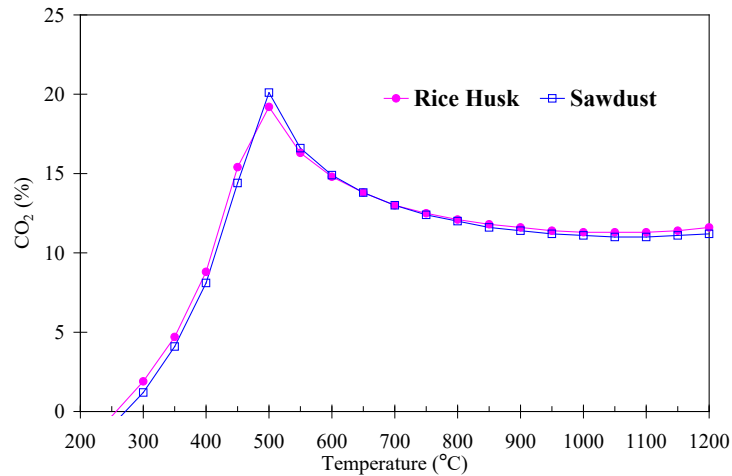
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิ

ในการศึกษาโปรคิวเซอร์แก๊สจากแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดหยุดนิ่งเปลวไฟไหลลงโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบและชี้เลี้ยงร่วมกับไอน้ำได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในช่วง 200-1,200 °C ซึ่งผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหยุดนิ่ง (Stationary Model) พบว่ากระบวนการไอน้ำ-แก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิในช่วง 200-1,200 °C ของเชื้อเพลิงแกลบและชี้เลี้ยง ณ สภาวะอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 100 kg/h อัตราการป้อนไอน้ำ 11.7 kg/h และเชื้อเพลิงมีความชื้น 11% แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของโปรคิวเซอร์แก๊ส ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ค่ามีเทน 3% 4% และ 5% Vol. ดังรูปที่ 4.19-4.21 4.22-4.24 และ 4.25-4.27 ที่สภาวะดังกล่าวจะให้องค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊สอยู่ในช่วงระหว่างค่าดังต่อไปนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 12-33% Vol. โดยมีค่าสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 200-400 °C แสดงดังรูปที่ 4.23 คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 0-20% Vol. โดยมีค่าสูงสุดที่ 200 °C และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.24 รูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.34 มีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 3-5% Vol. ไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 7-33% Vol. โดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 200 °C และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.25 รูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.35 และมีความร้อนด้านต่ำของโปรคิวเซอร์แก๊สอยู่ในช่วง 3.7-8.0 MJ/Nm³ แสดงดังรูปที่ 4.26 รูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.36 ซึ่งค่าความร้อนด้านต่ำของโปรคิวเซอร์แก๊สมีค่าสูงพอสำหรับการเดินเครื่องยนต์แก๊สสำหรับการผลิตไฟฟ้าต่อไป นอกจากนี้ประสิทธิภาพ

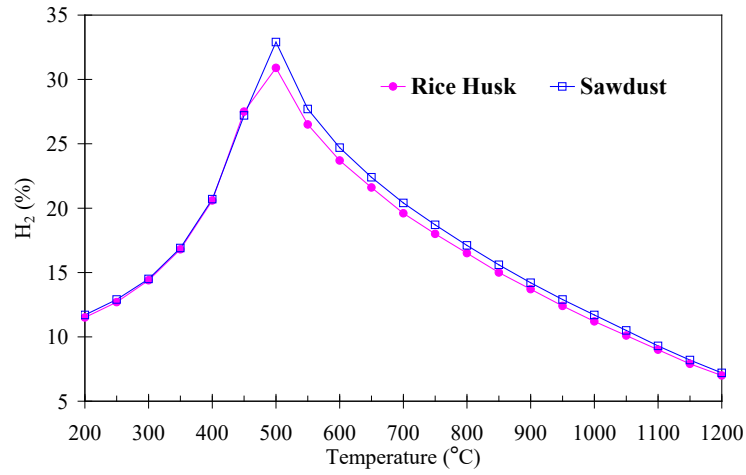
ของกระบวนการไอน้ำ-แก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงมีค่าอยู่ในช่วง 60-90% โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิ 200 °C และค่าประสิทธิภาพมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.27 รูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.37



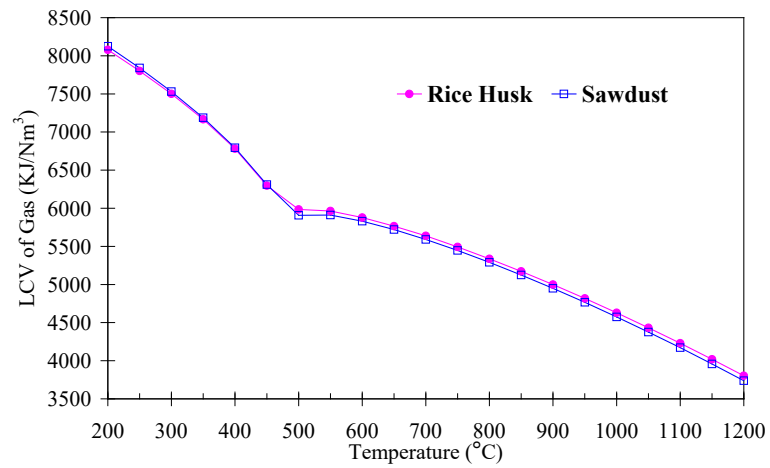
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%



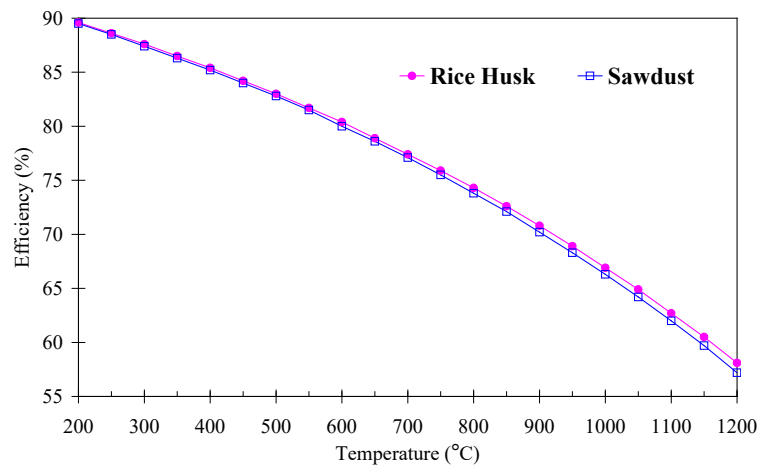
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%



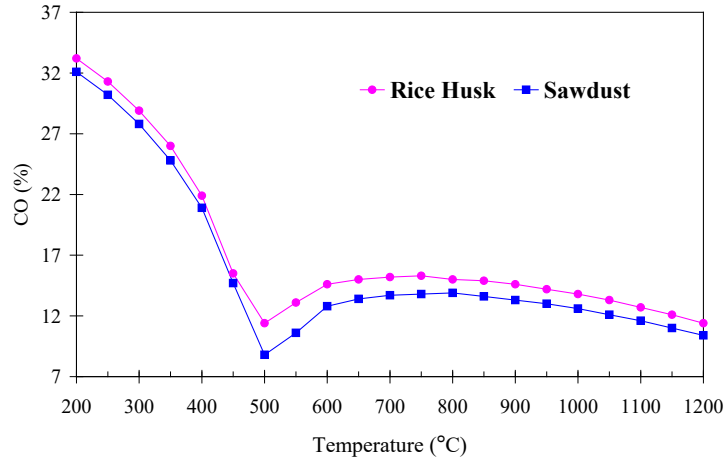
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%



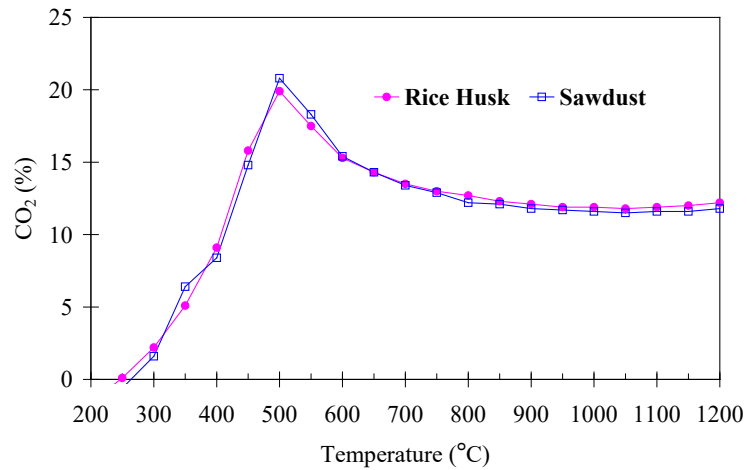
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของโปรดีวเซอร์แก๊สเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%



