

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากชีวมวลความชื้นสูงโดยใช้พลาสมา
เสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**EFFICIENCY ENHANCEMENT IN ENERGY
PRODUCTION FROM HIGH-MOISTURE BIOMASS
USING PLASMA-ASSISTED GASIFICATION**



Naiyawat Sukthang

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Agricultural and Food Engineering**

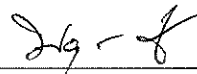
Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากชีวมวลความชื้นสูงโดยใช้พลาสมาเสริม
ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(ผศ. ดร. พงศ์ศักดิ์ จุลยุเสนา)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. วีรชัย อองหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



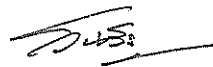
(ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

กรรมการ



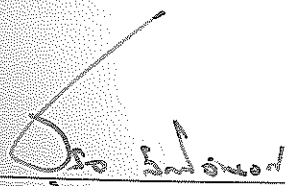
(อ. ดร. พรรษา ทิปลัม)

กรรมการ



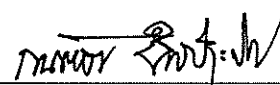
(อ. ดร. วันรัฐ อับดุลกาซิม)

กรรมการ



(ศ. ดร. สุกิจ ลิ้มปิ๋จ่านงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร. กนคัธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นัยวัฒน์ สุขท่ง : การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากชีวมวลความชื้นสูงโดยใช้
พลาสมาเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (EFFICIENCY ENHANCEMENT IN
ENERGY PRODUCTION FROM HIGH-MOISTURE BIOMASS USING PLASMA-
ASSISTED GASIFICATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย ออาจหาญ,
130 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional
Gasification, C-G) และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification, P-G) ในด้าน
ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน โดยนำพลาสมาอาร์ค (Plasma Arc) ชนิด DC Plasma Torch ขนาด
50 kW มาประยุกต์ใช้กับเตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดไหลลง (Fixed-bed Downdraft Gasifier) ระดับ
ต้นแบบขนาด 100 kW

ผลการศึกษาโดยทดสอบกับเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ความชื้นเฉลี่ย 16%w.b.
ระบบ P-G ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ
แก๊สเชื้อเพลิง ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงขึ้น และยังคงประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับ
เดียวกับระบบ C-G แม้ว่าจะมีการเพิ่มพลังงานจากพลาสมาเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ ยังพบว่า
ปริมาณคาร์บอนในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบ P-G ลดลง เมื่อเทียบกับระบบ C-G

สำหรับการทดสอบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นสูง คือ
28%w.b. และ 34%w.b. พบว่า P-G สามารถลดข้อจำกัดด้านความชื้นในวัตถุดิบในการเดินระบบ
ด้วย C-G โดยความชื้นของเชื้อเพลิงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในเตาปฏิกรณ์ลดลง แต่มีผลต่อการเพิ่ม
องค์ประกอบของ H_2 ในแก๊สเชื้อเพลิง ได้ค่าความร้อนอยู่ในระดับสูง ($> 5 \text{ MJ/Nm}^3$) และมีคุณภาพ
ตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ อีกทั้งยังคงประสิทธิภาพ
เทียบเคียงได้กับระบบ C-G โดยเฉพาะที่ระดับความชื้น 34%w.b. และเมื่อพิจารณาในกรณีการผลิต
พลังงานจากเชื้อเพลิงความชื้น 16%w.b. ซึ่งคิดรวมพลังงานในการอบแห้งด้วย พบว่า ระบบ P-G
จะมีประสิทธิภาพได้เปรียบถึง 15-20% แสดงให้เห็นว่าระบบ P-G สามารถเดินระบบโดยใช้
เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการลดขั้นตอนและพลังงานในการ
เตรียมเชื้อเพลิง

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา น.วิวัฒน์ สุขท่ง

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วีรชัย ออาจหาญ

NAIYAWAT SUKTHANG : EFFICIENCY ENHANCEMENT IN ENERGY
PRODUCTION FROM HIGH-MOISTURE BIOMASS USING PLASMA-
ASSISTED GASIFICATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 130 PP

PLASMA GASIFICATION/FIXED BED DOWNDRAFT GASIFIER/
ENERGY PRODUCTION/HIGH-MOISTURE BIOMASS

The objective of this research was to compare conventional gasification (C-G) and plasma gasification (P-G) system in terms of energy production efficiency. Moreover, the potential of P-G was investigated when using high-moisture biomass as fuel. In this experiment, the C-G system with a capacity of 100-kW electricity production was modified by installing a 50-kW plasma torch to the reactor.

The results showed that P-G system caused an increase in gasifier temperature when using cut biomass (Giant Leucaena) having an average moisture content of 16% w.b. In consequence, the derived syngas composition was improved, providing an increase in calorific value. Although the energy was added to the P-G system, the overall efficiency was comparable to that of C-G system. Moreover, it was found that tar content decreased in comparison to that derived from C-G system.

For high-moisture biomass, including 28% w.b. and 34% w.b., it was found that plasma could reduce the limit of biomass in terms of moisture content in C-G operation. The high moisture in the biomass caused a decrease in gasifier temperature. However, the derived H₂ in syngas was increased, obtaining high calorific value (> 5 MJ/Nm³), which is high enough for use in consecutive applications. The

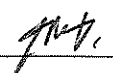
efficiency of P-G system operated with high moisture biomass was found to be more or less the same with that of C-G operated with low moisture biomass. When the drying energy required to achieved 16%w.b. is taken into account for C-G system, the efficiency of the P-G system is 15-20% higher, indicating that the P-G system can be operated with high-moisture biomass efficiently and reduces processes and energy for biomass preparation.



School of Agricultural Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจหาญ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งคอยให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสนา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ อาจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ และอาจารย์ ดร.วันรัฐ อับดุลลากาซิม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2557 ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนบัณฑิตศึกษา บุคลากร และนักวิจัยศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวลและสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านซึ่งมีส่วนสนับสนุนในการทำงานวิจัยในครั้งนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนโอกาสในการศึกษาเล่าเรียนด้วยดีตลอดมา

นัยวัฒน์ สุขทั้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับชีวมวล.....	5
2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ (Commercialized Biomass).....	6
2.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (Non-Commercialized Biomass).....	6
2.2 คุณสมบัติของชีวมวล	6
2.2.1 ส่วนประกอบองค์รวม	6
2.2.2 ค่าความร้อน (Heating Value).....	7
2.2.3 ปริมาณความชื้น (Moisture Content).....	8
2.2.4 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ	8
2.2.5 ส่วนประกอบของเศษเถา.....	9
2.2.6 การหลอมตัวของเศษเถา.....	9
2.2.7 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	10
2.2.8 ค่าความพรุนหรือปริมาตรช่องว่าง.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	ศักยภาพชีวมวล	11
2.4	การผลิตพลังงานจากชีวมวล	12
2.4.1	การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)	12
2.4.2	การย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)	13
2.4.3	กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Process)	15
2.5	เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน	16
2.5.1	ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเตาแก๊สซิฟิเคชัน	16
2.5.2	ชนิดของเตาแก๊สซิฟิเคชัน (Type of Gasifier)	18
2.5.3	การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง	21
2.5.4	มลพิษและของเสียที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	22
2.6	เทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค	27
2.6.1	หลักการของพลาสมาอาร์ค	28
2.6.2	รูปแบบของหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma Torch Type)	29
2.6.3	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมา	33
3	เครื่องมือและการดำเนินงานวิจัย	40
3.1	บทนำ	40
3.2	ขั้นตอนการวิจัย	41
3.3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	42
3.3.1	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัย	42
3.3.1.1	การเตรียมไม้กระถินยักษ์สำหรับเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัย	42
3.3.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	43
3.3.2.1	การศึกษาคุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)	43
3.3.2.2	การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณธาตุในตัวอย่าง	44
3.3.3	การพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชันสำหรับใช้กับพลาสมาอาร์คเชิงความร้อน	44
3.3.3.1	พลาสมาเชิงความร้อนขนาดกำลัง 50 กิโลวัตต์	44
3.3.3.2	การพัฒนาเตาปฏิกรณ์ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3.3 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G).....	57
3.3.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ.....	60
3.3.4 การศึกษาการผลิตพลังงานของระบบระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน	62
3.3.5 การประเมินสมรรถนะระบบ/ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน	66
4 ผลการทดลอง	69
4.1 การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	69
4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง	69
4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง	70
4.1.2.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	70
4.1.2.2 องค์ประกอบแบบประมาณ	72
4.1.2.3 องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ.....	73
4.2 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G)	73
4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile).....	74
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง	75
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น.....	78
4.2.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency)	79
4.3 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G).....	79
4.3.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile).....	80
4.3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง	83
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น.....	83
4.3.4 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ C-G และ P-G.....	85
4.4 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูงด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน	87
4.4.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile).....	87
4.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง	90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.3	ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น.....	92
4.4.4	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency).....	93
4.4.5	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ P-G สำหรับเชื้อเพลิงความชื้นสูงกับระบบ C-G (กรณี : วิเคราะห์รวมพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิง)	95
4.5	สมดุลมวลสารและพลังงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน	98
4.5.1	สมมติฐานและข้อมูลของระบบ สำหรับการทำให้สมดุลและพลังงาน	98
4.5.2	การทำสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบ	102
4.5.2.1	สมดุลมวลสาร (Mass Balance).....	102
4.5.2.2	สมดุลพลังงาน (Energy Balance).....	104
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1	สรุป	108
5.1.1	การพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชัน (P-G).....	108
5.1.2	การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานและประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน	108
5.1.3	การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานและประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันกับเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูง.....	109
5.1.4	การศึกษาสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบ	110
5.2	ข้อเสนอแนะ	111
	รายการอ้างอิง.....	112
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ	119
	ประวัติผู้เขียน	130

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวล (พื้นฐานแห้ง)	7
2.2 อุณหภูมิหลอมตัว (°C) ของเศษได้จากไม้พืนในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจน	10
2.3 ปฏิกิริยาในกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	14
2.4 ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	23
2.5 ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง	24
2.6 ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	25
2.7 การจำแนกวิธีการกำจัดทาร์	27
3.1 คุณลักษณะห้วงเวลาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้	44
3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบ	61
3.3 ชุดการทดลองการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน	64
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน	70
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์	71
4.3 องค์ประกอบแบบประมาณของชีวมวลประเภทไม้	72
4.4 องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุของชีวมวลทั่วไป	73
4.5 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิงจากไม้กระถินยักษ์สับท่อนด้วยการเดินระบบ C-G	77
4.6 ปริมาณทาร์และฝุ่นของแก๊สเชื้อเพลิง	78
4.7 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G	79
4.8 องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจากระบบ C-G และระบบ P-G	83
4.9 ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างระบบ C-G และ P-G	84
4.10 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G และระบบ P-G	85
4.11 การเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G	86
4.12 องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจากระบบ P-G	90
4.13 ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบ P-G	92
4.14 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ P-G	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน	96
4.16 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ P-G (34%w.b.) กับระบบ C-G (16%w.b.).....	97
4.17 อัตราการใช้เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 220 Nm ³ /hr.....	99
4.18 ปริมาณองค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิง 3 ระดับความชื้น	100
4.19 อัตราการไหล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม	101
4.20 อัตราการไหลและองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง	101
4.21 ปริมาณถ่านไม้และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ	102
4.22 การสมดุลมวลสารของระบบ P-G (34%w.b.).....	104
4.23 สมดุลพลังงานของระบบ	105
4.24 ผลการสมดุลมวลสารโดยรวมของระบบที่อัตราการไหล 220 Nm ³ /hr	106
4.25 ผลการสมดุลพลังงานของระบบที่อัตราการไหล 220 Nm ³ /hr.....	107

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	9
2.3	13
2.4	14
2.5	15
2.6	18
2.7	20
2.8	22
2.9	28
2.10	29
2.11	29
2.12	30
2.13	33
2.14	34
3.1	41
3.2	42
3.3	46
3.4	46
3.5	47
3.6	48
3.7	48
3.8	49
3.9	49
3.10	50
3.11	50
3.12	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมา.....	52
3.14 ลักษณะเปลวพลาสมาที่สภาวะต่างๆ.....	52
3.15 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวแกนและแนวรัศมีของเปลวพลาสมาที่สภาวะต่างๆ.....	53
3.16 ลักษณะของเตา Gasification และPlasma-assisted gasification.....	54
3.17 แผนผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน	55
3.18 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน	58
3.19 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน	59
3.20 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ($T_1 - T_6$).....	61
3.21 เครื่องมือที่ใช้ในการวัด	62
4.1 เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ (สับท่อน)	70
4.2 กราฟแสดงผลของความชื้นในชีวมวลต่อค่าความร้อน	72
4.3 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile).....	75
4.4 ลักษณะของพลาสมาอาร์คและอุณหภูมิจากพลาสมาที่การเดินระบบ 36 kW	80
4.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile) เปรียบเทียบระหว่างการเดินระบบ C-G กับระบบ P-G.....	82
4.6 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับความชื้น.....	89
4.7 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงตามระดับความชื้นเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหล 220 Nm ³ /hr	91
4.8 ประสิทธิภาพและค่าความร้อนตามระดับความชื้นเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหล 220 Nm ³ /hr.....	94
4.9 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้พลาสมาช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted Gasification) ที่ความชื้นและอัตราการไหลต่างๆ.....	95
4.10 แผนภาพปฏิบัติการกล่องดำ (Black box operation) ของระบบ	98
4.11 แผนภาพสมดุลมวลสารและพลังงาน	106

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society of Testing and Materials
C	=	ธาตุคาร์บอน (Carbon)
Ca	=	ธาตุแคลเซียม (Calcium)
Cl	=	ธาตุคลอรีน (Cholorine)
CO	=	แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (Carbonmonoxide)
CO ₂	=	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide)
CV _g	=	Calorific Value of Syngas
C-G	=	ระบบแก๊สซิฟิเคชั่น (Conventional Gasification)
C-G (16%w.b.)	=	การทดสอบผลิตพลังงานจากไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้น 16%w.b. กับระบบแก๊สซิฟิเคชั่น
%d.b.	=	ร้อยละมาตรฐานแห้ง (% Dry Basis)
g	=	กรัม (Gram)
G _c	=	Gas composition (%v/v)
H	=	ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)
H ₂	=	แก๊สไฮโดรเจน
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid)
Hg	=	ธาตุปรอท (Mercury)
HHV _{fuel}	=	High Heating Value of fuel (MJ/kJ)
HHV _g	=	High Heating Value of gas (MJ/Nm ³)
hr	=	ชั่วโมง (Hour)
kg	=	กิโลกรัม (Kilogram)
kcal	=	กิโลแคลอรี
kW	=	กิโลวัตต์ (Kilowatt)
LHV _{fuel}	=	Low Heating Value of fuel (MJ/kJ)
LHV _g	=	Low Heating Value of gas (MJ/Nm ³)
m _{ash}	=	Ash Production (kg/hr)
mg	=	มิลลิกรัม (Milligram)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MJ	=	เมกะจูล (Mega Joule)
m_{fuel}	=	Fuel Consumption (kg/hr)
Nm^3	=	Normal Cubic Metre
N	=	ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)
O	=	ธาตุออกซิเจน (Oxygen)
O_2	=	แก๊สออกซิเจน (Oxygen Gas)
P_e	=	Electrical Power
PG	=	Producer Gas
P-G	=	ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-Assisted Gasification)
P-G (16%w.b.)	=	การทดสอบผลิตพลังงานจากไม้กระถินยักษ์สับก่อนความชื้น 16%w.b. กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน
P-G (28%w.b.)	=	การทดสอบผลิตพลังงานจากไม้กระถินยักษ์สับก่อนความชื้น 28%w.b. กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน
P-G (34%w.b.)	=	การทดสอบผลิตพลังงานจากไม้กระถินยักษ์สับก่อนความชื้น 34%w.b. กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน
PPM	=	Part Per Million
S	=	ธาตุซัลเฟอร์ (Sulphur)
SO_2	=	แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur Dioxide)
SO_x	=	แก๊สออกไซด์ของซัลเฟอร์ (Sulphur Oxide)
$T_1 - T_6$	=	Reactor Temperature (Inside 1- Inside 6)
TD	=	Impurities (Tar & Dust)
T&S	=	Tar and Soot
V_g	=	Gas Flow Rate
%wt.	=	ร้อยละโดยน้ำหนัก (% By Weight)
%w.b.	=	ร้อยละมาตรฐานเปียก (% Wet Basis)
η_{cg}	=	Cold-Gas Efficiency

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา

จากการประเมินขององค์กรสารสนเทศพลังงาน หรือ EIA (Energy Information Administration) ซึ่งเป็นหน่วยงานสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานของโลก ได้ระบุว่า การใช้พลังงานของโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 54% โดยเฉพาะตั้งแต่ปี 2544 ไปจนถึงปี 2568 ซึ่งแหล่งพลังงานที่ใช้ 3 อันดับแรก คือ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ตามลำดับ จากการคาดการณ์ของ EIA ระบุว่าความต้องการใช้น้ำมันดิบและเชื้อเพลิงเหลวของโลก จะเพิ่มขึ้นจาก 88.1 ล้านบาร์เรลต่อวันในปี 2554 มาอยู่ที่ระดับ 89.5 ล้านบาร์เรลต่อวันในปี 2555 หรือเพิ่มขึ้น 1.6% โดยประเทศจีนและกลุ่มประเทศกำลังพัฒนามีอัตราการเติบโตมากที่สุด (Energy Information Administration, 2012) ในส่วนของก๊าซธรรมชาติและถ่านหินก็มีแนวโน้มการใช้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน สำหรับประเทศไทย พบว่าสัดส่วนการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขึ้นต้นในปี 2554 ก๊าซธรรมชาติมีสัดส่วนการใช้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 44 รองลงมาคือน้ำมันมีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 36 ถ่านหินนำเข้ามีสัดส่วนการใช้ร้อยละ 17 และมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มขึ้นในทุกๆปีอันเนื่องมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจ (ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน, 2555) ซึ่งหากพิจารณาระดับการใช้พลังงานดังกล่าวโดยไม่มี การค้นพบแหล่งพลังงานเพิ่มเติมแล้ว คาดว่าโลกจะมีแหล่งสำรองน้ำมันใช้ไปได้ก็เพียง 42 ปี ก๊าซธรรมชาติอีก 64 ปี และถ่านหิน 220 ปี เท่านั้น ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้น การผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีอยู่อย่างมหาศาล จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับ ปัญหาความไม่มั่นคงของพลังงานจากฟอสซิลและปัญหาสภาวะโลกร้อนได้

ปัจจุบัน การพัฒนาและค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทนทั้งในและต่างประเทศมีความก้าวหน้าไประดับหนึ่ง แต่ยังคงไม่สามารถทดแทนพลังงานจากฟอสซิลได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจาก ด้วยปัญหาและอุปสรรคด้านต่างๆ เช่น ปัญหาด้านเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม และสังคม เป็นต้น อย่างไรก็ตามประเทศไทยได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) โดยส่งเสริมพลังงานทดแทนประเภทต่างๆประกอบด้วย แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชยะ ก๊าซชีวภาพ และชีวมวล อีกทั้งพลังงานทดแทนรูปแบบใหม่ เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ คลื่นและกระแสน้ำ และไฮโดรเจน แต่หากมองไปถึงสภาพการณ์ปัจจุบันของประเทศไทย ซึ่งเป็น

ประเทศเกษตรกรรม และมีแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่เอื้ออำนวยต่อการเกษตรกรรมนั้น ทำให้เห็นว่าประเทศไทยน่าจะมีศักยภาพในการผลิตพลังงานจากชีวมวลได้อย่างมหาศาล อีกทั้งการผลิตพลังงานจากชีวมวลทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิลยังเป็นการช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Green House Gas)

กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานโดยใช้วิธีทางเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Process) สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบหลักๆ คือ กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งในส่วนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถือเป็นวิธีการผลิตพลังงานจากชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากระบบไม่มีความยุ่งยากและซับซ้อน โดยแก๊สซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-Chemical Conversion Process) โดยควบคุมเตาปฏิกรณ์ ให้เกิดการเผาไหม้แบบจำกัดปริมาณอากาศ (Partial Oxidation) ที่อุณหภูมิประมาณ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความร้อนจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) (Higman and Van der Burgt, 2008) แก๊สเชื้อเพลิงนี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยตรง โดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือป้อนแก๊สเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า หรือนำความร้อนของไอน้ำไปใช้ประโยชน์อื่น

อย่างไรก็ดีเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพหากวัตถุดิบมีความแปรปรวนของคุณสมบัติสูง อีกทั้งแก๊สชีวมวลที่ได้ยังคงมีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานโดยตรง เนื่องจากแก๊สที่มีปริมาณคาร์บอนสูงทำให้ค่าความร้อนน้อยลง และยังก่อให้เกิดการอุดตันในท่อส่งแก๊สหรือเครื่องยนต์ได้ (Han and Kim, 2006) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย โดย วีรัชย์ อาจหาญ และคณะ (2553) ที่สนับสนุนว่า การผลิตพลังงานต้นแบบโรงไฟฟ้าเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบ Fixed Bed Downdraft Gasification ขนาด 100 kW ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ในเชื้อเพลิงชีวมวลบางประเภท โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงเกิน 15% w.b. ไม่สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง การนำเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้มาใช้กับระบบ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงหลายขั้นตอน ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตพลังงานที่สูง ทั้งนี้หากไม่ควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง

แนวทางแก้ไขปัญหาคือ การศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสม ที่นำมาใช้เป็นแหล่งความร้อนเสริมให้กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะเพิ่มทางเลือกในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางขึ้น ทั้งนี้มีงานวิจัยที่สนับสนุนว่า การนำเทคโนโลยีพลาสมาเข้ามาใช้เป็นแหล่งความร้อนเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะสามารถแก้ปัญหาค่าความแปรปรวนด้าน

กายภาพในชีวมวลที่มีความชื้นสูงได้ เนื่องจากพลาสมาสามารถสร้างอุณหภูมิได้มากกว่า 1,500 °C ทำให้ช่วยในการรักษาอุณหภูมิสูงไว้ได้และยังช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา อีกทั้งช่วยขจัดเศษความร้อนที่สูญเสียไปจากระบบ (Rutberg and et. al., 2011) และสามารถลดปริมาณทาร์ในแก๊สชีวมวล (Hlina and et al., 2006) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพสูงในการสลายองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเราเรียกว่าเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification) ทั้งนี้ เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คกับการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตพลังงานสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน ยังถือเป็นเทคโนโลยีใหม่และยังเป็นการวิจัยและพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการ (Hlina et al., 2006; Zhang et al., 2010) อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้ก็ได้สนับสนุนว่า การนำพลาสมาเข้ามาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน มีความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ในการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง และยังสามารถเพิ่มผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในแก๊สเชื้อเพลิงได้ และมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม

การศึกษาในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการผลิตพลังงานจากชีวมวลโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คร่วมกับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน โดยการพัฒนากระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในระดับต้นแบบที่สามารถนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความแปรปรวนด้านความชื้นสูงได้ โดยมุ่งเน้นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ที่ให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น สามารถเดินระบบได้อย่างเสถียรภาพ ซึ่งจะนำไปสู่การได้รับเทคนิคและวิธีการใหม่ๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานจากชีวมวล ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถชี้วัดความเหมาะสมในการนำเทคโนโลยีไปใช้งานในอนาคต อันจะก่อให้เกิดประโยชน์กับประเทศชาติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาระบบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน
- 2) เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันที่มีผลต่อปริมาณทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิง
- 3) เพื่อศึกษาสมรรถนะการทำงาน และประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ดำเนินการโดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง (ไม้กระถินยักษ์สับท่อน) ได้แก่ ขนาด ความชื้น และความหนาแน่น พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) จากนั้นทำการพัฒนาชุดเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จากชุดเตาผลิตแก๊สชีวมวลชนิดไหลลง (Fixed Bed Down-Draft Gasifier) เพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงาน และประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน สำหรับเชื้อเพลิงที่ความชื้นระดับต่างๆ พร้อมทั้งศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในระบบที่มีผลต่อปริมาณทาร์ในโปรคิวเซอร์แก๊ส เพื่อประเมินผลระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในภาพรวมเพื่อเป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ได้เทคโนโลยีและวิธีการผลิตพลังงานจากชีวมวลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 2) ได้ผลการศึกษาสมรรถนะการทำงาน และประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูง
- 3) ได้ผลการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงที่เป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิในระบบ

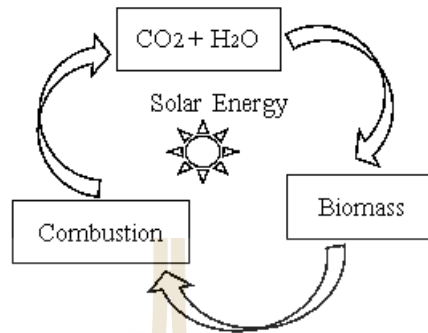
บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง มวลสารใดก็ตามที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตหรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่ใช้พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสงและเกิดการสะสมพลังงานในรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในตัวชีวมวล ซึ่งชีวมวลสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนแหล่งพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและกำลังจะหมดลง ประเทศไทยถือเป็นแหล่งชีวมวลขนาดใหญ่ เนื่องจากเป็นประเทศเกษตรกรรม อีกทั้งยังมีสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศที่เอื้ออำนวยต่อการผลิตทางการเกษตร สำหรับชีวมวลในความหมายเชิงการผลิตพลังงาน อาจมาจากหลายรูปแบบ เช่น ชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural Waste) หรือชีวมวลที่

ทำการเพาะปลูกเพื่อใช้ในการผลิตพลังงานโดยตรง (Energy Crops) เป็นต้น (บริษัท กรีนเอ็นเนอร์ยี เน็ทเวิร์ค, 2555)



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลังงานชีวมวล

สำหรับชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural Waste) สามารถจำแนกตามคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงและแหล่งกำเนิด ออกเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ และเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (วีรชัย และคณะ, 2550)

2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ (Commercialized Biomass)

เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูป ซี้ด-ขาย ในที่นี้ เช่น แกลบ ชานอ้อย เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์ ในภาคอุตสาหกรรม

2.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (Non-Commercialized Biomass)

เชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่กระจัดกระจายในไร่นา สวนเกษตร ในที่นี้ เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ทางปาล์ม เศษไม้/เปลือกไม้ จากการทำสวนป่าและอุตสาหกรรมป่าไม้ วัชพืชต่างๆ เช่น ผักตบชวา ไมยราพยักษ์ ซึ่งยังเป็นชีวมวลที่คงเหลือ ยังไม่ถูกนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ สามารถนำมา

พัฒนาไปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ได้ โดยผ่านกระบวนการจัดการ คือ การรวบรวม และแปรรูปให้พร้อมใช้ ทั้งนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงดังกล่าวอย่างละเอียดต่อไป

2.2 คุณสมบัติของชีวมวล

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลมีความหลากหลาย ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต คุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลทั่วไปสามารถทำได้โดยใช้พื้นฐานเดียวกัน เนื่องจากมีองค์ประกอบทางด้านเคมีคล้ายกัน คือ $C_{3.3-4.9}H_{5.1-7.2}O_{2.0-3.1}$ (นคร, 2553)

2.2.1 ส่วนประกอบองค์รวม

ชีวมวลประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และอื่นๆ เช่น สารสกัดบางจำพวก (Extractives) ซึ่งโดยปกติชีวมวลจำพวกไม้โตเร็วจะมีสัดส่วนของเซลลูโลสสูง ส่วนเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จะมีสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสสูง มีลิกนินน้อย และมีส่วนที่เป็นโปรตีนสูง (นคร, 2553) ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบลิกนินเซลลูโลสของชีวมวล (พื้นฐานแห้ง)

ชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	อื่นๆ (%)
ฟางข้าว	38	36	16	10
ต้นข้าวโพด	53	15	16	16
ซังข้าวโพด	32	44	13	11
ชานอ้อย	35	25	20	20
ไม้โตเร็ว	50	23	22	5
กระดาศ	76	13	11	0
ไม้ไผ่	41	26	27	7

2.2.2 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อน คือ ค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง แล้วผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับอุณหภูมินี้ ค่าความร้อนที่ใช้มีทั้งค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ ส่วนค่าความร้อนสูง คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว (นคร, 2553) โดยค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \text{LHV (MJ/kg)} + 0.02395 (9\text{H} + \text{MC}) \quad (2.1)$$

ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าประมาณ 10-20 MJ/kg โดยค่าความร้อนของชีวมวลกลุ่มไม้จะมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ใช่ไม้เล็กน้อย ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC) และเศษเถ้า หรือได้จากการใช้สูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดูลอง (Dulong Formula) โดยใช้ค่าสัดส่วนโดยมวลของแต่ละธาตุที่เกี่ยวข้อง

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.585\text{C} + 141.924\text{H} + 12.908\text{S} - 15.327\text{O} - 3.538\text{O}^2 \quad (2.2)$$

หรือจากสูตรของเดเมียบาส (Demirbas Formula)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.5\text{C} + 142.3\text{H} - 15.4\text{O} - 24.5\text{N} \quad (2.3)$$

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 31.2\text{FC} + 15.34\text{VM} \quad (2.4)$$

2.2.3 ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ปริมาณความชื้นสามารถแสดงออกมาได้เป็น 2 แบบ คือ สัดส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis) หรือสัดส่วนความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) โดยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$MC_t = m_{\text{water}} / m_{\text{total}} \quad (2.5)$$

ซึ่งโดยทั่วไปความชื้นของชีวมวลจะมีค่าสูง เนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก โดยปริมาณความชื้นขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและกระบวนการเตรียม เช่น การสับ/ย่อยลดขนาด การอบแห้ง และการผสม เป็นต้น

2.2.4 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณ เป็นการวิเคราะห์สมบัติเฉพาะตัวของเชื้อเพลิงชีวมวล ที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile Matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และปริมาณเถ้า (Ash Content) ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งเป็นสมบัติที่นิยมใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เป็นการวิเคราะห์สมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง Carbon, Hydrogen, Nitrogen and Sulfur Analyzer; CHNS-932 ซึ่งองค์ประกอบของธาตุต่างๆจะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและมีผลต่อค่าความร้อน

2.2.5 ส่วนประกอบของเถ้า

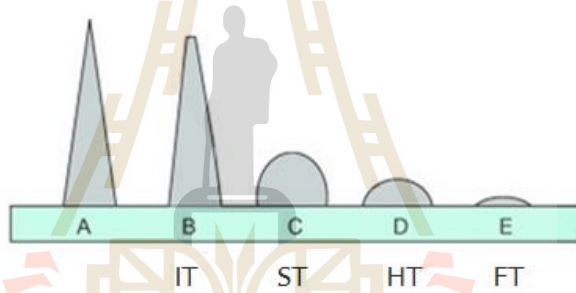
ที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวล ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย ซิลิกา (SiO_2) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งพบได้ในชีวมวลทุกชนิด ส่วนประกอบอื่นๆที่น่าสนใจ คือ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งพบมากในเถ้าของแกลบ โดยเฉลี่ยปริมาณเถ้าในวัสดุการเกษตรจะมีสูงกว่าในไม้ สารอนินทรีย์ในเถ้าของชีวมวลประเภทไม้ไผ่จะมีซิลิกาและออกไซด์ของแอลคาไลสูง ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิหลอมตัวของเถ้า และอาจสร้างปัญหาการเกาะติดของเถ้าบนพื้นผิวเตา (นคร, 2553)

2.2.6 การหลอมตัวของเถ้า

เมื่อเถ้าได้รับความร้อนจนมีสภาพอ่อนตัวจะเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวเตาปฏิกรณ์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปตัวแปรที่บ่งบอกถึงโอกาสในการเกาะติด คือ อุณหภูมิการหลอมตัวของ

เศษเถ้า ซึ่งสามารถหาได้โดยการนำเศษเถ้ามาผสมกับสารละลายเดกซ์ทรินแล้วปั่นเป็นรูปทรงกรวย ยอดแหลม จากนั้นนำไปให้ความร้อนในเตาที่ค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น รูปร่างที่เปลี่ยนไปของก้อน เศษเถ้าจะเป็นตัวระบุถึงอุณหภูมิ 4 ค่า (นคร, 2553) ประกอบด้วย

1. อุณหภูมิรูปร่างเปลี่ยนเริ่มต้น (Initial Deformation Temperature, IT) เมื่อเกิดการมนขึ้นบนยอดของทรงกรวย
2. อุณหภูมิอ่อนตัว (Softening Temperature, ST) เมื่อเศษเถ้าหลอมอ่อนและยุบลงเหลือความสูงเท่ากับความกว้างของฐาน
3. อุณหภูมิครึ่งทรงกลม (Hemispherical Temperature, HT) เมื่อเศษเถ้าหลอมเป็นรูปครึ่งทรงกลม มีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความกว้างของฐาน
4. อุณหภูมิของไหล (Fluid Temperature, FT) เมื่อเถ้าหลอมไหลเป็นกองกระจายกว้างบนพื้น มีความสูงไม่เกิน 1.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเถ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

ความแตกต่างระหว่าง IT กับ FT จะเป็นตัวบอกลักษณะการเกาะติดบนพื้นผิวว่าเป็นแบบบางหรือแบบสแลกหนา (Slag) ตัวอย่างอุณหภูมิการหลอมตัวของเศษเถ้าแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเศษเถ้าจากชีวมวลมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า $1,200^{\circ}\text{C}$ แต่ชีวมวลแต่ละชนิดก็มีอุณหภูมิการหลอมตัวของเศษเถ้าที่แตกต่างกัน เศษเถ้าที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา และไทเทเนียม (TiO_2) จะมีจุดหลอมเหลวสูง ในขณะที่เศษเถ้าที่มีเหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ จะมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ และเศษเถ้าที่มีโซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์ จะมีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมตัวของเศษเถ้าจะต่ำกว่าอุณหภูมิของการเผาไหม้ แต่สูงกว่าอุณหภูมิผนังเตา ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาในการนำเชื้อเพลิงแข็งไปใช้ประโยชน์ (นคร, 2553)

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิหลอมตัว ($^{\circ}\text{C}$) ของเศษเถ้าจากไม้พินในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจน

เชื้อเพลิง	สภาวะ	IT	ST	HT	FT
ไม้เนื้อแข็ง	Oxidation	1,471	1,499	-	1,510
	Reducing	1,477	1,493	-	1,504
ไม้สน	Oxidation	1,210	1,249	-	1,288
	Reducing	1,194	1,227	-	1,266
ถ่านหิน	Oxidation	1,100	1,205	1,230	1,330
	Reducing	1,125	1,230	1,255	1,365

IT = Initial Deformation Temperature HT = Hemispherical Temperature

ST = Softening Temperature FT = Fluid Temperature

2.2.7 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

เป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นของเชื้อเพลิงกับความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 15°C โดยที่สภาวะนี้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1,000 kg/m³

$$S = \frac{\rho_f}{\rho_{H_2O}} \quad (2.6)$$

ซึ่งความถ่วงจำเพาะมีผลโดยตรงต่อความพรุน (Porosity) หรือปริมาตรช่องว่าง (Void Volume) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) และค่าความหนาแน่นกอง (Bulk Density) ของวัสดุ (นคร, 2553)

2.2.8 ค่าความพรุนหรือปริมาตรช่องว่าง

ค่าความพรุนหรือปริมาตรช่องว่าง มีผลโดยตรงต่อการแพร่เข้าผสมของโมเลกุลอากาศกับเนื้อไม้ สำหรับเนื้อไม้แห้งจากการอบ ค่าสัดส่วนปริมาตรช่องว่างสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = (1 - S) / S_{cell} \quad (2.7)$$

ความถ่วงจำเพาะของผนังเซลล์ใช้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 จะเห็นได้ว่าเนื้อไม้ที่อบแห้งแล้วจะมีปริมาตรช่องว่างประมาณ 23-43% ของปริมาตรทั้งหมด ซึ่งมาจากช่องรูพรุนในส่วนของเส้นใยเทรคิตส์ ซึ่งช่องรูพรุนของชีวมวลจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล (นคร, 2553)

2.3 ศักยภาพชีวมวล

พลังงานจากชีวมวลมีศักยภาพสูงมาก ประมาณกันกว่า 40% ของประชากรโลก อาศัยชีวมวลในการหุงต้มและให้ความอบอุ่น และหากพิจารณาเฉพาะปริมาณการใช้ในประเทศกำลังพัฒนาทั่วโลกนั้น การใช้พลังงานชีวมวลจะมีสัดส่วนที่ประมาณ 35-40% ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยมีจีนและอินเดียเป็นประเทศที่ใช้มากที่สุด (Bhattacharya et al, 2003) ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีโครงการพลังงานชีวมวลเกิดขึ้นจำนวนมาก เนื่องจากการให้ความสำคัญมากขึ้นและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ

การใช้พลังงานชีวมวลของโลก พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราสูง ไม่ว่าจะเป็นการใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม การผลิตกระแสไฟฟ้าหรือการผลิตเชื้อเพลิงสำหรับภาคขนส่ง มีการประมาณการว่าสิ้นศตวรรษที่ 20 มีการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากพลังงานชีวมวลทั่วโลกราวๆ 40,000 MW และ 200,000 MW ตามลำดับ และมีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวล 18,000 ล้านลิตรต่อปี พลังงานชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญมากในอนาคต จากการศึกษาศักยภาพชีวมวลบ่งชี้ว่าการเพาะปลูกพืชพลังงานในพื้นที่การเกษตรปัจจุบันสามารถให้พลังงานได้ถึง 800 x 1,012 MJ (800 EJ) โดยไม่มีผลกระทบต่อผลผลิตทางอาหารของโลก อีกทั้งเศษวัสดุเหลือใช้ ขยะของเสียต่างๆสามารถผลิตพลังงานได้อีกประมาณ 40-170 EJ ดังนั้นโดยรวมแล้วศักยภาพพลังงานชีวมวลของโลกสูงถึง 1,000 EJ ต่อปี ซึ่งสูงกว่าปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของโลกในปัจจุบันซึ่งใช้อยู่ประมาณ 400 EJ (Faaij, 2006)

สำหรับประเทศไทยมีศักยภาพจากชีวมวลคงเหลือประเภทต่างๆ ประกอบด้วย แกลบ ฟาง ข้าว กากอ้อย ยอดและใบอ้อย ทะลายปาล์มเปล้า กากโยปาล์ม กะลาปาล์ม ทางใบและก้านปาล์ม ชังข้าวโพด ลำต้นมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง ชี้อ้อย เศษไม้ยางพารา ไม้พืชนกอคาลิปตัส เปลือกไม้ยูคาลิปตัส เศษไม้จากสวนป่า โดยมีปริมาณคงเหลือ 26,449,250 ตัน คิดเป็นศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า 2,909 MW และศักยภาพในการผลิตพลังงานความร้อน 10,340 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (กระทรวงพลังงาน, 2553) นอกจากนั้นรัฐบาลยังได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021) โดยได้ตั้งเป้าหมายการผลิตพลังงานจากชีวมวลในปี 2564 ไว้ที่ 3,630 MW ซึ่งในปัจจุบันมีกำลังการผลิตรวม 1751.86 MW