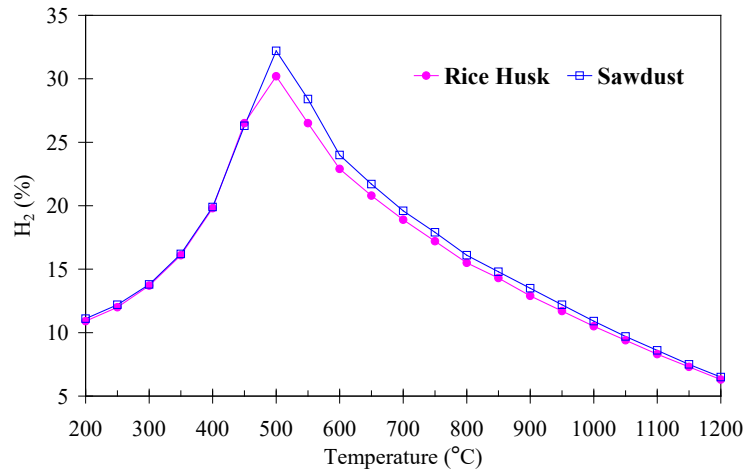
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 3%



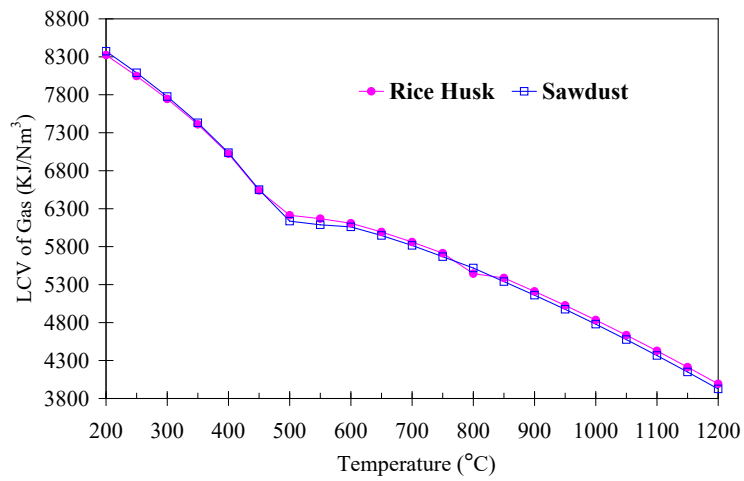
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%



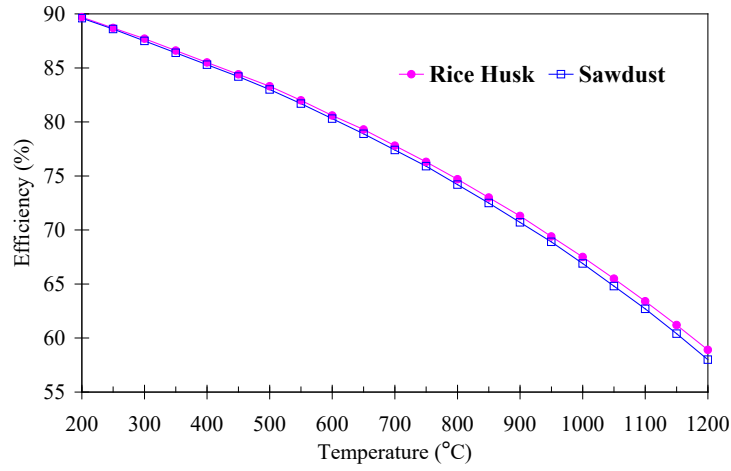
รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%



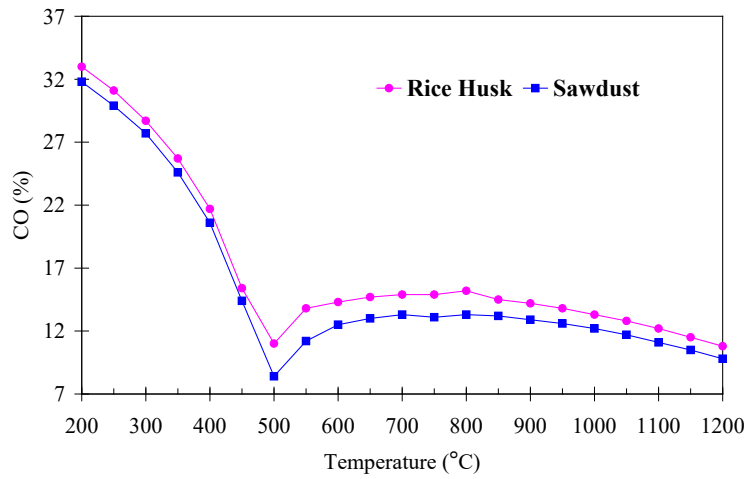
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%



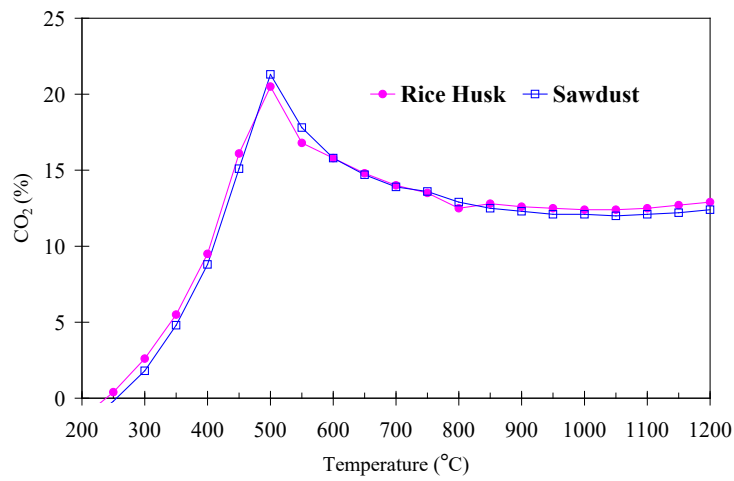
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของโปรดีวเซอร์แก๊สเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%



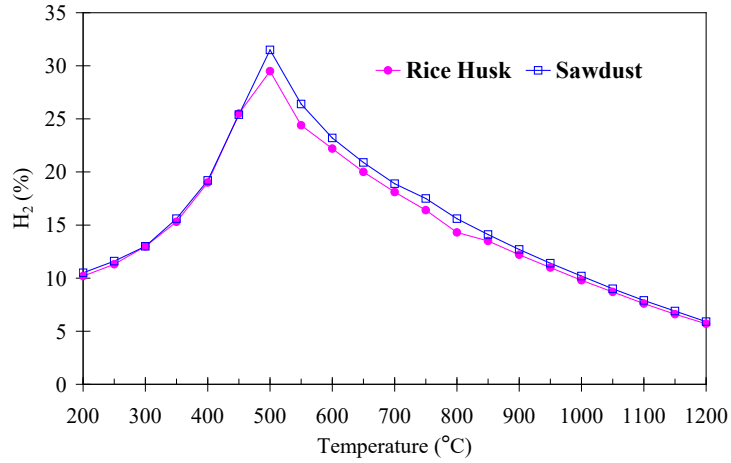
รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 4%



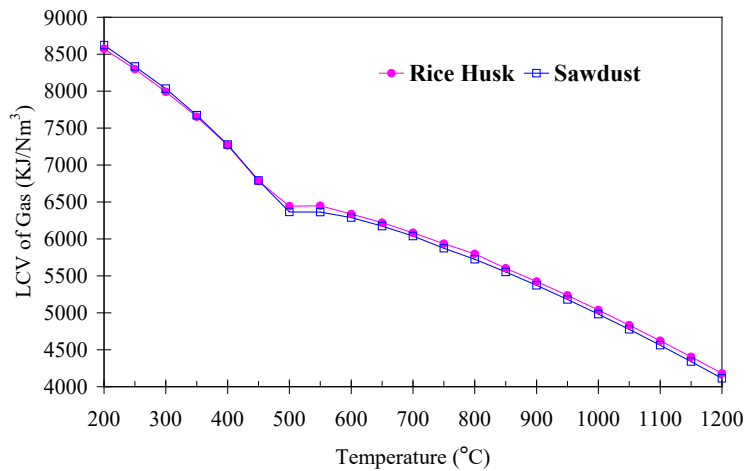
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%



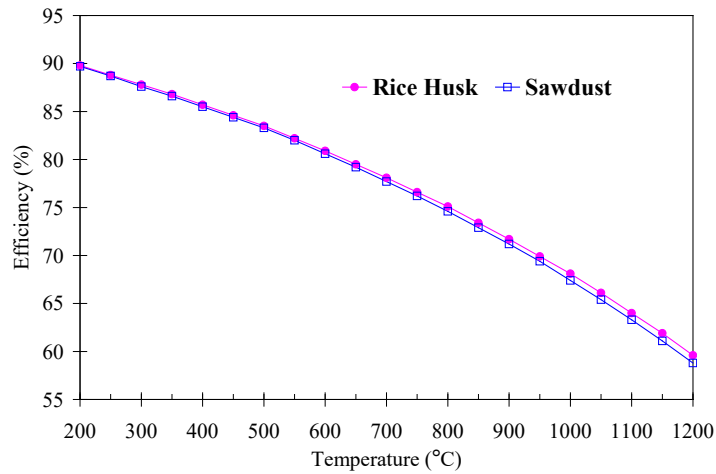
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%



รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเทียบกับอุณหภูมิที่ค่ามีเทน 5%

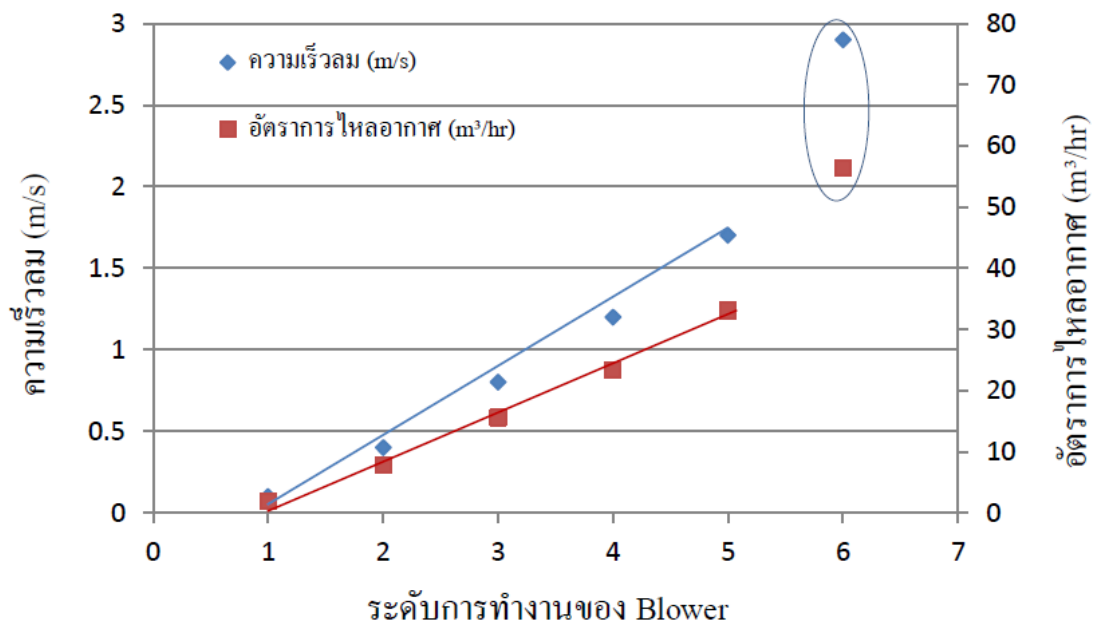
4.2 การวัดค่าความเร็วอากาศที่พัดลมป้อนเข้าสู่แก๊สซิไฟเออร์

ในการทดลองมีการควบคุมอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์ โดยพัดลมอัดอากาศผ่านชั้นเชื้อเพลิง ผ่านชุดทำความสะอาดแก๊ส และชุดระบายความร้อนแก๊ส ก่อนทำการวัดความเร็วลมเพื่อหาอัตราการไหลของอากาศ โดยพัดลมสามารถปรับระดับการทำงานได้ 6 ระดับ ซึ่งแต่ละระดับการทำงานของพัดลมจะให้อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันโดยมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นตามระดับการทำงานของพัดลมที่เพิ่มขึ้น ความเร็วของอากาศทำการตรวจวัดในขณะที่อากาศไหลในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.3 cm. และอุณหภูมิอากาศมีค่าประมาณ 39°C ผลการตรวจวัดความเร็วอากาศและผลการคำนวณอัตราการไหลของอากาศผ่านเตาแก๊สซิไฟเออร์แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.34

จากการทดลองป้อนอากาศเข้าสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์ที่ระดับการทำงานของพัดลม 1-6 พบว่าอากาศไหลผ่านเตาแก๊สซิไฟเออร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นเมื่อเพิ่มระดับการทำงานของพัดลมจากระดับ 1 ถึง ระดับ 5 ในขณะที่พัดลมทำงานที่ระดับ 6 ตรวจพบว่าความเร็วอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นมากและไม่เป็นเชิงเส้นกับการทำงานของพัดลมที่ระดับ 1 – 5 สาเหตุอาจเกิดจากอากาศมีความเร็วสูงและดันเชื้อเพลิงซึ่งมวลจนเกิดเป็นช่องว่างทำให้ความต้านทานการไหลลดลง อากาศจึงไหลได้สะดวกดังนั้นที่ระดับการทำงานของพัดลมนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ค่าความเร็วและอัตราการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 39°C

ระดับการทำงานของ พัดลม	ความเร็ว m/s	อัตราการไหลอากาศ m ³ /hr
1	0.1	1.944
2	0.4	7.776
3	0.8	15.552
4	1.2	23.328
5	1.7	33.048
6	2.9	56.376



รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าความเร็วลมกับอัตราการไหลของอากาศ

พัดลมที่ใช้ในการทดลองมีคุณลักษณะแสดงดังตารางที่ 4.6 ในขณะที่คุณลักษณะของเครื่องวัดความเร็วลมสำหรับตรวจวัดความเร็วของอากาศและแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยที่ลักษณะทางกายภาพของพัดลมและเครื่องวัดความเร็วลมแสดงในรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 แสดงคุณลักษณะของพัดลม รุ่น Maktec MT 400

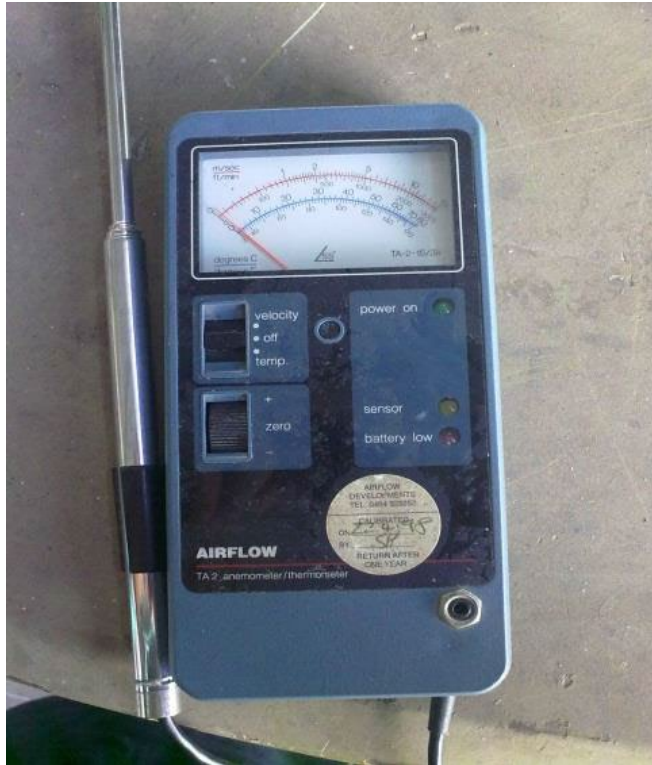
คุณลักษณะ	
ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด	220-230 V., ~ 2.3 A. 50-60 Hz
อัตราการเปลืองไฟ	500 W.
ความเร็วรอบสูงสุด	8500-16000 rpm
ปริมาณลม	2.5 m ³ /min

ตารางที่ 4.7 แสดงคุณลักษณะของเครื่องวัดความเร็วลม รุ่น Airflow TA2-15/3K

คุณลักษณะ	
ช่วงความเร็วลม	0-15 m/s
ช่วงอุณหภูมิ อัตราการเปลืองไฟ	0-80°C
ความแม่นยำของความเร็วที่อุณหภูมิ 20°C	±2% FSD
ความแม่นยำของอุณหภูมิ	±3% FSD
ขนาดของเครื่องมือ	185mm x 92mm x 30mm
น้ำหนัก	450 gms
แบตเตอรี่ ใช้ขนาด	AA 1.5 V 4 ก้อน
Output	1 ช่อง



รูปที่ 4.35 พัดลม รุ่น Maktec MT 400



รูปที่ 4.36 เครื่องวัดปริมาณอัตราการไหล

4.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.3.1 การทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

การทดลองการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ สามารถดำเนินการโดยการนำเชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อยมาชั่งน้ำหนักให้ได้ 20 kg แบ่งส่วนหนึ่งประมาณ 4 kg ป้อนเข้าเตาแก๊สซีฟเออร์ก่อน แล้วเผาเชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อยอีกประมาณ 1 kg จากด้านบนก่อน พอติดไฟดีแล้วจึงเทป้อนเข้าเตา จากนั้นนำเอาเชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อย 15 kg ที่เหลือป้อนเข้าเตา แล้วจึงเปิดพัดลมอัดอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเตาจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40°C เป็น 300°C จึงได้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่สามารถติดไฟได้ออกมา แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้จะไหลผ่านชุดไซโคลนดักฝุ่นและทาร์ แล้วไหลผ่านชุดลดอุณหภูมิแก๊ส ชุดกรองอากาศ และชุดถังพักแก๊ส จากนั้นจึงทำการบันทึกข้อมูลต่างๆดังนี้

4.3.1.1 อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊ส ด้วยเทอร์โมคัปเปิล