2.4 การผลิตพลังงานจากชีวมวล

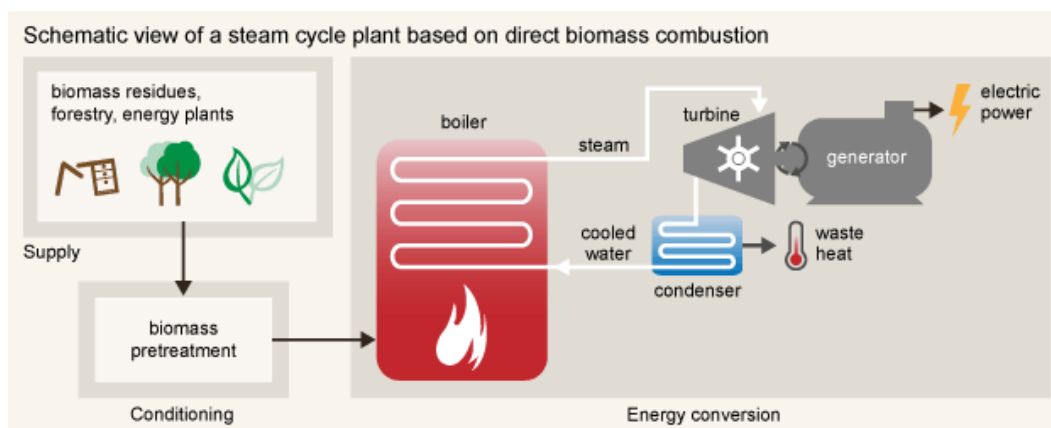
ส่วนของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานจากชีวมวลโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ร่วมกับการใช้เทคนิคพลาสมาอาร์ค ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน ดังนั้น จึงเน้นการศึกษาเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Process) ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ 1) การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) 2) การย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) และ 3) กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Process) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)

ระบบการเผาไหม้โดยตรงได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานกว่า 100 ปี และในปัจจุบันระบบการเผาไหม้โดยตรงเพื่อทำงานร่วมกับเทคโนโลยีกังหันไอน้ำในการผลิตพลังงานจากชีวมวลเป็นระบบที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการใช้ความร้อนในการเผาไหม้เพื่อสลายตัวชีวมวลในสภาพที่มีอากาศเพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ และได้เป็นพลังงานความร้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (วรรณช, 2553) ดังสมการ



ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล รูปแบบของเตาเผา ปริมาณอากาศ และอุณหภูมิในการเผาไหม้ เป็นต้น โดยเฉพาะที่สำคัญคือความชื้นของชีวมวลซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพ เนื่องจากในระหว่างการเผาไหม้ ระบบจะต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการระเหยน้ำหรือความชื้นในชีวมวลออก องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้มี 2 ส่วน คือ สารระเหย (Volatile) และคาร์บอน (Carbon) ซึ่งโดยทั่วไปเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีองค์ประกอบที่เป็นสารระเหยอยู่ถึง 3 ใน 4 ส่วนของทั้งหมด ดังนั้นในระบบการเผาไหม้ที่ดีควรจะต้องเก็บกักสารระเหยนี้กลับมาเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานได้ รูปแบบทั่วไปของการเผาไหม้โดยตรงสำหรับชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานแสดงดังรูปที่ 2.3

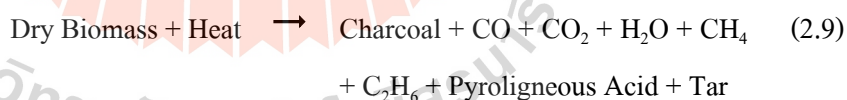


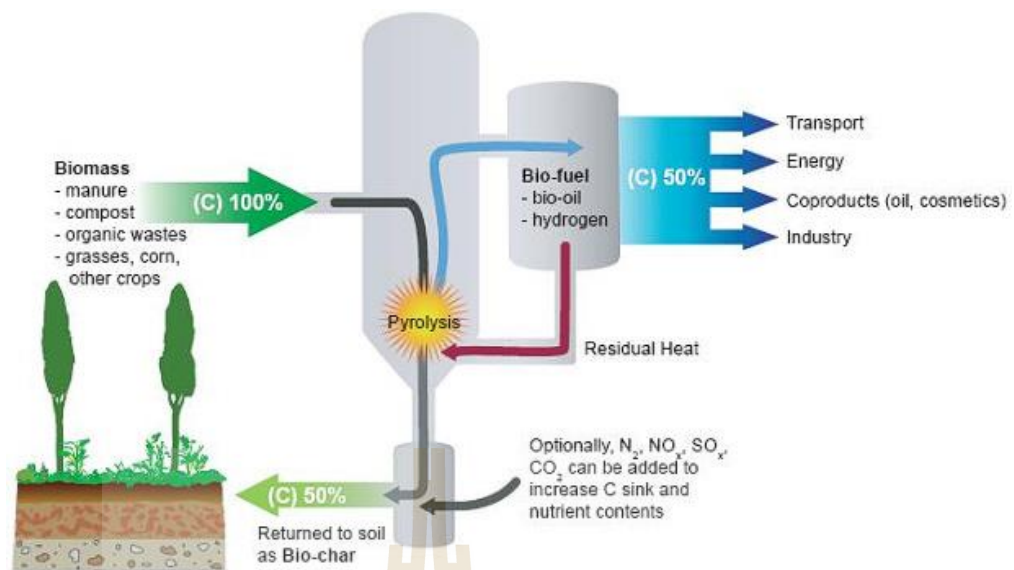
รูปที่ 2.3 ระบบการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion System)

ที่มา : <http://www.wisions.net>

2.4.2 การย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) คือ การย่อยสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในสภาวะจำกัดปริมาณอากาศ ซึ่งจะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงซึ่งอยู่ในรูปของแข็งของเหลว และก๊าซ โดยการย่อยสลายด้วยความร้อนนี้เป็นปฏิกิริยาเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible Chemical Process) ซึ่งความร้อนจะทำให้ Volatile Matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการสลายตัว ได้เป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในกระบวนการนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ คือ คาร์บอนในรูปถ่าน





รูปที่ 2.4 กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis Process)

ที่มา : <http://grist.org>

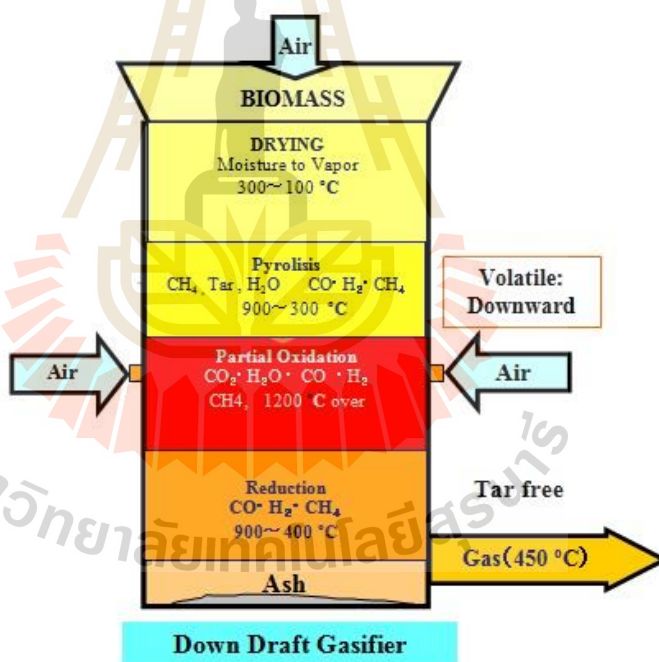
เราสามารถแบ่งกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนออกเป็น 4 ขั้นตอน ตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ได้ตามตารางที่ 2.3 (วรรณช, 2553)

ตารางที่ 2.3 ปฏิกริยาในกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

ระดับอุณหภูมิ	ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น
100-120 °C	ความชื้นหรือน้ำในชีวมวลจะระเหยออก (กระบวนการอบแห้ง)
275 °C	ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาส่วนใหญ่จะเป็นแก๊ส เช่น N ₂ , CO, และ CO ₂ นอกจากนี้จะมีกรดน้ำส้มและเมทานอลถูกกลั่นออกมาด้วย
280-350 °C	เกิดปฏิกริยาคายความร้อน และองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนจะถูกกลั่นออกมา ได้แก่ คีโตน (Ketone) แอลดีไฮด์ (Aldehydes) ฟีนอล (Phenol) และ เอสเทอร์ (Esters) รวมทั้งแก๊สต่างๆ เช่น CO, CO ₂ และ CH ₄ เป็นต้น
> 350 °C	สารระเหยง่าย (Volatile) จะถูกขับออก และเหลือส่วนที่เป็นถ่าน (Char-Coal) และเถ้า (Ash)

2.4.3 กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Process)

กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification) เป็นการอาศัยกระบวนการทาง Thermo-Chemical ในการสลายตัวเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งด้วยความร้อนที่สภาวะจำกัดอากาศ (Partial Oxidation) เพื่อผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas/ Syngas) ซึ่งเป็นแก๊สที่ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และ แก๊สมีเทน (CH_4) ในปริมาณร้อยละ 18-22, 18- 22 และ 1-2 ตามลำดับ มีค่าความร้อนเฉลี่ย 4.5- 5.5 MJ/Nm³ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตความร้อนหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ติดตั้งชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันถือเป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน มีเสถียรภาพ และได้รับการยอมรับกันทั่วโลกว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัย เพราะเป็นระบบความดันต่ำ (Low Pressure) เหมาะสมสำหรับชุมชน (วีรชัย และคณะ, 2551) ซึ่งภายในเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันจะเกิดปฏิกิริยาเป็น 4 โซน ตามระดับของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง
ที่มา : วีรชัย และคณะ (2551)

2.5 เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

2.5.1 ปฏิกริยาการเผาไหม้ในเตาแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Reaction) ที่อาศัยการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิงในสภาวะที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนในสัดส่วนที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Stoichiometric Fuel Air Ratio) แล้วได้ผลิตภัณฑ์แก๊สซึ่งมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ CO , H_2 และ CH_4 ซึ่งเป็นแก๊สชีวมวลที่จุดไฟติด และมีค่าความร้อนสูง ซึ่งในเตาเผาแก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกริยาออกเป็น 4 โซน ดังนี้

1) Combustion หรือ Oxidation Zone เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลจะลุกไหม้ เกิดปฏิกริยาออกหเคมีระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) โดยปฏิกริยาในโซน Combustion เป็นปฏิกริยาคายความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในโซน Reduction และ โซน Pyrolysis ซึ่งเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน โดยอุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง $1,100 - 1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$



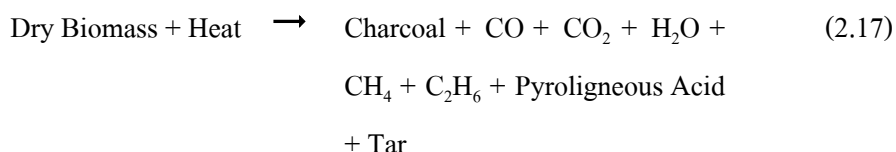
2) Reduction Zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion Zone จะทำให้เกิดปฏิกริยา Reduction ในโซนนี้ ซึ่งจะมีอุณหภูมิระหว่าง $500 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.12) ถึง (2.16) โดยปฏิกริยาในสมการที่ (2.12) เรียกว่า Boundouard Reduction และปฏิกริยาในสมการที่ (2.13) เรียกว่า Water Gas Reduction เป็นปฏิกริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ แก๊สที่ได้จากทั้งสมการเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีวมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.14) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ $500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปฏิกริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊ส

ไฮโดรเจนในแก๊สชีววมวลมีค่ามากขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดั่งสมการที่ (2.15) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (2.16) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production



3) Pyrolysis หรือ Distillation Zone เป็นปฏิกิริยาที่ได้รับความร้อนจากโซน Reduction ทำให้ Volatile Matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีววมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (2.17)

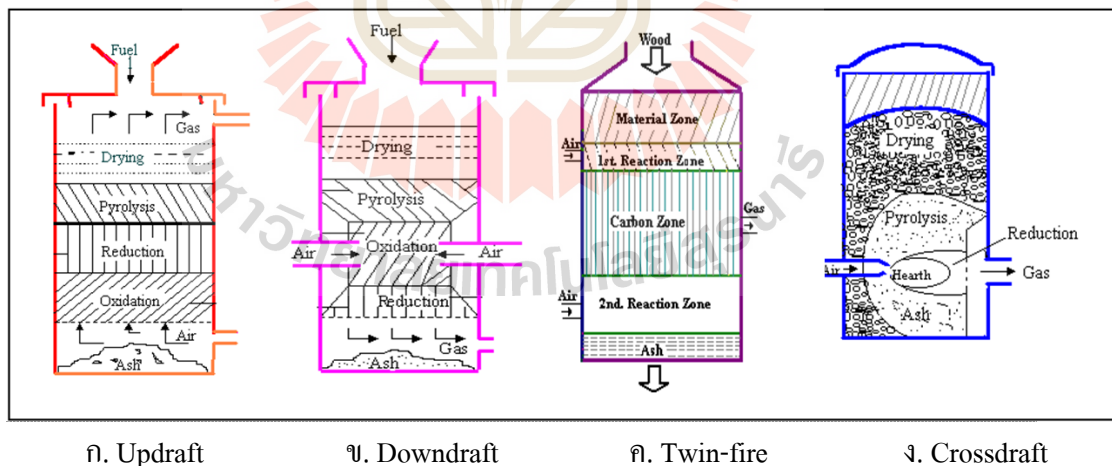


4) Drying Zone โซนนี้จะได้รับความร้อนจากโซนที่อยู่ด้านล่าง ทำให้มีอุณหภูมิประมาณ 100-200 °C ซึ่งไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile Matter แต่สามารถทำให้ความชื้นในเชื้อเพลิงชีววมวลระเหยออกมาได้ เสมือนกับเป็นการอบแห้งเชื้อเพลิงชีววมวล

2.5.2 ชนิดของเตาแก๊สซิฟิเคชัน (Type of Gasifier)

สำหรับชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) แบ่งตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิง ได้เป็น 2 แบบ คือ แบบคอลลัมน์ (Fixed Bed Gasifier) และแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier) ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ตามลักษณะของการนำไปใช้ประโยชน์ และเชื้อเพลิงที่ใช้ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลลัมน์ เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีลักษณะเป็นชิ้นขนาดใหญ่ รูปร่างคงตัว สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้ นำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย สำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบดเหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กมาก และต้องใช้ความเร็วของอากาศทำให้เชื้อเพลิงลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล ซึ่งเรียกว่า สภาวะของ Fluidization โดยจะมีสารเฉื่อย (Inert Material) เช่น ทราย หรือ หินปูน เพื่อเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน และทำให้แก๊สสะอาดขึ้น ระบบนี้เป็นระบบที่ใช้ความดันสูง จึงทำให้การเดินระบบมีความยุ่งยากกว่า โดยทั่วไปจะใช้กับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

วีรชัย และคณะ (2551) ได้อธิบายว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลลัมน์ (Fixed Bed Gasifier) ยังสามารถจำแนกตามทิศทางการป้อนอากาศในเตาคือ ถ้าอากาศถูกป้อนจากด้านล่างขึ้นข้างบนของเตาเรียกว่า Updraft Gasifier และถ้าอากาศถูกป้อนสู่โซนเผาไหม้แล้วไหลลงด้านล่างของเตาเรียกว่า Downdraft Gasifier ส่วนการป้อนอากาศเข้า 2 ทางเรียกว่า Twin-Fire และถ้าอากาศเข้าในแนวขวางเรียกว่า Crossdraft Gasifier ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (วีรชัย และคณะ, 2551)

สุธรรม (2549) กล่าวว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลลัมน์ (Fixed - bed) ที่นิยมใช้กันจะมี 2 แบบ คือ Updraft Gasifier และ Downdraft Gasifier แต่ทั้งสองแบบก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน

1) Updraft Gasifier เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้ากำลังสูง (500 kW ขึ้นไป) หรือใช้งานในการผลิตความร้อน เช่น การนำแก๊สเชื้อเพลิงไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับ หม้อไอน้ำความดันในการผลิตไอน้ำ แล้วนำไอน้ำที่ผลิตได้มาผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องจักรกังหันไอน้ำ สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง (มากกว่า 50%) ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ปริมาณทาร์ (Tars) สูงมาก ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 10-100 g/Nm³ (Kaupp and Goss, 1981) หากต้องนำไปใช้กับเครื่องยนต์จะต้องมีระบบทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพ

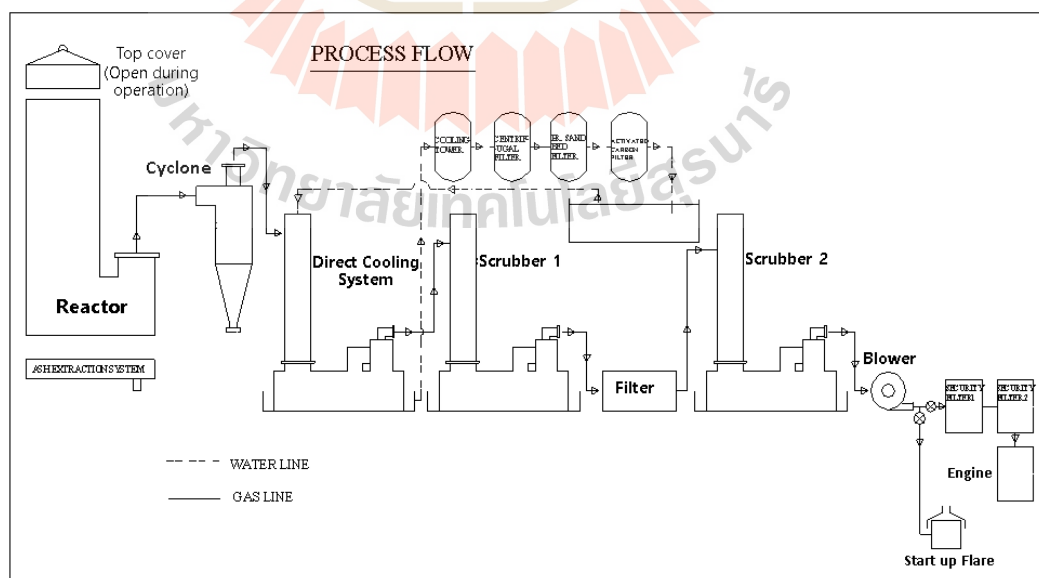
2) Downdraft Gasifier เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (ขนาดไม่เกิน 500 kW) แต่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทาร์ (Tars) เนื่องจาก ทาร์ที่ถูกผลิตขึ้นในโซน Pyrolysis จะไหลลงมาด้านล่างของเตาและถูกกำจัดในโซนของ Combustion หรือ Oxidation เป็นผลให้ระบบนี้เกิดทาร์ (Tars) น้อยกว่าระบบ Updraft Gasifier โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 50-500 mg/Nm³ (Kaupp and Goss, 1981; Groeneveld et al., 1983; Reed et al., 1983) ข้อจำกัดของระบบนี้คือ เชื้อเพลิงที่ใช้ต้องมีขนาดคงตัวประมาณ 20-60 mm เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการขัดขวางการไหลของแก๊สที่ผลิตได้ ผลการศึกษาของ Earp (1988) ที่ศึกษาถึงขนาดของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลงและได้สรุปว่า ขนาดของเชื้อเพลิงไม่ควรเกิน 1/8 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา และเชื้อเพลิงควรมีขนาดใกล้เคียงกัน จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ และปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้อย่างสม่ำเสมอ และความชื้นเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาชนิดนี้ไม่ควรเกิน 25%w.b. (Quaak et al., 1999) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Dogru (2000) ที่ทำการศึกษเกี่ยวกับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลง และได้สรุปว่าถ้าเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง เพราะมีไอน้ำในกระบวนการมากเกินไป

Kumar et al. (2014) ได้ทำการทดสอบผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบแก๊สไหลลง (Downdraft Gasifier) โดยทดสอบกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นต่างกัน 3 ระดับ คือ 15%w.b., 30%w.b. และ 45%w.b. เพื่อสังเกตผลของความชื้นที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน ผลการทดสอบทำให้เห็นว่า ความชื้นของชีวมวลที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานลดลงตามลำดับ คือ 65%, 52% และ 37% เนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิงจะทำให้ใช้เวลาในการเผาไหม้นานขึ้น ส่งผลต่อปฏิกิริยาในเตาและทำให้คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง

Sharma (2008) ได้ศึกษาการทำสมการสำหรับทำนายองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงในขั้นปฏิกิริยา Reduction ของเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบแก๊สไหลลง โดยจากการทดสอบผลของความชื้นเชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบแก๊สที่ได้และประสิทธิภาพ พบว่า ความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแก๊สที่ได้ คือ ทำให้ H₂ เพิ่มขึ้น และ CO ลดลง อีกทั้งยังส่งผลทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพโดยรวมลดลง

Arjhan et al., (2012) ได้ทำการศึกษาการผลิตพลังงานจากชีวมวล 10 ชนิด ด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบแก๊สไหลลง(ระดับต้นแบบ) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าระดับอุณหภูมิในเตาแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของของแก๊สเชื้อเพลิง และมีผลทำให้องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อย ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้อยู่ในช่วง $4.2 - 5.6 \text{ MJ/Nm}^3$ กำลังการผลิตไฟฟ้าที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด มีค่าอยู่ในช่วง $47 - 63 \text{ kW}$ โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะต่ำกว่า 2 kg/kWh โดยประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากยูคาลิปตัส, ชั่งข้าวโพด และไม้กระถินยักษ์มีค่ามากกว่า 70% และประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลทั้ง 10 ชนิด อยู่ในช่วง 6.3 – 18.6%

วีรชัย และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาเรื่อง “โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็ก สำหรับชุมชนแบบครบวงจร” โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล ประเภทต่าง ๆ 10 ชนิด คือ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยูคาลิปตัส เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ปีกไม้ยางพารา ชั่งข้าวโพด แกลบ กะลามะพร้าว ทางปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง และเปลือกมันสำปะหลัง โดยทดสอบกับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล ขนาด 100 kW ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้สรุปว่า ขนาดและความชื้นของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี คือ ขนาดโดยประมาณอยู่ที่ $40\text{W} \times 40\text{L} \times 60\text{H} \text{ mm}^3$ และความชื้นไม่เกิน 15%w.b. โดยรูปที่ 2.7 แสดงแผนผังกระบวนการของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.7 แผนผังกระบวนการโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Arjham et al. (2013) ทดสอบการผลิตพลังงานจากกากตะกอนน้ำเสีย โดยใช้เตาแก๊สซีพีเคชั้นแบบแก๊สไหลลง(ระดับต้นแบบ) เพื่อประเมินสมรรถนะการผลิตไฟฟ้า พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทำให้ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาสูงขึ้น และเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแก๊สและปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ในช่วง 4.2 – 4.87 MJ/Nm³ โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่ระดับอัตราการไหล 180 Nm³/hr สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 47 kW สรุปได้ว่า ระบบแก๊สซีพีเคชั้นแบบแก๊สไหลลงระดับต้นแบบนี้ สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกากตะกอนน้ำเสียได้

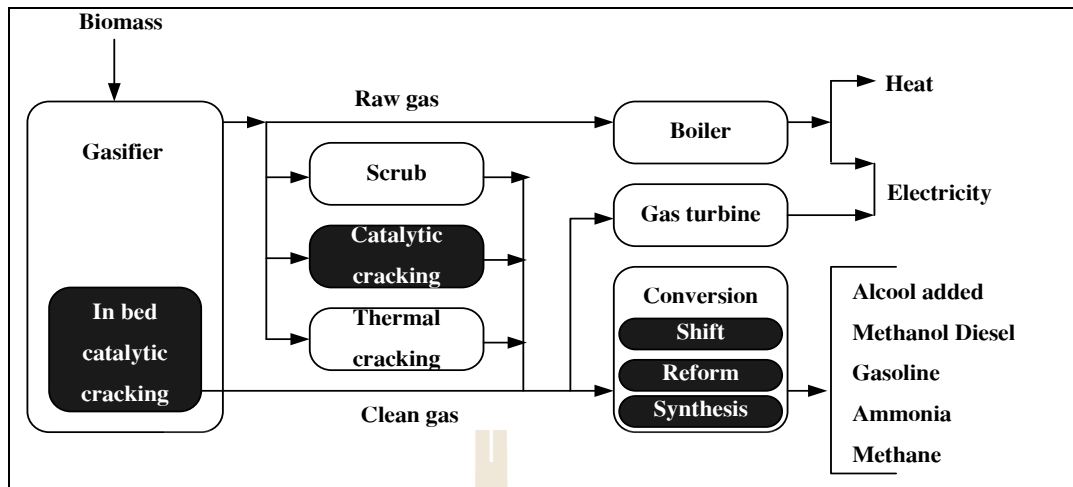
2.5.3 การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สชีววมวลหรือโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง แต่ก่อนนำมาใช้งานจำเป็นต้องผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สก่อน และขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานรูปที่ 2.8 แสดงถึงภาพรวมของการใช้ประโยชน์ของแก๊สเชื้อเพลิง โดยแบ่งแนวทางการใช้ประโยชน์หลักได้ 3 ประเภท คือ

1) พลังงานความร้อนตรง สามารถนำแก๊สเชื้อเพลิง มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนตรง เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิง สามารถส่งไปตามท่อในระยะใกล้ได้ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำความดันเพื่อผลิตไอน้ำ และนำไอน้ำมาใช้กับเครื่องจักรกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า

2) ใช้ผลิตไฟฟ้าในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยนำแก๊สเชื้อเพลิงส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊ส เพื่อผลิตไฟฟ้า ในกรณีนี้แก๊สเชื้อเพลิงต้องมีปริมาณทาร์และฝุ่นปนเปื้อนไม่เกิน 25 mg/Nm³ (Bhattacharya et al., 2001) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการใช้งานในเครื่องยนต์

3) นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี นอกจากการใช้ประโยชน์ดังกล่าวข้างต้น แก๊สเชื้อเพลิง สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี เช่น เซลล์เชื้อเพลิงคาร์บอเนตเหลว (Molten Carbonate Fuel Cells) และสารตั้งต้นในการผลิตเมทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เป็นตัวสังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง



รูปที่ 2.8 ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง
(ที่มา : Nowell, 1999)

2.5.4 มลพิษและของเสียที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การนำแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้งานมีความจำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดแก๊สก่อน (Pre-treatment Gas) เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อระบบ และเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากส่วนประกอบที่อันตราย เช่น ทาร์ (Tars) และฝุ่นขนาดเล็ก (Dust) การกำจัดองค์ประกอบปนเปื้อนช่วยเพิ่มค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงได้ และสามารถหลีกเลี่ยงมลพิษที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่เลือก และวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (Bridgwater, 1994b) ในตารางที่ 2.4 แสดงชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ชนิดของมลสารที่เกิดขึ้น นอกจากจะเป็นปัญหาต่อระบบ ยังเป็นมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้น การมีระบบทำความสะอาดแก๊สจึงเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่นิยมใช้โดยทั่วไปเพื่อลดปัญหาดังกล่าว แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ชนิดมลสาร	ลักษณะที่ปรากฏ	ปัญหา
มลสารหรืออนุภาคขนาดเล็ก	ฝุ่น (Dust) ขี้เถ้า (Ash) เถ้าลอย (Fly Ash) ผงถ่าน (Char) อนุภาคประกอบที่ควบแน่น(condensed compound)	ทำให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนที่เป็นโลหะในระบบและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
องค์ประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali Metal)	องค์ประกอบของโซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) ที่เกิดในสภาวะการกลายเป็นไอน้ำกลายเป็นแอสล็ก (Slag) หรือมีสภาวะกลายเป็นไอ	ทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนของโลหะที่อุณหภูมิสูง เกิดการหลุดลอกของชั้นผิวเคลือบโลหะ
ออกไซด์ของไนโตรเจน	เกิดปัญหามลภาวะอากาศ โดยเกิดระหว่างกระบวนการเผาไหม้	เกิดมลภาวะของ NO _x
ซัลเฟอร์และคลอรีน	บางส่วนคงเหลือในเถ้าหนัก (Bottom Ash) บางส่วนเกิดสภาวะการกลายเป็นไอ หรือ แก๊ส	ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นอันตรายและเกิดการกัดกร่อนโลหะ เช่น H ₂ S, HCl, SO _x
ทาร์ (Tars)	ของเหลวที่มีความหนืดสูง ส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน	ทำให้วาล์วและระบบกรองอุดตันและกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะ

ที่มา : Belgiorno et al. (2003)

ตารางที่ 2.5 ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง

ชนิดมลสาร	ระดับมลพิษ (g/Nm ³)	ระบบทำความสะอาด
มลสารหรืออนุภาคขนาดเล็ก	3-70	ไซโคลน ระบบกรอง (Filtration) ระบบสครับเบอร์ (Scrubber)
องค์ประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali Metal)	-	ระบบการควบแน่น (Condensation) ระบบกรอง (Filtration)
ออกไซด์ของไนโตรเจน	1.5-3.0	ระบบสครับเบอร์ (Scrubber) Selective Catalytic Reduction (SCR)
ทาร์ (Tars)	10-100	การแตกตัวโดยใช้ความร้อน (Thermal Cracking) การแตกตัวโดยใช้สารเร่ง (Catalytic Cracking) ระบบการควบแน่น (Condensation) ระบบสครับเบอร์ (Scrubber)
ซัลเฟอร์และคลอรีน	2.5-3.5	ระบบสครับเบอร์โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต หรือปูนขาว (Sodium Bicarbonate หรือ Lime Scrubbing)

ที่มา : Belgiorno et al. (2003)

จากรายงานของ Belgiorno et al. (2003) ได้อธิบายว่านอกจากปัญหาหมอกควันที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแล้ว ยังมีของเสียและมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากระบบทำความสะอาดแก๊ส จำเป็นต้องมีการจัดการของเสียเหล่านี้ต่อไป ซึ่งโดยสรุปแล้วมลพิษและของเสียที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ประกอบด้วย

1) มลพิษอากาศ (Air Pollution) การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ขึ้นอยู่กับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมลพิษ และเครื่องยนต์สันดาปภายในที่นำมาใช้ Belgiorno et al. (2003) กล่าวว่า ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) และองค์ประกอบของไดออกซิน (PCDD/F) สูงกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันก็จำเป็นต้องมีระบบ Pre-Treatment Gas เพื่อกำจัดองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดมลภาวะได้

2) ของเสียในรูปของแข็ง (Solid Waste) ของเสียในรูปของแข็งที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ ถ่าน และขี้เถ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นประมาณ 3-20% ของเชื้อเพลิงที่ป้อน

สู่เตา ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (Kirubakaran et al., 2007) ในกรณีที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ของเสียเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้ม หรือถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากถ่านที่ได้มีค่าความร้อน และค่าการดูดซับไอโอดีนสูง ตลอดจนมีปริมาณสารระเหยต่ำซึ่งเป็นผลให้เป็นถ่านที่เกิดขึ้นมีสภาพไร้ควัน (ทิพย์สุกนรินทร์ และคณะ, 2551)

3) น้ำเสียที่เกิดจากระบบทำความสะอาดแก๊ส (Waste Water) เช่น น้ำที่เกิดจากระบบสครับเบอร์ (Scrubber และ Condense Scrubber) ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้น มีทั้งมลสารที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ มลสารในรูปที่ละลายน้ำ เช่น Acetic Acid, Sulphur, Phenol และ Oxygenated Organic Compounds เป็นต้น สำหรับส่วนที่ไม่ละลายน้ำส่วนใหญ่คือองค์ประกอบของทาร์ (Tars) และของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะต้องถูกนำไปบำบัดอย่างถูกวิธี (Belgiorno et al., 2003)

ทาร์ หรือน้ำมันดิน หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หรือเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของทาร์เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (High Viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก สมบัติของทาร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของ H/C ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งเป็นข้อมูลสนับสนุนว่าผลของอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่อยู่ในทาร์ (อาภาณี, 2538)

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิปกติ 400-500°C (Conventional Flash Pyrolysis)	อุณหภูมิสูง 600-650°C (Hi-Temperature Flash Pyrolysis)	อุณหภูมิปกติ 700-800°C (Conventional Gasification)	อุณหภูมิสูง 900-1,000°C (Hi-Temperature Gasification)
Acid	Benzenes	Naphthalenes	Naphthalene
Aldehydes	Phenols	Acenaphthalenes	Acenaphthalene
Ketone	Catechols	Fluorenes	Phenanthrene
Furan	Naphthalene	Phenanthrenes	Fluoranthrene
Alcohols	Biphenyls	Benzaldehydes	Pyrene
Complex-Oxygenated Phenols	Phenanthrenes Benzofurans	Phenols Naphtofurans	Acephenanthrylene Benzanthracenes
Guaiacols Syringols	Benzaldehydes	Benzanthracenes	Benzopyrenes
Complex-Phenolics			

จากข้อมูลดังกล่าว ทำให้เห็นว่าทาร์ที่เกิดขึ้นจากระบบผลิตแก๊สชีวมวล ถือเป็นมลสารที่จำเป็นต้องกำจัดออกจากแก๊ส เพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพของแก๊ส และส่งผลถึงประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานในภาพรวมได้ ซึ่งได้มีนักวิจัยทำการศึกษาวิธีการต่างๆ ในการกำจัดทาร์

Han and Kim (2008) กล่าวว่า ชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานปฐมภูมิที่สำคัญอันหนึ่งของแหล่งพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ แก๊สซิฟิเคชัน/ไพโรไลซิส เนื่องจากไม่เพียงแต่จะสามารถผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ถ่าน และสารเคมีได้ แต่ยังมีผลพลอยได้อื่นๆ ที่ได้จากระบวนการดังกล่าวคือ เถ้าลอย, แก๊ส NO_x , SO_2 และ น้ำมันดิน (tar) ซึ่งน้ำมันดินหรือ tar นี้จะปนอยู่ในแก๊สและจะกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการอุดตันภายในระบบท่อทางส่งแก๊ส, กรอง และเครื่องยนต์ ยิ่งไปกว่านั้น ทาร์ปริมาณมากที่สะสมอยู่ในแก๊สจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ลดลง ดังนั้น การลดปริมาณทาร์ในแก๊สถือเป็นอุปสรรคใหญ่ในการผลิตพลังงานจากชีวมวล จากการศึกษาพบว่า วิธีการลดปริมาณทาร์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน/ไพโรไลซิส ซึ่งมีอยู่ 5 วิธีหลักๆ คือ วิธีทางกล (Mechanical Methods), Self-Modification, Thermal Cracking, Catalyst Cracking และ Plasma Method

Paethanom et al., (2012) ได้รายงานไว้ว่า เทคโนโลยีไบโอแมสแก๊สซิฟิเคชันได้รับความสนใจและประสบความสำเร็จกับการนำไปใช้ในการแปลงขยะหรือชีวมวลให้เป็นพลังงาน ได้ ถึงแม้ว่าจะมีปัญหาด้านการเดินระบบที่ยังยากอยู่บ้าง แต่สำหรับการประยุกต์ใช้ขั้นสูง แก๊สที่ได้จำเป็นต้องทำความสะอาดโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดิน (Tar) จำเป็นต้องกำจัดออก ซึ่งทาร์ในแก๊สที่ได้จะกลั่นตัวเมื่ออุณหภูมิลดลงและจะเกิดขางเหนียวอุดตันที่ท่อทางเดินแก๊สและเครื่องยนต์ ซึ่งการกำจัดทาร์ด้วยวิธีทางกลเป็นวิธีที่นิยมใช้ เนื่องจากราคาถูกและง่าย โดยได้นำเสนอการกำจัดทาร์ไว้ 3 วิธี คือ 1) ทาร์หนัก กำจัดโดยวิธีดูดกลืน (Absorption) โดยใช้น้ำมันพืชสครับ 2) ทาร์เบา กำจัดโดยวิธีดูดซับ (Adsorption) โดยใช้แกลบสดและแกลบเผา (Rice Husk Char) 3) ทาร์หนัก กำจัดโดยวิธีรวมทั้งดูดซับและดูดกลืน โดยใช้ทั้งน้ำมันพืชและแกลบเผา ซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่สุดและสามารถกำจัดทาร์ได้อย่างสมบูรณ์ประมาณ 95.4%

Hlina et al. (2006) ได้ทำการทดลองใช้เตาปฏิกิริยาพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันด้วย Hybrid Gas-Water Stabilized DC Torch เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากไม้ ซึ่งในการใช้พลาสมาอัตราการไหลต่ำซึ่งประกอบไปด้วยแก๊สอาร์กอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นแหล่งอุณหภูมิเสริมในกระบวนการ มีผลทำให้อุณหภูมิภายในระบบสูง และพบว่าแก๊สที่ได้จากระบวนการ มีค่าความเข้มข้นของทาร์ในปริมาณที่ต่ำกว่า 10 mg/Nm^3 จากการวัดด้วยวิธีการตาม SPE Method โดยการหาปริมาณเบนซีนและโทลูอินในสถานะแก๊ส

Anis and Zainal (2011) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการกำจัดทาร์ในโปรคิวเซอร์แก๊ส ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากทาร์จะ

ควบแน่น เป็นขางเหนียวเกาะแน่นตามท่อทางแก๊ส และระบบเครื่องยนต์ วิธีในการกำจัดทาร์แบ่งออกเป็นวิธีหลักๆ ได้ 3 วิธี คือ วิธีทางกล (Mechanical Cracking), วิธีทางเคมีหรือใช้ตัวเร่ง (Catalyst Cracking) และวิธีทางความร้อน (Thermal Cracking) ดังตารางที่ 2.7

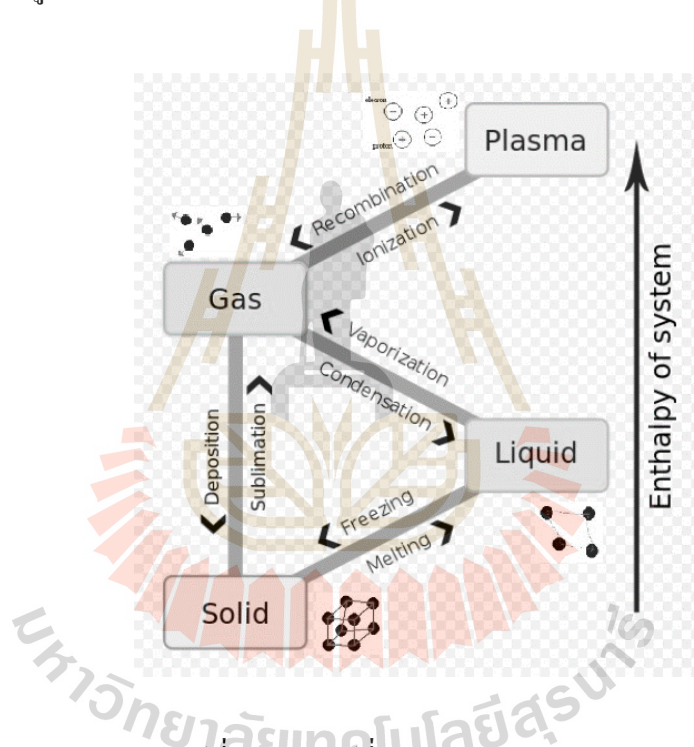
ตารางที่ 2.7 การจำแนกวิธีการกำจัดทาร์

1. Mechanical Cracking	1.1 Dry Gas Cleaning (Cyclone, Rotating Separator, Fabric Filter, Ceramic Filter, Activated Carbon Base Absorber, Sand Bed)
	1.2 Wet Gas Cleaning (Electrostatic Precipitator, Wet Scrubbers, Wet Cyclone)
2. Catalyst Cracking	2.1 Nickel-based Catalysts
	2.2 Non-nickel Metal Catalysts
	2.3 Alkali Metal Catalysts
	2.4 Basic Catalysts
	2.5 Acid Catalysts
	2.6 Activated Carbon Catalysts
3. Thermal Treatment	3.1 Thermal Cracking
	3.2 Plasma Cracking