4.3.1.2 อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าเตา

4.3.1.3 คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิง

4.3.1.4 ระยะเวลาในการทดลอง โดยทำการจดบันทึกข้อมูล 10 นาทีต่อ 1 ครั้ง

4.3.2 การทดลองผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

การทดลองกระทำโดยการนำแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากเตาแก๊สซีไฟเออร์ ซึ่งผ่านกระบวนการทำความสะอาดแก๊สและลดอุณหภูมิแล้วป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตร ที่ได้ทำการปรับปรุงระบบป้อนเชื้อเพลิงให้สามารถรองรับการใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยในช่วงเริ่มต้นเครื่องยนต์ทำงานโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงแก๊สโซลีน จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ทำการปรับอัตราส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์กับอากาศให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ และมีความเร็วรอบการทำงานที่เหมาะสม สำหรับการผลิตไฟฟ้า โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 220 – 250 V จึงทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ หลอดไฟส่องสว่าง 100 W จำนวน 40 หลอด, พัดลมอัดอากาศขนาด 500 W จำนวน 2 ตัว, พัดลมตั้งโต๊ะขนาด 50 W จำนวน 10 ตัว รวมภาระทั้งหมด 5,500 W แล้วบันทึกข้อมูลต่างๆดังนี้

4.3.2.1 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิง ด้วยเทอร์โมคัปเปิล

4.3.2.2 คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิง

4.3.2.3 ระยะเวลาในการทดลอง โดยทำการจดบันทึกข้อมูล 10 นาทีต่อ 1 ครั้ง

4.3.2.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้

4.4 ผลการทดลองการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ผลิตจากการแปรรูปเชื้อเพลิงแกลบและจี้เลื้อย ด้วยเตาผลิตแก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งอากาศไหลลง ทดลองโดยกำหนดปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงแกลบและจี้เลื้อยเข้าเตาผลิตแก๊สที่ 20 kg และอัตราการไหลของอากาศที่ 25.27 m³/hr. (พัดลมระดับ 4) ซึ่งจะทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ที่มีองค์ประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้จากการวัดที่เวลาต่างๆตลอดช่วงการเผาผลิตแก๊สจำนวน 4 ครั้ง ในระหว่างการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ครั้งที่	O ₂	CO	CO ₂	NO	NO _x	SO ₂	FT
	%	%	%	ppm	ppm	ppm	°C
1	-0.06	20.2	13.69	149	156	-4414	200.5
2	-0.13	24.6	13.76	171	180	-5740	219.0
3	-0.06	24.5	13.29	108	114	-5915	226
4	-0.13	25.6	13.27	71	74	-6348	231.8

จากการทดลองได้มีการนำแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์บางส่วนมาจุดไฟที่หัวเผาที่ใช้ในการทดลอง ส่วนแก๊สเชื้อเพลิงที่เหลือได้นำไปเก็บไว้ในถังพักแก๊ส (Gas Tank) สำหรับการวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ จะใช้เครื่องวัดองค์ประกอบแก๊ส (Gas analyzer) รูปที่ 4.3 ซึ่งทำหน้าที่วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สามารถอ่านเปอร์เซ็นต์ของ CO, CO₂, O₂, NO, NO₂ และอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรวจสอบแก๊ส โดยมี อุปกรณ์เก็บแก๊ส ดังรูปที่ 4.4 ใช้ในการดูดแก๊สเพื่อส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊ส

เครื่องวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้และก๊าซมลพิษจากปล่อง ไอเสีย รุ่น Testo 350

XL ช่วงการวัดค่าและความถูกต้องในการวัด

- อุณหภูมิ -40 ถึง +1,200 °C ± 0.1 °C
- O₂ 0 ถึง 25%Vol. ± 0.2 %Vol.
- CO 0 ถึง 10,000 ppm ± 10 ppm (0 to 200 ppm)
- NO 0 ถึง 3,000 ppm ± 5 ppm (0 to 99 ppm)
- NO₂ 0 ถึง 500 ppm ± 10 ppm (0 to 199 ppm)
- CO₂ 0 ถึง 50%Vol. ± 0.3%Vol
- SO₂ 0 ถึง 5,000 ppm ± 10 ppm (0 to 99 ppm)
- H₂S 0 ถึง 300 ppm ± 2 ppm (0 to 39.9 ppm)
- HC 100 ถึง 40,000 ppm
- Differential pressure ± 200 hPa ± 0.1 hPa
- ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Efficiency) 0 ถึง 120%
- ความร้อนสูญเสีย (Flue gas loss) 0 ถึง 99.9%
- สามารถเจือจางแก๊สความเข้มข้นสูง (Dilution) ได้ถึง 40 เท่า



รูปที่ 4.3 แสดงเครื่องวัดองค์ประกอบแก๊ส (Gas analyzer)



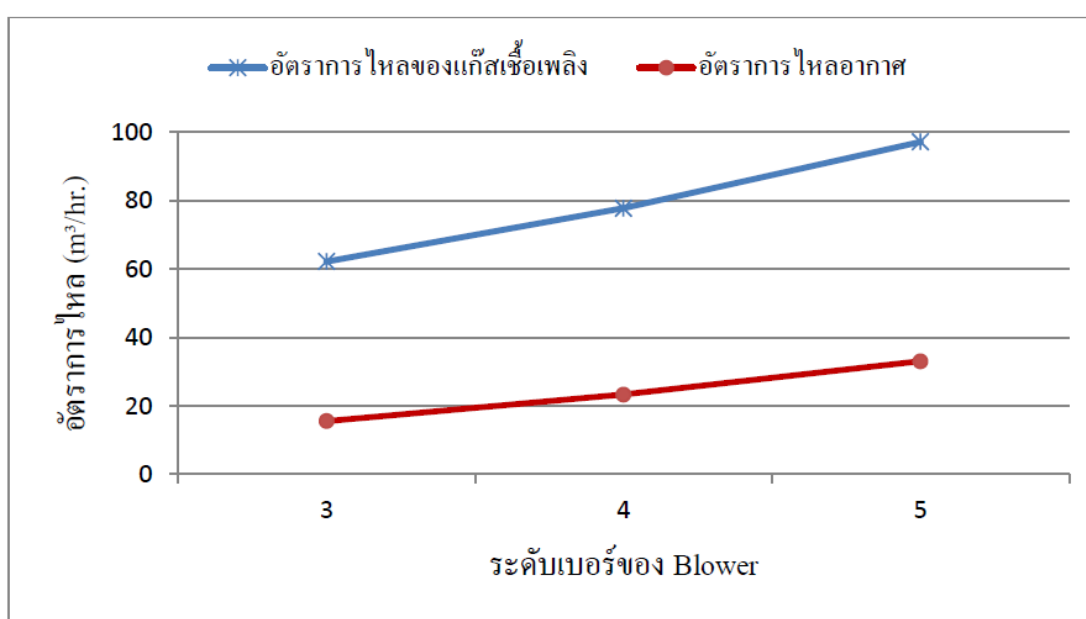
รูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์เก็บแก๊ส

4.5 ผลการเทียบอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และอากาศ

การเทียบอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศเป็นการเปรียบเทียบระหว่างระดับเบอร์ของพัดลมกับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศ ($\text{m}^3/\text{hr.}$) ซึ่งจากผลการเทียบสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีระดับเบอร์ของพัดลมมากขึ้นจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ตารางบันทึกผลการเทียบสามารถดูได้จากตารางที่ 4.5 ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างระดับเบอร์ของพัดลมกับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และอากาศ แสดงในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงการเทียบอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และอากาศ

ระดับการทำงานของพัดลม	อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง	อัตราการไหลอากาศ
	m ³ /hr.	m ³ /hr.
3	62.21	15.552
4	77.76	23.328
5	97.20	33.048



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับเบอร์ของพัดลมกับอัตราการไหล

4.6 การทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

เป็นการทดลองที่เผาเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาแก๊สซีไฟเออร์ให้ได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกมา โดยปรับอัตราการไหลของอากาศป้อนเข้าเตาให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง (ระดับการทำงานของพัดลม) เพื่อหาคุณสมบัติ ปริมาณสารมลทิน และอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ที่เวลาต่างๆ โดยไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ค่าของคุณสมบัติ อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่อัตราการไหลของอากาศ 11.66 m³/hr. แสดงดังตาราง 4.6 ที่อัตราการไหลของอากาศ 25.27 m³/hr. แสดงดังตาราง 4.7 และที่อัตราการไหลของอากาศ 38.88 m³/hr. แสดงดังตาราง 4.8 โดยการป้อนเชื้อเพลิงแกลบและจีเลื่อย

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล 20 kg. โดยอัตราการไหลของอากาศ 11.66 m³/hr.

เวลา Min.	อุณหภูมิ °C	การเปลี่ยนแปลง ขณะทดลอง
0	31	เริ่มการจุดไฟในเตาเผาด้วยเชื้อเพลิง 5 kg.
10	79	เติมชีวมวล 15 kg.
20	165	ติดไฟ, มีควันปริมาณมาก
30	220	ควันผสมน้อยลง
40	241	แก๊สมีคุณภาพดีปานกลาง
50	239	”
60	229	”
70	221	”
80	217	แก๊สมีคุณภาพดีมาก
90	222	”
100	221	”
110	218	”
120	213	”
130	215	”
140	210	”
150	208	แก๊สเริ่มหมด, มีควันปริมาณมาก
153	198	ไฟดับ

จากผลการทดลองพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเริ่มจุดไฟติดนาที่ที่ 20 จนถึงนาที่ที่ 153 ไฟจึงดับ ติดไฟเป็นเวลา 133 นาที และนาที่ที่ 40-70 (30 นาที) แก๊สเชื้อเพลิงจะมีคุณภาพดีปานกลาง และนาที่ที่ 80-140 (60 นาที) แก๊สเชื้อเพลิงจะมีคุณภาพดีมาก เมื่อทดลองเสร็จจึงได้ทำการตรวจสอบปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลือในเตาจะได้ประมาณ 2.08 kg. ปริมาณน้ำมันดินประมาณ 0.7 kg. และปริมาณตะกอนในถังน้ำใต้เตามีปริมาณ 0.05 kg.