2.6 เทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค

เทคโนโลยีพลาสมาได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยในศตวรรษที่ 19 เทคโนโลยีพลาสมาได้ถูกพัฒนาขึ้นและใช้งานในทวีปยุโรปสำหรับ อุตสาหกรรมโลหะการ ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 อุตสาหกรรมเคมีได้ใช้ฮีตเตอร์พลาสมา (Plasma Heater) เพื่อสกัดแก๊สอะซิทีลินจากก๊าซธรรมชาติ ในช่วงต้นของทศวรรษที่ 1960 องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งสหรัฐอเมริกา (NASA) ได้ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการจำลองสภาวะอุณหภูมิสูงเพื่อทดสอบยานกระสวยอวกาศ ขณะที่กำลังเคลื่อนเข้าสู่บรรยากาศโลก ในช่วงปี 1980 ได้มีการสร้างและใช้งานกระบวนการฮีตเตอร์พลาสมาขนาดใหญ่เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมโลหะและเคมี ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาเพื่อกิจกรรมด้านสิ่งแวดล้อมและแปรรูปขยะมูลฝอยเป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีพลาสมาในการกำจัดขยะมูลฝอยชุมชน (ทิพย์สุภินทร์ หินชูข, 2556)

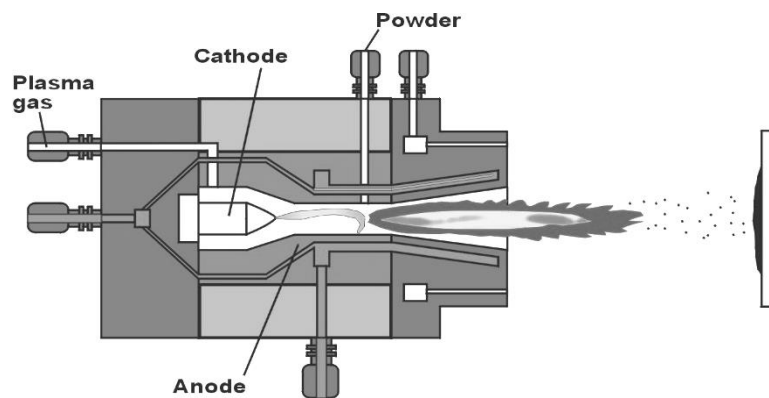
Plasma Arc ถือได้ว่าเป็นสถานะที่สี่ของสสารถัดจากสถานะแก๊ส นอกเหนือจากของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งเกิดจากการแตกตัวเนื่องจากการผ่านกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงไปยัง โมเลกุลของแก๊สนั้นๆ ทำให้โมเลกุลแก๊สถูกกระตุ้นและแตกตัวทำให้เต็มไปด้วยอนุภาคที่มีประจุ ทั้งไอออนและอิเล็กตรอน และกลายเป็น“พลาสมา” ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง $5,000\text{ }^{\circ}\text{C} - 15,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดย ระดับการแตกตัวมีตั้งแต่ 100% (Fully ionized gases) ไปจนถึง $10^{-4} - 10^{-6}$ (Partially ionized gases) เราสามารถแบ่งกลุ่มของพลาสมาที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ตามระดับ อุณหภูมิ ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูง ซึ่งพบได้ในปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบรวม (Fusion) และพลาสมา อุณหภูมิต่ำซึ่งพบได้ในแก๊สที่แตกตัว (พินธุ และอวิรุทซ์, 2548) รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนสถานะ ของสสารที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว แก๊ส และพลาสมา



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนสถานะของสสาร

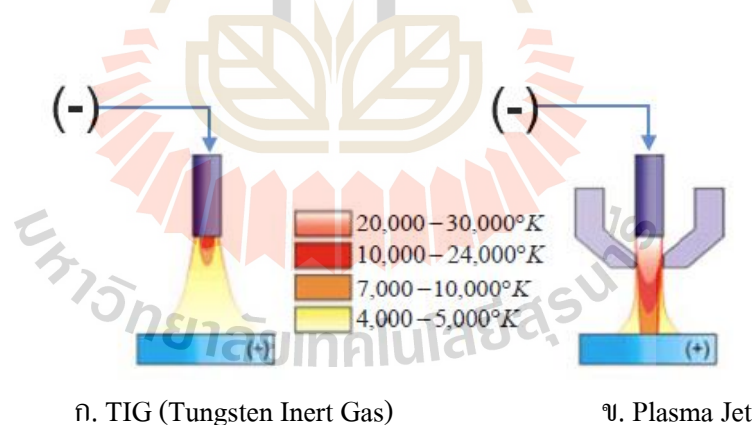
2.6.1 หลักการของพลาสมาอาร์ค

เนื่องจากพลังงานของพลาสมาเป็นพลังงานที่มีความร้อนสูง จึงนำมาสู่การทำให้เกิดอาร์คพลาสมาเพื่อนำความร้อนที่ได้มาใช้ประโยชน์ ซึ่งการเกิดอาร์คพลาสมาสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ โดยการอาร์คด้วยไฟฟ้าเพื่อให้พลังงานแก่แก๊สตัวกลาง เมื่อแก๊สนั้นวิ่งผ่านอาร์คไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาร์คจะทำให้แก๊สได้รับพลังงานและร้อนขึ้นจนทำให้โมเลกุลของก๊าซบางส่วนแตกตัวและถูกไอออไนซ์ทำให้เกิดเป็นอาร์คพลาสมาในที่สุด (นรงค์ฤทธิ์, 2555)



รูปที่ 2.10 การเกิดลำอาร์คพลาสมาเมื่อก๊าซตัวกลางวิ่งผ่านอาร์คด้วยไฟฟ้า
(ที่มา :<http://www.mie.utoronto.ca/labs/cact/Research/DCPlasma/DCPlasma.html>)

ลำอาร์คพลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีอุณหภูมิสูงมากและอุณหภูมิในลำอาร์คพลาสมาขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านอาร์คและรูปร่างของลำอาร์ค รวมทั้งความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านลำอาร์คพลาสมาด้วย โดยที่อุณหภูมิในแกนกลางของลำอาร์คพลาสมาอาจสูงถึง $20,000 - 30,000^{\circ}\text{K}$ และอุณหภูมিরอบนอกลำพลาสมาอาจลดลงเหลือเพียง $4,000 - 5,000^{\circ}\text{K}$ ดังรูปที่ 2.11

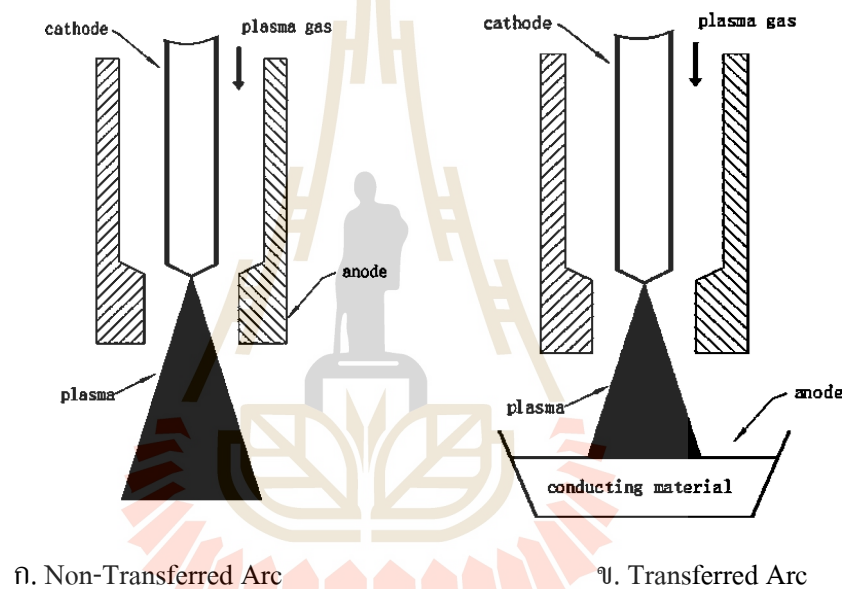


รูปที่ 2.11 ระดับอุณหภูมิของลำพลาสมา

2.6.2 รูปแบบของหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma Torch Type)

ในการประยุกต์ใช้พลาสมาอาร์คความร้อนในงานต่างๆ จะต้องใช้เทอร์ช (Torch) หรืออิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างลำพลาสมาขึ้นมา สำหรับหัวเทอร์ชพลาสมานั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ แบบ Transferred Torch และ แบบ Non-

Transferred Torch สำหรับหัวtorchแบบแรกนั้นจะมีการสร้างกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากอิเล็กโทรด ไปยังชิ้นงานหรือผิวเคลือบตัวนำที่ผนังปฏิกรณ์ (Conductive Lining of The Reactor Wall) หากไม่ใช้หัวtorchก็จะใช้อิเล็กโทรดกราไฟท์ (Graphite Electrode) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านอิเล็กโทรด กราไฟท์และเกิดการอาร์คกับอ่างโลหะหลอมเหลวในลักษณะเดียวกับอาร์คที่ใช้ในเตาหลอม โลหะ ส่วนกรณีของ Non-Transferred Torch นั้นจะมีอาร์คเกิดขึ้นอยู่ภายในหัวtorch คือ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากอิเล็กโทรดตัวหลังไปยังอิเล็กโทรดตัวหน้า และป้อนแก๊สเข้าไปด้าน ในเพื่อให้ความร้อนจนแก๊สเปลี่ยนสภาพเป็นพลาสมาและไหลออกมาผ่านหัวtorch (Tang et al., 2013) หัวtorchทั้งสองประเภทมีการใช้งานเชิงพาณิชย์มากกว่าศตวรรษแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 หัวtorchพลาสมาแบบ Non-Transferred Arc และ Transferred Arc

ที่มา : (Tang et al., 2013)

หัวเผาพลาสมา ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สร้างพลาสมาอุณหภูมิสูงและนำพลังงานที่ได้จากพลาสมานั้นไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ข้อดีของหัวเผาพลาสมา คือ มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ ไป เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิและเกิดปฏิกิริยาได้ดีและรวดเร็ว อีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำกว่า เนื่องจากไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงราคาแพง แต่อาจใช้เพียงอากาศเป็นแก๊สตัวกลาง ดังนั้น หัวเผาพลาสมาจึงสามารถพัฒนาเพื่อใช้งานด้านต่างๆ ได้ (George ,2005) ทั้งนี้งานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับพลาสมา มีดังต่อไปนี้

ปริญญ และนคร (2552) ได้ทำการพัฒนาหัวเผาพลาสมาสำหรับเผาขยะอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้หลักการปล่อยอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง และใช้อากาศเป็น Carrier Gas การทดสอบหัวเผาพลาสมาควบคุมโดยใช้แรงดันคงที่ 380 Volt กระแสไฟฟ้า 30, 40 และ 50 Amp. พบว่า กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลต่ออุณหภูมิเปลวพลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ โดยอุณหภูมิของพลาสมาสูงสุดทำได้ถึง 1,210 °K และสามารถทำลายและลดความเป็นพิษของขยะได้ดี

พิชญ และอวิรุทธิ์ (2548) ได้มีการสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดไม่สมดุลทางความร้อนที่กระตุ้นด้วยสัญญาณความถี่สูง ประกอบด้วย ระบบสุญญากาศสำหรับสร้างสภาวะความดันต่ำที่ 0.02 mbar หัวกำเนิดพลาสมาโครงสร้างขั้วต่อแบ่งร่วมแกนที่สามารถเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็น 40, 30, 20, 10 mm และปรับเลื่อนระยะขั้วต่อตามแนวแกนได้ 8 mm แหล่งกำเนิดกำลังชนิดขบวนการพัลส์ที่ใช้หม้อแปลงไฟแรงสูงแกนเฟอร์ไรท์ทำงานร่วมกับวงจรสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์สร้างสัญญาณขนาด 0-1 kV, 0.5-50kHz สำหรับใช้กระตุ้นแก๊สความดันต่ำให้เกิดการแตกตัว ผลการศึกษาพบว่าการใช้ขั้วต่อขนาดใหญ่กว่าจะทำให้พลาสมาเกิดการกระจายตัวตามแนวรัศมีได้กว้างกว่า ในขณะที่ความเข้มของสเปกตรัมจะมีค่าลดลงและสามารถพบสเปกตรัมย่านแสงเหนือม่วงของ N₂⁺, N₂ ในพลาสมาในโคโรเจนและพบสเปกตรัมย่านแสงสีแดงของ Ar I และ O I ในพลาสมาอาร์กอนและออกซิเจนตามลำดับ สเปกตรัมในทุกกรณีมีความเข้มสูงสุดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความถี่ 2-8 kHz ที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 45 W ซึ่งเป็นผลจากสมบัติการตอบสนองต่อความถี่และขีดจำกัดของพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการถ่ายโอนพลังงานให้พลาสมา

เพ็ญศรี (2543) ทำการศึกษาโครงสร้างและการทำงานของหัวจ่ายพลาสมาชนิด MEVVA (Metal Vapor Vacuum Arc) ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดพลาสมาของโลหะชนิดอาร์คในสุญญากาศ ใช้หลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูง พลาสมาจำนวนหนึ่งจะถูกสร้างขึ้นที่ผิวแคโทดซึ่งเป็นโลหะบริสุทธิ์ด้วย “จุดอาร์ค” จากเครื่องจ่ายแรงดันสูงแบบพัลส์ขนาด 10 kV 100 μs ที่ต่ออยู่ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วทริกเกอร์แบบวงแหวนซึ่งเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงถูกคั่นห่างจากกันด้วยฉนวน พลาสมาจากจุดอาร์คจะเป็นตัวเชื่อมให้เกิดการไหลของกระแสอาร์ค จากเครื่องจ่ายไฟอาร์คแบบพัลส์ขนาด 100 A 100 μs ที่ต่ออยู่ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด เป็นผลให้ผิวโลหะที่ใช้เป็นขั้วแคโทดเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นแก๊สและแตกตัวอย่างรุนแรงกลายเป็นพลาสมา จากนั้นพลาสมาจะขยายตัวเคลื่อนที่ผ่านช่องของแอโนดออกไป

Bang et al. (2006) ทำการวิจัยและออกแบบหัวเผาใช้แก๊สมีเทนโดยมีคลื่นไมโครเวฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพลาสมา (Methane-Augmented Microwave Plasma Burner) การออกแบบใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz กำลัง 1.5 kW เป็นตัวการทำให้เกิดอิเล็กตรอนในอากาศผ่าน 60 L/min แตกตัวได้เป็นพลาสมาอากาศที่มีอุณหภูมิเปลวพลาสมา 600 °K และเมื่อทำ

การฉีดแก๊สผสมที่มีส่วนผสมระหว่างแก๊สมีเทนปริมาณ 10 L/min และอากาศปริมาณ 40 L/min เพิ่มเข้าไปสู่กระแสพลาสมาอากาศที่เกิดจากการแตกตัวด้วยไมโครเวฟก็จะทำให้เปลวพลาสมามีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 600 °K เป็น 1,890 °K ที่แกนกลางพลาสมา

Chen et al. (2003) ทำการศึกษาหัวเผาพลาสมาไมโครเวฟกำลังต่ำ (< 1 kW) ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อสร้างอนุภาคทรงกลมของ Alumina ที่ควบคุมขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคได้ โดยทำการศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของ Carrier Gas และ กำลังคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อลักษณะและขนาดอนุภาคของ Alumina จากการศึกษาพบว่าค่าที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของ Alumina คือ ความหนาแน่นของละอองของเหลวหรืออนุภาคน้ำในอากาศขึ้น (Aerosol Stream) ซึ่งใช้เป็น Carrier Gas ที่ไหลผ่านส่วนร้อนของพลาสมาที่เกิดจากไมโครเวฟจะเกิดจากการแตกตัวของละอองของเหลวและให้พลังงานสูงขึ้น และการแตกตัวก็ขึ้นกับการกระจายตัวของโมเลกุลไอน้ำอีกด้วย สามารถสรุปได้ว่าหากมีอนุภาคของ Carrier Gas แตกตัวเป็นพลาสมาได้มากเท่าไรก็จะยิ่งได้พลังงานมากขึ้นเท่านั้น

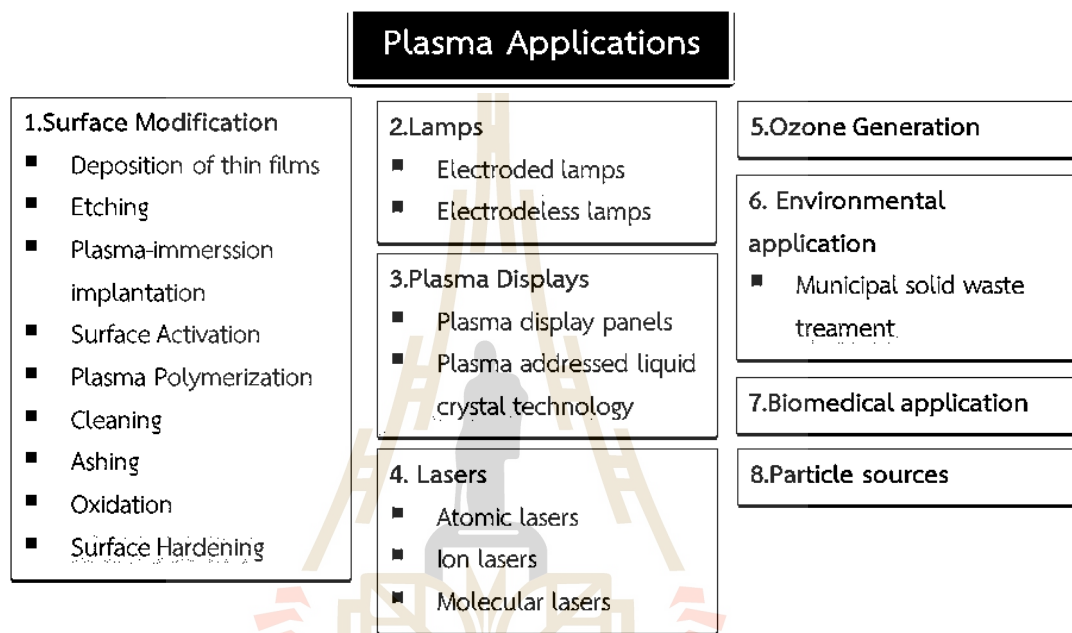
Pilla et al. (2006) ทำการศึกษาพลาสมาโดยใช้เทคนิคการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์นาโนวินาทีที่มีความต่างศักย์ 10 kV ในระหว่าง 10 ns ความถี่สัญญาณ 30 kHz ใช้ Carrier Gas ที่เป็นส่วนผสมระหว่างอากาศกับแก๊สโพรเพนและมีการบังคับให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของ Carrier Gas (ReD = 30000) ที่ความดันบรรยากาศ จากการศึกษาพบว่าความร้อนที่ปลดปล่อยออกจากพลาสมาจะสูงขึ้นหากการไหลของ Carrier Gas มีการปั่นป่วนมากขึ้น

Moon et al. (2005) ทำการศึกษาหัวเผาพลาสมาที่ใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าแรงสูงเพื่อวิเคราะห์พลาสมาที่ได้จากลักษณะการเคลื่อนที่ของ Carrier Gas แบบ No-Swirl Flow และ Swirl Flow ซึ่งมีผลต่อทั้งความยาวและความเร็วของเปลวพลาสมา จากการศึกษาพบว่ามุม Inlet Flow Angles (β) ที่เหมาะสมในการจ่าย Carrier Gas สู่หัวพลาสมา คือ 30°

Hur et al. (2002) ทำการศึกษาหัวเผาพลาสมาใช้แก๊สอาร์กอนเป็น Carrier Gas ที่มีความแตกต่างของการจัดวางขั้วแคโทดและหัวฉีด 6 แบบ เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่ดีที่สุดในการสร้างเปลวพลาสมาที่สมบูรณ์ ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการศึกษารุ่นนี้พบว่าเงื่อนไขในการทำเปลวพลาสมาที่ได้ออกมาที่มีความสมบูรณ์แบบมากที่สุดและได้ความร้อนสูงสุดนั้นมิได้ขึ้นอยู่กับ กระแสจ่าย, อัตราการไหลของแก๊ส และระยะอาร์คเท่านั้น แต่ยังคงคำนึงถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหัวฉีดอีกด้วย ซึ่งการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหัวฉีดที่เหมาะสมต่อค่าพารามิเตอร์อื่นๆเพียงค่าเดียว เช่น หัวฉีดหนึ่งตัวจะสามารถสร้างพลาสมาได้สมบูรณ์แบบ ที่ค่าอัตราการไหลของแก๊สเพียงค่าเดียวเท่านั้น เป็นต้น

2.6.3 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมา

เทคโนโลยีพลาสมา นอกจากจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานตัดหรือเชื่อมโลหะแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้พลาสมาในงานอื่นๆทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น การปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุ หลอดส่องสว่าง จอภาพโทรทัศน์ เลเซอร์ การผลิตไอโซน การกำจัดขยะและของเสีย การใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ และเป็นแหล่งกำเนิดอนุภาค (Bogaerts, 2002)

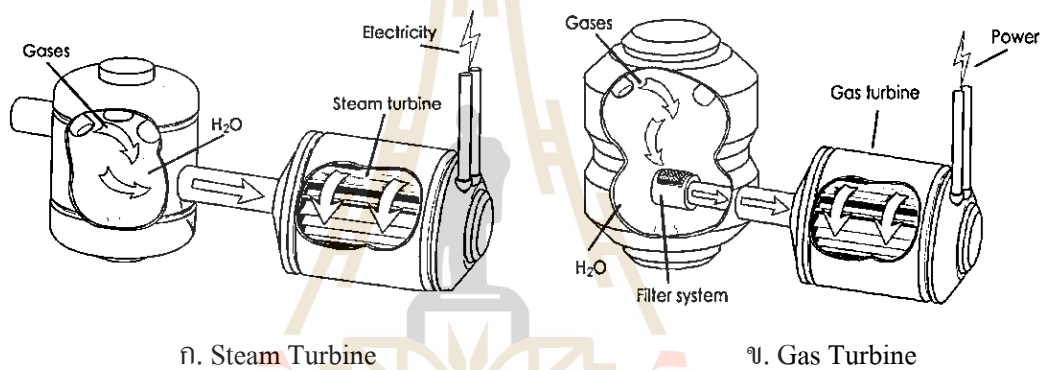


รูปที่ 2.13 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค
(ที่มา: Bogaerts, 2002)

นอกจากนี้เทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับระบบการเผาไหม้แบบแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification) ในการกำจัดขยะชุมชน หรือการนำไปย่อยสลายเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งถือว่าเป็นการนำพลังงานกลับมาใช้ (Energy Recovery) ระบบพลาสมาอาร์คต้องการกำลังในการสร้างพลาสมาเพื่อใช้ย่อยสลายขยะหรือชีวมวล ซึ่งในขณะเดียวกัน ระบบนี้ก็สามารถผลิตไฟฟ้าได้เช่นกัน ซึ่งต้นทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเข้ากับเทคโนโลยีพลาสมาอาร์คขึ้นอยู่กับความสามารถในการย่อยสลายวัสดุและประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้ และหากกำลังที่ระบบต้องการใช้เพื่อทำให้เกิดพลาสมานั้นมีค่าน้อยกว่ากำลังที่ผลิตได้ จะทำให้ระบบมีพลังงานสุทธิเหลือใช้และสามารถขายเพื่อสร้างรายได้ให้กับระบบได้ ปัจจุบันมีวิธีการในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเทคโนโลยีพลาสมาอาร์คมี 2 แบบหลักๆ คือ

1) การผลิตพลังงานโดยใช้กังหันไอน้ำ (Steam Turbine) แก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาไปเผาไหม้ในระบบผลิตไอน้ำเพื่อนำไอน้ำแรงดันสูงไปปั่นกังหันผลิตกระแสไฟฟ้า โดยแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านระบบควบคุมมลพิษอากาศ (Air Pollution Control : APC) ซึ่งใช้เทคโนโลยีเดียวกับโรงไฟฟ้าจากขยะมูลฝอยทั่วไป แสดงดังรูปที่ 2.14 (ก)

2) การผลิตพลังงานโดยใช้เครื่องยนต์กังหันแก๊ส (Gas Turbine) แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ต้นกำลังเช่น เครื่องยนต์กังหันแก๊ส (Gas Turbine Engine) การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในระบบผลิตกำลังแก๊สเทอร์ไบน์แบบวัฏจักรร่วม (Combustion Turbine Combined Cycle : CTCC) จะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แสดงดังรูปที่ 2.14 (ข)



รูปที่ 2.14 รูปแบบการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สเชื้อเพลิง

ที่มา : www.howstuffworks.com

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในการกำจัดขยะและกากของเสีย ได้มีการวิจัยและพัฒนาไว้ดังต่อไปนี้

Lemmens et al. (2007) กระบวนการ Plasma Gasification เป็นเทคโนโลยีด้านพลังงานขั้นสูง คือ เอาคุณสมบัติความร้อนที่สูงมาก ๆ ในสถานะของพลาสมา ที่เกิดจากความแตกต่างระหว่าง ขั้วบวกและขั้วลบของแท่งโลหะกับ Graphite Electrode เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนประจุจึงเกิด Thermal Plasma ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะทำให้ภายในเตาปฏิกรณ์มีอุณหภูมิสูง (15,000 °C) และสามารถแยกอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบใน RDF ออกได้ ซึ่งเหมาะสมกับเชื้อเพลิงขยะที่มีความหลากหลายของคุณลักษณะทางเคมี โดยโมเลกุลของสารอินทรีย์จะสลายเป็น Synthesis Gas ที่อุณหภูมิสูงในขณะเดียวกัน องค์ประกอบของสารอนินทรีย์ (Glass, Metals, Silicates, Heavy Metals) จะกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง เมื่อเย็นตัวลงจะกลายเป็นเถ้าหลอม

การดำเนินการวิจัย โดยเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เป็น Reactor Vessel ที่ถูกห่อหุ้มให้มีความหนา 10 cm และ Plasma Torch ทำจาก Graphite ซึ่งติดตั้งส่วนบนของเตา และส่วนล่างของเตา จะใส่ Crude Iron เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขั้วบวกของแท่ง Graphite Electrode และ Crude Iron ที่เป็นขั้วลบ การแลกเปลี่ยนประจุดังกล่าวจะเกิด Thermal Plasma ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ $1,600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเชื้อเพลิง RDF ที่ถูกเตรียมให้เป็นชิ้นเล็ก จะถูกใส่เข้าไปด้านบนของ Reactor โดยใช้สกรู สำหรับการศึกษาร่องประกอบของถ้ำห่อหุ้ม โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ผลการวิเคราะห์ร่องประกอบใน RDF พบว่ามี Ba, Cr, Cu, Pb, Ni, Sn และ Fe ในปริมาณที่สูง เนื่องจากธาตุเหล่านี้เป็นร่องประกอบในพลาสติก (PVC) สำหรับร่องประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ประกอบด้วย CO , H_2 , CO_2 , THC , O_2 มีค่าเท่ากับ 17.6, 8.1, 3.6, 2.8 และ 1.1% ตามลำดับ ผลการตรวจวัดมลพิษที่ผ่านระบบ Oxidizer Reactor และระบบกรองพบว่า มีปริมาณของฝุ่นและโลหะหนักสูง ดังนั้นในการใช้งานจริงต้องออกแบบให้ฝุ่นตกตะกอนในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น การศึกษาร่องประกอบของถ้ำห่อหุ้ม พบว่าร่องประกอบหลักเป็นโลหะ (Calcium, Aluminate, Calcium Silicate และ Calcium Aluminium Silicate) สำหรับผลการทดสอบการ Leaching ถูกยอมรับให้ผ่านมาตรฐานของเบลเยียม

การทดสอบครั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า Plasma Gasification เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสำหรับใช้กำจัดขยะ/ของเสียที่มีค่าความร้อนสูง ให้สามารถคืนรูปพลังงานกลับมาใช้ได้ อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการ Plasma Gasification จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์ในการทำความสะอาดแก๊สที่มีประสิทธิภาพ และหาระดับการปนเปื้อนที่เหมาะสมว่าจะไม่มีผลสำหรับการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์แก๊สหรือเทอร์โบที่ ซึ่งมลพิษหลักที่จำเป็นต้องศึกษา คือ Dust, Heavy Metal, Sulfur Compound, Nitrogen Compound (NH_3 , HCN), Halogen ทั้งนี้การศึกษาค่าความเป็นไปได้ยังไม่สามารถประเมินได้เนื่องจากความไม่เสถียรในการทดสอบเดินระบบ

Mountouris et al. (2006) พิจารณาว่าเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สพีเคชั่น มีความเหมาะสมกับการกำจัดขยะชุมชน ระบบมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยจะพัฒนาโมเดล Thermodynamic ของพลาสมาแก๊สพีเคชั่น โมเดลนี้มีชื่อเรียกว่า GasiEq เพื่อนำไปทำนายตัวแปรต่างๆ ที่สภาวะสมดุลของระบบ ตัวแปรที่ได้จากโมเดล คือ สมการความสัมพันธ์ร่องประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงกับความชื้นของเชื้อเพลิง, องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสัดส่วนโมลของออกซิเจนต่อโมลของเชื้อเพลิง และ องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงอุณหภูมิ โดยพบว่าสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ อุณหภูมิประมาณ $1,273\text{ }^{\circ}\text{K}$ จะให้ค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เท่ากับ 1 kWh/Nm^3 โดยความชื้นของเชื้อเพลิงต้องต่ำกว่า 0.15 และ สัดส่วนโมลของออกซิเจนกับโมลของเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.52-0.70 mol

Mountouris et al. (2008) ได้นำโมเดลที่พัฒนาขึ้นในปี 2006 มาทำนายอัตราการป้อนเชื้อเพลิงกากตะกอน โดยซึ่งพบว่าที่สภาวะเหมาะสม คือ เชื้อเพลิง 250 ตันต่อวัน และความชื้นของเชื้อเพลิง ไม่เกิน 68% โดยพลังงานสุทธิที่ผลิตได้ของระบบ คือ 2.85 MW

Minutillo et al. (2009) ได้พัฒนา Thermochemical Model สำหรับ โรงไฟฟ้าเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันและความร้อนร่วม (Plasma Gasification Combine Cycle (IPGCC) Power Plant) ที่ใช้ RDF จากขยะมาเป็นเชื้อเพลิง ระบบนี้ใช้ Air เป็น Carrier Gas แต่เงื่อนไขของการสร้างโมเดลนี้ได้ทำการ Simulation โดยเปลี่ยน Carrier Gas ออกเป็น 3 แบบ คือ Air, O₂ 40% – N₂ 60%(v/v) และ Air+Oxygen โมเดลที่พัฒนาขึ้นนี้จะนำมาใช้ในการทำนายองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง และความต้องการพลังงานในเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊ส และหาสภาวะที่เหมาะสมของการเดินระบบ คือ มีอัตราการใช้พลังงานจาก Plasma Torch ต่ำ แต่ให้ค่าพลังงานจากความร้อนจากแก๊สเชื้อเพลิงสูง โดยพบว่า การใช้ Air+Oxygen ให้ค่าพลังงานของระบบประมาณ 69%

Lapa et al. (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบของสารพิษที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ของเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยทดสอบกับขยะอันตราย ผลการศึกษาสรุปว่าการปลดปล่อยของค์ประกอบของสารพิษในเตาหลอมมีต่ำมากเนื่องจาก อนุภาคเหล่านั้นถูกทำลายที่อุณหภูมิสูง

Hinsui et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะตกเกรด (Rejected Waste) ซึ่งถูกคัดออกมาจากระบวนการบำบัดเชิงกลและชีวมวล (Mechanical and Biological Treatment) โดยทำการทดสอบกับระบบแก๊สซิฟิเคชันและใช้แหล่งความร้อนภายนอกพลาสมาช่วยในกระบวนการ ซึ่ง Rejected Waste ที่นำมาทดสอบมีความชื้นอยู่ในช่วง 10 – 40%w.b. ผลการทดสอบ พบว่า การใช้ความร้อนจากพลาสมาช่วยในกระบวนการทำให้ลดข้อจำกัดด้านคุณภาพของเชื้อเพลิงได้ และพบว่า ระดับความชื้นของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมรรถนะของระบบลดลง เช่น ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ พลังงานที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส เป็นต้น โดยค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้อยู่ในช่วง 8.26 – 4.82 MJ/Nm³ ตามลำดับความชื้นของเชื้อเพลิง สรุปได้ว่า Rejected Waste สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้พลาสมาเป็นความร้อนช่วย เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพได้

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับชีวมวลเพื่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ได้มีการวิจัยและพัฒนาไว้ดังต่อไปนี้

Tang and Huang (2005) ได้ทำการพัฒนาระบบพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุในเตาแก๊สซิฟิเคชัน โดยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ RF Plasma Reactor และแก๊สที่ผลิตได้ พบว่าตำแหน่งของอิเล็กโทรด ความดัน และพลังงานที่ใส่เข้าไป (Power Input) เป็นตัวแปร

ที่สำคัญที่มีผลต่ออุณหภูมิ และประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงาน ซึ่งสำหรับระบบผลิตแก๊สชีววมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กำลัง 1,600-2,000 W , ความดัน 3,000-8,000 Pa สามารถผลิตแก๊สชีววมวลที่มีองค์ประกอบของ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังได้ถ่าน (Light Hydrocarbons) ซึ่งปริมาณแก๊สชีววมวลดังกล่าวสามารถผลิตได้ถึง 66% โดยน้ำหนักของชีววมวล

Hlina and et al. (2006) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีววมวลเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่งในการใช้ประโยชน์ ปริมาณทาร์ในแก๊สที่ได้เป็นสิ่งสำคัญเพราะว่าปริมาณทาร์ที่สูงจะทำให้เป็นปัญหาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพแก๊ส ซึ่งที่ผ่านมาได้มีความพยายามในการลดทาร์ในแก๊สกันอย่างมากมาย ซึ่งหากได้แก๊สที่มีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สูงน่าจะมีความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากแก๊ส การทดลองนี้ได้ใช้เตาปฏิกิริยาพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันด้วย Hybrid Gas-Water Stabilized DC Torch ซึ่งเป็นพลาสมาอัตรการไหลต่ำซึ่งประกอบไปด้วยแก๊สอาร์กอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกิริยาสูง จากการวัดทาร์ในแก๊ส ซึ่งเป็นแก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงไม้ โดยใช้วิธีการตาม SPE Method ด้วยการหาปริมาณเบนซีนและโทลูอินในสถานะแก๊ส ทำให้พบว่ามีความเข้มข้นของทาร์ในปริมาณที่ต่ำกว่า 10 mg/Nm³

Han and Kim (2008) กล่าวว่าชีววมวลถือเป็นแหล่งพลังงานปฏิกิริยาที่สำคัญอันหนึ่งของแหล่งพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด ซึ่งวิธีการนำไปใช้ประโยชน์ที่นิยมมากที่สุดคือ แก๊สซิฟิเคชัน/ไพโรไลซิส ซึ่งไม่เพียงแต่จะสามารถผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ถ่าน และสารเคมีได้ แต่ยังมีผลพลอยได้อื่นๆที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวคือ เถ้าลอย, แก๊ส NO_x, SO₂ และ น้ำมันดิน (tar) ซึ่งจะปนอยู่ในแก๊สและจะก่อกวนตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการอุดตันภายในระบบท่อทางส่งแก๊ส, กรอง และเครื่องยนต์ ยิ่งไปกว่านั้น ทาร์ปริมาณมากที่สะสมอยู่ในแก๊สจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ลดลง ดังนั้น การลดปริมาณทาร์ในแก๊สถือเป็นอุปสรรคใหญ่ในการผลิตพลังงานจากชีววมวล ซึ่งวิธีการในการลดทาร์สามารถทำได้ 5 วิธีหลักๆ คือ Mechanical Methods, Self-Modification, Thermal Cracking, Catalyst Cracking และ Plasma Method

Oost and et al. (2009) ได้ทำการทดลองผลิตแก๊สชีววมวล(syngas) จากเตาปฏิกิริยาพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันที่ติดตั้งหัวพลาสมาแบบ Hybrid Gas-Water Stabilized Torch พบว่าแก๊สที่ผลิตได้มีปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สูงซึ่งสามารถสร้างลำพลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 15,000 °K เป็นผลให้เตาปฏิกิริยามีความร้อนสูงและสม่ำเสมอ จึงทำให้อัตรการเกิดปฏิกิริยาและอัตรการใช้เชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของ Syngas ที่ได้มีดังนี้ คือ H₂(28-46%), CO (44-68%), CO₂ (2-8%) และ Ar (0.2-8%) อีกทั้งมีปริมาณทาร์อยู่ในระดับต่ำ (1 mg/Nm³)

Zhang and et al. (2010) ได้รายงานไว้ว่า ชีวมวลสามารถนำมาแปลงให้เป็นพลังงาน โดยกระบวนการ Thermo-Chemical ประกอบด้วย การเผาไหม้, ไพโรไลซิส, แก๊สซิฟิ-

เคชั่น และลิกวิทแฟลคชั่น พร้อมทั้งกระบวนการอุณหภูมิขั้นสูงประกอบด้วย การเผาไหม้ร่วม ไพโรไลซิสแบบเร็ว พลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น และ Supercritical Water Gasification ซึ่งพบว่าการผลิตพลังงานด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมระหว่างชีวมวลและถ่านหินเป็นแบบที่ง่ายและนิยมใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนพลาสมาเทคนิคเป็นวิธีที่สามารถทำลายองค์ประกอบขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมในการใช้กำจัดขยะอันตราย และ Supercritical Water Gasification เป็นวิธีที่สามารถผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวลได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชีวมวลที่มีความชื้นสูงๆ

Rutberg and et al. (2011) พลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงถูกประเมินสำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับผลิตความร้อนและไฟฟ้า ข้อดีของพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นเมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สซิฟิเคชั่นแบบเก่าคือ พลาสมาจะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่า การควบคุมกระบวนการง่ายกว่าและใช้พลังงานต่อหน่วยเอาท์พุทต่ำกว่า และจากผลการทดสอบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นพบว่า ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลที่ได้มีค่า 13.8-14.3 MJ/kg โดยที่ใส่พลังงานเข้าไป (Power Input) 2.2-3.3 MJ/kg ตามลำดับ

Janajreh et al. (2013) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำการศึกษเปรียบเทียบการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่นและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น และทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ โดยแบบจำลองสามารถคำนวณองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของระบบ จากการศึกษาพบว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพได้ โดยมีค่าองค์ประกอบของ H_2 และ CO เพิ่มขึ้น แต่พบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบต่ำกว่าระบบแก๊สซิฟิเคชั่นแบบดั้งเดิม เนื่องมาจากระบบพลาสมาต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นยังคงเหมาะสมสำหรับระบบการกำจัดขยะที่มีระบบผลิตพลังงานร่วมด้วย

Hlina et al. (2014) ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชั่นจากเชื้อเพลิงชีวมวลและพลาสติกหลายชนิด โดยใช้ความร้อนจากพลาสมาช่วยในกระบวนการ เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของแก๊ส ขนาดกำลังของพลาสมาที่ใช้เท่ากับ 100-110 kW และ อัตราการใช้เชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 10-30 kg/hr จากผลการศึกษา พบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคุณภาพตามต้องการ คือ มีปริมาณ H_2 และ CO รวมกันสูงถึง 90% โดยปริมาตร

Du et al. (2015) ทำการศึกษากระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่นจากซังข้าวโพด (ระดับห้องปฏิบัติการ) เพื่อศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงคุณภาพสูง (H_2 และ CO สูง) พบว่าสามารถผลิตแก๊สได้ 79% ที่ระดับพลังงานของพลาสมา 25.2 Watt และใช้ในโตรเจนเป็น Carrier Gas ของระบบพลาสมา โดยองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีส่วนของ H_2 เท่ากับ 48.2% และ CO เท่ากับ 24.9% สรุปได้ว่า เครื่องพลาสมามีศักยภาพในการช่วยเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สที่มีคุณภาพได้ เนื่องจากพลาสมาทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมากมาย ระบบมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูง และสามารถเดินระบบได้ในเวลาอันรวดเร็ว

Diaz et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊ส H_2 ด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันแบบสองขั้นตอน จากเชื้อเพลิงชีวมวล โดยเครื่องพลาสมาจะใช้ไอน้ำที่ผลิตจากขั้นตอนแรกมาใช้เป็นตัวกลาง เพื่อกำเนิดเปลวพลาสมาในเตาปฏิกรณ์ในขั้นตอนที่สอง จากการทดสอบพบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีสัดส่วนของ H_2 สูงถึง 50% และได้มีการตรวจสอบผลการทดลองด้วยแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Model)

Tamosiunas et al. (2016) ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณ H_2 สูง โดยใช้พลาสมาที่มีแก๊สตัวกลางเป็นไอน้ำช่วยในกระบวนการผลิตแก๊ส โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ประกอบด้วยกลีเซอรอลและไม้ จากการทดลองพบว่า สำหรับเชื้อเพลิงกลีเซอรอลสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของ H_2 และ CO เท่ากับ 47% และ 25% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 51% ส่วนเชื้อเพลิงไม้สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของ H_2 และ CO เท่ากับ 45.2% และ 21% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 45.6%



บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

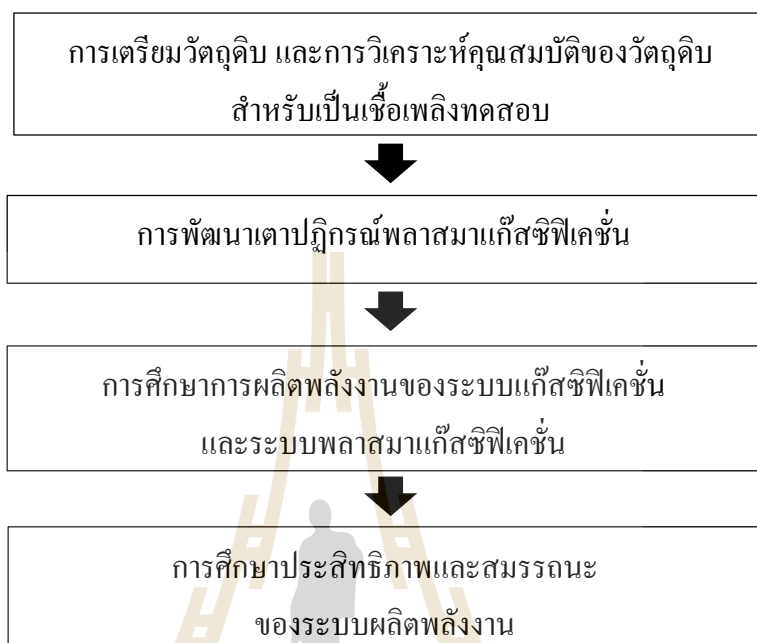
3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานจากชีวมวล โดยมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีทางความร้อน 2 เทคโนโลยี คือ 1) เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional Gasification) สัญลักษณ์ย่อคือ ระบบ C-G และ 2) เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted Gasification) สัญลักษณ์ย่อคือ ระบบ P-G โดยงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาระบบ P-G ในระดับต้นแบบขนาด 100 กิโลวัตต์ เพื่อเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการศึกษาวิจัย และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับระบบ C-G ขนาด 100 kW เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบ ด้านสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบ เนื่องจากในปัจจุบัน การศึกษาและวิจัยด้านเทคโนโลยีพลาสมาอาร์คทางความร้อนสำหรับการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลในระดับต้นแบบ ถือเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ ยังไม่ปรากฏรายละเอียดในเชิงเทคนิค และเชิงวิศวกรรม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่มีวัตถุประสงค์หลัก คือเพื่อสร้างนวัตกรรม (Innovation) ด้านเทคโนโลยีทางความร้อนสำหรับระบบ P-G ที่มีข้อมูลยืนยันอย่างครอบคลุม อันจะเป็นประโยชน์ และสร้างทางเลือกใหม่ด้านเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล

งานวิจัยนี้ จะเน้นการใช้เทคโนโลยีทางความร้อน 2 เทคโนโลยี คือ ระบบ C-G และระบบ P-G ในการศึกษาการผลิตพลังงานจากชีวมวล โดยงานวิจัยนี้ ศึกษาในขอบเขตของเชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้กระถินซึ่งผ่านกระบวนการเตรียมให้อยู่ในรูปแบบที่พร้อมใช้งาน คือ การสับเป็นท่อนและลดความชื้น พร้อมทั้งทำการทดสอบกับไม้กระถินสับท่อนที่มีความชื้นสูง (>15%w.b.)

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

สำหรับขั้นตอนในงานวิจัยนี้ โดยภาพรวมของการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในงานวิจัย

1) การเตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับงานวิจัย อันประกอบด้วย การเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้กระถินยักษ์ ด้วยวิธีการสับท่อนให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดยาวประมาณ 50-70 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 – 60 mm และลดความชื้นโดยวิธีการตากลาน ซึ่งแบ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับทดสอบเป็น 3 กลุ่ม คือ (1) เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นต่ำ (<20%w.b.) (2) เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นปานกลาง (ประมาณ 20-30%w.b.) และ (3) เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นสูง (>30%w.b.)

2) การพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification) จะพัฒนาต่อจาก ชุดเตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง (Fixed-bed Downdraft Gasifier) เพื่อการนำระบบพลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนช่วย (Plasma-assisted Gasification)

3) การศึกษาการผลิตพลังงานของระบบ C-G จะใช้เชื้อเพลิงความชื้นต่ำ (<20%w.b.)

4) การศึกษาการผลิตพลังงานของระบบ P-G โดยการนำพลาสติกเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนเสริมในระบบ C-G โดยทดสอบกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้น 3 ระดับ คือ ความชื้นต่ำ (<20%w.b.) ปานกลาง (ประมาณ 20-30%w.b.) และความชื้นสูง (>30%w.b.)

5) ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงาน (Operation Performance) และประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold Gas Efficiency) ของระบบ C-G และ ระบบ P-G

6) ศึกษาการทำสมดุลมวลสารและพลังงาน (Mass and Energy Balance) ของระบบ

3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

ทั้งนี้ขั้นตอนและวิธีการ โดยละเอียด มีดังต่อไปนี้

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัย

3.3.1.1 การเตรียมไม้กระถินยักษ์สำหรับเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ จะใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยผ่านกระบวนการสับ/ย่อยลดขนาด โดยใช้เครื่องเลื่อยไม้ที่พัฒนาขึ้นสำหรับเตรียมไม้ท่อน โดยเฉพาะ และทำการลดความชื้นด้วยวิธีการตากลาน เพื่อให้ได้ความชื้นในระดับต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ ในการสับท่อนไม้กระถินยักษ์ซึ่งมีขนาดลำต้นแตกต่างกัน ซึ่งจะเลือกเอาท่อนไม้กระถินยักษ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงประมาณ 25 – 60 mm และเลื่อยเป็นท่อนขนาดความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 50 – 70 mm ทั้งนี้เพื่อให้ได้ก้อนเชื้อเพลิงที่มีขนาดใกล้เคียงกัน



(ก) เครื่องเลื่อยที่พัฒนาขึ้น โดย ม.สุรนารี



(ข) ไม้กระถินยักษ์สับท่อน

รูปที่ 3.2 การเตรียมเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สำหรับทดสอบ

สำหรับการปรับระดับความชื้นของเชื้อเพลิง จะใช้วิธีการตากลาน หลังจากสับเป็นท่อนแล้ว โดยเชื้อเพลิงความชื้นต่ำ (16%w.b.) ได้จากการตากลานเป็นระยะเวลา

ประมาณ 1 สัปดาห์ ส่วนที่ระดับความชื้นปานกลาง ได้จากการเตรียมไม้สดและตากจนเหลือความชื้นประมาณ 28%w.b. และเชื้อเพลิงที่ระดับความชื้นสูงสุด จะใช้ไม้ที่ได้จากการตัดต้นสดและหั่นเป็นท่อน แต่เนื่องจากกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงในปริมาณมาก จำเป็นต้องใช้เวลา ทำให้ความชื้นบางส่วนหายไป จึงทำให้การเตรียมเชื้อเพลิงที่ระดับความชื้นสูงสุด มีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 34%w.b.

3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

3.3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

1) ความชื้น (Moisture) คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุ ความชื้นมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้และคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เชื้อเพลิงที่มีขนาดความชื้นต่ำยิ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตแก๊สได้มากขึ้นเท่านั้น โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173 (ภาคผนวก)

2) เถ้า (Ash) คือปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในชีวมวล ภายหลังการเผา ซึ่งปริมาณเถ้าในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามีปริมาณเถ้าสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนต่ำ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3174 (ภาคผนวก)

3) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คือปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณสารระเหยในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนสูง เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่เผาไหม้ได้สูง แต่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวจะต่ำ ตามลำดับ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3175 (ภาคผนวก)

4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ก็มีแนวโน้มที่จะให้ผลได้ของถ่านชาร์สูง เป็นต้น โดยใช้วิธีการคำนวณจากผลต่างระหว่าง ความชื้น เถ้า และปริมาณสารระเหย (By Difference, d.b.)

5) ค่าความร้อน (High Heating Value) คือ ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb หรือ kcal/L เป็นต้น จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าชีวมวลนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงหรือไม่ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2015 (ภาคผนวก)

3.3.2.2 การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณธาตุในตัวอย่าง

โดยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS-932 EDXRF (เครื่องมือวิเคราะห์นี้มีค่า Limit of Detection 5 ppm) ณ ห้องปฏิบัติการของอาคารศูนย์เครื่องมือ 1 (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ส่วนธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ (ภาคผนวก)

3.3.3 การพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชันสำหรับใช้กับพลาสมาอาร์คเชิงความร้อน

3.3.3.1 พลาสมาเชิงความร้อนขนาดกำลัง 50 กิโลวัตต์

ในงานวิจัยนี้ อาศัยต้นแบบเทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Technology) ภายใต้การพัฒนาโดย บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา เป็นบริษัทที่ดำเนินการวิจัยและพัฒนาด้านพลาสมาอาร์คกับการกำจัดของเสียอันตรายและการผลิตพลังงานทดแทน มีผู้เชี่ยวชาญด้าน Plasma Technology และ Plasma Physics ทั้งนี้ โดยการประสานความร่วมมือด้านงานวิจัย ระหว่าง ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีกับ สถาบัน Advanced Plasma Solutions for Waste Management ซึ่งเป็นฝ่ายวิจัยและพัฒนา (Research and Development : R&D) ของบริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) เพื่อทำการพัฒนาระบบพลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Torch) ขนาด 50 kW สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยรายละเอียดของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และมีรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของหัวพลาสมาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ข้อกำหนด
Power	50 kW
Voltage (max)	300 V
Current (max)	250 A
Air	2-10 g/s
Water (max)	500 g/s
Life time of electrodes	200 hr
Efficiency	65 %
Diameter of nozzle	25 mm
Sizes	300 x 600 mm
Weight	10 kg

1) ชุดหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Torch)

- หัวพลาสมา (Plasma Arc Torch) เป็นชนิด DC Plasma Torch ผลิตจากวัสดุเหล็กแข็งทนอุณหภูมิสูง สามารถสร้างอุณหภูมิเปลวแก๊สได้ในช่วง 2,200-11,000 °C มีอุปกรณ์ประกอบ คือ ชุดขั้วไฟฟ้า (Electrode) ชุดหัวฉีดแก๊ส (Gas Injectors) ฉนวนทนความร้อน (Insulator) ชุดจุดประกายไฟฟ้า (Spacer) มีอายุการใช้งานต่อเนื่องได้ไม่ต่ำกว่า 200 ชั่วโมง ประสิทธิภาพรวมของระบบ (System efficiency) ประมาณ 65% พร้อมชุดอุปกรณ์สำรอง มีน้ำหนักรวมประมาณ 10 kg ขนาดโดยประมาณ 300 x 600 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหัว (Diameter of Nozzle) โดยประมาณ 25 mm

- ชุดขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากวัสดุทองแดง (Cu) ประกอบด้วย ขั้วบวก (+) และขั้วลบ (-) จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 50 kW ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 300 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 250 A โดยใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC)

- ชุดหัวฉีดแก๊ส (Gas Injectors) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อากาศ (Air) เป็น Carrier Gas ปรับอัตราการฉีดแก๊สได้ในช่วง 2-10 g-carrier gas/sec พร้อมทั้งติดตั้งระบบลดอุณหภูมิของเปลวแก๊ส ด้วยระบบ Water Cooling Supply System ที่อัตราการไหลของน้ำสูงสุด 500 g-water/sec

- ฉนวนทนความร้อน (Insulator) ทำจากวัสดุพิเศษทนความร้อน หุ้มฉนวนทั้งชุดจนถึงบริเวณทางออกของแก๊ส (Plasma Gases Outlet)

- ชุดจุดประกายไฟฟ้า (Spacer) มีการต่อเชื่อมชุดจุดประกายไฟฟ้าเข้ากับส่วนหัวพลาสมาและระบบขั้วไฟฟ้า (Electrode) ด้วยระบบควบคุม (Control Block และ Block of Ignition) โดยการทำงานจะใช้การควบคุมด้วยเจ้าหน้าที่ (Manual Control Mode)

- การเดินระบบของชุดหัวพลาสมาอาร์ค (Gas Plasma Arc Torch) เป็นระบบควบคุมด้วยเจ้าหน้าที่ (Manual Control System) และมีการติดตั้งอุปกรณ์ วงจรไฟฟ้า ระบบควบคุมให้แล้วเสร็จ และสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

2) การติดตั้งและปรับแต่งชุดหัวพลาสมา

- การตั้งระยะห่างของขั้ว Anode และ Cathode โดยใช้ดินน้ำมันเป็นตัววัดระยะ ซึ่งจะต้องตั้งระยะห่างให้อยู่ในช่วง 2 - 3 mm ดังรูปที่ 3.3



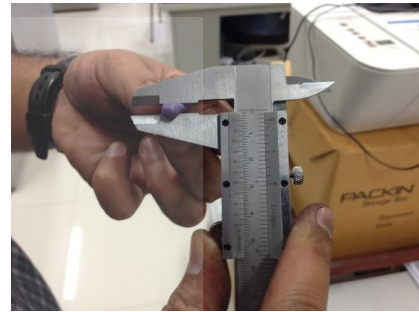
ก. ปั่นดินน้ำมันเป็นแท่งทรงกระบอก และนำไปติดไว้บริเวณหัว Anode ดังรูป



ข. นำชุดหัว Cathode วางกดทับลงไปให้ชุดหัว Anode ให้แน่น



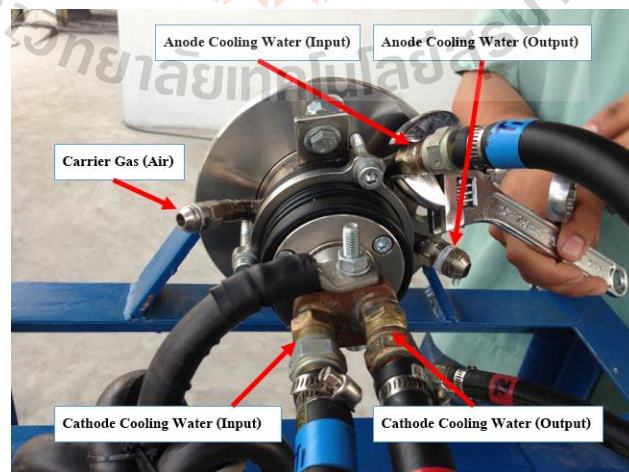
ค. ดึงชุดหัว cathode ขึ้น และนำดินน้ำมันที่ถูกกดทับขึ้นมาวัดขนาด gap ดังรูป



ง. วัดขนาดดินน้ำมันด้วยเวอร์เนีย (ต้องได้ความหนา 2-3 mm)

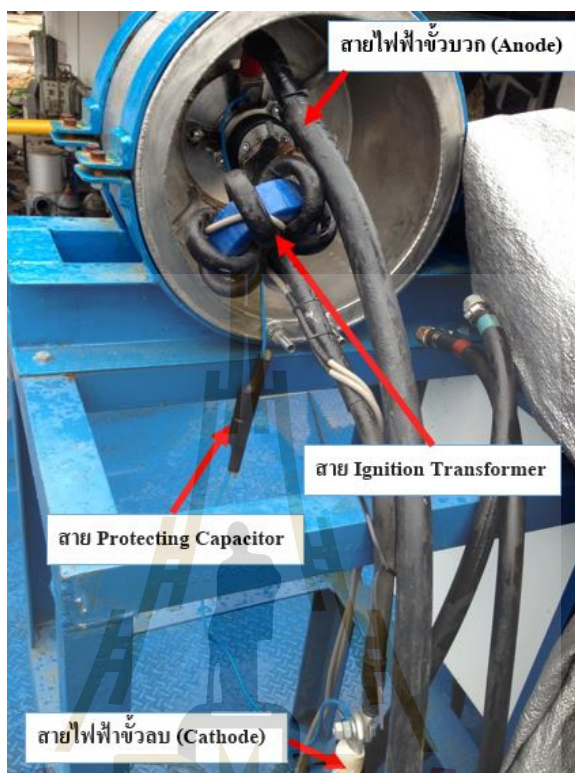
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบระยะห่าง (Gap) ระหว่างหัว Anode และ Cathode

- การต่อระบบน้ำหล่อเย็น และ Carrier Gas เข้ากับหัวพลาสมา โดยระบบน้ำหล่อเย็นหัวพลาสมาจะมี 2 ชุด คือ สำหรับหล่อเย็นชุดหัว Anode และ Cathode ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การต่อระบบน้ำหล่อเย็นและ Carrier Gas ของหัวพลาสมา

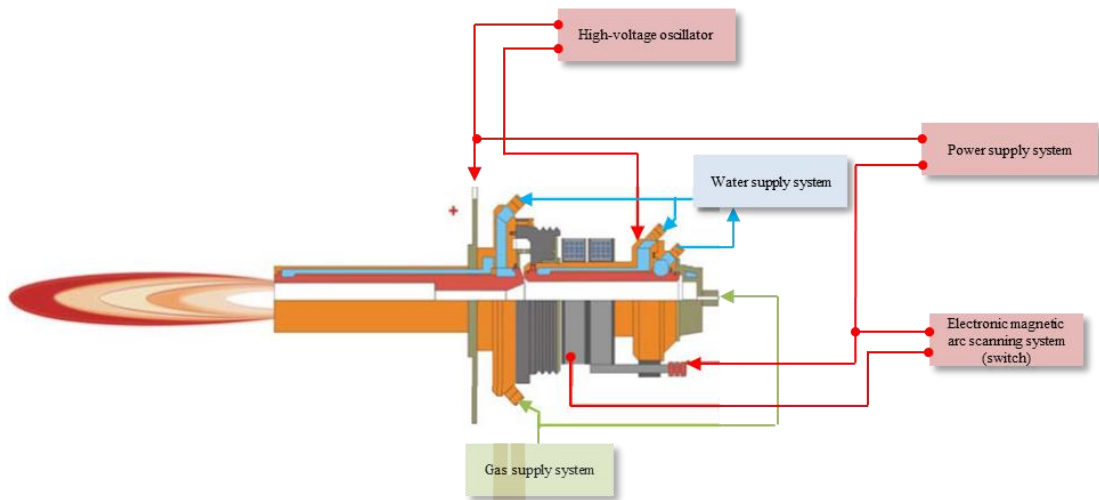
- การติดตั้งระบบไฟฟ้าเข้ากับหัวพลาสมา ประกอบด้วย 1) สายไฟฟ้าขั้ว Anode และ Cathode 2) สาย Protecting Capacitor และ สาย Ignition Transformer ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การติดตั้งระบบสายไฟฟ้าเข้ากับหัวพลาสมา

3) ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุม

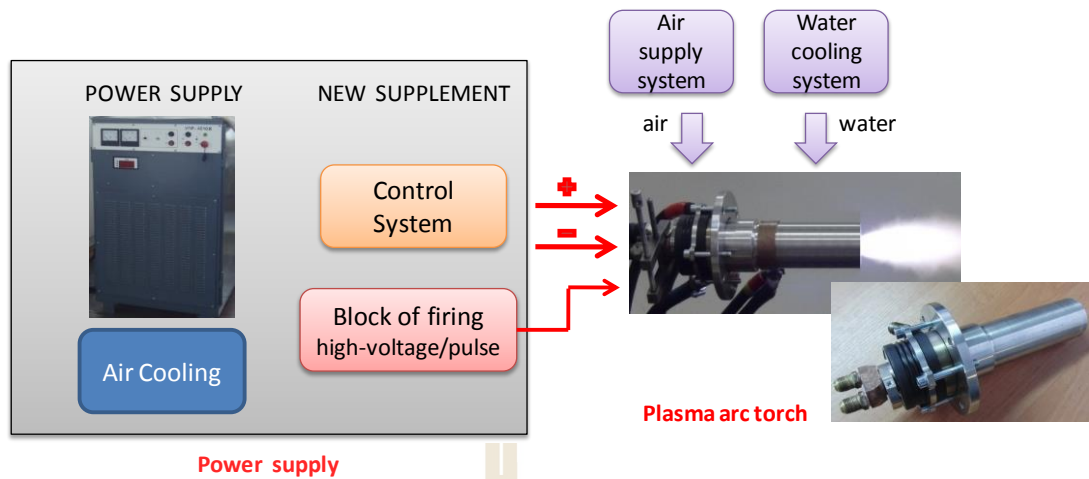
ชุดอุปกรณ์จ่ายกระแส (Power Supply) สำหรับใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current : AC) ซึ่งเป็นระบบไฟแบบ 3 เฟส กระแสไฟฟ้า 250 A แรงดัน 380 V และความถี่ 50 Hz และพร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาดใหญ่ และ หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Transformer) ที่สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ให้มีความต่างศักย์สูงขนาด 40,000 V ทั้งนี้ แผนผังการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Torch) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สำหรับชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ในส่วนของลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 แผนผังของหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Torch)

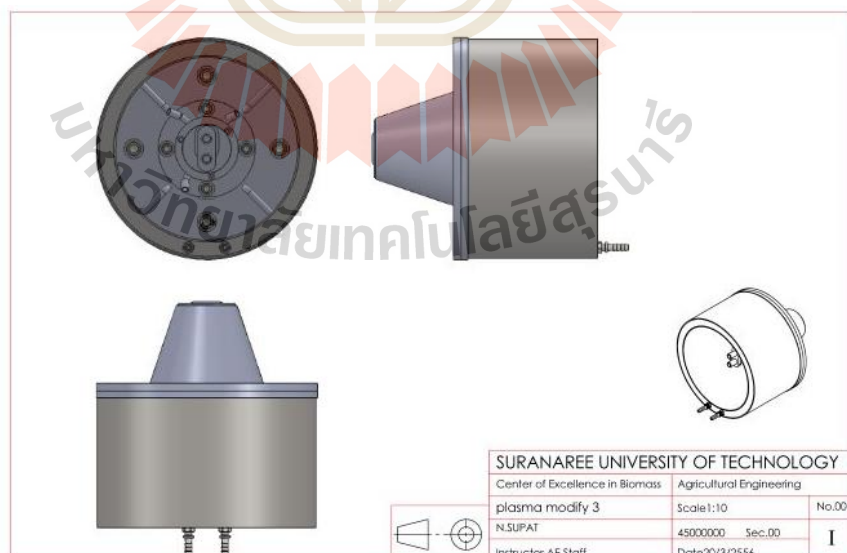


รูปที่ 3.7 ชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 ลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า

หัวพลาสมาจะถูกลำเลียงเข้าไปประกอบเข้ากับเตาปฏิกรณ์ แต่การติดตั้งชุดพลาสมาอาร์คในเตาปฏิกรณ์ที่มีความร้อนสูง จำเป็นต้องออกแบบระบบ Plasma Jacket หรือ ชุดครอบหัวพลาสมา สำหรับป้องกันความร้อนที่จะก่อให้เกิดความเสียหายกับระบบสายไฟ ท่อแก๊ส และท่อน้ำ ซึ่งชุดครอบหัวพลาสมาสามารถระบายความร้อนที่แผ่ออกมาจากตัวเตาได้โดยใช้น้ำไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Plasma Jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา



ก. หัวพลาสมาที่ประกอบชุดครอบ

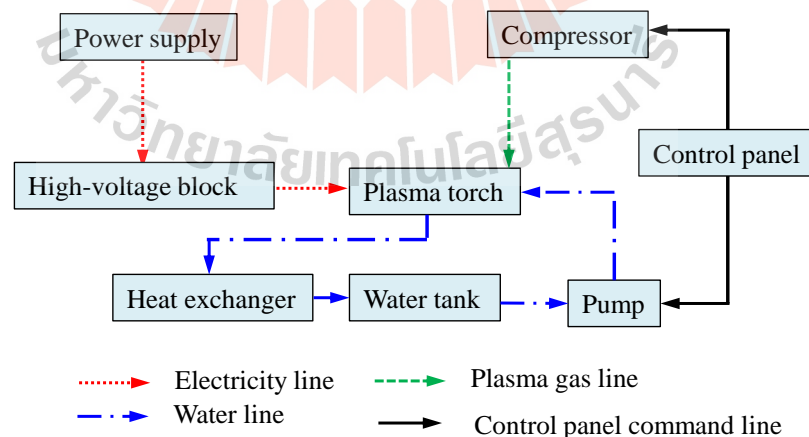


ข. การทดสอบหัวพลาสมาแบบมีชุดครอบ

รูปที่ 3.10 ลักษณะชุดครอบหัวพลาสมา (Plasma Jacket)

4) การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับนำหัวพลาสมาอาร์คไปใช้งานในเชิงความร้อน

ทั้งนี้ การนำหัวพลาสมาอาร์ค มาใช้งานทางความร้อนกับระบบเตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชัน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้อง คิดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง โดยได้พัฒนาและติดตั้งระบบเพิ่มเติม ได้แก่ ระบบผลิตน้ำหล่อเย็นหัวพลาสมา (Cooling Water) ระบบปั้มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา รายละเอียดของระบบและอุปกรณ์ ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และรายละเอียดมีดังต่อไปนี้



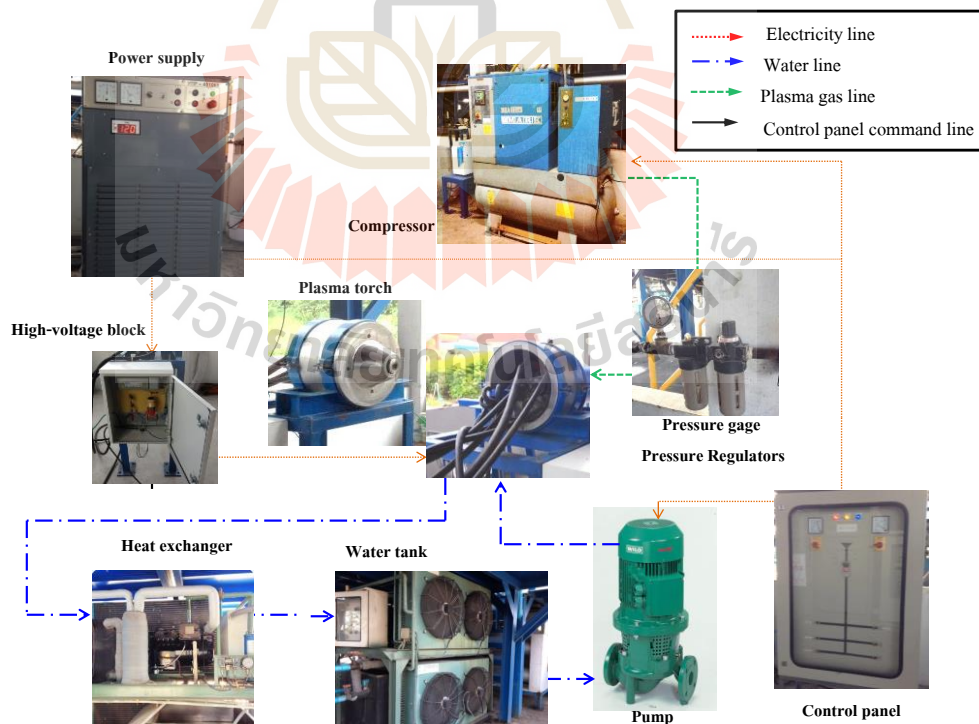
รูปที่ 3.11 แผนผังอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค

- ถังพักน้ำ (Water tank) อุปกรณ์ผลิตน้ำหล่อเย็น (Cooling Water) และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิของชุดหัวพลาสมาอาร์ค โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ พร้อมระบบควบคุมและระบบแสดงอุณหภูมิ น้ำสำหรับควบคุมอุณหภูมิของน้ำเข้าหัวพลาสมาอาร์ค (Inlet Plasma Arc Torch) ไม่เกิน 30 °C และอุณหภูมิของน้ำออกจากระบบ (Outlet Plasma Arc Torch) ไม่เกิน 55 °C เนื่องจากเมื่อมีการใช้งานต่อเนื่อง หัวพลาสมาจะมีความร้อนสูง การลดอุณหภูมิให้กับหัวพลาสมา จะเป็นการป้องกันการความเสียหายต่อระบบสายไฟ และอุปกรณ์ภายในหัวพลาสมา

- ปั๊มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา (Water Cooling Supply System) ที่มีความดันไม่ต่ำกว่า 0.6 MPa ให้อัตราการไหลของน้ำสูงสุด 500 g-water/secs

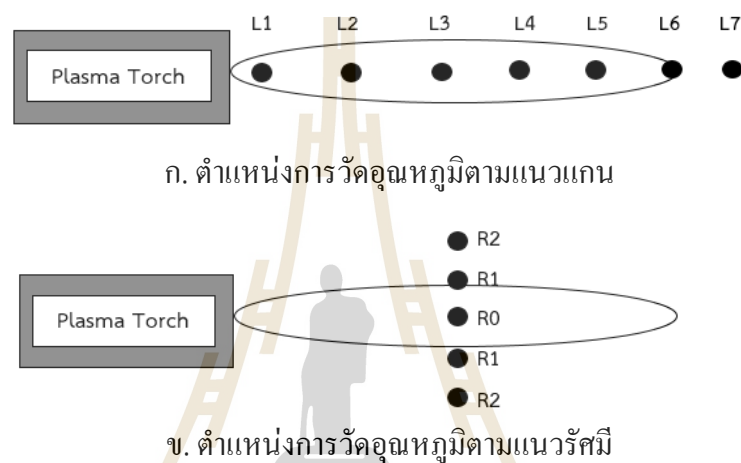
- เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) สำหรับหัวฉีดแก๊ส (Gas Injector) ของชุดหัวพลาสมาอาร์ค โดยจะสามารถให้ Carrier Gas ทำงานกับระบบได้ ที่แรงดันของแก๊สได้ไม่ต่ำกว่า 1 MPa (10 Bar) และให้อัตราการไหลของ Carrier Gas สูงสุดที่ระดับ 8 g-carrier gas/sec

ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค สำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานวิจัยนี้ ดังแสดงใน รูปที่ 3.12

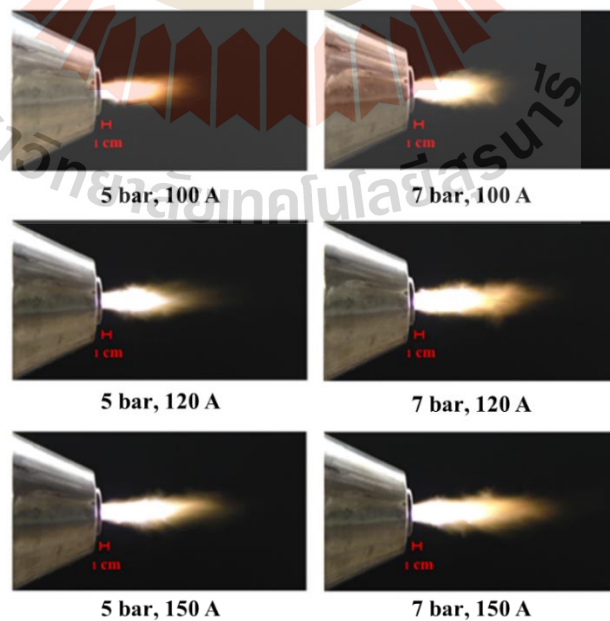


รูปที่ 3.12 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค

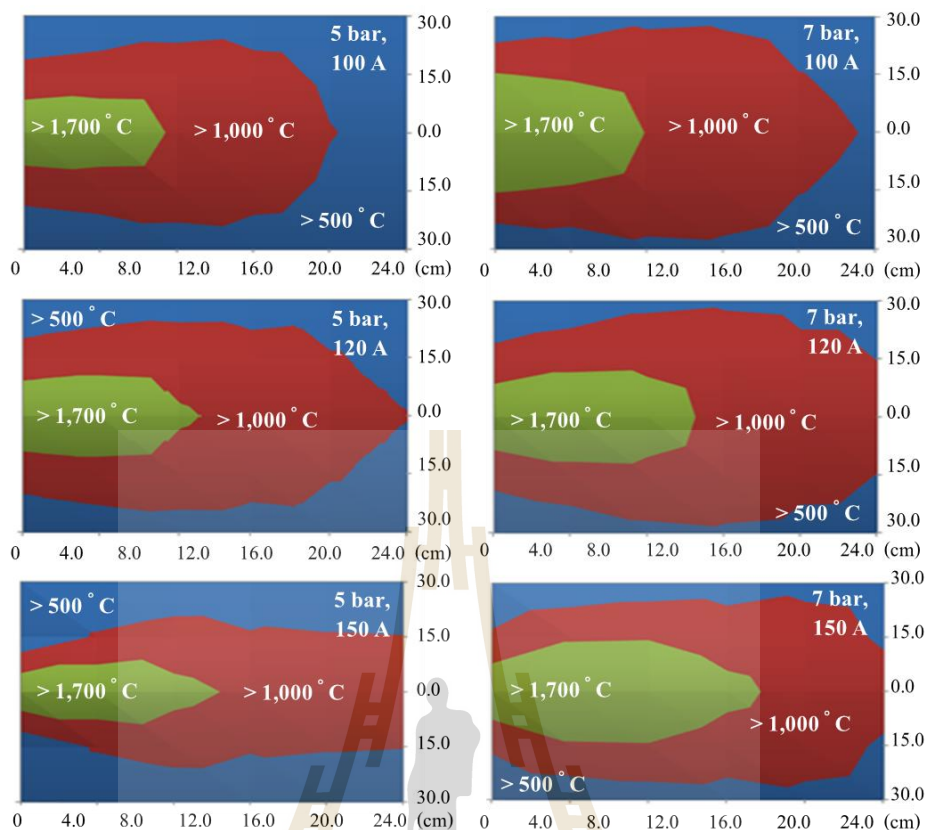
เนื่องจากการเดินระบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบพลาสมาอาร์ค และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบหัวพลาสมา จึงได้ทำการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิของเปลวพลาสมาที่สภาวะต่างๆ ประกอบด้วย 1) การควบคุมกระแสไฟฟ้าในช่วงระหว่าง 100, 120 และ 150 A ที่ความต่างศักย์ 300 V และ 2) กำหนดแรงดันของอากาศ (Carrier Gas) ที่ระดับ 5 และ 7 bar โดยทำการวัดระดับอุณหภูมิของเปลวพลาสมาตามแนวแกน และแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมา



รูปที่ 3.14 ลักษณะเปลวพลาสมาที่สภาวะต่างๆ



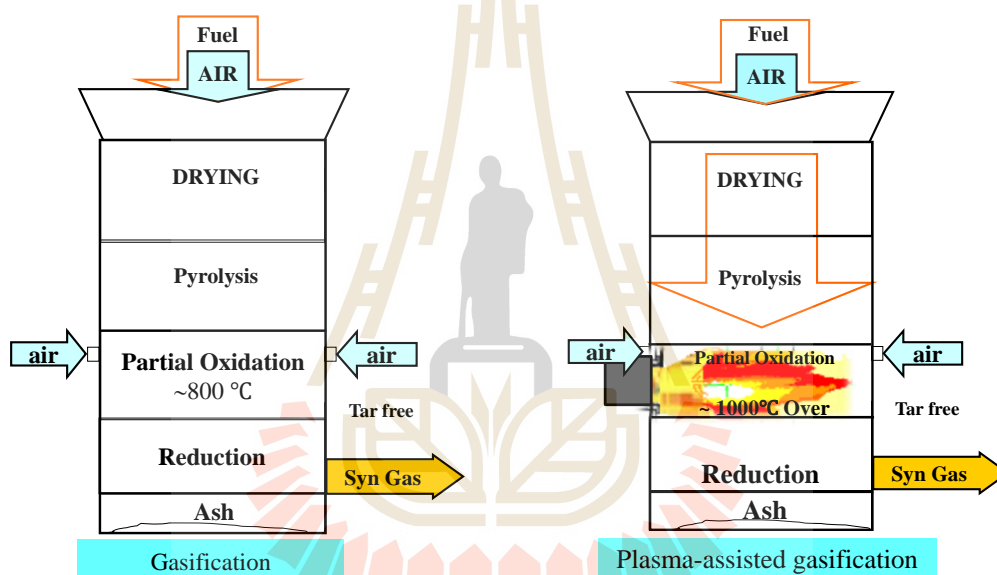
รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวแกนและแนวรัศมีของเปลวพลาสมาที่สภาวะต่างๆ