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล 20 kg. โดยอัตราการไหลของอากาศ 25.27 m³/hr.

เวลา Min.	อุณหภูมิ °C	การเปลี่ยนแปลง ขณะทดลอง
0	35	เริ่มการจุดไฟในเตาเผาด้วยเชื้อเพลิง 5 kg.
10	80	เติมเชื้อเพลิง 15 kg.
20	118	ติดไฟ, ควันลดลง
30	248	คุณภาพแก๊สเริ่มดี
40	272	คุณภาพแก๊สดี
50	272	„
60	270	„
70	269	„
80	258	„
90	260	„
100	259	„
110	256	แก๊สเริ่มหมด
120	252	ควันผสมมาก
130	250	„
135	248	ไฟดับ

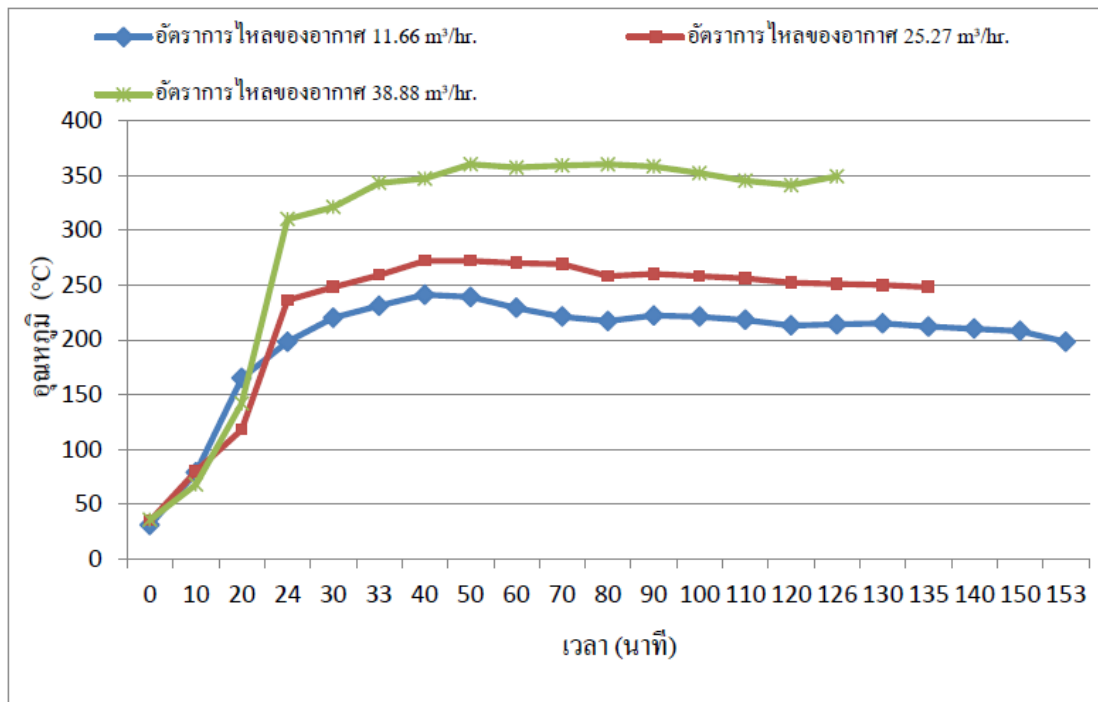
จากผลการทดลองพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเริ่มจุดไฟติดนาที่ที่ 20 จนถึงนาที่ที่ 135 ไฟจึงดับ ติดไฟเป็นเวลา 115 นาที และนาที่ที่ 40-100 (60 นาที) แก๊สเชื้อเพลิงจะมีคุณภาพดีมาก โดยสังเกตจากมีควันผสมออกมาน้อย เมื่อทดลองเสร็จได้ทำการตรวจสอบปริมาณจีเอ็มที่เหลือในเตาจะได้ 1.5 kg. ปริมาณน้ำมันดิน 0.18 kg. และปริมาณตะกอนในถังน้ำได้เตา 0.08 kg.

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล 20 kg. โดยอัตราการไหลของอากาศ 38.88 m³/hr.

เวลา Min.	อุณหภูมิ °C	การเปลี่ยนแปลง ขณะทดลอง
0	36	เริ่มการจุดไฟในเตาเผาด้วยเชื้อเพลิง 5 kg.
10	68	เติมเชื้อเพลิง 15 kg.
20	142	มีควันปริมาณน้อย
30	310	มีควันปริมาณมาก
38	321	จุดไฟติดมีควันผสมมาก
40	343	คุณภาพแก๊สเริ่มดี
50	347	”
60	360	แก๊สมีคุณภาพดี
70	357	”
80	359	”
90	360	”
100	358	”
110	352	แก๊สเริ่มหมด
120	345	ควันมาก
126	341	ไฟดับ

จากผลการทดลองพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเริ่มจุดไฟติดนาที่ที่ 38 จนถึงนาที่ที่ 126 ไฟจึงดับ ติดไฟเป็นเวลา 88 นาที่ และนาที่ที่ 60-100 (40 นาที่) แก๊สเชื้อเพลิงจะมีคุณภาพดีที่สุด โดยสังเกตจากการที่ไม่มีควันผสมออกมา เมื่อทดลองเสร็จได้ทำการตรวจสอบปริมาณจี้ถ้ำที่เหลือในเตาจะได้ 1.22 kg. ปริมาณน้ำมันดิน 0.1 kg. และปริมาณตะกอนในถังน้ำได้เตา 0.12 kg.

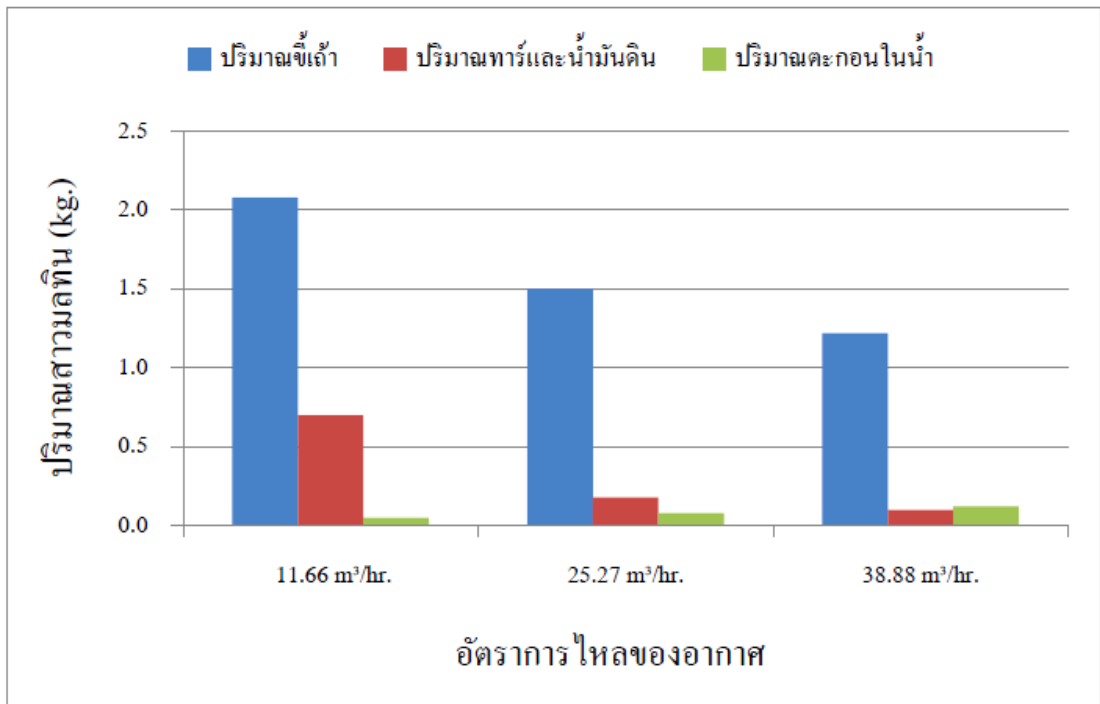
จากการทดลองของทั้งสามการทดลองนั้นพบว่าความแตกต่างระหว่างการทดลองส่วนใหญ่คือ อุณหภูมิภายในเตา เวลาที่ใช้ในการทดลอง และอัตราการไหลของอากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 แสดงการเทียบเวลาและอุณหภูมิของการทดลองทั้งสามการทดลอง