จากลักษณะกระจายตัวของอุณหภูมิต่างๆของเปลวพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และได้ทำการพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้งานวิจัยนี้ เห็นว่า การจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 120 A ความต่างศักย์ 300 V และกำหนดแรงดันของอากาศที่ 7 bar เป็นสภาวะที่เหมาะสม คือ มีการกระจายของอุณหภูมิทั้งในแนวแกนและแนวรัศมีอย่างทั่วถึง และคิดเป็นพลังงานที่ป้อนเข้าระบบเท่ากับ 36 กิโลวัตต์ หรือ ประมาณ 70% ของกำลังสูงสุดของระบบ (50 kW) ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในการเดินระบบต่อเนื่อง เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเดินระบบที่กำลังสูงสุด และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบพลาสมาอาร์คได้ อีกทั้งการใช้แรงดัน Carrier Gas เท่ากับ 5 bar ไม่เหมาะสม เนื่องจากไม่ใช่แรงดันสำหรับการใช้งานแบบต่อเนื่องตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะจ่ายกระแสไฟฟ้า 120 A และแรงดัน Carrier Gas 7 bar เป็นสภาวะสำหรับเดินระบบหัวพลาสมาสำหรับงานวิจัยนี้

3.3.3.2 การพัฒนาเตาปฏิกรณ์ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

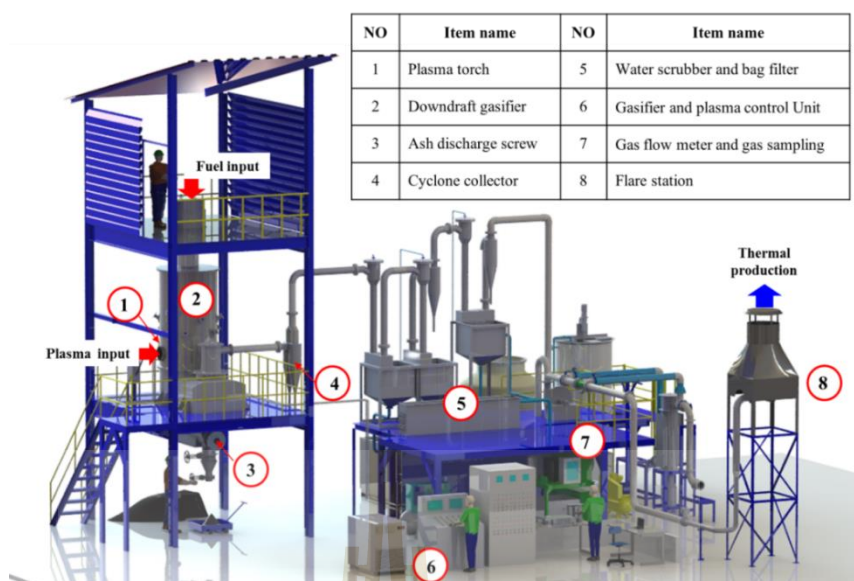
ในพัฒนาเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ จะพัฒนาต่อยอดจากต้นแบบ โรงไฟฟ้าชีวมวลเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ของศูนย์ความ

เป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นเตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed-bed Downdraft Gasifier) ที่ถูกออกแบบให้สามารถรองรับเชื้อเพลิงได้ไม่ต่ำกว่า 200 kg/hr (สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 100 kW) ในส่วนของการพัฒนาระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในงานวิจัยนี้ จะทำการปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยนำพลาสมาอาร์คช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted Gasification) โดยการเพิ่มช่องในเตาปฏิกรณ์เพื่อติดตั้งหัวพลาสมา โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการติดตั้งหัวพลาสมาอาร์คในตำแหน่งโซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ความร้อนจากพลาสมาอาร์คเข้าไปเป็นความร้อนช่วยสำหรับกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ลักษณะของเตา Gasification และ Plasma-assisted gasification

ทั้งนี้ ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1) ชุดเตาปฏิกรณ์ 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส 3) ระบบบำบัดน้ำเสีย และ 4) ชุดอุปกรณ์และระบบควบคุมการนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ โดยแผนผังกระบวนการ แสดงไว้ในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

1) เตาปฏิกรณ์ (Gasifier)

เตาปฏิกรณ์ชนิด (Open-Top) Fixed-bed Downdraft Gasifier ภายนอก ทำจากวัสดุโลหะมวลกลม ภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนทำจากวัสดุทนความร้อนทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ด้านบนของเตาประกอบด้วย Hopper Feeder เพื่อรับเชื้อเพลิง และมีฝาปิด มีช่องไวัชิลน้ำ (Seal) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้า-ออกจากเตาขณะ Shut Down ระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้อนอากาศและควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับการเผาไหม้ ด้านล่างของเตามีระบบลำเลียงถ่าน (ถ่านไม้) ที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ก)

ในกรณีของการใช้งานเป็นเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จะติดตั้งหัวพลาสมาอาร์ค เข้าไปภายในเตาปฏิกรณ์ โดยติดตั้งบริเวณ โซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) เพื่อให้ความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เข้าไปเป็นความร้อนช่วยในโซนของการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ข), รูปที่ 3.18 (ค) และ รูปที่ 3.18 (ง)

หลักการทำงานของระบบเตาปฏิกรณ์สำหรับ ระบบแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันนี้ มีหลักการทำงานคือ เชื้อเพลิงจะถูกลำเลียงสู่ถังพักเพื่อรอที่จะเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ หลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกปล่อยลงสู่เตาและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น 4 โซนคือ 1) โซนอบแห้ง (Drying Zone) 2) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) 3) โซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) ซึ่งงานวิจัยนี้ จะทำการประกอบหัวพลาสมาอาร์คเข้าไปในโซนการเผาไหม้ ในกรณีของการใช้งานเป็นระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน และ 4) โซนรีดักชัน (Reduction Zone) สำหรับผลิตแก๊ส

เชื้อเพลิง (Syngas) โดย แก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น จะไหลผ่านทางออกด้านล่าง ไปสู่ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas Cleaning Unit) คือ ไชโคลนดักฝุ่น (Cyclone) ระบบสครับเบอร์ (Water Scrubber และ Chiller Scrubber) และ ระบบถุงกรอง (Bag Filter) ตามลำดับ จากนั้น แก๊สเชื้อเพลิงจะผ่านไปยังชุดทดสอบการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงต่อไป (Flare Station)

2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas Treatment Unit)

1. Cyclone Collector เป็นอุปกรณ์แยกฝุ่นหรืออนุภาคออกจากแก๊สใช้หลักการดักฝุ่นด้วยแรงเหวี่ยงทำให้เกิดแก๊สหมุนวน (Vortex) จากนั้นฝุ่นหรืออนุภาคจะตกลงสู่ด้านล่างของ Cyclone Collector ส่วนแก๊สจะหมุนวนอยู่ด้านบนแล้วไหลตามท่อไปสู่ระบบ Water Scrubber และ Chiller Scrubber ซึ่งเป็นส่วนประกอบลำดับถัดไป แสดงไว้ในรูปที่ 3.18 (จ)

2. Water Scrubber และ Chiller Scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและอนุภาคนาขนาดเล็กออกจากแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้ละอองน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32 °C ส่วน Chiller Scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและน้ำมันดิน (Tars) โดยใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10 °C ซึ่งไอระเหยจกขางเหนียวของน้ำมันดินจะถูกควบแน่นลงมาพร้อมกับน้ำ ลักษณะของ Water Scrubber และ Chiller Scrubber แสดงไว้ในรูปที่ 3.18 (ข)

3. Fabric Filter Unit ทำหน้าที่ดักฝุ่นอนุภาคนาขนาดเล็ก และความชื้นครั้งสุดท้ายหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยฝุ่นอนุภาคนาขนาดเล็กที่ผ่านเข้ามาจะถูกดักจับไว้โดยถุงกรองซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้มากถึง 100 μm เพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาดสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.18 (ข)

3) ถังพักน้ำและระบบบำบัดน้ำเสีย

ถังพักน้ำ หรือ ระบบ Buffer Tank ถูกออกแบบสำหรับรองรับน้ำจากกระบวนการทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง Water Scrubber และ Chiller Scrubber ซึ่งมีความจุประมาณ 10 m^3 แสดงไว้ในรูปที่ 3.18 (ข) ในกรณีที่ต้องการบำบัดน้ำเสีย จะหมุนเวียนน้ำจาก Buffer Tank แล้วบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical Treatment) โดยใช้หลักการโคแอกูเลชัน (Coagulation) ที่ถัง Flocculation Tank

4) พัดลมดูด และชุดทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง

พัดลมดูด (Gas Blower) เป็นอุปกรณ์สำหรับดูดแก๊สเชื้อเพลิง ที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วจาก ระบบทำความสะอาดแก๊ส เพื่อไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในงานวิจัยนี้ จะนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ผ่านเข้าไปยังชุดทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง (Start-Up Flare) และทำการเผาขยะแก๊สทิ้ง แสดงไว้ในรูปที่ 3.18 (ฅ) และรูปที่ 3.18 (ฉ) ตามลำดับ

3.3.3.3 การเดินระบบแก๊สซีพีเคชั่น (C-G) และพลาสมาแก๊สซีพีเคชั่น (P-G)

สำหรับรายละเอียดของการเดินระบบแก๊สซีพีเคชั่น และพลาสมาแก๊สซีพีเคชั่น ในการทดลองของงานวิจัยนี้ มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) การเดินระบบเตาปฏิกรณ์แก๊สซีพีเคชั่น

1. ทำการเปิดฝาของเตาผลิตปฏิกรณ์ และทำการปล่อยน้ำที่อยู่ด้านบนของเตาซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการไหลเข้าออกของอากาศในช่วงที่ดับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สุดท้ายทำการเติมวัตถุดิบให้อยู่ในระดับที่กำหนด

2. ทำการเปิดช่องทางเข้าของอากาศรอบตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในของตัวเตา

3. กดเปิดสวิตช์ควบคุมการทำงานของระบบ และทำการจุดเตาปฏิกรณ์ในตำแหน่ง Ignition Port

4. ภายหลังจากจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงประมาณ 2 ชั่วโมง ทำการเปิด Flare Valve เพื่อปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ออกทาง Flare เพื่อทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง

5. สำหรับการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ต้องทำการเติมเชื้อเพลิงพร้อมทั้งนำถ่าน (Char) ออกจากเตาโดยการหมุนวาล์วนำถ่านให้เปิดออกและเปิดสวิตช์ชุดสกรูลำเลียงถ่าน

2) การเดินระบบเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซีพีเคชั่น

การเดินระบบสำหรับส่วนควบคุมการทำงานของเตาปฏิกรณ์ กระทำเช่นเดียวกัน สำหรับส่วนของระบบการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค มีขั้นตอนการเดินระบบดังต่อไปนี้

1. ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหัวพลาสมาอาร์คคงที่ 36 kW โดยควบคุมปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 120 A และที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 300 V

2. ปรับ Pressure Gage และ Pressure Regulators ของเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ให้ทำงานที่แรงดันของแก๊สเท่ากับ 7 bar (อัตราการไหลของมวลอากาศประมาณ 8 g-carrier gas/sec)

3. ควบคุมการทำงานของปั้มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา (Water Cooling Supply System) ให้มีความดันไม่ต่ำกว่า 0.6 MPa ให้อัตราการไหลของมวลน้ำไม่ต่ำกว่า 500 g-water/secs เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำเข้าหัวพลาสมาอาร์ค (Inlet Plasma Arc Torch) ไม่เกิน 30 °C และอุณหภูมิของน้ำออกจากระบบ (Outlet Plasma Arc Torch) ไม่เกิน 55

°C เพื่อการลดอุณหภูมิให้กับหัวพลาสมา อันเป็นการป้องกันการเสียหายต่อระบบสายไฟ และ อุปกรณ์ภายในหัวพลาสมา ทั้งนี้ขั้นตอนการเดินระบบแสดงในรูปที่ 3.19



ก. เตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชัน



ข. เตาปฏิกรณ์ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน



ค. การประกอบหัวพลาสมาอาร์ค



ง. เปลวลำแสงของพลาสมาอาร์ค



จ. ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone Collector)



ฉ. Water Scrubber and Chiller Scrubber

รูปที่ 3.18 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน



ช. ระบบกรอง (Fabric Filter Unit)



ซ. ถังรวบรวมน้ำเสีย (Buffer Tank)

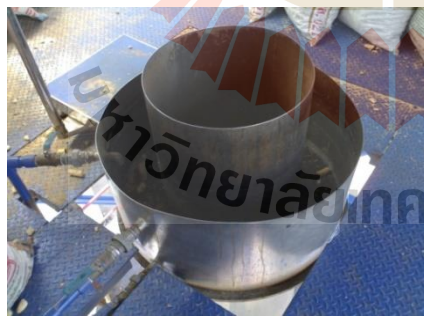


ฅ. พัดลมดูด (Gas Blower)



ญ. ชุดทดสอบการลุกไหม้ (Start-up Flare)

รูปที่ 3.18 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชั่นและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น (ต่อ)



ก. Hopper Feeder ป้อนเชื้อเพลิง



ข. เปิดวาล์วทางเข้าของอากาศรอบตัวเตา

รูปที่ 3.19 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชั่น และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น



ค. สวิตช์ควบคุมระบบเตาปฏิกรณ์



ง. ระบบแสดงอุณหภูมิในเตา



จ. สวิตช์ควบคุมระบบพลาสติกอาร์ค



ฉ. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

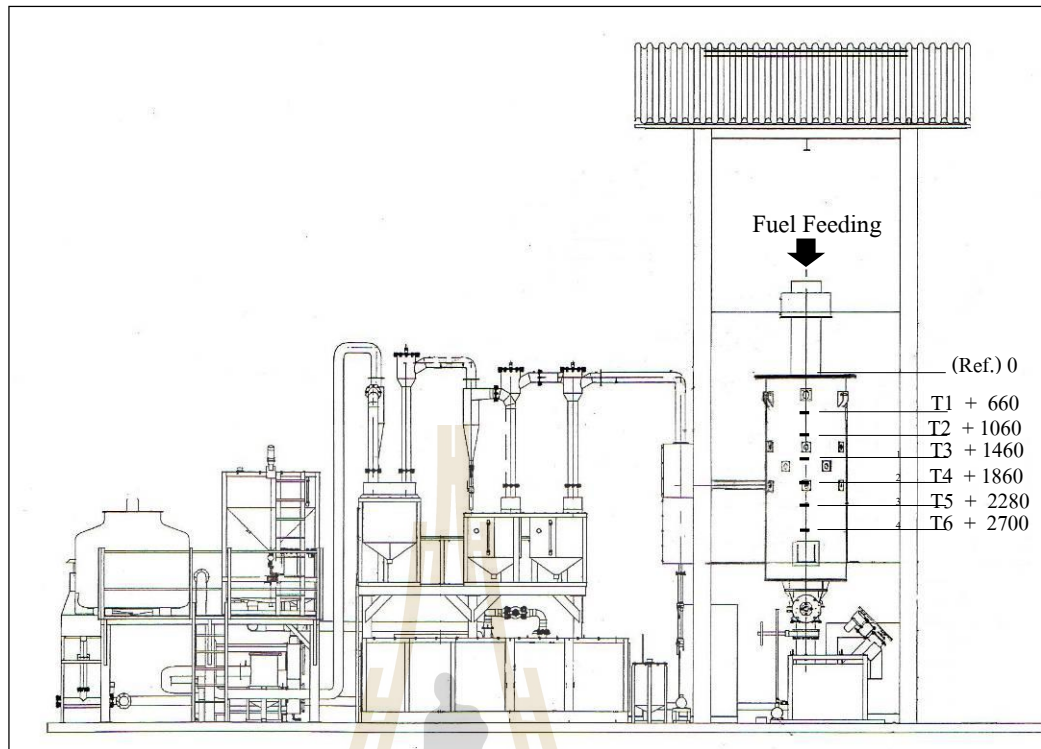
รูปที่ 3.19 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสติกแก๊สซิฟิเคชัน (ต่อ)

3.3.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ

การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ($T_1 - T_6$) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของโซนต่างๆ ภายในเตาปฏิกรณ์ จะแสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามระยะความสูง 6 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.20

2) เครื่องมือวัด อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 3.2 และ แสดงไว้ในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ($T_1 - T_6$)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เครื่องมือวัด/Sensor
1. Reactor Temperature	$T_1 - T_6$	Thermocouple Type-K และ Type-R
2. Gas Flow Rate (Nm^3/h)	V_g	Gas Flow Meter (Range 5 to 40 m/s: Vane Probes)
3. Gas Composition (%v/v)	G_c	Online Potable Gas Analyzer Gasboard-3100P series
4. Fuel Consumption (kg/hr)	m_{fuel}	เครื่องชั่ง
5. Char Discharge (kg/hr)	m_{ash}	เครื่องชั่ง
6. Impurities, Tar & Dust (mg/Nm^3)	T_D	Filter And Condenser



ก. Gas Flow Meter



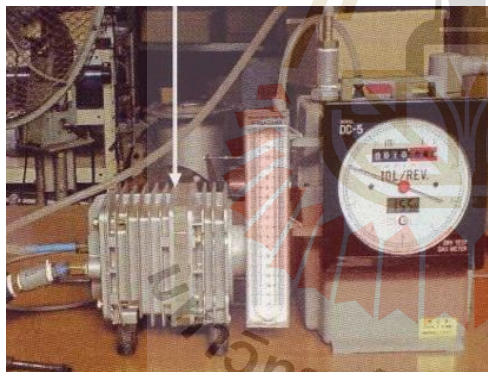
ข. Portable Gas Analyzer



ค. ตาชั่ง (ใช้วัด Fuel Consumption)



ง. ตาชั่ง (ใช้วัด Ash Production)



จ. ชุด Filter And Condense



ฉ. Flue Gas Analyzer (ยี่ห้อ Testo-350XL)

รูปที่ 3.21 เครื่องมือที่ใช้ในการวัด

3.3.4 การศึกษาการผลิตพลังงานของระบบระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

การศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้กระดี่นชั้กั้บระบบ C-G และ P-G มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ รวมถึงการทดสอบการใช้เชื้อเพลิงที่ระดับความชื้นสูงกับระบบ P-G ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ โดย

ต้องได้ค่าพลังงานความร้อนสูง (มากกว่า 4.0 MJ/Nm^3) นอกจากแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพแล้ว ระบบต้องสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณสม่ำเสมอด้วย เพราะจำเป็นอย่างยิ่งหากมีการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

ทั้งนี้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องของการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันให้มีเสถียรภาพ มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิ ชนิดเชื้อเพลิง ความชื้นเชื้อเพลิง ปริมาณการป้อนอากาศ และการดึงถ่านออกเป็นต้น โดยเฉพาะการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบเตาปฏิกรณ์ไหลลง (Fixed-bed Downdraft Gasifier) ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูงอาจเกิดปัญหาในการเดินระบบได้ ดังคำแนะนำของ Quakk et al. (1999) ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบ Downdraft Gasifier ไม่ควรมีความชื้นเกิน $12\% \text{ w.b.}$ หรือมากที่สุดไม่เกิน $25\% \text{ w.b.}$ และสอดคล้องกับรายงานผลการทดสอบของ Kumar et al. (2014) พบว่าความชื้นจะทำให้เสถียรภาพของระบบและประสิทธิภาพโดยรวมลดลง เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ลดลงต่ำกว่ามาตรฐาน อีกทั้งอาจเกิดการเผาไหม้บางส่วนไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิดปริมาณทาร์เพิ่มมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพื่อศึกษาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูงในระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยสมมติฐานว่า การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันจากเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูงสามารถทำให้มีเสถียรภาพได้ โดยการใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เป็นความร้อนช่วย ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted Gasification) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และพลังงานสุทธิที่จะได้จากระบบ โดยการทดลองกำหนดพลังงานที่ป้อนเข้าระบบคงที่ที่ 36 kW (โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 120 A ที่ความต่างศักย์ 300 V)

โดยกำหนดเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบเป็น 3 กลุ่ม และทำการทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระดับต่าง ๆ 3 ระดับ คือ $140 \text{ Nm}^3/\text{hr}$, $180 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ และ $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ซึ่งในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ จะใช้ Inverter ควบคุมความเร็วมอเตอร์ของ Blower (อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง คือ ปริมาณของแก๊สที่ผลิตได้ต่อชั่วโมงในหน่วยลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมสำหรับแต่ละการทดลอง)

การกำหนดชุดการทดลองการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ สับท่อนกับระบบแก๊สซิฟิเคชัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลองการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน

การทดลองที่	ความชื้นเชื้อเพลิง	ระบบ	อัตราการไหล (Nm ³ /hr)
1	16%w.b.	C-G	140, 180, 220
2	16%w.b.	P-G	140, 180, 220
3	28%w.b.	P-G	140, 180, 220
4	34%w.b.	P-G	140, 180, 220

การศึกษาอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio : ER) ของระบบ Fixed-bed Downdraft Gasifier โดยหาความสัมพันธ์ของอัตราการใช้อากาศต่ออัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงที่สถานะต่างๆ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.1) (Babu, 2004)

$$ER = [AF\text{-ratio}_{\text{measured}}] / [AF\text{-ratio}_{\text{stoichiometric}}] \quad (3.1)$$

เมื่อ

ER คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดจริงต่อสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีในทางทฤษฎี

AF-ratio_{measured} คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดจริง

AF-ratio_{stoichiometric} คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีตามทฤษฎี

โดยในทางทฤษฎี หรือ Theoretical Combustion สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)



ในที่นี้ CH_xO_y คือ สูตรทางเคมี (Generic Formula) ของเชื้อเพลิง ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในตัวของเชื้อเพลิง และ m คือปริมาณของออกซิเจนที่เชื้อเพลิงต้องการเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่ $m = 1 + 0.25x - 0.5y$ โดยที่การเดินระบบจะควบคุม

ให้ค่า ER อยู่ในช่วง $\sim 0.1 - 0.3$ เนื่องจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่สภาวะสมดุลจะต้องมีค่า ER อยู่ในช่วง 0.1 - 0.3 (Reed et al., 1983)

ในการเดินระบบ จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบ ประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยจะตรวจวัดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1) ข้อมูลอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง

การเก็บข้อมูลอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในแต่ละสภาวะ จะใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Gas Flow Meter) โดยข้อมูลจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อการ Monitoring ระบบ และป้องกันไม่ให้เกิดการคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ที่กำหนดไว้ (เครื่องมือวัดรูปที่ 3.21 (ก))

2) การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตา (Temperature Profile)

ข้อมูลของอุณหภูมิในเตาจะแสดงผลทางระบบ Data logger ซึ่งสามารถเก็บ บันทึกข้อมูลได้ตลอดเวลา (ในที่นี้จะเก็บทุกๆ 30 นาที) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จำนวน 6 ตำแหน่ง (T1-T6) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Temperature Profile) จะสามารถนำไปใช้อธิบายความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัด ตารางที่ 3.2, รูปที่ 3.20)

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในแต่ละการทดลอง ในงานวิจัยนี้จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในตำแหน่งที่ผ่านระบบทำความสะอาดแล้ว โดยใช้เครื่องวัดคุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงแบบออนไลน์ (Online Portable Gas Analyzer) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สต่างๆ คือ CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , O_2 และ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.21 (ข))

4) อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกเติมใส่ลงไป ในเตาปฏิกรณ์โดยใช้เครื่องชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.21 (ค))

5) อัตราการดึงถ่านออก (Char Discharge)

อัตราการดึงถ่านออกสามารถนำไปประเมินค่าผลผลิตคาร์บอนคงเหลือ (Yields of Carbon Residue) โดยอัตราการดึงถ่านออกจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเถ้า (Ash) ในเชื้อเพลิง ทั้งนี้

เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของถ่านในเตา ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาถ่านหลอมและอุดตันภายในเตาได้ สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเดินระบบโดยควบคุมอัตราการดึงถ่านออกให้ได้ประมาณ 5% ของน้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ (สัดส่วนของถ่านในเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ประมาณ 1.53%) ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของถ่านที่ถูกนำออกจากเตาปฏิกรณ์โดยใช้เครื่องชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการดึงถ่านออกในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.21 (ง))

6) Tar and Dust

ทาร์ (Tar) และ ฝุ่นละออง (Dust) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทาร์ (Crude Tar) หรือน้ำมันดิน เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ เป็นลักษณะของเหลวที่มีความหนืดสูง (High Viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Dust) เป็นอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทั้ง ทาร์ และ ฝุ่นละออง เป็นอันตรายและเป็นปัญหาหลัก ในการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ในกรณีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน สำหรับการวัดปริมาณทาร์และฝุ่นละออง จะทำการเก็บตัวอย่างในตำแหน่งเดียวกับที่เก็บตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ของระบบทำความสะอาดแก๊ส โดยใช้ปั๊มลมดูดตัวอย่าง ในปริมาณที่กำหนด โดยทำการดักทาร์ และ ฝุ่นละออง ด้วย Condenser และ Filter ตามลำดับ และนำไปชั่งคำนวณหาปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.21 (จ))

3.3.5 การประเมินสมรรถนะระบบ/ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

1) ประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold Gasification Efficiency) ของระบบ C-G และ P-G ดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อ ประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ โดยใช้ความสัมพันธ์คือ (Bhattacharya, 2001; Arjhar et al, 2012;2013)

$$\text{Cold-Gas Efficiency } (\eta_{cg}) = \frac{[\text{Rate Of Energy Carried By Syngas}]}{[\text{Rate Of Energy Supplied To Reactor}]}$$

$$\text{Cold-Gas Efficiency } (\eta_{cg}) = \frac{[V_g \times CV_g]}{[m_{\text{Fuel}} \times LHV_{\text{Fuel}}]} \quad (3.3)$$

เมื่อ

V_g

คือ

Flow Rate of Syngas (Nm^3/hr)

CV_g	คือ	Calorific Value of Syngas (MJ/Nm ³)
m_{fuel}	คือ	Fuel Consumption (kg/hr)
LHV_{fuel}	คือ	Low Heating Value of Fuel (MJ/kg)

โดยใช้ความสัมพันธ์ของเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน คือ Minutillo et al. (2009)

$$\begin{aligned} \text{Cold-Gas Efficiency-Plasma } (\eta_{cg}) &= [\text{Rate Of Energy Carried By Syngas}] / \\ &[\text{Rate Of Energy Supplied To Reactor}] \\ &= [V_g \times CV_g] / [(m_{Fuel} \times LHV_{Fuel}) + (W_{torch})] \end{aligned} \quad (3.4)$$

เมื่อ

W_{torch} คือ Power Consumption of The Plasma Torch

2) เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ (Operation Performance) ได้แก่ การประเมินค่าพลังงานสุทธิของระบบ (Net Energy Yield) และ พารามิเตอร์ อื่นๆ ดังต่อไปนี้

- พลังงานจากเชื้อเพลิงเข้าระบบ (MJ/hr)

$$= [LHV_{Fuel}] \cdot [m_{Fuel}] \quad (3.5)$$

- พลังงานจาก Plasma Arc เข้าระบบ (MJ/hr)

$$P = VI \quad (3.6)$$

$$V = 300 \text{ volt, } I = 120 \text{ Amp}$$

$$P = \text{kW (1 kWh = 3.6 MJ)}$$

- พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (MJ/hr)

$$= [CV_g] \cdot [V_g] \quad (3.7)$$

- อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ (Syngas Yield, Nm³/kg)

$$= [V_g] / [m_{Fuel}] \quad (3.8)$$

- อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ (Energy Yield, MJ/kg)

$$= [CV_g \cdot Vg] / [m_{Fuel}] \quad (3.9)$$

- 3) ประเมินผลผลิตคาร์บอนคงเหลือ (Yields of Carbon Residue) (Hakansson, 2007)

$$\text{Carbon Residue} = [M \times 100] / M_0 \quad (3.10)$$

เมื่อ:

M = ปริมาณคาร์บอนคงเหลือ (g)

M₀ = ปริมาณคาร์บอนในตัวอย่างตอนเริ่มต้น (g)



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง เป็นสิ่งสำคัญที่จะประเมินว่าเชื้อเพลิงมีความเหมาะสมต่อการผลิตพลังงาน โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากขึ้นเพียงใด และอีกทั้งองค์ประกอบที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้นจะทำให้สามารถอธิบายลักษณะมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ เนื่องจากไม้กระถินยักษ์เป็นตัวอย่างของไม้โตเร็วที่มีความเหมาะสมกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ส่วนหนึ่งเนื่องจากไม้กระถินยักษ์สามารถเจริญเติบโตได้เกือบทุกพื้นที่ของประเทศไทย มีค่าผลผลิต (Yield) และค่าความร้อนเทียบเคียงหรือเหนือกว่าไม้โตเร็วหลายๆชนิด (ณัฐ วรยศ และคณะ, 2551) ซึ่งค่าความร้อนดังกล่าวขึ้นอยู่กับความชื้นของไม้ โดยทั่วไปไม้สดจะมีความชื้นค่อนข้างสูง (ประมาณ 42 – 49 %w.b.) การจะนำไม้สดมาใช้ทันทีหลังจากตัดจะทำให้ค่าความร้อนของไม้ต่ำ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ความชื้น ขนาดเชื้อเพลิง และความหนาแน่น เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการลำเลียงและสมรรถนะของระบบผลิตพลังงาน (Broson et al., 2016)

4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ คือไม้กระถินยักษ์ ซึ่งผ่านกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิง ด้วยวิธีการสับท่อนให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดยาวประมาณ 50-70 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 – 60 mm โดยใช้เครื่องเลื่อยไม้สำหรับเตรียมเชื้อเพลิงไม้ท่อนโดยเฉพาะ

การศึกษาผลของความชื้นในเชื้อเพลิงที่มีต่อสมรรถนะของระบบผลิตพลังงาน ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จึงต้องทำการเตรียมเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ให้มีความชื้นต่างกันเป็น 3 ระดับ (ปรับความชื้นด้วยวิธีการตากลาน) ดังนี้คือ (1) เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นต่ำ (<20%w.b.) (2) เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นปานกลาง (20 – 30 %w.b.) และ (3) เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นสูง (>30%w.b.) โดยสมบัติทางกายภาพบางประการของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 และเชื้อเพลิงไม้

กระถินยักษ์สับท่อนและพร้อมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบแสดงดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ (สับท่อน)

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน

พารามิเตอร์	เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์		
	ความชื้นต่ำ	ความชื้นปานกลาง	ความชื้นสูง
ความชื้น (%w.b.)	16.02 ± 1.35	28.12 ± 0.92	34.28 ± 1.21
ความหนาแน่นกองวัสดุ (kg/m ³)	335.95	391.94	427.57
ขนาดเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย (mm)	ยาว 50 – 70 mm, เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 – 60 mm		

4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง

การศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วย ค่าความร้อน องค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ เนื่องจากสมบัติเหล่านี้ถือเป็นสมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties) ของเชื้อเพลิงทุกชนิด และเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่เป็นตัวกำหนดถึงคุณภาพของเชื้อเพลิงซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบการเผาไหม้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

4.1.2.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

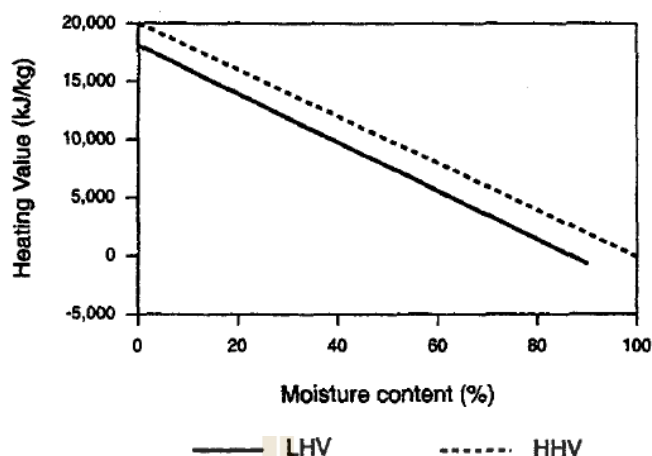
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ หรือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำให้องค์ประกอบที่เป็นสารระเหยได้รับความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยจากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมป์แคลอรีมิเตอร์ของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ที่ระดับความชื้น 16%w.b., 28%w.b. และ 34%w.b. พบว่ามีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value) เท่ากับ 16.02, 13.73 และ 12.59 MJ/kg ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value) เท่ากับ 14.54, 12.12 และ 10.92 MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนต่ำนี้

สามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนสูงโดยใช้ความสัมพันธ์ $LHV = HHV - 0.02395(9H + MC)$ (นคร ทิพยาวงศ์, 2553) จากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ดังกล่าวถือว่ามีค่าเทียบเคียงและสอดคล้องกับรายงานของ (Rengsirikul et al., 2011, Chotchutima et al., 2016) ซึ่งได้รายงานค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ว่ามีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value) อยู่ในช่วง 17.92 – 19.67 MJ/kg (น้ำหนักมวลแห้ง)

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์

รายการ	พารามิเตอร์	ระดับความชื้น (%w.b.)		
		16	28	34
ค่าความร้อน (MJ/kg)	ค่าความร้อนสูง (HHV)	16.02	13.73	12.59
	ค่าความร้อนต่ำ (LHV)	14.54	12.12	10.92
องค์ประกอบ แบบประมาณ (wt%, d.b.)	สารระเหย (Volatile Matter)		80.94	
	คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)		17.53	
	เถ้า (Ash)		1.53	
องค์ประกอบ แบบแยกธาตุ (wt%, d.b.)	คาร์บอน (C)		49.2	
	ไฮโดรเจน (H)		6.05	
	ไนโตรเจน (N)		0.47	
	ซัลเฟอร์ (S)		0.03	
	ออกซิเจน (O)		42.74	

จากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลง เมื่อเชื้อเพลิงมีความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของ (Quaak et al. 1999) ว่าในเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง จะมีน้ำอยู่ในส่วนประกอบของเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่สูงขึ้น จึงทำให้องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ (Combustible Matter) ในเชื้อเพลิงมีสัดส่วนลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนลดลงตามไปด้วย พร้อมทั้งได้แสดงรูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าความร้อนในเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของความชื้นในชีวมวลต่อค่าความร้อน
ที่มา : Quaak et al. (1999)

4.1.2.2 องค์ประกอบแบบประมาณ

จากการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วยปริมาณสารระเหย (Volatile Matter), ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และปริมาณเถ้า (Ash) เท่ากับ 80.94%, 17.53% และ 1.53% ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบได้กับข้อมูลของ (Reed and Das, 1988) ดังตารางที่ 4.3

สารระเหยเป็นส่วนประกอบในชีวมวลซึ่งจะระเหยออกมาเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400 – 500 °C โดยชีวมวลทั่วไปจะมีสัดส่วนของสารระเหยสูง (> 80%) ในขณะที่ถ่านหินอาจมีน้อยกว่า 20% และในส่วนของปริมาณเถ้าซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งชีวมวลประเภทไม้โดยทั่วไปถือว่ามีปริมาณเถ้าอยู่น้อยมาก (ประมาณ 0.1 – 2.0%) เมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทแกลบและฟางข้าว หากเชื้อเพลิงมีปริมาณเถ้าอยู่มาก อาจส่งผลเสียต่อระบบการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเถ้าหลอมและอุดตันภายในเตาปฏิกรณ์ได้ (Quaak et al. 1999)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบแบบประมาณของชีวมวลประเภทไม้

Parameter (%wt., db)	(Reed and Das, 1988)	งานวิจัยนี้
Volatile Matter (VM)	77.0 – 87.0	80.94
Fixed Carbon (FC)	12.8 – 21.0	17.53
Ash	0.1 – 2.0	1.53

4.1.2.3 องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ

จากการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) ของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง(ไม่คิดรวมปริมาณเถ้า) ประกอบด้วย คาร์บอน (C) 49.2%, ไฮโดรเจน (H) 6.05%, ไนโตรเจน (N) 0.47%, ซัลเฟอร์ (S) 0.03% และ ออกซิเจน (O) 42.74% โดยทั่วไปสัดส่วนของปริมาณธาตุในเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีสัดส่วนของ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน อยู่ในปริมาณที่สูง สำหรับค่าสัดส่วนของ ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่ามีปริมาณน้อยมาก (มีค่าสัดส่วน < 1%) โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับ Quaak et al. (1999) ซึ่งได้แสดงองค์ประกอบแบบแยกธาตุของชีวมวลทั่วไปไว้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุของชีวมวลทั่วไป

Element	Symbol	(%wt., dry and ash-free basis)	
		Quaak et al. (1999)	งานวิจัยนี้
Carbon	C	44 – 51	49.20
Hydrogen	H	5.5 – 6.7	6.05
Oxygen	O	41 – 50	42.74
Nitrogen	N	0.12 – 0.60	0.47
Sulfur	S	0.0 – 0.2	0.03

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณเพื่อประเมินค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้ ซึ่งโดยทั่วไปการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยวิธี Bomb Calorimeter อาจมีขั้นตอนยุ่งยากและใช้เวลานาน แต่การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุอาจทำได้โดยไม่ยุ่งยาก, ใช้เวลาน้อยกว่า และต้นทุนถูกกว่า ซึ่งปัจจุบันมีสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงโดยใช้ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ (C, H, N, S และ O) อยู่หลายสมการ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้สมการต้องพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของเชื้อเพลิง เพื่อความแม่นยำในการคำนวณ (Sheng and Azevedo, 2005)

4.2 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G)

การศึกษาในหัวข้อนี้ จะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ผ่านการปรับความชื้นด้วยวิธีตากลานให้เหลือความชื้นในระดับต่ำ (ความชื้นเฉลี่ยประมาณ 16%w.b.) ในการทดสอบเดิน

ระบบผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional Gasification) เพื่อใช้ผลการทดสอบนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาและเปรียบเทียบกับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification) ต่อไป

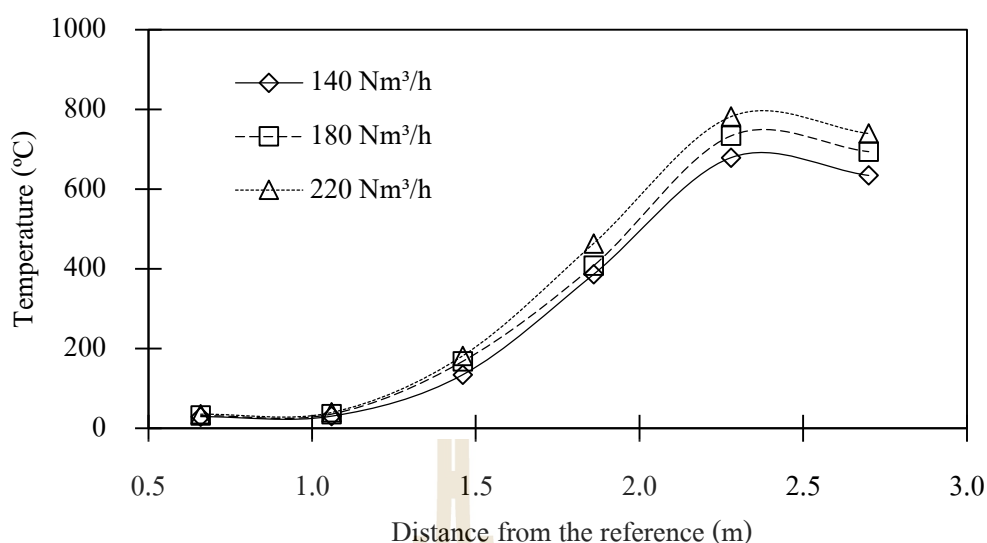
ในการทดสอบเดินระบบจะทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระบบเป็น 3 ระดับ คือ $140 \text{ Nm}^3/\text{hr}$, $180 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ และ $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ตามต้องการได้ ดังนั้น ค่าอัตราการไหลจากการทดสอบจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระดับอัตราการไหลที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เพื่อศึกษา 1) การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ 2) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง 3) ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนและฝุ่น 4) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

การศึกษาอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงและชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่ออธิบายปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ในระยะความสูงต่าง ๆ โดยวัดอุณหภูมิที่ 6 ชั้นความสูง คือ T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , และ T_6 ซึ่งมีความสูงจากระยะอ้างอิง (ความสูงจากด้านบนเตาลงสู่ด้านล่างเตา) เท่ากับ 0.66, 1.06, 1.46, 1.86, 2.28 และ 2.7 m ตามลำดับ โดยอุณหภูมิภายในเตาที่ชั้นความสูงต่างๆจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องทุกๆ 5 นาที

ทั้งนี้ การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile) ของระบบของเตาปฏิกรณ์แบบ Fixed Bed Down Draft Gasification ตามทฤษฎีของปฏิกิริยาอุณหภูมิของระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ ที่ระยะความสูง 0.66 – 1.46 m ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนของเตา กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นช่วงของโซนอบแห้ง (Drying Zone) อุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ คือประมาณ $100\text{-}200^\circ\text{C}$ เป็นช่วงที่ความชื้นในเชื้อเพลิงถูกกำจัดออก ที่ระยะความสูง 1.46 – 1.86 m เป็นโซนของปฏิกิริยา Pyrolysis หรือ Distillation ช่วงอุณหภูมิ $200\text{-}500^\circ\text{C}$ ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ส่วนที่ระยะความสูงระหว่าง 1.86 – 2.28 m เป็นจุดที่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา เป็นหัวใจ Heat Hearth หรือ Hot Zone ที่เกิดจากกระบวนการ Combustion เป็นช่วงที่อาจมีอุณหภูมิสูงถึง $1,100\text{-}1,500^\circ\text{C}$ และที่ระยะความสูงระหว่าง 2.28 – 2.7 m จะเป็นช่วงของ Reduction Zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion Zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง $500\text{-}900^\circ\text{C}$

จากการทดสอบ ได้นำข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยจากการเดินระบบต่อเนื่อง ที่ระยะความสูงต่างๆ $T_1\text{-}T_6$ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ คือ $140 \text{ Nm}^3/\text{hr}$, $180 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ และ $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ มาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตา ตามระยะความสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบ (Pattern) ของ Temperature Profile ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

จากรูปลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นไปในทางเดียวกัน และระดับอุณหภูมิภายในเตาจะสูงขึ้นเล็กน้อยตามอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงระยะความสูง 0.66 – 1.46 m (Drying Zone) ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำไม่เกิน 100 °C และเพิ่มสูงขึ้นเป็นประมาณ 380 °C - 460 °C ที่ระยะความสูง 1.86 m ซึ่งเป็นโซน Pyrolysis จากนั้นเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 680 °C - 780 °C ซึ่งเป็นช่วงระยะความสูงของโซน Combustion และอุณหภูมิในเตาในช่วงระยะความสูง 2.7 m จะมีค่าลดลง เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งโซน Reduction ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 630 °C - 739 °C ซึ่งระดับของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชันสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล และกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะแบบนี้ พบอยู่ในการเดินระบบด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นของวัสดุปานกลางและสูง (303 – 459 kg/m³) (Arjhar et al., 2012)

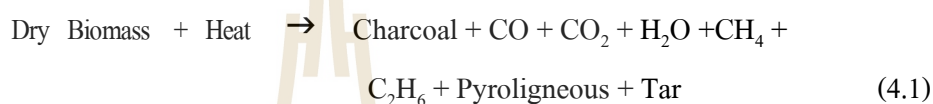
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

จากการทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน(ความชื้นเฉลี่ย 16%w.b.) กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการอ้างอิงและเปรียบเทียบกับ การเดินระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยพบว่า การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลโดยควรได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้

ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง มีผลมาจากอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ตลอดจนองค์ประกอบเชื้อเพลิง โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

Drying Zone คือช่วงที่ความชื้นในเชื้อเพลิงถูกกำจัดออก โดยเกิดที่ระยะความสูง 0.66 – 1.46 ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนของเตา ตามที่ได้กล่าวมา

Pyrolysis Zone หรือ Distillation เกิดที่ระยะความสูง 1.46 – 1.86 m ช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C ในช่วงนี้ถ้าอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์สูงพอเหมาะ โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยของแข็ง ของเหลว สารอินทรีย์ระเหยง่าย และแก๊ส ดังสมการที่ (4.1)

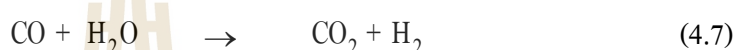
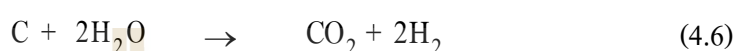
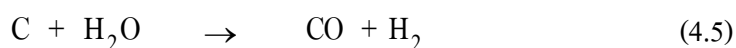


Combustion หรือ Oxidation Zone ในช่วงที่อุณหภูมิที่สุด คือจุดที่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา โดยเกิดที่ระยะความสูง 1.86 – 2.28 m ช่วงนี้จะเป็นหัวใจ Heat Hearth หรือ Hot Zone ที่เกิดกระบวนการ Combustion หรือ Oxidation เมื่อเชื้อเพลิงถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจะถูกไหม้เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3)



Reduction Zone จะเกิดที่ระยะความสูงระหว่าง 2.28 – 2.7 m จะเป็นช่วง มีอุณหภูมิในช่วง 500-700°C ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก Zone ก่อนหน้านี้จะถูกนำมาใช้ เพื่อเป็นสารตั้งต้น โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วง T4-T5 นี้คือปฏิกิริยาของ C กับ CO₂ เกิดเป็น CO ดังสมการที่ (4.4) เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ Boudouard Reaction และจะเกิดปฏิกิริยา Water Shift Reaction โดยเป็นปฏิกิริยาของ C กับ H₂O เกิดเป็น H₂ ดังสมการที่ (4.5) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงที่ต้องการ คือ CO และ H₂ สำหรับกรณีเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง ปริมาณน้ำส่วนเกิน (H₂O) จะทำปฏิกิริยากับ C และ CO ต่อเนื่องทำให้ปริมาณ CO ลดลงและมีปริมาณแก๊ส CO₂ สูงขึ้น ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องควบคุมความชื้นของเชื้อเพลิงให้มีค่าต่ำ ทั้งนี้ H₂ บางส่วนจะ

ทำปฏิกิริยากับ C ทำให้เกิดแก๊สมีเทนซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของการผลิตแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.8) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production หรือ Methanization



คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง จากการเดินระบบ ต่อเนื่อง สำหรับเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน (ความชื้นเฉลี่ย 16%wb) ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ คือ 140 Nm³/hr, 180 Nm³/hr และ 220 Nm³/hr ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งสรุปได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิงจากไม้กระถินยักษ์สับท่อนด้วยการเดินระบบ C-G

ประเภท เชื้อเพลิง	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง						ค่าความร้อน (MJ/Nm ³)
	Flow (Nm ³ /hr)	CO	H ₂	CH ₄	O ₂	CO ₂	
ไม้กระถินยักษ์	137.00	13.55	19.91	2.24	0.44	15.47	4.65
สับท่อน	172.25	15.63	19.89	1.98	0.60	14.30	4.82
(16% w.b.)	221.10	15.65	19.36	2.19	0.33	15.51	4.84

จากการเดินระบบด้วยเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน พบว่า สามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่อัตราการไหลทั้ง 3 ระดับ และได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ โดยพบว่าค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่า 4.65, 4.82 และ 4.84 MJ/Nm³ ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงบางตัว ซึ่งอาจอธิบายได้จากผลการทดสอบของ Son et al. (2011) ซึ่งได้สังเกตการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของแก๊ส

เชื้อเพลิง พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลในช่วง 105 - 211 Nm³/hr (ในทุกชนิดของชีวมวล) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเล็กน้อย แต่อาจมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่าง CO และ CO₂ ซึ่งค่าความร้อนจากการทดสอบดังกล่าวมีค่าเพียงพอสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ เช่น การใช้งานในรูปความร้อนควรมีค่ามากกว่า 4.0 MJ/Nm³ ส่วนกรณีการผลิตไฟฟ้ากับเครื่องยนต์แก๊ส ค่าความร้อนของแก๊สจำเป็นต้องสูงกว่า 4.2 MJ/Nm³ อ้างอิงจาก Quakk et al., (1999)

ในส่วนขององค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ทั้ง 3 ระดับอัตราการไหล มีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยอื่นๆ (Zainal et al. 2002.; Arjham et al. 2012.; Walawender et al. 1985) โดยประกอบไปด้วยแก๊สหลักคือ CO, H₂, CH₄, O₂ และ CO₂ ซึ่งมีค่าเฉลี่ย (% v/v) อยู่ในช่วง 13.55 - 15.65%, 19.36 - 19.91%, 0.33 - 0.60 และ 14.30 - 15.51% ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบแก๊ส นอกเหนือจากที่กล่าวมา คือ N₂ ซึ่งมาจากอากาศและไม่ได้ทำปฏิกิริยา และมีผลรวมขององค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ (CO, H₂ และ CH₄) อยู่ในช่วง 35.7 - 37.5%

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น

การวิเคราะห์องค์ประกอบปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิงจะทำการวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น (Tar and dust) ในแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งได้ผ่านการทำความสะอาดจาก 4 ระบบ คือ 1) Cyclone Collector 2) Water Scrubber 3) Chiller Scrubber และ 4) Fabric Filter ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สที่ระดับสูงขึ้น จะยังมีแนวโน้มของปริมาณการปนเปื้อนของฝุ่นมากขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปมีการปนเปื้อนของอนุภาคขนาดเล็กและฝุ่น เมื่อปรับความเร็วในเส้นท่อเพื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจะมีผลทำให้ดีกรีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น จึงเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กในเตาปฏิกรณ์มากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.6 ปริมาณทาร์และฝุ่นของแก๊สเชื้อเพลิง

สภาพการทดสอบ	อัตราการไหล	ปริมาณ (mg/Nm ³)		
	(Nm ³ /hr)	ทาร์และฝุ่น	ทาร์	ฝุ่น
ไม้กระถินยักษ์สับท่อน	137.00	41.82	2.59	39.23
(16% w.b.)	172.25	57.22	3.01	54.21
C-G	221.10	75.23	4.00	71.23

อย่างไรก็ดีปริมาณทาร์และฝุ่นที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วพบว่า อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ มีปริมาณทาร์และฝุ่นอยู่ในช่วง 41.82 – 75.23 mg/Nm³ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaupp and Goss. (1981); Groeneveld et al. (1983); Reed et al. (1983) ที่ได้สรุปว่าการ

ปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นของเทคโนโลยี Downdraft gasifier โดยทั่วไป จะมีค่าประมาณ 50-500 mg/ Nm³ จึงสรุปได้ว่าคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้(ในแง่ของความสะอาด) มีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

4.2.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency)

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Gas) ในระบบ C-G ตารางที่ 4.7 แสดงผลประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-Gas Efficiency : η_{cg}) ในแต่ละอัตราการไหล ซึ่งสรุปภาพรวมได้ว่า แนวโน้มของประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน ที่ความชื้นเฉลี่ย 16%w.b. จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิ ผลค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ในหัวข้อที่ผ่านมา

ตารางที่ 4.7 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G

ประเภทเชื้อเพลิง	อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิง (Nm ³ /hr)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	อัตราการดึงแก๊สออก (kg/hr)	อัตราการดึงแก๊สออก (%)	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (η_{cg}) (%)
ไม้กระถินยักษ์	137.00	75.55	4.15	5.48	57.99
สับท่อน	172.25	91.40	5.1	5.58	62.43
(16%w.b.)	221.10	102.30	5.5	5.37	71.89

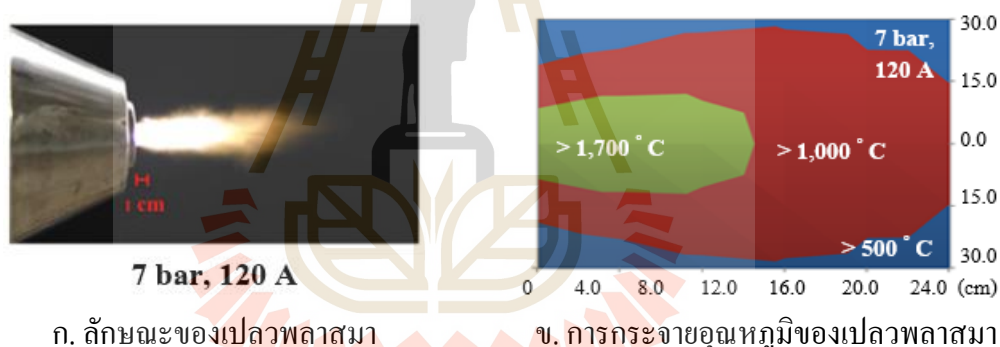
จากผลการทดสอบเดินระบบ ดังกล่าว พบว่า เชื้อเพลิงไม้ถือเป็นเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสมกับระบบแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากสามารถเดินระบบได้ราบเรียบ และพบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในระดับมาตรฐาน โดยเฉพาะที่ระดับอัตราการไหลที่ 220 Nm³/hr ได้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (η_{cg}) เท่ากับ 71.89% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ (Zainal et al., 2002; Arjhar et al., 2012; ทิพย์สุภินทร์, 2556)

4.3 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G)

การศึกษการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์โดยเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification, P-G) โดยการศึกษาในหัวข้อนี้ จะกำหนดปัจจัยการทดสอบเหมือนกับการทดสอบผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional Gasification) คือ ทำการเดินระบบ

โดยใช้เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน ที่ความชื้น 16%w.b. ปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระบบเป็น 3 ระดับ คือ 140 Nm³/hr, 180 Nm³/hr และ 220 Nm³/hr แต่จะใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์คเป็นความร้อนช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted Gasification) ซึ่งในที่นี้เรียกว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (งานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ P-G)

โดยการทดลองกำหนดพลังงานของพลาสมาที่ป้อนเข้าระบบคงที่เท่ากับ 36 kW หรือประมาณ 70% ของกำลังสูงสุดของระบบ (50 kW) เนื่องจากการเดินระบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบพลาสมาอาร์คได้ โดยในการควบคุมระบบพลาสมาทำได้โดยการปรับตั้งค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ที่ชุดควบคุมการส่งกำลัง (Power Supply Unit) เท่ากับ 120 A และ 300 V ตามลำดับ จากนั้นพลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังชุดแปลงแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้เกิดการอาร์คที่หัวพลาสมา เมื่อผ่านอากาศตัวกลางที่มีแรงดัน 7 bar ไปยังอาร์คจะทำให้อากาศตัวกลางแตกตัวเป็นสถานะพลาสมา กลายเป็นเปลวพลาสมาที่มีความร้อนสูง ซึ่งได้ทำการทดสอบการกระจายของอุณหภูมิที่เปลวพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะของพลาสมาอาร์คและอุณหภูมิจากพลาสมาที่การเดินระบบ 36 kW

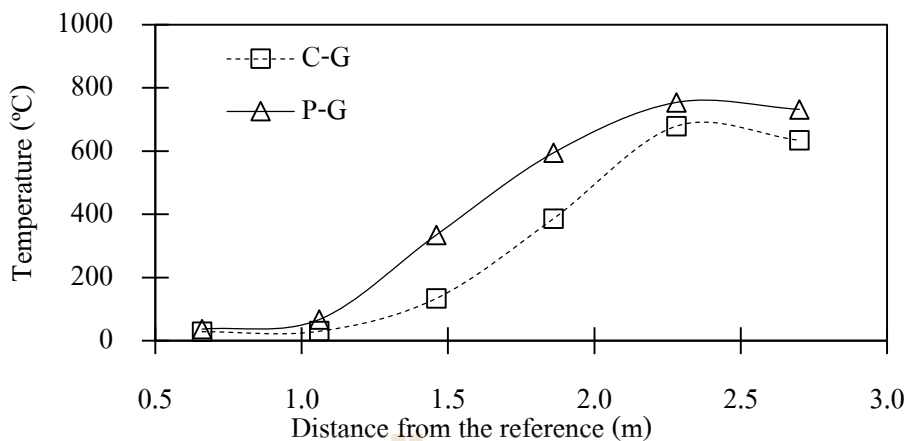
ทั้งนี้ เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และพลังงานสุทธิที่จะได้จากระบบ โดยจะทำการแสดงผลการทดสอบนี้ไปพร้อมกับการวิจารณ์เปรียบเทียบกับผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) ในหัวข้อที่ผ่านมา ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

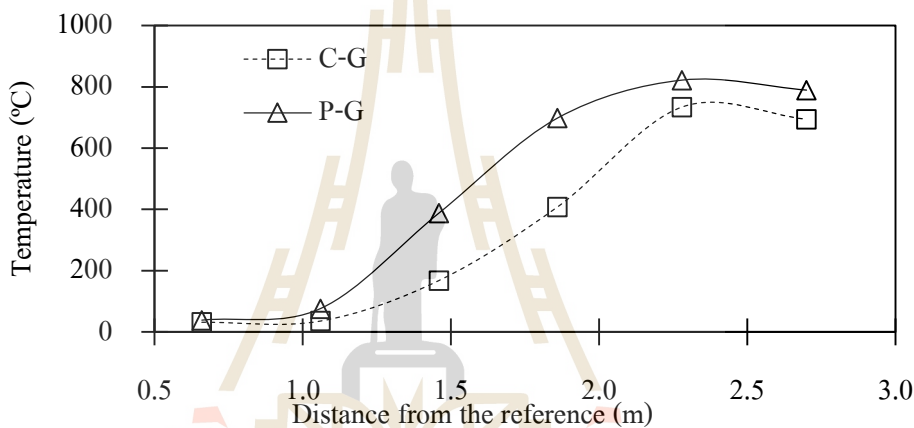
การศึกษาชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่ออธิบายปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อเพิ่มพลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เป็นความร้อนช่วย สามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มความร้อนจากพลาสมาเข้าไปจะส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นอุณหภูมิของระบบ C-G ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันในทุกๆ

อัตราการไหล แต่หากพิจารณาในภาพรวมจะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาปฏิกรณ์ของระบบ P-G จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นช่วงกว้าง(โซนการเผาไหม้กว้างขึ้น) ดังกล่าว เห็นได้ว่าการเพิ่มความร้อนให้กับระบบด้วยพลาสมา (plasma arc) ช่วยให้เกิดการพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ได้มากขึ้น เนื่องจากตำแหน่งที่เพิ่มความร้อนจากพลาสมาอาร์ค คือ ตำแหน่ง Combustion Zone ตามทฤษฎีของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่ระดับนี้จะถูกเรียกว่า Hot Zone หรือ Heat Hearth ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซน Reduction และ โซน Pyrolysis ซึ่งเป็นโซนที่เกิดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ อุณหภูมิที่สูงขึ้น มีผลให้เกิดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ได้ดีขึ้น (Arjhan et al., 2012)

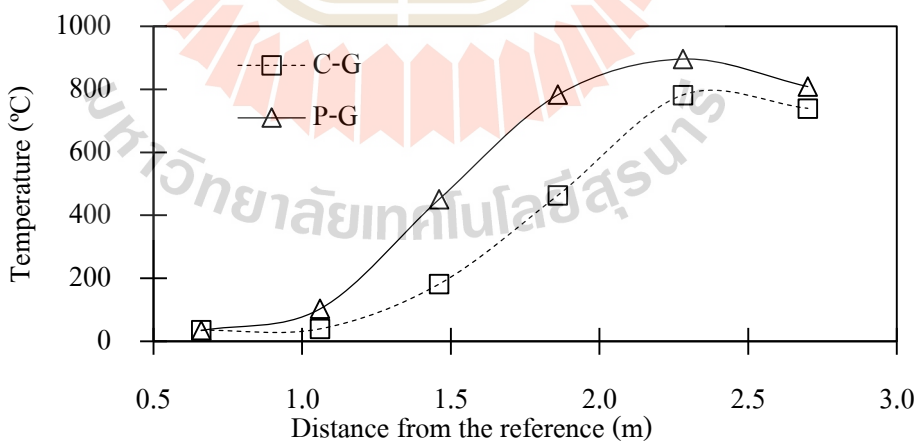




ก. อัตราการไหล 140 Nm³/hr



ข. อัตราการไหล 180 Nm³/hr



ค. อัตราการไหล 220 Nm³/hr

รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile) เปรียบเทียบระหว่างการเดินระบบ C-G กับระบบ P-G

4.3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าระบบ P-G มีองค์ประกอบของแก๊ส CO และ CH₄ เพิ่มขึ้น แต่ในส่วนแก๊ส H₂ พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยสำหรับที่อัตราการไหล 140 Nm³/hr และ 180 Nm³/hr ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน คือ เมื่อมีการเพิ่มพลังงานความร้อนจากภายนอกเข้าไป ทำให้ความร้อนในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้น สามารถเพิ่มสัดส่วนของแก๊สเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นการเพิ่มอัตราการเปลี่ยนรูปคาร์บอนในเชื้อเพลิงให้เป็นแก๊ส CO ได้มากขึ้น (Janajreh et al., 2013) และสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ที่ได้อธิบายว่า อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ที่สูงและพอเหมาะจะเป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิ และการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ใน Reduction zone (Higman & Van der Burgt, 2008; Arjham et al., 2012, 2013)

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจากระบบ C-G และระบบ P-G

ระบบ	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง						ค่าความร้อน (MJ/Nm ³)
	Flow (Nm ³ /hr)	CO	H ₂	CH ₄	O ₂	CO ₂	
C-G (16%w.b.)	137.00	13.55	19.91	2.24	0.44	15.47	4.65
	172.25	15.63	19.89	1.98	0.60	14.30	4.82
	221.10	15.65	19.36	2.19	0.33	15.51	4.84
P-G (16%w.b.)	136.20	17.14	18.75	3.86	0.49	14.30	5.56
	177.75	19.33	19.56	3.00	0.74	12.43	5.61
	216.40	19.34	20.30	3.30	0.61	13.03	5.80

ค่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงของระบบ P-G ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากแก๊ส CO และ CH₄ เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ (Combustible Gas) โดยค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบ C-G โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.56, 5.61 และ 5.80 MJ/Nm³ ตามลำดับอัตราการไหล ซึ่งระดับของค่าความร้อนดังกล่าวนี้ถือว่าอยู่ในระดับที่สูง เนื่องจากการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลแบบแก๊สไหลลง (Downdraft Gasification) โดยทั่วไปจะได้ค่าความร้อนของแก๊สอยู่ในช่วง 4.5 – 5 MJ/Nm³ (Quaak, 1999)

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น

การวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น ในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการเดินระบบ P-G ซึ่ง จะทำการวิเคราะห์ในแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งได้ผ่านการทำความสะอาดจาก 4 ขั้นตอน คือ 1) Cyclone Collector 2) Water Scrubber 3) Chiller Scrubber และ 4) Fabric Filter (ถุงกรอง) ซึ่งผลการศึกษาดังแสดงใน ตารางที่ 4.9 พบว่า ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ

ระบบ C-G คือที่อัตราการไหลของแก๊สสูงขึ้น จะมีแนวโน้มของปริมาณการปนเปื้อนของฝุ่นมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปมีการปนเปื้อนของอนุภาคขนาดเล็กและฝุ่น ดังนั้น เมื่อปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจะเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กในเตาปฏิกรณ์และไหลรวมกันมากับแก๊สเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.9 ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างระบบ C-G และ P-G

สภาพการทดสอบ	อัตราการไหล (Nm ³ /hr)	ปริมาณ (mg/Nm ³)		
		ทาร์และฝุ่น	ทาร์	ฝุ่น
C-G (16%w.b.)	137.00	41.82	2.59	39.23
	172.25	57.22	3.01	54.21
	221.10	75.23	4.00	71.23
P-G (16%w.b.)	136.20	54.50	2.23	52.27
	177.75	65.34	2.76	62.58
	216.40	88.38	3.11	85.27

เมื่อพิจารณาปริมาณทาร์ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบ P-G พบว่ามีปริมาณต่ำกว่าระบบ C-G เล็กน้อย (ประมาณ 8-20 %) อาจเป็นผลจากอุณหภูมิในเตาเฉลี่ยของระบบ P-G ซึ่งสูงกว่าระบบ C-G เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้ไฮโดรคาร์บอนในทาร์ลดลงได้ (อาภาณี, 2538) ซึ่งการกำจัดทาร์ด้วยการพยายามเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาให้สูงขึ้นถือเป็นวิธีการกำจัดแบบ Primary Method แต่ในความเป็นจริงการกำจัดทาร์ที่มีประสิทธิภาพดีและง่ายที่สุด คือการใช้วิธี Secondary Method ซึ่งเป็นการกำจัดทาร์หลังจากที่แก๊สไหลออกจากเตาปฏิกรณ์แล้ว เช่น การใช้น้ำละลาย การใช้วิธีควบแน่น และการใช้ถุงกรอง เป็นต้น (Nakamura et al., 2016) อย่างไรก็ตาม ยังพบว่ามีการวิจัยที่สามารถลดปริมาณทาร์ได้ในปริมาณมากด้วยวิธี Primary Method ซึ่งเป็นเตาปฏิกรณ์แบบแก๊สไหลขึ้น (Updraft Gasifier) โดยทำการติดตั้งหัวพลาสมาที่บริเวณทางออกของแก๊สเชื้อเพลิง มีผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น อีกทั้งแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะไหลผ่านความร้อนจากพลาสมาโดยตรง วิธีการนี้จึงสามารถทำให้องค์ประกอบของทาร์สลายตัวด้วยความร้อนได้ปริมาณมาก จึงมีผลให้ปริมาณทาร์ลดลงเหลือ <math><10 \text{ mg/Nm}^3</math> (Hlina et al., 2006)

ดังนั้น การเพิ่มความร้อนในเตาปฏิกรณ์โดยการติดตั้งหัวพลาสมาที่ตำแหน่งโซนเผาไหม้ (Combustion Zone) สำหรับงานวิจัยนี้ มีผลทำให้ปริมาณทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ลดลงเล็กน้อย และยังมีส่วนในการปรับปรุงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงให้ดีขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณทาร์ที่อยู่ในองค์ประกอบแก๊ส ถือว่าอยู่ในมาตรฐานสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ได้

อ้างอิงจาก Quaaak et al. (1999) ซึ่งแนะนำไว้ว่า ปริมาณทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ ต้องมีค่าไม่เกิน 500 mg/Nm^3 อีกทั้ง Kaupp and Goss. (1981); Groeneveld et al. (1983); Reed et al. (1983) ที่ได้สรุปว่าการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น สำหรับเทคโนโลยี Downdraft gasifier โดยทั่วไป จะมีค่าประมาณ $50\text{-}500 \text{ mg/Nm}^3$

4.3.4 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ C-G และ P-G

จากการทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน ความชื้นเฉลี่ย 16 %w.b. ด้วยระบบ P-G และได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-Gas Efficiency : η_{cg}) และได้แสดงผลเปรียบเทียบกับระบบ C-G ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งสรุปภาพรวมได้ว่า แนวโน้มของประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊ส โดยสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิ ผลค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของระบบ P-G พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับระบบ C-G ในทุกๆอัตราการไหล แม้ว่าระบบ P-G จะมีการเพิ่มพลังงานให้กับระบบด้วยพลาสมาที่ตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่อัตราการไหล $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของระบบ P-G มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 72.66 % ในขณะที่ระบบ C-G มีค่าเท่ากับ 71.89%

ตารางที่ 4.10 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G และระบบ P-G

ระบบ	อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)	อัตราการใช้ เชื้อเพลิง (kg/hr)	อัตราการ ดึงแก๊สออก (kg/hr)	อัตราการ ดึงแก๊สออก (%)	ประสิทธิภาพ การผลิตแก๊ส เชื้อเพลิง (η_{cg}) (%)
C-G (16%w.b.)	137.00	75.55	4.15	5.48	57.99
	172.25	91.40	5.10	5.58	62.43
	221.10	102.30	5.50	5.37	71.89
P-G (16%w.b.)	136.20	82.20	4.60	5.59	57.12
	177.75	100.85	4.35	4.32	62.53
	216.40	109.90	5.50	5.00	72.66

ดังกล่าว จึงได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะด้านการผลิตพลังงาน เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบ C-G กับระบบ P-G สำหรับที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยกรณีการเดินระบบ P-G มีการป้อนพลังงานเข้าระบบคงที่เท่ากับ 36 kW (ประเมินเป็นค่าพลังงานจากพลาสมาอาร์คต่อชั่วโมงได้เท่ากับ $\sim 129.6 \text{ MJ}/\text{hr}$)

ผลการประเมินเป็นพลังงานที่ได้จากระบบ สำหรับระบบ P-G ซึ่งสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่า คือ 5.80 MJ/Nm^3 เมื่อประเมินเป็นค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ จะมีค่าเท่ากับ $1,255.12 \text{ MJ/hr}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบ C-G ประมาณ 17.29% ในขณะที่ระบบ C-G ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเพียง 4.84 MJ/Nm^3 และมีค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เท่ากับ $1,070.12 \text{ MJ/hr}$ อีกทั้งระบบ P-G ยังมีอัตราส่วนพลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Energy Yield) สูงขึ้นประมาณ 9.18% เมื่อเทียบกับระบบ C-G ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าแม้ระบบ P-G จะใส่พลังงานเพิ่มเข้าไปในระบบแต่ยังสามารถคงประสิทธิภาพของระบบได้เท่ากับ 72.66% (ในขณะที่ระบบ C-G มีประสิทธิภาพ 71.89%)

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G

พารามิเตอร์	ระบบ C-G	ระบบ P-G
อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)	221.10	216.40
อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	102.30	109.90
อัตราการดึงเถ้าออก (kg/hr)	5.50	5.50
อัตราการดึงเถ้าออก (%)	5.37	5.00
ระยะเวลาการทำงาน (hr)	4	4
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)	14.54	14.54
พลังงานของเชื้อเพลิงเข้าระบบ (MJ/hr)	1,487.44	1,597.95
พลังงานจากพลาสติก (MJ/hr)	-	129.6
ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (LHV, MJ/Nm^3)	4.84	5.80
พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (MJ/hr)	1,070.12	1,255.12
อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Volume Syngas yield, Nm^3/kg)	2.16	1.97
อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Energy yield, MJ/kg)	10.46	11.42
ประสิทธิภาพของระบบ (%) (Cold-gas Efficiency) (η_{cg})	71.89	72.66
องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์		
CO (%vol)	15.65	19.34
H ₂ (%vol)	19.36	20.30
CH ₄ (%vol)	2.19	3.3
O ₂ (%vol)	0.33	0.61
CO ₂ (%vol)	15.51	13.03
% คาร์บอนคงเหลือ (Yields of carbon residue)	9.55	8.67
คุณภาพของแก๊ส		
ปริมาณทาร์ (mg/Nm^3)	4.00	3.11
ปริมาณฝุ่น (mg/Nm^3)	71.23	85.27
ปริมาณทาร์และฝุ่นรวม (mg/Nm^3)	75.23	88.38

4.4 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูงด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

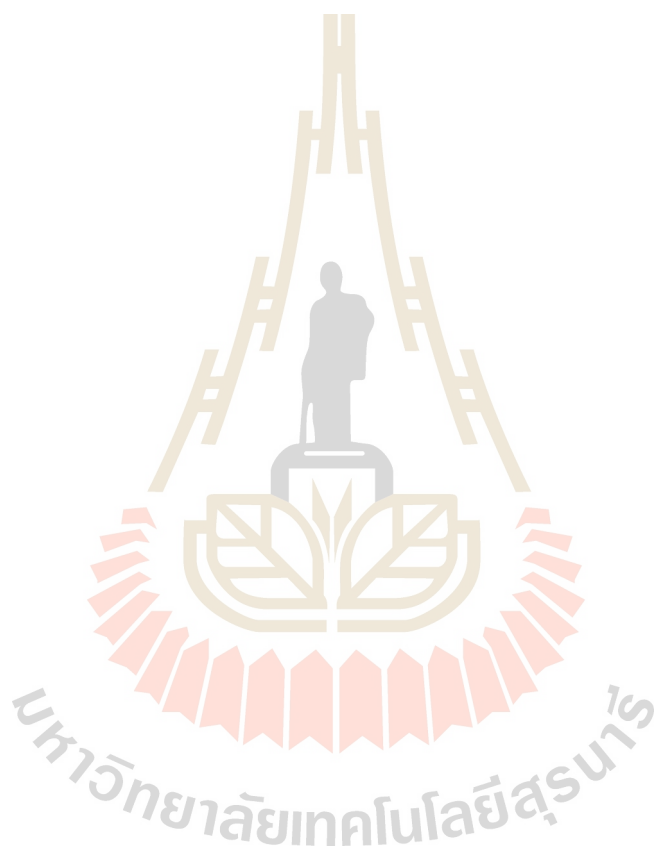
จากการทดสอบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ความชื้น 16 %w.b. ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) ซึ่งความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ระดับ 16 %w.b. นี้ ถือว่ามีความเหมาะสมกับระบบ Downdraft Gasifier ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยอ้างอิงจากข้อมูลของ (Ruiz et al., 2013.; Martinez et al., 2012.; Quak et al., 1999) ซึ่งได้แนะนำว่าเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงควรมีความชื้นไม่เกิน 25%w.b. เนื่องจากผลการวิจัยของ Kumar et al. (2014) พบว่าการเดินระบบ Downdraft Gasifier กับเชื้อเพลิงความชื้นสูง (30 – 45 %w.b.) ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาลดลงต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณน้ำในเชื้อเพลิง ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ที่ระดับความชื้นสูง คือ 28 %w.b. และ 34 %w.b. ด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) โดยสมมติฐานว่า ความร้อนจากพลาสมาจะช่วยรักษาระดับอุณหภูมิในเตาไม่ให้ต่ำเกินไป เพื่อให้ปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้

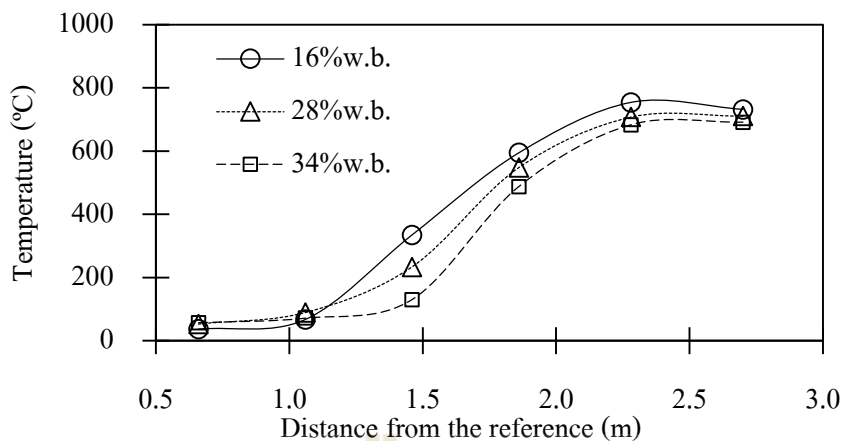
โดยการทดสอบนี้จะทำการเดินระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 3 ระดับ คือ 140 Nm³/hr, 180 Nm³/hr และ 220 Nm³/hr และใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์คเป็นความร้อนช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยกำหนดพลังงานของพลาสมาที่ป้อนเข้าระบบคงที่เท่ากับ 36 kW หรือ 129.6 MJ/hr เพื่อศึกษาสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบ พร้อมทั้งทำการวิจารณ์และเปรียบเทียบกับผลการศึกษาการผลิตพลังงานจากชีวมวลที่ระดับความชื้น 16 %w.b. จากในหัวข้อที่ผ่านมา

4.4.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile)

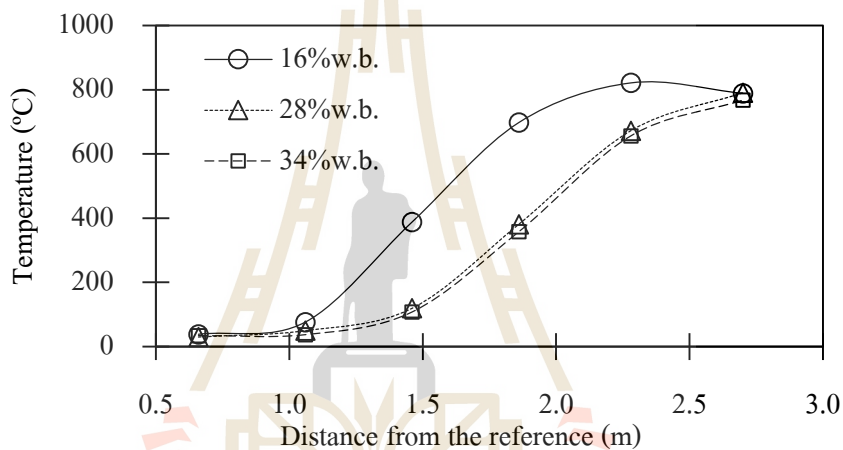
จากการเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ความชื้น 28%w.b. และ 34%w.b. พบว่าระบบสามารถเดินได้ปกติและต่อเนื่อง โดยลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิสำหรับการทดลองนี้ ยังคงรูปแบบเหมือนกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไป และสามารถอธิบายขั้นของการเกิดปฏิกิริยาในเตาตามตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิได้ดังนี้ คือ ตำแหน่ง T1-T2 ช่วงนี้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C ซึ่งแสดงถึงช่วงการอบแห้ง ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนพาและระเหยออกไปในโซนนี้ หลังจากนั้นอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากตำแหน่ง T3-T4 จะเป็นการกลั่นสลายของเชื้อเพลิงแข็ง หรือกระบวนการไพโรไลซิสในช่วงนี้ และมีการปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น กลุ่มแก๊สไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ และทาร์ เหลือไว้เฉพาะส่วนที่เป็นถ่านแข็ง หรือ (Char) ไว้ (Rajvanshi, 1986) ส่วนที่ตำแหน่ง T4-T5

ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศและความร้อนจากพลาสมาอาร์คเพิ่มเข้าไป จะเป็นโซนการเผาไหม้ หรือ Combustion Zone จากนั้นช่วงสุดท้ายของเตาเป็นช่วงที่อุณหภูมิลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งเป็นช่วงที่มีการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สที่ผลิตจากโซนด้านบนกับถ่านที่เหลือ หรือที่เรียกว่า Reduction Zone ทำให้มีการผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ (H₂) โดยทั่วไปอุณหภูมิในช่วงนี้ควรที่จะสูงกว่า 500 °C (Kirubakaran et al., 2009)

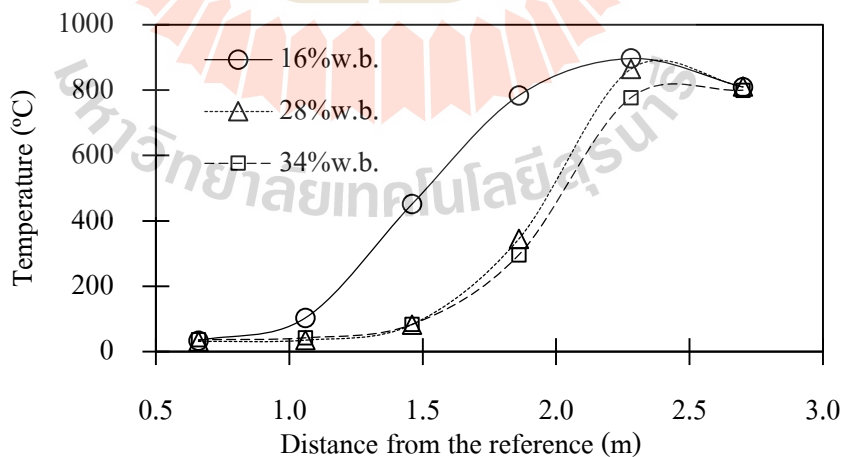




ก. อัตราการไหล 140 Nm³/hr



ข. อัตราการไหล 180 Nm³/hr



ค. อัตราการไหล 220 Nm³/hr

รูปที่ 4.6 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับความชื้น

ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile) สำหรับเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ที่ระดับความชื้นต่างๆ พบว่า ความชื้นมีผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง ความชื้นของเชื้อเพลิงต้องไม่เกิน 25%w.b. ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความชื้นจากชีวมวลที่เพิ่มขึ้นทำให้ระดับของอุณหภูมิภายในเตาตกลง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ระบบสามารถดำเนินต่อไปได้ ซึ่งในความเป็นจริง การป้อนวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงแทบจะเป็นไปไม่ได้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยน้ำมากเกินไปจนทำให้อุณหภูมิไม่สูงเพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้แหล่งความร้อนภายนอกจากพลาสมาทำให้ข้อจำกัดด้านความชื้นของวัตถุดิบลดลงได้

4.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

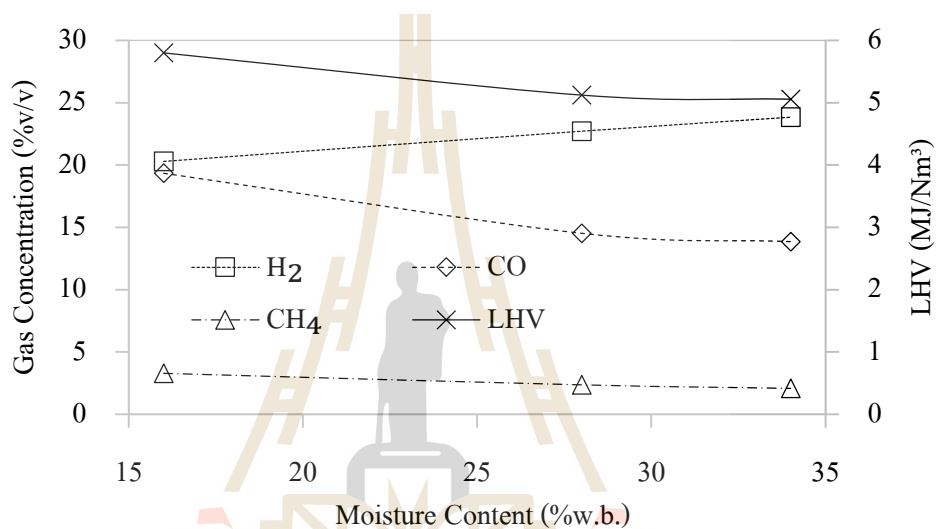
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการเดินระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) ของเชื้อเพลิงที่ความชื้น 16%w.b., 28%w.b. และ 34%w.b. ในแต่ละอัตราการไหล ได้แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจากระบบ P-G

ความชื้น	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง						ค่าความร้อน (MJ/Nm ³)
	Flow (Nm ³ /hr)	CO	H ₂	CH ₄	O ₂	CO ₂	
16%w.b.	136.20	17.14	18.75	3.86	0.49	14.30	5.56
	177.75	19.33	19.56	3.00	0.74	12.43	5.61
	216.40	19.34	20.30	3.30	0.61	13.03	5.80
28%w.b.	137.14	15.09	24.46	2.54	0.98	14.56	5.44
	177.33	15.15	24.02	2.16	0.48	14.82	5.26
	215.50	14.51	22.71	2.37	0.48	15.10	5.12
34%w.b.	138.00	15.12	25.83	2.18	0.61	15.04	5.54
	179.00	13.94	24.40	2.41	0.55	15.25	5.24
	218.00	13.84	23.83	2.08	0.63	14.80	5.05

ผลของความชื้นในเชื้อเพลิงที่มีต่อปริมาณองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ พบว่า ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันในทุกๆอัตราการไหล โดยเฉพาะปริมาณขององค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Gas) คือ CO, H₂ และ CH₄ โดยปริมาณ CO จะมีค่าลดลง ในช่วงประมาณ 2 - 4% และ 22 - 5% เมื่อเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงขึ้นเป็น 28%w.b. และ 34%w.b. ตามลำดับ

สำหรับปริมาณ H_2 พบว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นของเชื้อเพลิง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นไปตามที่คาดไว้เนื่องจากมีน้ำมากพอสำหรับกระบวนการผลิต H_2 โดยพบว่า ปริมาณของ H_2 เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 4 - 5% และ 3 - 7% เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นสูงขึ้น เป็น 28%w.b. และ 34%w.b. การเพิ่มขึ้นและลดลงของ H_2 และ CO ตามความชื้นเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Zainal et al. (2001) และ Sharma (2008) โดยรูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ H_2 , CO, CH_4 และค่าความร้อน ที่อัตราการไหล $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงตามระดับความชื้นเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหล $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$

ดังกล่าว จะเห็นว่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีความแปรปรวนตามความชื้น ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อน (Calorific Value : LHV) ของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าความร้อนจะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น แต่ก็ยังสูงเพียงพอสำหรับนำไปใช้กับเครื่องยนต์แก๊ส ซึ่งต้องการค่าความร้อนอย่างน้อยประมาณ 4.2 MJ/Nm^3 (Quakk et al., 1999) ซึ่งคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงความชื้นสูงยังคงอยู่ในระดับที่ดีได้นั้น น่าจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เป็นหลัก เนื่องจากการใช้พลาสมาทำให้สามารถรักษาระดับอุณหภูมิภายในเตาไม่ให้ต่ำเกินไป อีกทั้งการใช้พลาสมาอุณหภูมิสูงสามารถทำลายพันธะทางเคมีของเชื้อเพลิงทำให้เกิดปริมาณไฮโดรเจน ไอออน และโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นและผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ (Janajreh et al., 2013)

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น

ปริมาณทาร์และฝุ่นมีบทบาทสำคัญต่อการเดินระบบของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ หากมีการปนเปื้อนสูงเกินไปอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบที่นำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้ ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับความชื้นต่างๆ ซึ่งทำการตรวจวัดหลังจากแก๊สผ่านกระบวนการทำความสะอาดมาแล้ว ได้แก่ Water Scrubber, Chiller Scrubber และ Fabric Filter (ถุงกรอง)

ตารางที่ 4.13 ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบ P-G

ระดับความชื้น เชื้อเพลิง	อัตราการไหล (Nm ³ /hr)	ปริมาณ (mg/Nm ³)		
		ทาร์และฝุ่น	ทาร์	ฝุ่น
16%w.b.	136.20	54.50	2.23	52.27
	177.75	65.34	2.76	62.58
	216.40	88.38	3.11	85.27
28%w.b.	137.14	19.40	2.47	16.93
	177.33	36.33	3.84	32.49
	215.50	65.53	2.97	62.56
34%w.b.	138.00	48.16	2.83	45.33
	179.00	64.65	4.21	60.44
	218.00	72.20	3.32	68.88

ปริมาณของทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดสอบเชื้อเพลิงชีวมวล ความชื้นสูงยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ ซึ่งโดยทั่วไป ปริมาณทาร์และฝุ่นที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงจะมีค่าเท่ากับ 50-500 mg/Nm³ (Kaupp and Goss, 1981; Reed et al., 1983) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบ การออกแบบสถานะการทำงาน และวิธีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ (Devi et al., 2003) อีกทั้งประสิทธิภาพการกำจัดทาร์และฝุ่น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปริมาณของทาร์และฝุ่น และอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่เลือกใช้งาน (Phuphuakrat et al, 2010) ในการทดลองครั้งนี้พบว่าระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้สามารถผลิตแก๊สที่มีความสะอาดมากเพียงพอสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า (Bhattacharya et al., 2001)

4.4.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

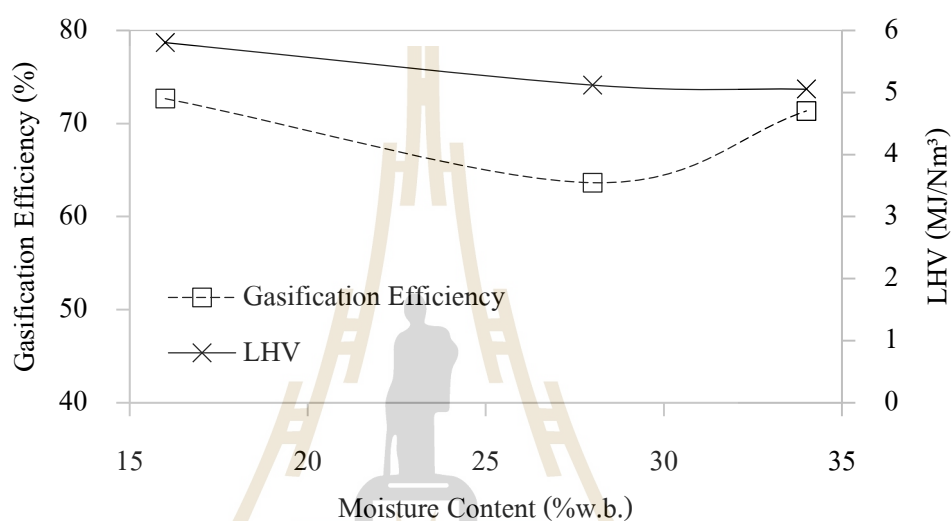
จากการทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน ที่ความชื้นเฉลี่ย 16%w.b., 28%w.b. และ 34%w.b. ด้วยระบบ P-G และได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-Gas Efficiency: η_{cg}) แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่า เมื่อพิจารณาตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น เห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันในทุกๆระดับความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 4.14 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ P-G

ความชื้น	อัตราการไหล แก๊สเชื้อเพลิง (Nm ³ /hr)	อัตราการใช้ เชื้อเพลิง (kg/hr)	อัตราการ คังเต้าออก (kg/hr)	อัตราการ คังเต้าออก (%)	ประสิทธิภาพ การผลิตแก๊ส เชื้อเพลิง (η_{cg}) (%)
16%w.b.	136.20	82.20	4.6	5.59	57.12
	177.75	100.85	4.35	4.32	62.53
	216.40	109.90	5.5	5.00	72.66
28%w.b.	137.14	98	4.4	4.52	56.67
	177.33	118.5	5.15	4.35	59.58
	215.50	132.35	5.5	4.15	63.63
34%w.b.	138.00	95.5	4.75	4.97	65.26
	179.00	120.15	5.25	4.37	65.14
	218.00	129	5.5	4.24	71.34

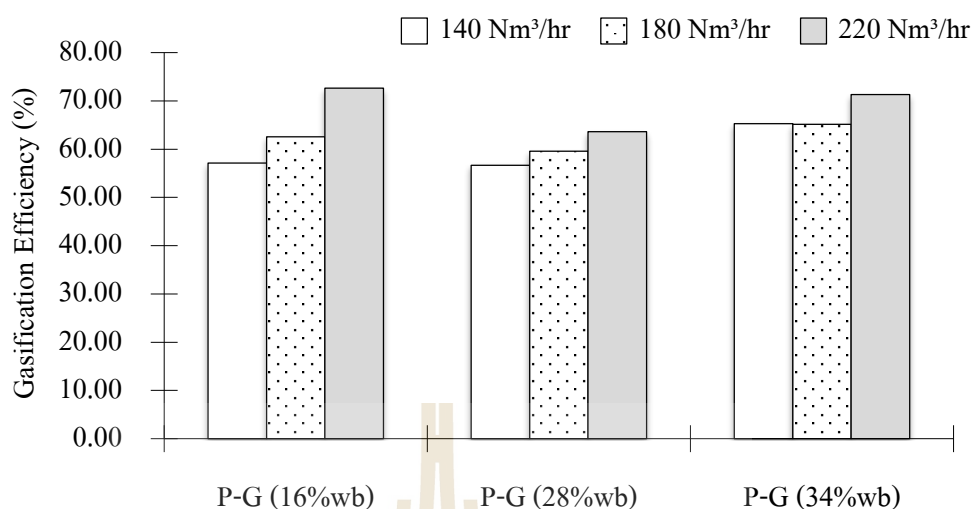
แต่หากพิจารณาผลของความชื้นที่เพิ่มขึ้นในระดับอัตราการไหลเดียวกัน พบว่า เมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้นเป็น 28%w.b. ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สจะมีค่าลดลงเท่ากับ 0.45%, 2.95% และ 9.03% ตามลำดับอัตราการไหล แต่เมื่อเพิ่มระดับความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวลเป็น 34%w.b. พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 140 Nm³/hr และ 180 Nm³/hr จะเพิ่มขึ้น 8.14% และ 2.61% ตามลำดับ ส่วนที่อัตราการไหล 220 Nm³/hr พบว่า ประสิทธิภาพลดลง ประมาณ 1.32% ลักษณะการลดลงแล้วเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพตามความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวล ที่อัตราการไหล 220 Nm³/hr แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งลักษณะเช่นนี้ อาจแตกต่างจากข้อมูลของ Zainal et al. (2002) ซึ่งพบว่าค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สจะลดลงตามความชื้นเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น

ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส ที่ความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวล 34%w.b. อาจเป็นผลมาจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่อน้ำหนักเปียก ที่ใส่เข้าไปในระบบน้อยกว่า เนื่องจากมีส่วนประกอบของความชื้นหรือน้ำเป็นจำนวนมาก อีกทั้งน้ำในเชื้อเพลิงยังมีส่วนในการเพิ่มองค์ประกอบของแก๊ส H_2 ในแก๊สเชื้อเพลิง และยังคงมีค่าความร้อนอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงอยู่ ($> 5 \text{ MJ/Nm}^3$) จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงความชื้นสูงด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพและค่าความร้อนตามระดับความชื้นเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหล $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$

รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน ที่ระดับความชื้นต่างๆ ประกอบด้วย P-G (16%w.b.), P-G (28%w.b.) และ P-G (34%w.b.) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบ P-G (34%w.b.) มีค่าสูงกว่าหรือเทียบเคียงกับระบบอื่นในทุกระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้พลาสมาช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted Gasification) ที่ความชื้นและอัตราการไหลต่างๆ

4.4.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ P-G สำหรับเชื้อเพลิงความชื้นสูง กับระบบ C-G (กรณี : วิเคราะห์รวมพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิง)

จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการผลิตพลังงานจากระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูง (> 25%w.b.) ในการเดินระบบได้ โดยยังคงประสิทธิภาพได้เหนือกว่าหรือใกล้เคียงกับระบบ C-G ซึ่งใช้เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นต่ำ (16%w.b.) อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นต่ำ โดยใช้ระบบ C-G จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการลดความชื้นของเชื้อเพลิง ซึ่งการลดความชื้นอาจทำได้โดยการตากลาน และการใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น

สำหรับการลดความชื้นด้วยวิธีการตากลานยังคงประสบปัญหาทั้งในด้านพื้นที่และฤดูกาล กล่าวคือ การตากลานเพื่อลดความชื้นวัสดุจำเป็นต้องใช้พื้นที่จำนวนมากเพื่อเกลี่ยกองวัสดุให้เป็นชั้นบางเพื่อให้รับรังสีจากแสงอาทิตย์ทั่วถึง แต่หากในช่วงฤดูฝนการตากลานจะไม่สามารถทำได้ ซึ่งอาจแก้ปัญหานี้ได้ด้วยการใช้เครื่องอบแห้ง ซึ่งกระบวนการลดความชื้นที่ได้กล่าวมานี้จำเป็นต้องใช้พลังงาน โดยเฉพาะการใช้เครื่องอบแห้งจำเป็นต้องมีแหล่งเชื้อเพลิงหรือพลังงานความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง เช่น แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นต้น ซึ่งถือเป็นต้นทุนทางด้านพลังงานที่จะต้องใช้ในการกระบวนการผลิตพลังงานจากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ดังนั้น ในหัวข้อนี้ จึงได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตพลังงานเชิงเปรียบเทียบ ระหว่างระบบ P-G ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้น 34%w.b. กับ ระบบ C-G ที่ใช้

เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้น 16%w.b. (วิเคราะห์รวมพลังงานในการอบแห้ง) ที่ระดับอัตราการไหลสูงสุดที่ได้ทำการศึกษาไว้คือ 220 Nm³/hr เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างทั้งสองระบบ เพื่อเป็นข้อมูลทางเลือกในการพิจารณาสำหรับการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวลในอนาคต ดังผลการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงเปรียบเทียบของทั้ง 2 ระบบ ในตารางที่ 4.16

สำหรับค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งชีวมวลที่จะนำมาวิเคราะห์ จะใช้ข้อมูลจากรายงานการวิจัยของ วีรชัย และคณะ(2250) ที่ได้มีการศึกษาเรื่องการอบแห้งเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี ซึ่งทำการทดสอบอบแห้งไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 42%w.b. ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 15%w.b. โดยใช้พลังงานเฉพาะในการระเหยน้ำ (Specific Energy Consumption, SEC) เท่ากับ 13.89 MJ/kg_{evaporated water} ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน

รายการ	ปริมาณ
อัตราการใช้เชื้อเพลิง(ความชื้น 16%w.b.)	102.3 kg/hr
น้ำหนักมวลแห้ง	88.19 kg
น้ำหนักมวลเปียก(ความชื้น 34%w.b.)	133.62 kg
ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออก	31.32 kg (133.62 – 102.3)
SEC (ระบบอบแห้งอ้างอิง)	13.89 MJ/kg _{evaporated water}
พลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้ง	435.04 MJ/hr (13.89 x 31.32)

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ P-G (34%w.b.) กับระบบ C-G (16%w.b.)

พารามิเตอร์	ระบบ C-G	ระบบ P-G
อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)	221.10	218.00
อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	102.30	129.60
อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)	5.5	5.5
อัตราการคั่งเถ้าออก (%)	5.37	4.24
ระยะเวลาการทำงาน (hr)	4	4
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)	14.54	10.92
พลังงานของเชื้อเพลิงเข้าระบบ (MJ/hr)	1,487.44	1,415.23
พลังงานจากพลาสติก (MJ/hr)	-	129.6
พลังงานจากการอบแห้งเชื้อเพลิง (MJ/hr)	435.04	-
ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (LHV, MJ/Nm^3)	4.84	5.05
พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (MJ/hr)	1,070.12	1,100.9
อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Volume Syngas yield, Nm^3/kg)	2.16	1.68
อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Energy yield, MJ/kg)	10.46	8.49
ประสิทธิภาพของระบบ (%) (Cold-gas Efficiency) (η_{cg})	55.62	71.34
องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์		
CO (%vol)	15.65	13.84
H ₂ (%vol)	19.36	23.83
CH ₄ (%vol)	2.19	2.08
O ₂ (%vol)	0.33	0.63
CO ₂ (%vol)	15.51	14.80
% คาร์บอนคงเหลือ (Yields of carbon residue)	9.55	9.36
คุณภาพของแก๊ส		
ปริมาณทาร์ (mg/Nm^3)	3.01	1.56
ปริมาณฝุ่น (mg/Nm^3)	71.23	70.64
ปริมาณทาร์และฝุ่นรวม (mg/Nm^3)	74.24	72.20

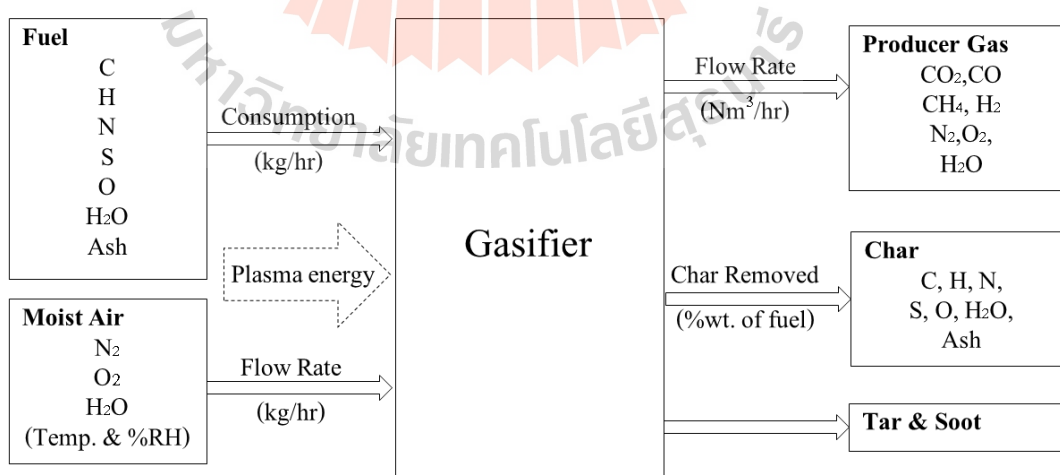
จากผลการวิเคราะห์สมรรถนะของทั้ง 2 ระบบ จะเห็นได้ว่า หากมีการคิดรวมพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าไปในระบบ C-G ด้วย จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบ P-G ได้เปรียบระบบ C-G อย่างเห็นได้ชัด คือ 71.34% (สำหรับระบบ P-G) และ 55.62% (สำหรับระบบ C-G) ดังนั้น หากใช้ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล จะช่วยลดขั้นตอนและพลังงานในกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลได้

4.5 สมดุลมวลสารและพลังงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทำสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันจากที่ได้ทำการทดสอบมาแล้วข้างต้น ซึ่งจะให้เห็นถึงภาพรวมของกระบวนการผลิตในเชิงปริมาณ ประกอบไปด้วย กระแสการไหลของวัตถุดิบ, ผลิตภัณฑ์, ผลพลอยได้ (by-Products), กากของเสีย และพลังงานที่ป้อนเข้า-ออก และพลังงานที่สูญเสียไปจากระบบ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบกระบวนการ การเลือกอุปกรณ์และเครื่องจักร รวมไปถึงการประเมินประสิทธิภาพและปรับปรุงกระบวนการผลิตพลังงาน (Arslan, 2013)

4.5.1 สมมติฐานและข้อมูลของระบบ สำหรับการทำสมดุลมวลสารและพลังงาน

สำหรับระบบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน ด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) ของงานวิจัยนี้ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบแผนภาพปฏิบัติการกล่องดำ (Black Box Operation) เพื่อใช้ในการพิจารณาทำสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพปฏิบัติการกล่องดำ (Black box operation) ของระบบ

โดยการวิเคราะห์สมดุลมวลสารและพลังงานจะใช้ข้อมูลต่างๆที่ได้ทำการตรวจวัดในระหว่างการทดลอง ซึ่งได้เลือกข้อมูลจากการทดลองที่อัตราการไหลแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด คือ 220 Nm³/hr ของแต่ละการทดลองมาทำการวิเคราะห์ พร้อมทั้งกำหนดสมมติฐานและข้อมูลต่างๆ สำหรับการทำให้สมดุลมวลสารและพลังงานดังนี้

1) การคำนวณสมดุลมวลสารและพลังงานจะทำการคำนวณในฐานของน้ำหนักเปียกเชื้อเพลิงเข้าระบบคงที่ 1 kg และคำนวณค่าพลังงานในหน่วยจูล (J)

2) กำหนดให้มีกระแสไหลเข้า 2 กระแส คือ เชื้อเพลิงชีวมวล และอากาศชื้น ส่วนกระแสออก 3 กระแส คือ แก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas), ถ่านชีวมวล (Char) และ น้ำมันดินและเขม่า (Tar & Soot) ซึ่งเป็นปริมาณไม่ทราบค่าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ โดยคิดเป็นปริมาณรวมกันซึ่งอาจสะสมอยู่ในระบบหรือสูญเสียออกนอกระบบ

3) เชื้อเพลิงชีวมวลที่เข้าระบบ คิดเป็นสัดส่วนขององค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ โดยมีความชื้น 3 ระดับ คือ 16%w.b., 28%w.b. และ 34%w.b. และใช้ค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงจากการทดลองในการคำนวณดังตารางที่ 4.17 โดยสัดส่วนองค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 4.18

สำหรับการคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จะทำการคำนวณโดยใช้ปริมาณองค์ประกอบแบบแยกธาตุ และใช้สมการคำนวณค่าความร้อนเชื้อเพลิงชีวมวลของ Sheng and Azevedo (2005) ซึ่งได้พัฒนาสมการหาค่าความร้อนในหน่วย MJ/kg ได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น (error ± 5%) ดังสมการ ($HHV=1.3675 + 0.3137C + 0.7009H + 0.0318O$)

ตารางที่ 4.17 อัตราการใช้เชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 220 Nm³/hr

สภาวะการทดลอง	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)
C-G (16%w.b.)	102.30
P-G (16%w.b.)	109.90
P-G (28%w.b.)	132.35
P-G (34%w.b.)	129.60

ตารางที่ 4.18 ปริมาณองค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิง 3 ระดับความชื้น

องค์ประกอบ	ปริมาณ (% by weight)		
	16%w.b.	28%w.b.	34%w.b.
C	41.33	35.42	32.47
H	5.08	4.36	3.99
O	35.90	30.77	28.21
N	0.39	0.34	0.31
H ₂ O	16.00	28.00	34.00
Ash	1.29	1.10	1.01
S	0.03	0.02	0.02

4) อากาศที่เข้าระบบเพื่อใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เป็นอากาศที่สภาวะแวดล้อม ซึ่งจะมีการเก็บข้อมูลสภาวะอากาศที่ความดันปกติ (1 atm) ประกอบด้วย อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อสำหรับการคำนวณสัดส่วนของ N₂, O₂ และ H₂O ซึ่งเป็นองค์ประกอบของอากาศชื้น (Moist Air) โดยคำนวณสัดส่วนของน้ำในอากาศจากความสัมพันธ์ของความดันไอน้ำอิ่มตัวในอากาศที่อุณหภูมิใดๆ และความสัมพันธ์ $(P_{N_2} + P_{O_2}) + P_{H_2O} = 760 \text{ mmHg}$ จากนั้นคำนวณสัดส่วนของ N₂ และ O₂ ในอากาศชื้นโดยยึดตามสัดส่วนในอากาศแห้ง คือ N₂ = 79% และ O₂ = 21%

อัตราการไหลของอากาศชื้นเข้าระบบ คำนวณจากค่าอัตราการไหลและสัดส่วนไนโตรเจนในแก๊สเชื้อเพลิง และปริมาณไนโตรเจนในอากาศ (79%) โดยตารางที่ 4.19 แสดงค่าอัตราการไหล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม

5) ความร้อนจากพลาสมา จะใช้ในการทำสมดุลพลังงาน สำหรับกระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งพลาสมาจะให้พลังงานคงที่เท่ากับ 36,000 W หรือ 129,600 kJ/hr จากนั้นคำนวณค่าพลังงานของพลาสมาต่อหน่วยน้ำหนักของเชื้อเพลิง (kJ/kg) ด้วยการหารด้วยอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.19 อัตราการไหล อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม

สภาวะการทดลอง	อัตราการไหล (kg/hr)	อุณหภูมิอากาศ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)
C-G (16%w.b.)	173.45	24.5	52.75
P-G (16%w.b.)	153.70	26.75	51.5
P-G (28%w.b.)	158.02	31.25	44.25
P-G (34%w.b.)	159.77	30.75	34.25

6) แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ (Producer Gas) ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph, CG ซึ่งจะเป็นค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (% v/v) และปรับสัดส่วนดังกล่าวตามความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง ดังแสดงในตารางที่ 4.20

การคำนวณค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของแก๊สเชื้อเพลิง คำนวณจากสัดส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบของแก๊ส CO, H₂ และ CH₄ ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 10,100 kJ/kg, 120,000 kJ/kg และ 50,050 kJ/kg ตามลำดับ (Cengel and Boles, 2002)

ตารางที่ 4.20 อัตราการไหลและองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

สภาวะการทดลอง	อัตราการไหล (Nm ³ /hr)	อุณหภูมิ (°C)	องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง (%v/v)						
			CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂
C-G (16%w.b.)	221.10	23	14.33	15.45	2.16	19.12	47.36	1.26	0.32
P-G (16%w.b.)	216.40	22	12.97	19.25	3.28	20.21	43.24	0.43	0.61
P-G (28%w.b.)	215.50	27	15.03	14.45	2.36	22.62	44.65	0.41	0.48
P-G (34%w.b.)	218.00	31	14.65	13.70	2.06	23.59	44.37	1.00	0.62

7) ถ่านไม้ (Char) ถือเป็นผลพลอยได้จากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะถูกลำเลียงออกจากเตาปฏิกรณ์ในขณะที่เดินระบบ โดยจะมีการเก็บข้อมูลน้ำหนักของถ่านไม้และคำนวณเทียบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ (สัดส่วนโดยน้ำหนัก) ดังตารางที่ 4.21

สำหรับการคำนวณค่าความร้อนของถ่านไม้ (Char) ที่เหลือจากกระบวนการ ใช้ค่าความร้อนต่ำ(LHV) ของสาร C และ H₂ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32,800 kJ/kg และ 120,000 kJ/kg ตามลำดับ (Cengel and Boles, 2002)

ตารางที่ 4.21 ปริมาณถ่านไม้และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ

สภาวะการทดลอง	อัตราการใช้ถ่าน (%wt.)	องค์ประกอบธาตุ					
		C	H	N	S	Ash	O
C-G (16%w.b.)	5.37	73.42	2.35	0.64	0.08	5.99	17.51
P-G (16%w.b.)	5.00	71.58	2.35	0.68	0.07	7.61	17.72
P-G (28%w.b.)	4.15	75.38	2.71	0.77	0.05	6.38	14.70
P-G (34%w.b.)	4.24	71.58	2.82	0.71	0.08	9.06	15.75

8) ปริมาณทาร์และเขม่า (Tar and Soot) คือ ปริมาณของมลสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่ได้มีการตรวจวัดไว้และอาจสะสมอยู่ในระบบหรือสูญหายออกนอกระบบโดยไม่สามารถสังเกตได้ ในการคำนวณสมดุลมวลสาร จึงกำหนดให้ปริมาณนี้เป็นปริมาณไม่ทราบค่า

4.5.2 การทำสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบ

การวิเคราะห์สมดุลมวลสารและพลังงาน จะใช้สมมติฐานและข้อมูลจากหัวข้อที่ผ่านมา พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างของระบบ P-G (34%w.b.) ซึ่งในการคำนวณสมดุลมวลสารและพลังงาน จะใช้ค่าคงที่และค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของมวลสารต่างๆของ (Cengel and Boles, 2002)

4.5.2.1 สมดุลมวลสาร (Mass Balance)

การสมดุลมวลสารของระบบนี้ จะพิจารณาจากปฏิบัติการทดลองและทำการดุลมวลสารในรูปแบบปริมาณของธาตุที่เข้าและออกจากระบบ ประกอบด้วย คาร์บอน(C), ไนโตรเจน(N), ไฮโดรเจน(H) และออกซิเจน(O) ดังสมการที่ 4.8 – 4.11 และแสดงสมดุลมวลรวม (Overall Mass Balance) ดังสมการที่ 4.12 และผลการสมดุลมวลสารดังตารางที่ 4.22

$$C (\text{Fuel}) = C (\text{Producer gas}) + C (\text{Char}) + C (\text{Tar\&Soot}) \quad (4.8)$$

$$N (\text{Fuel}) + N (\text{Moist Air}) = N (\text{Producer Gas}) + N (\text{Char}) + N (\text{Tar\&Soot}) \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \text{H (Fuel)} + \text{H (H}_2\text{O of Fuel)} + \text{H (Moist Air)} &= \text{H (Producer Gas)} + \text{H (Char)} \\ &+ \text{H (T\&S)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \text{O (Fuel)} + \text{O (H}_2\text{O of Fuel)} + \text{O (Moist Air)} &= \text{O (Producer Gas)} + \text{O (Char)} \\ &+ \text{O (T\&S)} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \text{Mass (Fuel)} + \text{Mass (Moist Air)} &= \text{Mass (Producer Gas)} + \text{Mass (Char)} \\ &+ \text{Mass (T\&S)} \end{aligned} \quad (4.12)$$



ตารางที่ 4.22 การสมดุลมวลสารของระบบ P-G (34%w.b.)

มวลเข้า (kg)		มวลออก (kg)	
กระแส	ปริมาณ	กระแส	ปริมาณ
สมดุลคาร์บอน (C)			
Fuel	0.3247	Producer Gas	0.2741
		Char	0.0304
		T&S	0.0202
Total	0.3247	Total	0.3247
สมดุลไนโตรเจน (N)			
Fuel	0.0031	Producer Gas\	0.9328
Moist Air	0.9595	Char	0.0003
		T&S	0.0294
Total	0.9626	Total	0.9626
สมดุลไฮโดรเจน (H)			
Fuel	0.0399	PG	0.0431
H ₂ O in Fuel	0.0378	Char	0.0012
Moist Air	0.0020	T&S	0.0354
Total	0.0797	Total	0.0797
สมดุลออกซิเจน (O)			
Fuel	0.2821	Producer Gas	0.5437
H ₂ O in Fuel	0.3022	Char	0.0067
Moist Air	0.2551	T&S	0.2890
Total	0.8394	Total	0.8394
สมดุลมวลรวม (Overall Mass Balance)			
Fuel	0.9898	Producer Gas	1.7938
Moist Air	1.2166	Char	0.0386
		T&S	0.3741
Total	2.2064	Total	2.2064

4.5.2.2 สมดุลพลังงาน (Energy Balance)

การสมดุลพลังงานจะวิเคราะห์จากรายการกระแสเข้าและออกของมวลสารผ่านระบบ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงภาพรวมของพลังงานความร้อนที่เข้า-ออก และสูญเสียออกจากระบบ อีกทั้งสามารถใช้ประเมินค่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของระบบได้ ซึ่งสามารถระบุรายการคำนวณพลังงาน ดังนี้

รายการกระแสเข้า

- 1) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง
- 2) พลังงานจากพลาสติก
- 3) ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ของเชื้อเพลิงและอากาศขึ้น
- 4) เอนทัลปี (Enthalpy) ของไอน้ำในอากาศขึ้น

รายการกระแสออก

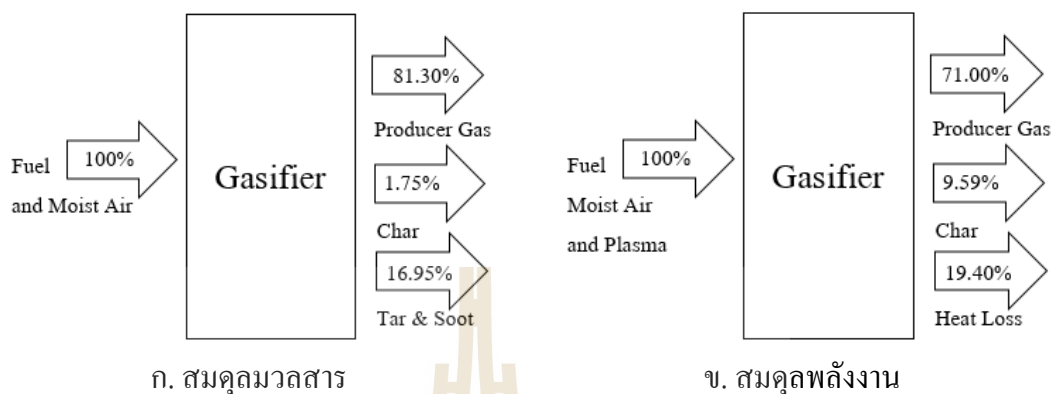
- 1) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง
- 2) ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ของแก๊สเชื้อเพลิง
- 3) เอนทัลปี (Enthalpy) ของไอน้ำในแก๊สเชื้อเพลิง
- 4) ค่าความร้อนของถ่าน (Char)
- 5) ความร้อนสูญเสีย (Heat Loss) คือ ค่าความร้อนที่เป็นส่วนต่างจากการทำสมดุล ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ได้ตรวจวัด ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการสูญเสียออกนอกระบบ เช่น การนำความร้อน (Conduction) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

ตารางที่ 4.23 สมดุลพลังงานของระบบ

พลังงานเข้า	kJ	พลังงานออก	kJ
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	10,839.70	ค่าความร้อนแก๊สเชื้อเพลิง	8,403.01
พลังงานพลาสติก	1,000	ความร้อนสัมผัสแก๊สเชื้อเพลิง	2.17
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงและอากาศ	0.00	เอนทัลปีไอน้ำในแก๊สเชื้อเพลิง	32.83
เอนทัลปีของไอน้ำในอากาศ	44.45	ค่าความร้อนของถ่านไม้	1,140.03
		ความร้อนสูญเสีย	2,306.10
Total	11,884.14	Total	11,884.14
Cold Gasification Efficiency (%)		70.97	

นอกจากนี้สามารถแสดงสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบดังกล่าวได้ ดังรูปที่ 4.11 โดยเป็นการแสดงสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของมวลสารและพลังงานตามกระแสเข้า-ออกระบบ P-G (34%w.b.) ซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงภาพรวมของกระบวนการผลิตพลังงานในเชิงปริมาณได้ดียิ่งขึ้น จากรูป พบว่ามวลสารจากเชื้อเพลิงและอากาศเข้าสู่กระบวนการ และออกจากกระบวนการในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง, ถ่านไม้ และน้ำมันดินและเขม่า (Tar & Soot) เท่ากับ 81.30%, 1.75% และ 16.95% ตามลำดับ ซึ่งในส่วนของกระแสน้ำมันดินและเขม่าที่ไม่ได้ตรวจวัดไว้ และกำหนดให้เป็นปริมาณไม่ทราบค่า จากการทำสมดุลมวลสารทำให้ทราบถึงปริมาณของน้ำมันดินและเขม่ามีค่า 16.95% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับข้อมูลการทำสมดุลมวลสารของระบบแก๊ส

ซีพีเคชั่นของ (Reed and Das, 1988) และ (Nakamura et al., 2016) มีค่าเท่ากับ 7-12% และ 23% ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 แผนภาพสมดุลมวลสารและพลังงาน

สำหรับสมดุลพลังงานของระบบ พบว่า ระบบสามารถแปรสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) ได้ 71.00% และมีกากของแข็ง คือ ถ่านไม้ (Char) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการคิดเป็นพลังงาน 9.59% ส่วนที่เหลือคือพลังงานที่สูญเสียไปจากระบบ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบ เช่น การนำความร้อนผ่านผนังเตาและระบบท่อแก๊สเชื้อเพลิง การเสียความร้อนจากระบบทำความสะอาดแก๊ส เป็นต้น

ตารางที่ 4.24 ผลการสมดุลมวลสาร โดยรวมของระบบที่อัตราการไหล 220 Nm³/hr

ระบบ	มวลเข้า		มวลออก			Total
	Fuel	Moist Air	PG	Char	T&S	
C-G (16%w.b.)	0.9871	1.6715	2.4074	0.0505	0.2007	2.6585
P-G (16%w.b.)	0.9871	1.3765	2.1457	0.0462	0.1716	2.3635
P-G (28%w.b.)	0.9889	1.1730	1.7605	0.0389	0.3625	2.1619
P-G (34%w.b.)	0.9898	1.2166	1.7938	0.0386	0.3741	2.2064