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเวลาและอุณหภูมิขณะเริ่มเผาไหม้ของทั้งสามการทดลองนั้นแตกต่างกัน เป็นการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศต่างกัน ซึ่งการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 11.66 m³/hr. จะใช้เวลาในการทดลองมากที่สุดประมาณ 51% เมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศ 38.88 m³/hr. ในขณะที่อุณหภูมิจะต่ำ และปริมาณสารมลทินก็จะมากตามไปด้วย การทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 25.27 m³/hr. จะใช้เวลาในการทดลองปานกลางประมาณ 30% เมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศ 38.88 m³/hr. ในขณะที่อุณหภูมิจะสูงกว่าการทดลองแรก และปริมาณสารมลทินก็น้อยกว่าการทดลองแรกด้วย และการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 38.88 m³/hr. จะใช้เวลาในการทดลองน้อยที่สุด อุณหภูมิสูงกว่าการทดลองสองครั้งที่ผ่านมา และปริมาณสารมลทินก็น้อยที่สุด ซึ่งทำให้เวลาและอุณหภูมิแตกต่างกัน แต่ที่เหมือนกันก็คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้มีคุณภาพดีเป็นเวลา 40-60 นาที และอุณหภูมิจะลดลงเมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลเริ่มหมด

จากการทดลองที่ผ่านมานั้น สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการทดลองก็คือส่วนของปริมาณสารมลทินที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งเก็บรายละเอียดข้อมูลได้หลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาผลิตแก๊สหมดแล้ว ประกอบด้วยปริมาณจี้เถ้า ปริมาณทาร์ น้ำมันดิน และปริมาณตะกอนในน้ำ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 การเทียบปริมาณสารมลทิน

จากรูปที่ 4.6 พบว่าในการทดลองทั้งสามครั้ง มีปริมาณสารมลทินที่แตกต่างกัน โดยการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 11.66 m³/hr. จะมีปริมาณจี้เถ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 63.93%, ปริมาณน้ำมันดินเพิ่มขึ้นประมาณ 7 เท่า, และปริมาณตะกอนในน้ำลดลงประมาณ 41% เมื่อเทียบกับ การทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศ 38.88 m³/hr. การทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 25.27 m³/hr. จะมีปริมาณจี้เถ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 22.95%, ปริมาณน้ำมันดินเพิ่มขึ้นประมาณ 80%, และปริมาณตะกอนในน้ำลดลงประมาณ 66% เมื่อเทียบกับ การทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศ 38.88 m³/hr. และการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศ 38.88 m³/hr. จะมีปริมาณสารมลทินน้อยที่สุด เนื่องจากการใช้อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ไม่เท่ากัน จึงเกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกันไปด้วย

4.7 การทดลองการทำงานของระบบเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

เป็นการทดลองที่เผาเชื้อเพลิงชีวมวล 20 kg. ในเตาผลิตแก๊สให้ได้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกมา โดยปรับอัตราการไหลของอากาศป้อนเข้าเตาให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นนำแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้มาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า โดยกำหนดค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็น 1:1 ซึ่งข้อมูลการทดลองสามารถดูได้จากตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองการทำงานของระบบเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

เวลา Min.	อุณหภูมิ °C	การเปลี่ยนแปลง ขณะทดลอง
0	47	เริ่มการจุดไฟในเตาเผาด้วยเชื้อเพลิง 5 kg.
10	47	มีควันปริมาณมาก
15	49	เติมเชื้อเพลิง 15 kg.
20	52	มีควันปริมาณมาก
30	61	”
36	74	ติดไฟที่หัวเผา, ผสมควัน
40	117	น้ำใต้เตาพุ่งกระจาย, ไฟดับ
45	108	พัดลมเสีย, เปลี่ยนพัดลม
50	120	อัดอากาศ
60	157	”
68	275	ติดไฟ, ควันผสมมาก
70	327	ติดไฟ, ควันผสมน้อยลง
80	325	คุณภาพแก๊สเริ่มดี
82	327	คุณภาพแก๊สดี
90	339	ติดเครื่องยนต์ด้วยน้ำมัน, เครื่องยนต์ติด
100	333	ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์
110	335	เครื่องยนต์ติด, เครื่องปั่นไฟปั่นได้ 250 V.
120	326	ทดสอบกระแสไฟฟ้า
130	318	เทียบหลอดไฟสปอร์ตไลท์และ พัดลม
140	302	”

เวลา	อุณหภูมิ	การเปลี่ยนแปลง
Min.	°C	ขณะทดลอง
150	297	เสียบหลอดไฟสปอร์ตไลท์ และ พัดลม
152	293	แก๊สเชื้อเพลิงน้อย, เครื่องยนต์เริ่มจะดับ
160	310	เครื่องยนต์ดับ
165	286	ไฟดับ
168	374	เผาชีวมวลที่ตกค้าง
170	394	ปิดพัดลม

จากผลการทดลองเผาเชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อย 20 kg. โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 25.27 m³/hr. พบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเริ่มจุดติดไฟนาที่ที่ 68 จนถึงนาที่ที่ 165 ไฟจึงดับ ติดไฟเป็นเวลา 107 นาที่ และนาที่ที่ 82 -150 (68 นาที่) แก๊สเชื้อเพลิงจะมีคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากการทดลองครั้งนี้มีอากาศบางส่วนย้อนกลับเข้าสู่เตา จึงทำให้น้ำในถังได้เตาผลิตแก๊สฟุ้งกระจายออกมา ส่งผลทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเปียก และทำให้เวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น เมื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงกลับสู่สภาวะปกติแล้วจึงได้นำแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้มาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเครื่องยนต์ทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 50 นาที่ บันกระแสไฟฟ้าได้ 220-250 V. เมื่อทดลองเสร็จจึงได้ทำการตรวจสอบปริมาณขี้เถ้าที่เหลือในเตาจะได้ 1.6 kg. ปริมาณน้ำมันดิน 0.30 kg. และปริมาณตะกอนในถังน้ำได้ตามีปริมาณ 0.04 kg. และการทดลองครั้งนี้ได้มีการควบแน่นของแก๊สที่ชุดกรองอากาศ ทำให้น้ำอยู่ ประมาณ 0.15 kg

สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้จากการเผาไหม้มาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า จะใช้เครื่องยนต์เกยตรขนาดเล็กที่มีเครื่องปั่นไฟในตัวเครื่องยนต์สำหรับการทดลอง โดยการเปิดวาล์วที่ชุดปรับอัตราส่วนอากาศและแก๊สเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์ ให้ได้อัตราส่วนของอากาศกับแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้เครื่องยนต์ติดเครื่องได้ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานปกติแล้วจะสามารถปั่นเครื่องปั่นไฟ ได้กำลังไฟฟ้าขนาด 220-250 V. จากนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้หลอดไฟสปอร์ตไลท์ จำนวนสองหลอด และ พัดลม อัดอากาศ จำนวนหนึ่งตัว มาใช้ในการทดลอง

โดยรูปและรายละเอียดของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า หลอดไฟสปอร์ตไลท์ พัดลม อัดอากาศ และชุดวาล์วปรับอากาศและแก๊สเชื้อเพลิง ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

เครื่องยนต์/รุ่น : ควายทอง K010

แบบเครื่องยนต์ : เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ลูกสูบเดี่ยว

ขนาดเครื่องยนต์ : 13 HP.

ชนิดของระบบเริ่มการเดินเครื่อง : กระตุกสตาร์ท

กำลังสูงสุด : 5500 W

กำลังที่กำหนดต่อเนื่อง : 4600 W

Rate Voltage : 220 V

Rate Frequency : 50 Hz

Power Factor : 1



รูปที่ 4.8 เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

หลอดไฟสปอร์ตไลท์รุ่น :GS TLX2125

Input :220-240, 50Hz

อัตราการเปลืองไฟสูงสุด :36 W 2 หลอด



รูปที่ 4.9 หลอดไฟสปอร์ตไลท์



รูปที่ 4.10 พัดลมอัดอากาศ



รูปที่ 4.11 ชุดวาล์วปรับอากาศและแก๊สเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์

ผลการวิเคราะห์โดยประมาณแสดงให้เห็นว่าแกลบและขี้เลื่อยมีค่าปริมาณสารระเหยที่เผาไหม้ได้ 57.3% และ 65.9% โดยปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าเท่ากันที่ 15.6% และปริมาณเถ้า 17.1% และ 1.5% ที่ค่าความชื้น 10.0% และ 17.0% ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่าขี้เลื่อยและแกลบมีค่าคาร์บอน 40.6% และ 46.4% ไฮโดรเจน 5.4% และ 7.1% ออกซิเจน 36.5% และ 44.8% ไนโตรเจน 0.33% และ 0.12% ซัลเฟอร์ 0.05% และ 0.03% ตามลำดับ ที่ค่าความชื้นเดียวกัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทั้งสองให้ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใกล้เคียงกับผลจากการศึกษาโดยนักวิจัยท่านอื่นๆ เพียงแต่มีความแตกต่างกันบ้างเนื่องมาจากความชื้นในเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและขี้เลื่อยในแต่ละห้องที่มีค่าไม่เท่ากันนั่นเอง นอกจากนี้แกลบและขี้เลื่อยในจังหวัดเพชรบุรีมีค่าความร้อนเท่ากับ 14,360 kJ/kg และ 16,149 kJ/kg ตามลำดับ และเมื่อนำผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุไปทำการคำนวณหาสูตรเคมีของเชื้อเพลิงขี้เลื่อยและแกลบพบว่าขี้เลื่อยและแกลบมีสูตรเคมี $CH_{1.83}O_{0.72}$ และ $CH_{1.59}O_{0.67}$ ตามลำดับ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการไอน้ำ-แก๊สซิฟิเคชันอุณหภูมิสูงจากเชื้อเพลิงแกลบในแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดหยุดนิ่งเปลวไฟไหลลงแสดงให้เห็นว่า ณ สภาวะอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 100 kg/hr อัตราการป้อนไอน้ำ 11.7 kg/hr และเชื้อเพลิงมีค่าความชื้น 11% ก๊าซผลิตภัณฑ์จะมีองค์ประกอบดังนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์ 10-16% Vol. คาร์บอนไดออกไซด์ 10-16% Vol. มีเทน 3-5% Vol. ไฮโดรเจน 5-25% Vol. และค่าความร้อนด้านต่ำของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง 3.9-6.6 MJ/Nm³ ประสิทธิภาพของกระบวนการไอน้ำ-แก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงจากเชื้อเพลิงแกลบในเตาแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดหยุดนิ่งเปลวไฟไหลลงมีค่าอยู่ในช่วง 60-83% โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิ 600 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ไอน้ำในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าความร้อนสูงพอที่จะสามารถนำไปเผาไหม้ในเครื่องยนต์แก๊สสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้

ผลจากการศึกษาองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊สจากแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดหยุดนิ่งเปลวไฟไหลลงโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อยสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแสดงให้เห็นว่า ณ สภาวะอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 100 kg/hr อัตราการป้อนไอน้ำ 11.7 kg/hr และเชื้อเพลิงมีค่าความชื้น 11% โปรคิวเซอร์แก๊สจะมีองค์ประกอบดังนี้ คาร์บอนมอนอกไซด์ 12-33% Vol.

คาร์บอนไดออกไซด์ 0-20% Vol. มีเทน 3-5% Vol. ไฮโดรเจน 7-33%Vol. และค่าความร้อนด้านต่ำของโปรคิวเซอร์แก๊สมีค่าอยู่ในช่วง 3.7-8.0 MJ/Nm³ ประสิทธิภาพของแก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดหยุดนิ่งโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบและขี้เลื่อย มีค่าอยู่ในช่วง 60-90% โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิ 200 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โปรคิวเซอร์แก๊สมีค่าความร้อนสูงพอที่จะสามารถนำไปเผาไหม้ในเครื่องยนต์แก๊สสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์แบบเบดนิ่งอากาศไหลลง โดยกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตา 20 kg กำหนดอัตราการไหลของอากาศในการทดลองแต่ละครั้งที่แตกต่างกัน แล้วทำการวัดอุณหภูมิภายในเตา วัดค่าองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง ปริมาณสารมลทินทำการจับเวลา และบันทึกผลการทดลอง จากนั้นจึงเริ่มทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อนำแก๊สเชื้อเพลิงบางส่วนไปเผาทดลองที่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ฯ และแก๊สบางส่วนจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

พบว่าที่การทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ ($11.66 \text{ m}^3/\text{hr.}$) จะมีเวลาในการจุดติดไฟของแก๊สเชื้อเพลิงที่หัวเผามากที่สุดคือนาทีที่ 20-153 (133 นาที) มีอุณหภูมิภายในเตาที่ต่ำอยู่ในช่วง $31 - 241 \text{ }^\circ\text{C}$ คุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะดีปานกลางที่นาทีที่ 40-70 (30 นาที) อุณหภูมิระหว่าง $241 - 221 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยจะมีควันผสมออกมามาก และคุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะดีมากที่นาทีที่ 80-140 (60 นาที) และมีปริมาณสารมลทินมากที่สุด ที่การทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศปานกลาง ($25.27 \text{ m}^3/\text{hr.}$) จะมีเวลาในการจุดติดไฟของแก๊สเชื้อเพลิงที่หัวเผาน้อยลงคือนาทีที่ 20-135 (115 นาที) มีอุณหภูมิภายในเตาที่สูงขึ้นอยู่ในช่วง $35 - 272 \text{ }^\circ\text{C}$ คุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะดีมากที่นาทีที่ 40-100 (60 นาที) อุณหภูมิระหว่าง $258 - 272 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยจะมีควันผสมออกมาน้อยลง และมีปริมาณสารมลทินที่น้อยลง และที่การทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศสูง ($38.88 \text{ m}^3/\text{hr.}$) จะมีเวลาในการจุดติดไฟของแก๊สเชื้อเพลิงที่หัวเผาน้อยที่สุดคือนาทีที่ 38-126 (88 นาที) มีอุณหภูมิภายในเตาสูงที่สุดอยู่ในช่วง $36 - 360 \text{ }^\circ\text{C}$ คุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะดีมากที่นาทีที่ 60-100 (40 นาที) อุณหภูมิระหว่าง $357 - 360 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยจะมีควันผสมออกมาน้อย และมีปริมาณสารมลทินน้อยที่สุด ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในการทดสอบคุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ จะแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นจะมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้สูงขึ้น คุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงก็จะดีขึ้น และเวลากับปริมาณสารมลทินก็จะน้อยลงตามไปด้วย

ที่การทดลองเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบและขี้เลื่อย 20 kg ที่อัตราการไหลของอากาศ 25.27 m³/hr. โดยกำหนดค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็น 1:1 เพื่อผลิตแก๊สสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า พบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเริ่มจุดติดไฟนาทิตั้งที่ 68-165 (107 นาที) มีอุณหภูมิภายในเตาสูงที่สุดอยู่ในช่วง 36 – 369 °C คุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะดีมากที่นาทิตั้งที่ 70-120 (50 นาที) อุณหภูมิระหว่าง 316 – 336 °C และมีปริมาณสารมลทินน้อย เมื่อคุณภาพแก๊สดีจึงเริ่มนำแก๊สไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่นาทิตั้งที่ 100 เครื่องยนต์ทำงานต่อเนื่องด้วยแก๊สเชื้อเพลิงเป็นเวลา 50 นาที ขับเครื่องปั่นไฟฟ้าได้ 220-250 V. ผลิตไฟฟ้าได้ 5.5 KWe และประสิทธิภาพรวมของระบบประมาณ 55.00 % สามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับ หลอดไฟส่องสว่าง 100 W จำนวน 40 หลอด, พัดลมอัดอากาศขนาด 500 W จำนวน 2 ตัว, พัดลมตั้งโต๊ะขนาด 50 W จำนวน 10 ตัว รวมภาระทั้งหมด 5,500 W

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ มีอุปสรรคที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดของขั้นตอนการทดลองและข้อมูลการทดลอง มีสาเหตุดังต่อไปนี้

5.2.1 ที่บริเวณภายนอกห้องเผาไหม้ของเตาไม่มีการหุ้มฉนวนกันความร้อน จึงทำให้มีการสูญเสียความร้อนไปมาก ทำให้อุณหภูมิภายในเตาต่างกันไป

5.2.2 การระเบิดพุ่งกระจายของน้ำในถังได้ตาขณะทดลอง ทำให้ชีวมวลในห้องเผาไหม้เปียก การทดลองจึงไม่สมบูรณ์

5.2.3 เนื่องจากการสร้างและทดลองครั้งนี้เป็นการสร้างและทดลองนอกสถานที่ ผู้ทดลองจึงเสียเวลาในการเดินทาง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ศึกษาวิธีการเติมเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่เตา และวิธีการนำขี้เถ้าออกจากเตา ให้สัมพันธ์กับการทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบ

5.3.2 ทำการหุ้มฉนวนกันความร้อนที่บริเวณภายนอกห้องเผาไหม้ ให้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

5.3.4 ผู้ทดลองต้องมีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวัดชนิดต่างๆ เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาแพง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Planning and Installation Bioenergy Systems A Guide for Installers, Architects and Engineers, 2005, James&James (Science Publishers), U.S.A.
- [2] สำเร็จ จักรใจ, 2547, การเผาไหม้, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, กรุงเทพฯ, หน้า 76-77.
- [3] McKendry, P., 2001, "Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of Biomass", *Bioresource Technology*, Vol. 88, pp. 37-46.
- [4] Kaew-On, J. Waewsak, J., Mani, M. and Phethuayluk, S., 2006, "Biomass Conversion Technology: Gasification," *Thaksin Science Journal*, Vol. 2, pp. 56–67.
- [5] Chmielniak, T. and Sciazko M., 2003, "Co-Gasification of Biomass and Coal for Methanol Synthesis," *Applied Energy*, Vol. 74, pp. 393–403.
- [6] Pereraa, K. K. C. K., Rathnasiria, P. G., Senaratha, S. A., Sugathapalaa, G. T., Bhattacharya, S. C. and Salam, P. A., 2005, "Assessment of Sustainable Energy Potential of Non-Plantation Biomass Resources in Sri Lanka," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 29, pp. 199–213.
- [7] Yin, X., Wu, C. Z., Zheng, S. P., Chen, Y., 2002, "Design and Operation of a CFB Gasification and Power Generation System for Rice Husk," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 23, pp. 181 – 187.
- [8] Hoque, M. M. and Bhattacharya, S. C., 2001, Fuel Characteristics of Gasified Coconut Shell in a Fluidized and a Spouted Bed Reactor, *Energy*, Vol. 26, pp. 101–110.
- [9] Bhattacharya, S. C., Hla, S. S., Pham, H. L., 2001, "A Study on a Multi-Stage Hybrid Gasifier-Engine System", *Biomass & Bioenergy*, Vol. 21, pp. 445-460.
- [10] "ผลผลิต": ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2543/2544, กรุงเทพฯ, 2542, "อัตราส่วนวัสดุเหลือใช้ต่อผลผลิต" สำหรับชานอ้อย ฟางข้าว ต้นมันสำปะหลัง เปลือกถั่วลิสงและต้นฝ้าย
- [11] Wander, P. R., Altafinib, C. R., Ronaldo and Barretob, M., 2004, "Assessment of a Small Sawdust Gasification Unit," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, pp. 467–476.
- [12] Cao, Y., Wang, Y. Riley, J. T., Pan, W. P., 2006, "A Novel Biomass Air Gasification Process for Producing Tar-Free Higher Heating Value Fuel Gas," *Fuel Processing Technology*, Vol. 87, pp. 343–353.

- [13] Dogru, M., Howarth, C. R., Akay, G., Keskinler, B., Malik, A. A., 2002, "Gasification of Hazelnut Shells in a Downdraft Gasifier," *Energy*, Vol. 27, pp. 415–427.
- [14] Jayah, T. H., Aye, L., Fuller, R. J., Stewart, D. F., 2003, "Computer Simulation of a Downdraft Wood Gasifier for Tea Drying," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, pp. 459-469.
- [15] Zainal, Z. A., Ali, R., Lean, C. H., Seetharamu, K. N., 2001, "Prediction of Performance of a Downdraft Gasifier using Equilibrium Modeling for Different Biomass Materials," *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, pp. 1499-1511.
- [16] Ganan, J., Turegano, J. P., Calama, G., Roman, S., Kassir, A. A., 2006, "Plant for the Production of Activated Carbon and Electric Power from the Gases Originated in Gasification Processes," *Fuel Processing Technology*, Vol. 87, pp. 117-122.
- [17] Ganana, J., Kassir, A. A., Abdullah, Mirandab, A. B., Tureganoc, J., Correiac, S., Cuerdad, E. M., 2005, "Energy Production by means of Gasification Process of Residuals Source in Extremadura (Spain)," *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 1759–1769.
- [18] Bhattacharya, S. C., Salama, P. A., Runqing, H., Somashekar, H. I., Racelis, D. A., Rathnasirie, P. G., Yingyuad, R., 2005, "An Assessment of the Potential for Non-Plantation Biomass Resources in Selected Asian Countries for 2010," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 29 pp. 153–166.
- [19] Sanz, A. and Corella, J., 2006, "Modeling Circulating Fluidized Bed Biomass Gasifiers Results from a Pseudo-Rigorous 1-Dimensional Model for Stationary State," *Fuel Processing Technology*, Vol. 87, pp. 247–258.
- [20] Junfenga, L., Runqing, H., Yanqina, S., Jinglia, S., Bhattacharya, S. C., Salam, P. A., 2005, "Assessment of Sustainable Energy Potential of Non-Plantation Biomass Resources in China," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 29, pp. 167–177.
- [21] Sajjakulnukita, B., Yingyuada, R., Maneekh, V., Pongnarintasuta, V., Bhattacharya, S. C. Salam, P. A., 2005, "Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Thailand," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 29, pp. 214–224.
- [22] ศิริบุษ จินดารักษ์, 2548, เอกสารประกอบการสอน, เทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยนเรศวร

- [23] สุริย์ จรูญศักดิ์, 2543, การศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงเพื่อใช้ในการผลิตเซรามิกส์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [24] วิทยา จงเจริญ และ บุญเลี้ยง ชิมศรีสกุล, 2530, โพรคิวเซอร์แก๊ส ติดเครื่องยนต์แก๊สโซลีน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [25] ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม, 2539, คณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, โครงการการศึกษาการพัฒนาเตาเผาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมขนบท กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน
- [26] บวรพรรณ คดีการ, 2529, ตัวกรองที่เหมาะสมสำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านไม้, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [27] วิภาวรรณ แสงสง่า, 2544, การเปรียบเทียบการผลิตเซรามิกส์โดยใช้พลังงานความร้อนที่ได้จากเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ Updraft และ Downdraft, ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [28] ธรากร สกุลพานิชและปิยวงษ์ ฑิตธิวงษ์, 2530, การศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆในกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลจากกะลามะพร้าว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [29] Arthayukti, W., 1984, "Air Gasification of Corn Cobs in a Tubular Open Top Batch Gasifier", Biomass Gasification in Thailand, National Energy Administration, Ministry of Science Technology and Energy.
- [30] Hoi, W. K., 1992, "Development of a 35 kW Rubber Wood Gasifier", Second International Energy Conference on Energy from Biomass Residues, 17-19 August, Kuala Lumpur.
- [31] จงจิตร หิรัญลาก และคณะ, 2542, การอบแห้งพริกโดยใช้โพรคิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่10, ฉบับที่1 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 68-77.
- [32] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2544, เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ "พื้นฐานอุปกรณ์นำความร้อนที่กลับคืน," มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- [33] ชนากานต์ อาสาสุจริต, 2538, การอบแห้งพริกโดยใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สชีวมวล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [34] Deeto, S., Chindaruksa S. and Waewsak J., 2005, “Designing of a Mulberry Green Tea Dryer with Producer Gas Utilization,” *The 43rd Kasetsart University Annual Conference*, 3-5 February, Bangkok, Thailand, (in Thai).
- [35] Deeto, S., Chindaruksa S. and Waewsak J., 2005, “The Utilization of Producer Gas in a Mulberry Green Tea Production Process,” *The 1st Conference of Energy Network of Thailand*, 11-13 May, Chonburi, Thailand (in Thai).
- [36] Deeto, S., Chindaruksa, S. and Waewsak, J., 2005, “A Mulberry Green Tea Drying using Producer Gas,” *Naresuan University Science Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-26.
- [37] Blasi, C. D., 2000, ‘Dynamic Behaviour of Stratified Downdraft Gasifiers,’ *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, pp. 2931-2944.
- [38] Giltrap, D. L. McKibbin, R. and Barnes, G. R. G., 2003, A Steady State Model of Gas-Char Reactions in a Downdraft Biomass Gasifier,” *Solar Energy*, Vol. 74, pp. 85-91.
- [39] Chmielniak, T. and Sciazko, M., 2003, “Co-Gasification of Biomass and Coal for Methanol Synthesis,” *Applied Energy*, Vol. 74, pp. 393-403.
- [40] McKendry, P., 2002, “Energy Production from Biomass (part 1): Overview of Biomass,” *Bioresource Technology*, Vol. 83, pp. 37-46.
- [41] McKendry, P., 2002, “Energy Production from Biomass (part 2): Conversion Technologies,” *Bioresource Technology*, Vol. 83, pp. 47-54.
- [42] McKendry, P., 2002, “Energy Production from Biomass (part 3): Gasification Technologies,” *Bioresource Technology*, Vol. 83, pp. 55–63.
- [43] Tinaut, F. V., Melgar, A. Horrillo, A. and Rosa, A. D., 2006, “Method for Predicting the Performance of an Internal Combustion Engine Fuelled by Producer Gas and Other Low Heating Value Gases,” *Fuel Processing Technology*, Vol. 87, pp. 135-142.
- [44] Gonzalez, J. F., Ganan, J., Ramiro, A., Gonzalez-Garcia, C. A., Encinar, J. M., Sabio, E., Roman, S., 2006, “Almond Residues Gasification Plant for Generation of Electric Power Preliminary Study,” *Fuel Processing Technology*, Vol. 87, pp.149 – 155.

- [45] Henriksen, U., Ahrenfeldt, J., Jensen, T. K. Gobel, B., Bentzen, J. D. Hindsgaul, C., and Sorensen, L .H., 2005, "The Design, Construction and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifier," *Energy*, Vol. 31, pp.1542 – 1553.
- [46] Chen, G., Andries, J., Luo, Z. and Spliethoff, H., 2003, "Biomass Pyrolysis/Gasification for Product Gas Production: The Overall Investigation of Parametric Effects," *Energy Conversion&Management*, Vol. 44, pp. 1875-1884.
- [47] Babu, B. V. and Sheth, P. N., 2005, "Modeling and Simulation of Reduction Zone of Downdraft Biomass Gasifier: Effect of Char Reactivity Factor," *Energy Conversion&Management*, Vol. 47, pp.2602 – 2611.
- [48] Zainal, Z. A., Raifau, A., Quadir, G. A. and Seetharamu, K. N., 2002, "Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 23, pp. 283-289.
- [49] Hasler, P. and Nussbaumer, T. H., 1999, "Gas Cleaning for IC Engine Applications from Fixed Bed Biomass Gasification," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 16, pp 385-395.
- [50] Yin, X. L., Wu, C. Z. Zheng, S. P. and Chen, Y., 2002, "Design and Operation of a CFB Gasification and Power Generation System for Rice Husk," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 23, pp. 181-187.