ตารางที่ 4.25 ผลการสมดุลพลังงานของระบบที่อัตราการไหล 220 Nm³/hr

ระบบ	พลังงานเข้า (kJ)			พลังงานออก (kJ)			Total	$\eta_{eg}(\%)$
	Fuel	Moist Air	Plasma	PG	Char	Heat loss		
C-G (16%w.b.)	14,822.11	66.17	0.00	10,375.71	1,446.71	3,065.87	14,888.28	69.57
P-G (16%w.b.)	14,822.11	60.50	1,179.25	11,378.29	1,315.89	3,367.68	16,061.86	71.00
P-G (28%w.b.)	12,167.17	57.20	979.22	8,306.12	1,162.88	3,734.59	13,203.59	63.05
P-G (34%w.b.)	10,839.70	44.45	1,000.00	8,438.01	1,140.03	2,306.10	11,884.14	70.97

ตารางที่ 4.24 และ ตารางที่ 4.25 แสดงผลการสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบที่อัตราการไหล 220 Nm³ เนื่องจากเป็นอัตราการไหลที่ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละการทดลอง และจากผลการวิเคราะห์สมดุลมวลสารและพลังงาน พบว่า ค่าประสิทธิภาพของระบบ C-G (16%w.b.), P-G (16%w.b.), P-G (28%w.b.) และ P-G (34%w.b.) มีค่าเท่ากับ 69.57%, 71.00%, 63.05% และ 70.97% ตามลำดับ ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพจากการคำนวณโดยวิธีสมดุลมวลสารและพลังงาน มีค่าใกล้เคียงกับที่ประเมินไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 2% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากการตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าต่างๆ โดยเครื่องมือวัด Reed and Das (1988)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

5.1.1 การพัฒนาระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G)

พลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Torch) ชนิด DC Plasma Torch ขนาด 50 kW ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ เตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed Bed Downdraft Gasifier) โดยได้มีการปรับเปลี่ยนระบบอย่างเหมาะสมสำหรับการนำหัวพลาสมาอาร์คไปใช้งานกับเตาปฏิกรณ์ เพื่อให้สามารถเดินระบบต่อเนื่องได้ ซึ่งหัวพลาสมาอาร์คถูกติดตั้งบริเวณโซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สรุปได้ว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้พลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนช่วย (Plasma-Assisted Gasification) ระดับต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงกับการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

จากการทดสอบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ความชื้น 16%w.b. โดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และ ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบถึงผลของการเพิ่มความร้อนเข้าไปในระบบด้วยพลาสมา สรุปได้ว่า

1) อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ C-G และมีลักษณะเหมือนกันในทุกๆ อัตราการไหล โดยพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยในเตาปฏิกรณ์ของระบบ P-G จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นช่วงกว้าง (โซนการเผาไหม้กว้างขึ้น) ดังกล่าว เห็นได้ว่าการเพิ่มความร้อนให้กับระบบด้วยพลาสมา (Plasma Arc) ช่วยให้เกิดการพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ได้มากขึ้น

2) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบ P-G พบว่า มีองค์ประกอบของแก๊ส CO และ CH₄ เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพลังงานความร้อนจากภายนอกเข้าไป ทำให้ความร้อนในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงและการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ และทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูงขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.56, 5.61 และ 5.80 MJ/Nm³ ตามลำดับอัตราการไหล ซึ่งระดับของค่าความร้อนดังกล่าวนี้ถือว่าอยู่ในระดับที่สูง เนื่องจากการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

จากชีวมวลแบบแก๊สไหลลง(Downdraft Gasification) โดยทั่วไปจะได้ค่าความร้อนของแก๊สอยู่ในช่วง 4.5 – 5 MJ/Nm³

3) ปริมาณทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบ P-G มีค่าอยู่ในช่วง 2.23 – 3.11 mg/Nm³ ซึ่งมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับระบบ C-G (ประมาณ 8-20%) ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาของระบบ P-G สูงกว่าระบบ C-G โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้มีผลทำให้ไฮโดรคาร์บอนในทาร์ลดลงได้ ปริมาณทาร์ดังกล่าว ถือว่าอยู่ในมาตรฐานสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ปริมาณทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ ต้องมีค่าไม่เกิน 500 mg/Nm³)

4) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-Gas Efficiency: η_{cg}) ของระบบ P-G พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับระบบ C-G ในทุกๆอัตราการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่อัตราการไหล 220 Nm³/hr ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของระบบ P-G มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 72.66% ในขณะที่ระบบ C-G มีค่าเท่ากับ 71.89% ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าแม้ระบบ P-G จะใส่พลังงานเพิ่มเข้าไปในระบบแต่ยังสามารถคงสมรรถนะของระบบให้ใกล้เคียงหรือดีกว่าระบบ C-G ได้

5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันกับเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูง

จากการทดสอบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ระดับความชื้นปกติ (16%wb) และที่ระดับความชื้นสูง คือ 28%w.b. และ 34%w.b. ด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) โดยทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 3 ระดับ คือ 140 Nm³/hr, 180 Nm³/hr และ 220 Nm³/hr และใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์คเป็นความร้อนช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยพลังงานของพลาสมาที่ป้อนเข้าระบบคงที่เท่ากับ 36 kW หรือ 129.6 MJ/hr สรุปได้ดังนี้

1) ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูง ยังคงรูปแบบเหมือนกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไป โดยพบว่า ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระดับของอุณหภูมิภายในเตาตกลง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ระบบสามารถดำเนินต่อไปได้ ซึ่งในความเป็นจริง การป้อนวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงแทบจะเป็นไปไม่ได้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยน้ำมากเกินไปจนทำให้อุณหภูมิไม่สูงเพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังนั้น การใช้แหล่งความร้อนภายนอกจากพลาสมาทำให้ข้อจำกัดด้านความชื้นของวัตถุดิบลดลงได้

2) ปริมาณองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มีการเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะปริมาณขององค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Gas) คือ CO, H₂ และ CH₄ โดยปริมาณ CO จะมีค่าลดลง ในช่วงประมาณ 2 - 4% และ 2 - 5% เมื่อ

เชื้อเพลิงมีความชื้นสูงขึ้นเป็น 28%w.b. และ 34%w.b. ตามลำดับ และสำหรับปริมาณ H_2 พบว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในเชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณน้ำ ในรูปของความชื้นมากพอสำหรับกระบวนการผลิต H_2 โดยพบว่าปริมาณของ H_2 เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง ประมาณ 4 - 5% และ 3 - 7% เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นสูงขึ้นเป็น 28%w.b. และ 34%w.b. (เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระดับความชื้น 16%w.b.)

3) ปริมาณของทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดสอบเชื้อเพลิงชีวมวล ความชื้นสูง พบว่า ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ ซึ่ง โดยทั่วไปปริมาณทาร์และฝุ่นที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงจะมีค่าเท่ากับ 50-500 mg/Nm^3 และเพียงพอสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

4) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-Gas Efficiency: η_{cg}) ที่ระดับ ความชื้นชีวมวล 28%w.b. มีค่าน้อยกว่าที่ความชื้น 16%w.b. เท่ากับ 0.45%, 2.95% และ 9.03% ตามลำดับอัตราการไหล แต่สำหรับผลการทดสอบกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้น 34%w.b. พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 140 Nm^3/hr และ 180 Nm^3/hr เพิ่มขึ้น 8.14% และ 2.61% ตามลำดับ ส่วนที่อัตราการไหล 220 Nm^3/hr พบว่าประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย ประมาณ 1.32%

5) จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ P-G สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้น สูง (34%w.b.) เปรียบเทียบกับระบบ C-G (16%w.b.) ซึ่งคิดรวมพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง เชื้อเพลิงจากความชื้น 34%w.b. ให้เหลือ 16%w.b. (โดยใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (Specific Energy Consumption, SEC) เท่ากับ 13.89 $MJ/kg_{evaporated\ water}$) พบว่า ประสิทธิภาพของ ระบบ P-G ได้เปรียบระบบ C-G อย่างเห็นได้ชัด คือ 71.34% (สำหรับระบบ P-G) และ 55.62% (สำหรับระบบ C-G) ดังนั้น หากใช้ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีว มวล จะช่วยลดขั้นตอนและพลังงานในกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลได้

5.1.4 การศึกษาสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบ

จากการวิเคราะห์สมดุลมวลสารและพลังงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมา แก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งทำให้เห็นถึงภาพรวมของกระบวนการผลิตในเชิงปริมาณ ประกอบไปด้วย กระแส การไหลของวัตถุดิบ, ผลิตภัณฑ์, ผลพลอยได้ (by-Products), กากของเสีย และพลังงานที่ป้อนเข้า- ออก และพลังงานที่สูญเสียไปจากระบบ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการ ออกแบบกระบวนการ การเลือกอุปกรณ์และเครื่องจักร รวมไปถึงการประเมินประสิทธิภาพและ ปรับปรุงกระบวนการผลิตพลังงาน

โดยจากการวิเคราะห์สมดุลมวลสารและพลังงานของระบบ P-G (34%w.b.) สำหรับการสมดุลมวลสารทำให้เห็นว่า ปริมาณมวลสารของเชื้อเพลิงและอากาศ เมื่อเข้าสู่ระบบ

กระบวนการแปรรูปพลังงานจะได้ปริมาณสัดส่วนของมวลสารขาออก ประกอบด้วย แก๊สเชื้อเพลิง, ถ่านไม้ และทาร์และเขม่า เท่ากับ 81.30%, 1.75% และ 16.95% ตามลำดับ

สำหรับสมดุลพลังงาน จะเห็นได้ว่า ระบบสามารถเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปพลังงานแก๊สเชื้อเพลิงได้เท่ากับ 71.00%, พลังงานในถ่านไม้ 9.59% และพลังงานที่สูญเสียออกนอกระบบ 19.40%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยนี้ยังขาดการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ ในรูปแบบของการวิเคราะห์ทางการเงินและการลงทุน ในแง่ของการนำพลาสมาความร้อนมาใช้ร่วมกับกระบวนการผลิตพลังงานจากชีวมวลความชื้นสูง โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

2) เทคโนโลยีระดับต้นแบบพลาสมาอาร์คความร้อน สำหรับนำมาใช้กับระบบเผาไหม้ ยังไม่มีการพัฒนาและผลิตใช้ได้เองภายในประเทศ เทคโนโลยีนี้ ยังถือเป็นองค์ความรู้เฉพาะ (Know-how) ของผู้พัฒนาเทคโนโลยีซึ่งมีเฉพาะในต่างประเทศ และมีต้นทุนที่สูงมาก ดังนั้นควรมีการส่งเสริมสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สำหรับนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

3) กระบวนการผลิตพลังงานจากชีวมวลความชื้นสูง โดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ถือเป็นอีกทางเลือกสำหรับการผลิตพลังงานจากชีวมวล ซึ่งควรมีการศึกษาและพัฒนาต่อยอด เนื่องจากสามารถลดขั้นตอนและลดการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงได้

4) การใช้ความร้อนจากพลาสมาในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อศึกษาการลดปริมาณทาร์ในแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นวิธีการกำจัดทาร์แบบ Primary Method คือ การปรับปรุงกระบวนการหรือปฏิกิริยาภายในเตาปฏิกรณ์เท่านั้น หากมีการศึกษาการกำจัดทาร์โดยใช้พลาสมาความร้อนแบบ Secondary Method ซึ่งหมายถึงความถึงการศึกษานำความร้อนจากพลาสมาไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแก๊สที่ออกจากเตาปฏิกรณ์ จะทำให้ได้ผลการศึกษาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน. (2553). รายงานประจำปี 2553 กระทรวงพลังงาน. 270 หน้า.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2552). ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย

[ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content
&view=article&id=130:2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68](http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130:2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68).

กัญญา บุญเกียรติ. (2542). เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 368 หน้า

ณัฐ วรยศ, ทะนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, นคร ทิพย์วาศ์, ณัฐนี วรยศ, ณัฐวุฒิ ดุษฎี, ชูรัตน์ ชารรัตน์ และอดิพงษ์ นันทพันธุ์. (2551). การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าระดับชุมชนโดยใช้พลังงานจากไม้โตเร็ว. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, ปกัศ ชนะโรค และ วีรัชย์ อัจหาญ. (2551). การศึกษามลพิษและของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 188-189.

ทิพย์สุภินทร์ หินชุย. (2556). การศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร. (2555). เทคโนโลยีการตัดด้วยลำอาร์คพลาสมา[ออนไลน์]. ได้จาก: <https://sites.google.com/site/powermut/home/articles/thekhnoloyikartadlohawylaxarkhphlasma>.

นคร ทิพย์วาศ์. (2553). เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ. 256 หน้า

บริษัท กรีนเอ็นเนอร์ยีเน็ทเวิร์ค จำกัด. (2555). มาตรการพลังงานทดแทน : การผลิตพลังงานจากชีวมวล[ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.greenenergynet.net/tec_Biomass.html.

ปริญ คงกระพันธ์ และนคร ทิพย์วาศ์. (2552). การพัฒนาหัวเผาพลาสมาความร้อนเพื่อการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 16 (1) : 19-27.

- พิชญ พูลเจริญศิลป์ และอวิรุทธิ์ โปธิชัย. (2548). แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยสัญญาณความถี่สูง. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- เพ็ญศรี ประมขกุล. (2543). การเกิดอนุภาคขนาดใหญ่จากเครื่องกำเนิดไอออนชนิดเอ็ม อี วี วี เอ เมื่อใช้ทองแดงเป็นแคโทด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วีรัชย์ ออาจหาญ และคณะ. (2550). การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน (ระยะที่2). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- วีรัชย์ ออาจหาญ, นิวัฒน์ คงกะพี้, กฤษกร รับสมบัติ, ปกัศ ชนะโรค และ ทิพย์สุภินทร์ หินชูช. (2551). การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน การประเมินประสิทธิภาพและผลกระทบด้านมลพิษ. วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. ปีที่ 40 เล่มที่ 2.
- วรรณช แจงสว่าง. (2553). พลังงานหมุนเวียน. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 247 หน้า.
- ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน. (2555). สถานการณ์พลังงานไทย ปี 2554. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 25 หน้า.
- สุธรรม ปทุมสวัสดิ์. (2549). ระบบผลิตแก๊สชีวมวลขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้า. ระบบกำเนิดก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลและขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงาน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. หน้า 109-119.
- อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. (2538). การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทสาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Anis, S. and Zainal, Z. A. (2011). Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal method: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 15: 2355-2377.
- Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2012). Evaluation of Energy Production from Different Biomass Feedstock Using a Pilot Scale Downdraft Gasifier. **Biobase Materials and Bioenergy**. 6, 1-11.
- Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2013). Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier. **Energy & Fuels**. 27(1) : 229-236.

- Arslan, C. (2013). **Material and Energy Balance [On-line]**. Available:
<http://www.cuneytarслан.com/material-energy-balance>.
- Babu, B.V., Chaurasia, A.S. (2004). Pyrolysis of biomass: improved models for simultaneous kinetics & transport of heat, mass, and momentum. **Energy Conversion and Management**. 45: 1297-1327
- Bang, U. C., Hong, Y. C., Cho, C. S. and Yi, J. W. (2006). Methane - augmented microwave plasma burner. **IEEE Transaction on Plasma Science**. 34(5) : 1751 – 1756.
- Belgiorno, V., Feo, G. D., Rocca, C. D. and Napoli, R. M. A. (2003). Energy from gasification of soild wastes. **Waste Management** 23: 1-15.
- Bhattacharya, S. C., Hla, S. S. and Pham, H. L. (2001). A study on a multi-stage hybrid gasifier-engine system. **Biomass and Bioenergy**. 21(6): 445-460.
- Bhattacharya, S. C., Abdul Salam, P., Pham, H. L., Ravindranath, N. H. (2003). Sustainable biomass production for energy in selected Asian countries. **Biomass and Bioenergy** 25: 471-482.
- Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., Joost van der Mullen. (2002). **Review: Gas discharge plasma and their applications. Spectrochimica Acta Part B**. 57: 609-658.
- Bronson, B., Gogolek, P., Mehrani, P. and Preto, F. 2016. Experimental investigation of the effect of physical pre-treatment on air-blown fluidized bed biomass gasification. **Biomass and Bioenergy** 88: 77-88.
- Cengel, Y. A. and Boles, M. A. (2002). **Thermodynamics: An Engineering Approach.**, McGraw-Hill, New York, United State of America.
- Chen, G., Anddries, J., Luo, Z., and Spilethoff. (2003). Biomass pyrolysis/gasification for product gas Production: the overall investigation of parametric effect. **Energy Conversion & Management**. 44:1875-1884.
- Chotchutima, S., Tudsri, S., Kangvansaichol K. and Sripichitt, P. (2016). Effects of sulfur and phosphorus application on the growth, biomass yield and fuel properties of leucaena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) deWit.) as bioenergy crop on sandy infertile soil. **Agriculture and Natural Resources**. 50: 54-59.
- Devi, L., Ptasinski, K. J., Janssen, F.J.J.G. (2003). A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass and Bioenergy**. 24(2):125-140.

- Diaz, G., Sharma N., Leal-Quiros, E. and Munoz-Hernandez A. (2015). Enhanced hydrogen production using steam plasma processing of biomass: Experimental apparatus and procedure. **International Journal of Hydrogen Energy**. **40**: 2091 – 2098.
- Dogru, M. (2000). Fixed Bed Gasification of Biomass. Ph.D. **thesis, University of Newcastle, United Kingdom.**
- Du, C., et al. (2015). Gasification of corn cob using non-thermal arc plasma. **International Journal of Hydrogen Energy**. **40**: 12634 -12649.
- Earp, D.M. (1988). The Gasification of Biomass in a Downdraft Reactor” **Ph.D. Thesis, Chemical Engineering Department, Aston University, UK.**
- Energy Information Administration. (2012). **Short-Term Energy Outlook [On-line]**. Available: http://www.eia.gov/forecasts/steo/pdf/steo_full.pdf
- Faaij A. (2006). Modern biomass conversion technologies. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**. **11**: 343-375.
- George A. (2005). **Plasma arc heating - an overview [On-line]**. Available: <http://www.hdrpower.com/app/1001.asp>
- Groeneveld, M. J., Gellings, P. E. and Hos, J. J. (1983). Production of a tar free gas in an annular cocurrent moving bed gasifier. **Energy from biomass and wastes**.
- Han, J., and Kim H. (2008). The reduction and control technology of tar during biomass gasification/ pyrolysis: **An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews**. **12(2)**: 397-416.
- Hakansson, K (2007). Torrefaction and Gasification of Hydrolysis Residue. **MSc Thesis. Umea Institute of Technology.**
- Higman, C and Van der Burgt, M. (2008). Gasification (2nd ed). **Elsevier, Oxford OX2 8DP, UK.**
- Hinsui, T., Arjhan, W. and Liplap, P. (2014). Plasma – assisted gasification of rejected waste from MBT plant for syngas production. **Suranaree J. Sci. Technol.** **22(2)**: 183-196.
- Hlina, M., Hrabovsky, M., Kopecky, V., Konrad, M. and Kavka, T. (2006). Plasma gasification of wood and production of gas with low content of tar. **Czechoslovak Journal of Physics**. **56**: B1179-B1184.
- Hlina, M., Hrabovsky, M., Kavka, T. and Konrad, M. (2014). Production of high quality syngas

- from argon/water plasma gasification of biomass and waste. **Waste Management**. **34**: 63 – 66.
- Hur, M., Lee, C. M. and Hong, S. H. (2002). Development of a transferred plasma torch for the efficient vitrification treatment for hazardous wastes. **American Physical Society, 55th Gaseous Electronic Conference, Minneapolis, MN, Meeting ID GEC02, abstract#GTP.090.**
- Janajreh, I., Raza, S. S., Valmundsson, A. S. (2013). Plasma gasification process: Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification. **Energy Conversion and Management**. **65(0)**:801-809.
- Kaupp, A. and Goss, J. R. (1981). State of art for small scale (50 kW) to gas producer-engine systems. **Final Report to the USDA USFS on Contract No. 53-319R-0-141, University of California, Davis.**
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., Subramanian, P. (2009). **A review on gasification of biomass. Renewable and Sustainable Energy/Review**, **13(1)**:179-186.
- Kumar, H., Baredar, P., Agrawal, P. and Soni, S. C. (2014). Effect of moisture content on gasification efficiency in downdraft gasifier. **IJSET. Volume No.3, Issue No.4**: 411-413.
- Lapa, N., Oliveira, J. F. S., Camacho, S. L. and Circeo, L. J. (2002). An ecotoxic risk assessment of residue materials produced by the plasma pyrolysis/vitrification (PP/V) process. **Waste Management**. **22(3)**: 335-342.
- Lemmens, B., Elslander, H., Vanderreydt, I., Peys, K., Diels, L., Oosterlinck, M. and Joos, M. (2007). Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams. **Waste Management**. **27(11)**: 1562-1569.
- Martinez. J. D., Mahkamov, K., Andrade, R. V. and Lora, E. E. S. (2012). Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. **Renewable Energy**. **38**:1-9.
- Minutillo, A., Perna, A. and Di Bona, D. (2009). Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant. **Energy conversion and management**. **50**, 2837-2842.
- Moon, J. H., Han, J. G. and Kim, Y. J. (2005). Performance of an atmospheric plasma torch with

- various inlet angles. **Surface & Coatings Technology**. **193**: 94-100.
- Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D. (2006). Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis. **Energy conversion and management**. **47**: 1723-1737.
- Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D. (2008). Solid waste plasma gasification: Process development and energy optimization. **Energy conversion and management**. **49**, 2264-2271.
- Nakamura, S., Kitano, S. and Yoshikawa, K. (2016). Biomass gasification process with the tar removal technologies utilizing bio-oil scrubber and char bed. **Applied Energy**. **170**: 186-192.
- Nowell, G. P. (1999). The Promise of Methanol Fuel Cell Vehicles. **American Methanol Institute. State University of New York at Albany**.
- Oost, G., et al. (2009). Pyrolysis/gasification of biomass for synthetic fuel production using a hybrid gas-water stabilized plasma torch. **Vacuum**. **83(1)**: 209-212.
- Paethanom, A., Nakahara, S., Kobayashi, M., Prawisudha, P. and Yoshikawa, K. (2012). Performance of tar removal by absorption and adsorption for biomass gasification. **Fuel Processing Technology**. **104**: 144-154.
- Phuphuakrat, T.; Nipattummakul, N.; Namioka, T.; Kerdsuwan, S.; Yoshikawa, K., (2010). Characterization of tar content in the syngas produced in a downdraft type fixed bed gasification system from dried sewage. **Fuel**. **89**:2278-2284.
- Pilla, G., et al. (2006). Stabilization of aturbulent premixed flame using a nanosecond repetitively pulsed plasma. **IEEE Transactions on Plasma Science**, vol. **34**, No. **6**, December 2006, 2471-2477.
- Quaak, P., Knoef, H. and Stassen, H. (1999). Energy from biomass: **A review of combustion and gasification technology. World bank techpaper. no.422**.
- Rajvanshi, A. K. (1986). Biomass gasification, In: Goswami, Y.D. (Ed.). **Alternative Energy in Agriculture, CRC Press**. 83-102.
- Reed, T. B., and Das, A. (1988). Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System, **Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado**.
- Rengsirikul, K., Kanjanakuha, A., Ishii, Y., et al. (2011). Potential forage and biomass production

- of newly introduced varieties of *Leucaena* (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.) in Thailand. **Grassl. Sci.** **57**: 94-100.
- Ruiz, J. A., Juarez M.C., Morales M. P., Munoz, P. and Mendivil, M. A. (2013). **Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. Renewable and Sustainable Energy Reviews.** **18**: 174-183.
- Rutberg, Ph.G., Bratsev, A. N., Kuznetsov, V. A., Popov, V. E., Ufimtsev, A. A., Shtengel, S. V. (2011). On efficiency of plasma gasification of wood residues. **Biomass and Bioenergy.** **35(1)**: 495-504.
- Sharma, A. K. (2008). Equilibrium modeling of global reduction reactions for a downdraft (biomass) gasifier. **Energy Conversion and Management.** **49(4)**: 832-842.
- Sheng, C. and Azevedo, J.L.T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy.** **28**: 499-507.
- Son, Y. I., Yoon, S. J., Kim, Y. K. and Lee, J. G., (2011). Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier. **Biomass and Bioenergy** **35(10)**: 4215-4220.
- Tamosiunas, A., Valatkevicius, P., Valincius, V. and Levinskas, R. (2016). Biomass conversion to hydrogen-rich synthesis fuels using water steam plasma. **Comptes Rendus Chimie.** **19**: 433 – 440.
- Tang, L., Huang, H. (2005). Biomass gasification using capacitively coupled RF plasma technology. **Fuel.** **84**: 2055-2063.
- Tang, L., Huang, H., Hao, H. and Zhao, K. (2013). Development of plasma pyrolysis/gasification systems for energy efficient and environmentally sound waste disposal. **J Electrostat.** **71**: 839-47.
- Walawender, W. P., Chern, S. M. and Fan, L. T. (1985). Wood chip gasification in a commercial downdraft gasifier. In: Overend RP, editor. **Fundamentals of thermochemical biomass conversion. Amsterdam: Elsevier Applied Science**, P. 911- 921.
- Zainal, Z. A., Rifau, A., Quadir, G. A. and Seetharamu, K. N. (2002). Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. **Biomass and Bioenergy.** **23(4)**: 283-289.
- Zhang, L., Xu, C. C., Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. **Energy Conversion and Management.** **51(5)**: 969-982.



ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพ

ก1.1 ความหนาแน่นของวัสดุ

วิธีการทดลอง ทำการวัดค่ามวลต่อปริมาตรของตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณตามสมการที่ (ก1)

$$\text{Density} = \frac{\text{Mass (kg)}}{\text{Volume (m}^3\text{)}} \quad (\text{ก1})$$

ก1.2 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่าง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $105 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน ทำการบันทึกผล จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก2)

$$M(wb) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W} \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ

M (wb)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)
W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

ก.2 การหาค่าประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

การหาค่าประกอบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile mater) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ก.2.1 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิคเคเตอร์ (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิคเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่าง ที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก3)

$$M(db) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W_2 - W_0} \quad (\text{ก3})$$

เมื่อ

M (db)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)
W_0	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

ก2.2 เถ้า (Ash)

- เเผาครุชชีเบลพอร์ซเลน (Porcelain crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนประมาณ 1 กรัม
- นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750°C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่
- นำครุชชีเบลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเดสิเกเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก4)

$$A = 100 \times \frac{(W_3 - W_4)}{W} \quad (\text{ก4})$$

เมื่อ

A	คือ	ร้อยละของเถ้า
W_3	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)
W_4	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

ก2.3 ปริมาณสารระเหย

- เเผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเกเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม
- ปิดฝาครุชชีเบลให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที

- หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- นำครุชชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในแคลิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก5)

$$V = 100 \times \frac{(W_5 - W_6)}{W} \quad (\text{ก5})$$

เมื่อ

V	คือ	ร้อยละของสารระเหย
W ₅	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (กรัม)
W ₆	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
M	คือ	ร้อยละของความชื้น

ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณ ได้ตามสมการที่ (ก6)

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของเถ้า} \quad (\text{ก6})$$

ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific Value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77 โดยนำตัวอย่างตัวอย่างแห้งบดละเอียด อัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition Wire) ใส่งในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมบี้ปิดฝา อัดแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ เข้าไปด้วยความดัน 30 kg/cm³ ประมาณ 5 นาที แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เต็มน้ำ ประมาณ 1800 มิลลิลิตร กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการ บอมบี้ Benzoic acid มาตรฐาน

ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวก ไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝง ออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียดมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = m.c.\Delta T \quad (ก7)$$

เมื่อ

Q	คือ	ปริมาณความร้อน (MJ/Kg)
m	คือ	มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)
c	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 KJ/kg)
ΔT	คือ	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

ก.3 การหาคูณสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

ก3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1-2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925 $^{\circ}\text{C}$ ภายใต้ ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Reagent CO_2 H_2O N_2 ความคุมความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรให้คงที่

ก3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

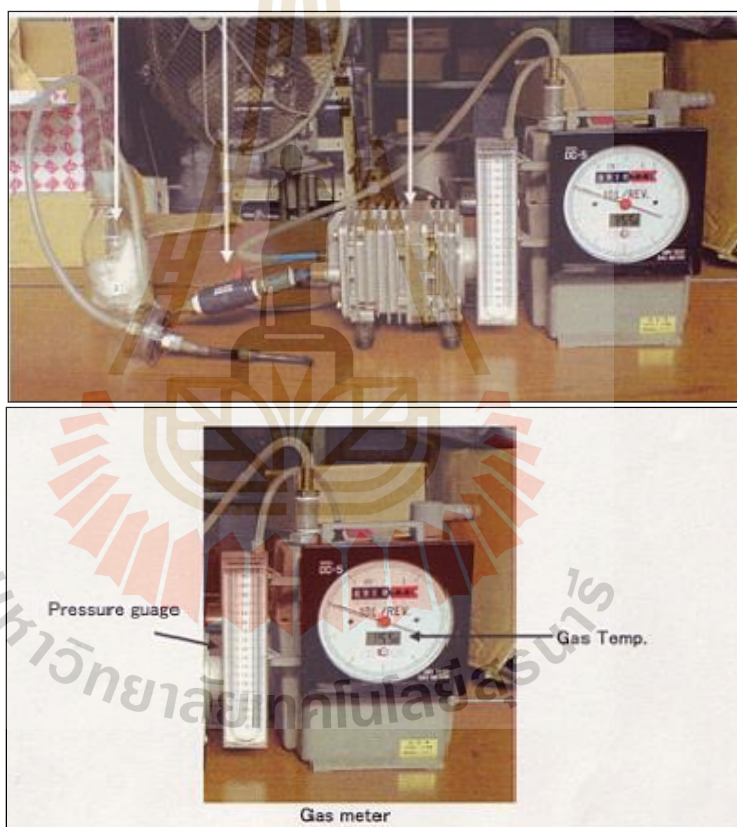
ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงตัวอย่าง หาได้จาก การคำนวณดังสมการที่ (ก8)

$$\text{ปริมาณออกซิเจน(\%)} = 100 - (\% \text{คาร์บอน} - \% \text{ไฮโดรเจน} - \% \text{ไนโตรเจน} - \% \text{ซัลเฟอร์}) \quad (ก8)$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น (Tars and dust)

การวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น อ้างอิงตามคู่มือการเดินระบบของ โรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี (Technical training manual : technical support materials on the biomass gasification power plant) โดยวิธีการวิเคราะห์ที่มีรายละเอียดดังนี้

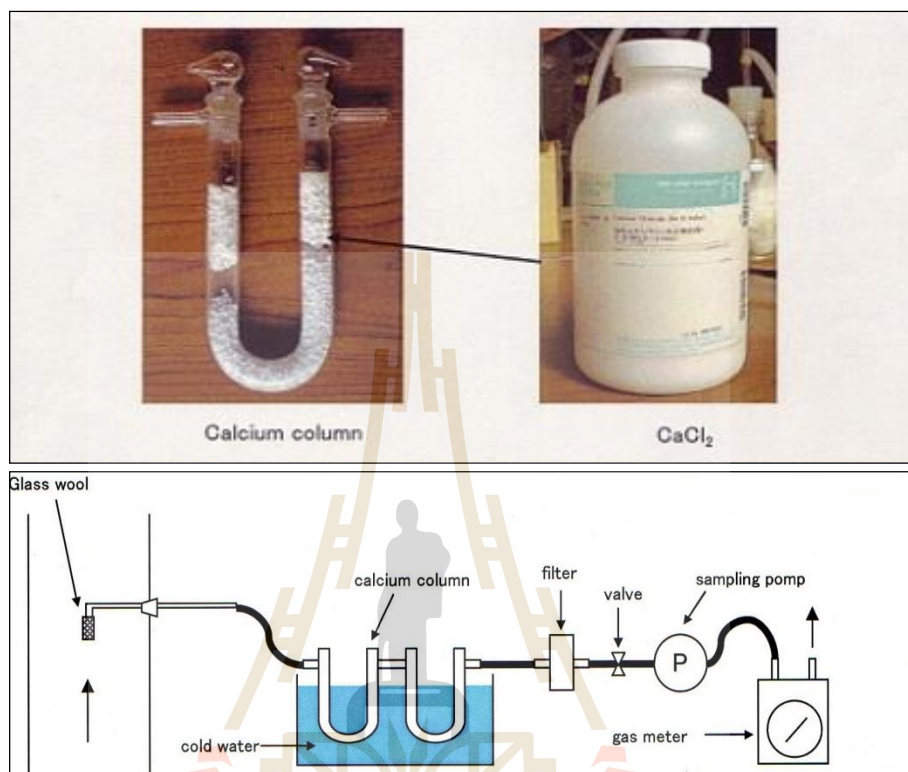
1) เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ ก1 คือปั๊มที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น ต้องควบคุมปริมาตรให้ได้เท่ากันทุกครั้งที่ทำกรเก็บตัวอย่าง เพื่อลดความคลาดเคลื่อน โดยปริมาตรที่กำหนด คือ ไม่เกิน 300 L



รูปที่ ก1 การเตรียมเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

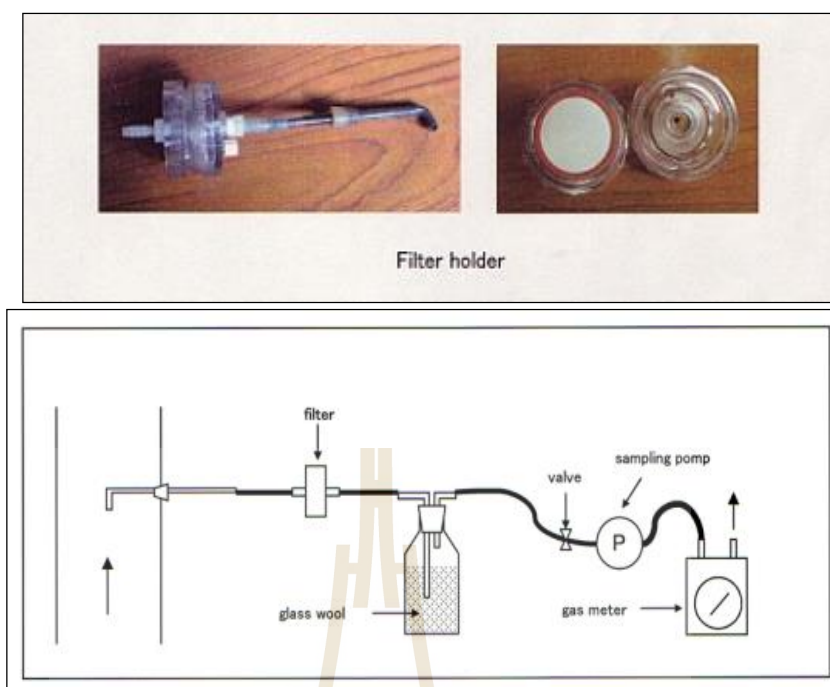
2) เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ ก2 คือ CaCl_2 ซึ่งทำหน้าที่ดูดความชื้นที่มีอยู่ในแก๊ส โดยทำการเติม CaCl_2 ลงไปใน Calcium ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ ก 2 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง (X_w) เพื่อนำมาคำนวณหา

ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (V_m) ก่อนที่จะคำนวณในรูป ปริมาตรของแก๊สแห้ง (V_N) หรือที่ใช้ในหน่วย Nm^3



รูปที่ ก2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง

3) จากนั้นเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น คือ Filter Holder สำหรับใส่กระดาษกรอง ซึ่งจะใช้กระดาษกรอง GF/B Dia. 47 mm ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ก3



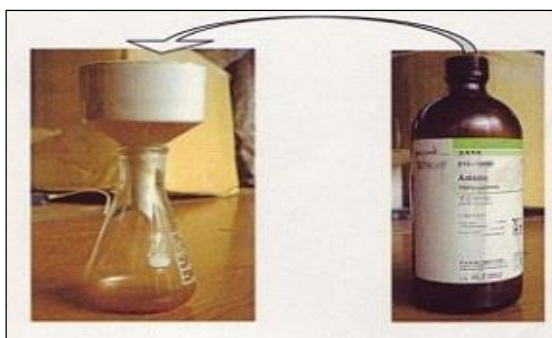
รูปที่ ก3 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ทาร์และฝุ่น

4) ทำการเก็บตัวอย่างทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงจนได้ปริมาณที่กำหนด คือไม่เกิน 300 L จากนั้นนำกระดวยกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งน้ำหนักที่ได้คือปริมาณของทาร์และฝุ่นรวมกัน ตัวอย่างกระดวยกรองหลังผ่านการเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ ก4



รูปที่ ก4 กระดวยกรองหลังผ่านการเก็บตัวอย่าง (ทาร์และฝุ่นรวมกัน)

5) ทำการล้างทาร์ออกจากกระดวยกรองโดยใช้สารละลาย Anisole ดังแสดงในรูปที่ ก5 จากนั้นนำกระดวยกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ ๕ การล้างด้วยสารเคมี Anisole เพื่อกำจัดทาร์ออกจากกระดาษกรอง

6) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณ โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$X_w = \frac{1.24m + 100}{V_m \times \left(\left(\frac{273}{273 + \theta_m} \right) \times \left(\frac{P_a + P_m}{101.3} \right) \right) + 1.24m} \quad (ก9)$$

$$V_m = \frac{V_L \times \left(\left(\frac{273}{273 + \theta_m} \right) \times \left(\frac{P_a + P_m}{101.3} \right) \right)}{1000} \quad (ก10)$$

เมื่อ

X_w	คือ	% ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง
m	คือ	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของแคลเซียมคลอไรด์ (mg)
V_L	คือ	ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (L)
V_m	คือ	ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (m^3)
θ_m	คือ	อุณหภูมิที่อ่านได้จาก Gas meter ($^{\circ}C$)
P_a	คือ	ความดันบรรยากาศ (kPa)
P_m	คือ	ความดันแก๊สที่อ่านได้จาก Gas meter (kPa)

$$V_n = V_m \times \left(1 - \frac{X_w}{100} \right) \quad (ก11)$$

$$W_d = \left(\frac{m_3 - m_1}{V_N} \right) \quad (ก12)$$

$$W_t = \left(\frac{m_2 - m_3}{V_N} \right) \quad (ก13)$$

เมื่อ

V_m	คือ	ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (m^3)
V_N	คือ	ปริมาตรของแก๊สแห้ง (Nm^3)
W_t	คือ	ความเข้มข้นของทาร์ (Tar Concentration mg/Nm^3)
W_d	คือ	ความเข้มข้นของฝุ่น (Dust Concentration mg/Nm^3)
m_1	คือ	น้ำหนักกระดาษกรองเริ่มต้น (mg)
m_2	คือ	น้ำหนักหลังการกรองและอบที่อุณหภูมิ $103^\circ C$ (mg)
m_3	คือ	น้ำหนักหลังล้างทาร์ออกด้วยสารละลาย Anisole และอบที่อุณหภูมิ $130^\circ C$ (mg)

ประวัติผู้เขียน

นายณัยวัฒน์ สุขทั้ง เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 เป็นบุตรของนายสุขะวัฒน์ สุขทั้ง และนางพรนิชา สุขทั้ง จบชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนจำการบุญ และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนจ่านกร้อง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) พ.ศ. 2547 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ ปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) พ.ศ. 2550 จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท บัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2557 และทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยวิจัย ณ ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี