

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะพลาสติก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNGAS PRODUCTION FROM PLASTIC WASTE GASIFICATION PROCESS



MISS THACHAKORN PARNNIAM

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
ของขยะพลาสติก

โดย

นางสาวรัชกร ปานเนียม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

ปริญญานิพนธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)


(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

กรรมการ



กรรมการ

(รศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ของขยะพลาสติก
โดย	นางสาวรัชกร ปานเนียม
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำขยะเหลือทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำขยะที่ไม่นิยมนำไปรีไซเคิลในประเทศไทย ได้แก่ ก่อ่งโพน (PS) และกระดาษใบตองเทียม (PepPE) ไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป และในโครงการนี้นำเสนอการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา (2) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา และ (3) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารวมกับใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเพื่อหาสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุด ซึ่งในโครงการนี้ทำการศึกษาและออกแบบแบบจำลองผ่านโปรแกรม Aspen Plus V9 จากการจำลองกระบวนการพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ส่งผลให้แก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โดยจากการจำลองกระบวนการพบว่า เมื่อใช้วัตถุดิบ PS และ PepPE แล้วต้องการให้ได้สัดส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด ควรเลือกกระบวนการเป็นแบบที่ (3) โดยเมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบ ให้สัดส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนมากกว่าการใช้ PepPE และนอกจากนี้ยังได้พลังงานความร้อนที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันน้อยที่สุดด้วย และถ้าต้องการให้ได้สัดส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด ควรเลือกกระบวนการเป็นแบบที่ (2) โดยเมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบ ให้สัดส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่าการใช้ PepPE และนอกจากนี้ยังจะได้ว่าพลังงานความร้อนที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันน้อยกว่ากระบวนการแบบที่ (1) สรุปว่าโครงการวิจัยนี้ได้ให้ข้อมูลและความเข้าใจในกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากวิธีการแก๊สซิฟิเคชันที่แตกต่างกันโดยใช้ขยะพลาสติกที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้เป็นวัตถุดิบ ผลการวิจัยมีส่วนสำคัญในการพัฒนาวิธีการจัดการขยะอย่างยั่งยืนและการใช้ขยะเป็นทรัพยากรที่มีค่าสำหรับการผลิตพลังงาน

คำสำคัญ: ขยะพลาสติก, แก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์, ตัวทำปฏิกิริยา,

แก๊สสังเคราะห์, ตัวดูดซับ, แคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Syngas production from plastic waste gasification process
By	Miss Thachakorn Parnniam
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2022
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Duangkamol Na-Ranong

Abstract

This project aims to utilize non-recyclable plastic waste, specifically foam containers (PS) and plastic-coated paper (PepPE), as raw material for gasification processes to produce synthesis gas. Three gasification methods were studied: (1) gasification using steam as a gasifying agent, (2) gasification using steam and carbon dioxide as a gasifying agent, and (3) gasification using steam as a gasifying agent with sorption using calcium oxide (CaO) as a sorbent. The influence of temperature on the gasification process is examined to determine the operational conditions that provide the highest content of hydrogen and carbon monoxide in synthesis gas. Through simulation using Aspen Plus V9, it was found that increasing the gasifier temperature enhances the production of synthesis gas. Furthermore, if the highest mole fraction of hydrogen in the synthesis gas was desired, gasification process (3) was recommended when using PS as the feedstock. On the other hand, if the highest mole fraction of carbon monoxide in the synthesis gas was desired, gasification process (2) was preferred when using PepPE as the feedstock. In conclusion, this study provides insights into the production of synthesis gas through various gasification methods using non-recyclable plastic waste. The findings contribute to the development of sustainable waste management practices and the utilization of waste as a valuable resource for energy production.

Keywords: Plastic waste, Steam gasification, Carbon dioxide, Gasifying agent, Synthesis gas, Sorbent, Calcium oxide

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและสมบูรณ์ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความรู้และแนวทางที่เป็น ประโยชน์ตลอดการดำเนินงาน ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง ติดตามความก้าวหน้าด้วยความ เอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้การทำงานวิจัยครั้งนี้เป็นไปอย่างราบรื่นและสมบูรณ์ ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา ซึ่งทำให้ผู้จัดทำได้มีองค์ความรู้นำมา ปรับใช้ในการแก้ไขปัญหาและจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้สมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และน้องชาย รวมไปถึงเพื่อน ๆ ของผู้จัดทำที่คอยให้ คำแนะนำ ช่วยเหลือ ให้กำลังใจ อีกทั้งยังช่วยชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จ หาก ปริญญาานิพนธ์นี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ธัชกร ปานเนียม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ขยะพลาสติก (Plastic Waste).....	3
2.1.1 องค์ประกอบของขยะพลาสติก.....	3
2.2 แคลเซียมออกไซด์ (CaO).....	5
2.3 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification).....	5
2.3.1 หลักการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	5
2.3.2 ปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	6
2.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	7
2.4 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas).....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	11
3.1 แผนภาพแบบการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ IV ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการจำลองกระบวนการ.....	12
3.2.1 การตรวจสอบโมเดล (Model validation)	12
3.2.2 การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น	13
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผล.....	18
4.1 ผลเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับการทดลอง.....	18
4.2 ผลของการจำลองกระบวนการ.....	18
4.2.1 ผลของผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์	19
4.2.2 เปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงโมล (Mole flow rate) ของแก๊สสังเคราะห์จาก กระบวนการทั้ง 3 แบบ.....	25
4.2.3 พลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	28
5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ	28
5.2 ข้อเสนอแนะ	29
บรรณานุกรม.....	30
ภาคผนวก.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อ V ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของวัสดุดิบในการทดลอง	13
ตารางที่ 3.2 สภาวะการดำเนินงานของสายป้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	13
ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์แบบประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของกล่องโฟม (PS) และ กระดาษใบตองเทียม (PepPE).....	14
ตารางที่ 3.4 สภาวะการดำเนินงานของสายป้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง	15
ตารางที่ 3.6 สภาวะการดำเนินงานของสายป้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง (ต่อ).....	16
ตารางที่ 3.7 ปฏิกริยาเคมีที่กำหนดให้เกิดขึ้นใน Gasification unit	17



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงขยะพลาสติก	4
รูปที่ 3.1 แผนภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS หรือ PepPE เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (1) หรือ (2) หรือ (3).....	11
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองกระบวนการกับผลการทดลอง	18
รูปที่ 4.2 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (1).....	19
รูปที่ 4.3 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (1).....	19
รูปที่ 4.4 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (2).....	19
รูปที่ 4.5 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (2).....	20
รูปที่ 4.6 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (3).....	20
รูปที่ 4.7 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (3).....	20
รูปที่ 4.8 H ₂ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ.....	22
รูปที่ 4.9 H ₂ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ.....	22
รูปที่ 4.10 CO ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ	22
รูปที่ 4.11 CO ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ	23
รูปที่ 4.12 CO ₂ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ.....	23
รูปที่ 4.13 CO ₂ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ.....	23
รูปที่ 4.14 CH ₄ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ.....	24
รูปที่ 4.15 CH ₄ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ	24
รูปที่ 4.16 อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ	25
รูปที่ 4.17 อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ	26
รูปที่ 4.18 พลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ	26
รูปที่ 4.19 พลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ VII กิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลทั่วโลกมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งสวนทางกับการใช้พลังงานของโลกที่มีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแนวโน้มของจำนวนประชากรทั่วโลกมีเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเชื้อเพลิงจากฟอสซิล อาทิ น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานหลักในปัจจุบันที่มีอยู่อย่างจำกัดและกำลังจะหมดไปในอนาคตอันใกล้ อีกทั้งยังปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมหาศาล ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ [1] เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการพิจารณาถึงการผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยเพื่อใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิลได้รับความสนใจมากขึ้น เป็นอีกหนึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาที่ยั่งยืน เนื่องจากช่วยแก้ปัญหาเรื่องการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน [2]

ในประเทศไทยมีขยะมูลฝอยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก หนึ่งในรูปแบบของขยะมูลฝอย คือ ขยะพลาสติก ซึ่งเป็นขยะประเภทนี้ส่วนใหญ่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ แต่มีข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการขยะพลาสติกที่ยังไม่สามารถรองรับปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ จากผลสำรวจของกรมควบคุมมลพิษพบว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะพลาสติกเฉลี่ย 2 ล้านตันต่อปี โดยมีเพียงร้อยละ 20 เท่านั้นที่ถูกนำไปรีไซเคิลอย่างถูกวิธี ในขณะที่อีกร้อยละ 78 ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบและเตาเผา และมีบางส่วนที่หลงเหลือในสิ่งแวดล้อม [3] กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจึงเป็นเทคโนโลยีที่สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบได้ ซึ่งพลาสติกส่วนใหญ่เป็นพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว (Single-use plastics) เช่น ก่อหลอมโฟม (PS) และกระดาศาไบโตนเทียม (PepPE) จะไม่มีการนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ โดยส่วนใหญ่จะถูกทิ้งเป็นขยะ

โครงการนี้จะเลือกใช้ก่อก่อโฟม (PS) และกระดาศาไบโตนเทียม (PepPE) เป็นวัตถุดิบนำไปผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas) ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และในโครงการนี้จะนำเสนอการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา (Gasifying Agent) (2) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา และ (3) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารวมกับใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเพื่อหาสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถนำขยะเหลือทิ้งไปใช้ผลิตแก๊สที่ใช้ประโยชน์ได้ โดยนำขยะที่ไม่นิยมนำไปรีไซเคิลในประเทศ ได้แก่ กล่องโฟม และ กระดาษใบตองเทียม ไปใช้เป็นวัตถุดิบ ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
2. เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะพลาสติก โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus V9
2. ขยะพลาสติกนำมาใช้ผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน คือ กล่องโฟม และ กระดาษใบตองเทียม
3. ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา (2) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา และ (3) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารวมกับใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับ
4. วิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของกล่องโฟม และ กระดาษใบตองเทียม โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ดำเนินงานในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อยู่ในช่วง 600 – 800 °C
5. โดยกำหนดสภาวะในการดำเนินงานบางส่วนเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง ได้แก่
 - ความดันที่ใช้ดำเนินงานทั้งกระบวนการ อยู่ที่ความดันบรรยากาศ หรือ 1 atm
 - อัตราการป้อนขยะพลาสติก 100 kg/hr ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 atm
 - ไอน้ำที่เป็นตัวทำปฏิกิริยา ถูกป้อนที่อุณหภูมิ 200 °C ความดัน 1 atm
 - แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นตัวทำปฏิกิริยา ถูกป้อนที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 atm
 - แคลเซียมออกไซด์ที่เป็นตัวดูดซับ ถูกป้อนที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 atm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อช่วยลดขยะและนำขยะที่เหลือทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์
2. เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โดยใช้ขยะเหลือทิ้งแทนพลังงานฟอสซิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขยะพลาสติก (Plastic Waste)

ขยะหรือขยะมูลฝอย (Refuse or Solid Waste) หมายถึง ของเสียที่อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งอาจจะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นปะปนมาด้วยจำนวนหนึ่ง ขยะที่เกิดขึ้นจากอาคารที่พักอาศัย สถานที่ทำงาน โรงงาน อุตสาหกรรม หรือตลาดสดก็ตามจะมีปริมาณและลักษณะแตกต่างกันออกไป

ขยะพลาสติกเป็นประเภทหนึ่งของขยะมูลฝอย ซึ่งเป็นขยะประเภทนี้ส่วนใหญ่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ แต่ก็มีขยะพลาสติกบางชนิดที่นำไปรีไซเคิลได้ยาก เช่น ก่อ่งโฟม และ กระจาดใบตองเทียม โดยก่อก่อ่งโฟมมีปัญหาสำคัญมาจากเรื่องต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูง เพราะโฟมนั้นมีลักษณะเบา และกินพื้นที่ในการจัดเก็บมาก รถบรรทุกหนึ่งคันสามารถบรรทุกก่อก่อ่งโฟมได้เพียง 200-300 กิโลกรัมต่อหนึ่งเที่ยว เทียบกับการบรรทุกกระจาด ขวดแก้ว หรือขยะอื่น ๆ ซึ่งจะได้อย่างน้อย 3 ถึง 6 ตันต่อเที่ยว ดังนั้นการขนขยะโฟมไปโรงงานรีไซเคิล จึงเสียค่าน้ำมัน และค่าแรงคนงาน มากกว่าขยะชนิดอื่นหลายเท่า ดังนั้น ต้นทุนการรับซื้อขยะโฟมก็ต้องสูงขึ้นด้วย [4] ส่วนกระจาดใบตองเทียมยากต่อการนำไปรีไซเคิลต่อ เพราะต้องแยกกระจาดออกจากพลาสติกเสียก่อนถึงจะสามารถส่งแยกกระจาดกับพลาสติกให้โรงงานกระจาดและโรงงานพลาสติกต่อไปได้ [5] ดังนั้นขยะพลาสติกสามารถนำมาผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงในอนาคตได้ [6]

2.1.1 องค์ประกอบของขยะพลาสติก

โดยทั่วไปลักษณะของขยะพลาสติกจะสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะพลาสติกได้ 2 แบบ ได้แก่ [7]

2.1.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

วิเคราะห์แบบประมาณตามมาตรฐาน ASTM D3172 ซึ่งจะวิเคราะห์ขยะพลาสติกหาปริมาณต่าง ๆ ได้แก่

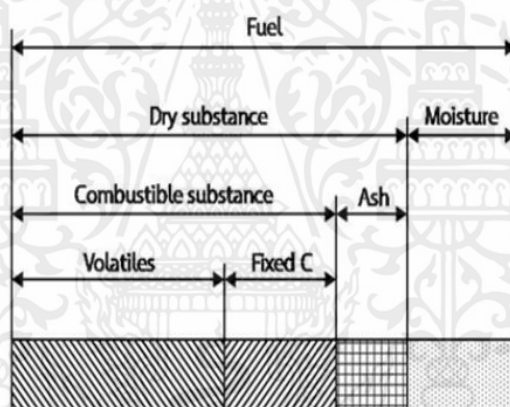
1) ความชื้น (Moisture Content) คือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงขยะพลาสติก เชื้อเพลิงขยะพลาสติกที่นำมาใช้ควรมีความชื้นไม่เกิน 10% เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนในการไล่ความชื้นของเชื้อเพลิงขยะพลาสติก

2) สารระเหยได้ (Volatile Matter) คือ ส่วนที่โมเลกุลถูกเผาไหม้ได้ง่าย หากเชื้อเพลิงมีค่าสารระเหยได้สูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

3) คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) คือ ส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของขยะพลาสติกประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ขยะพลาสติกที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงที่ต่ำหรือน้อยจะสันดาปได้ไม่มีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำ ความเร็วในการติดไฟช้า เนื่องจากมีความชื้นมาก

4) ขี้เถ้า (Ash) คือ ส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในขยะพลาสติกที่ถูกออกซิไดส์สมบูรณ์

การทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว คือ ขยะพลาสติกที่เป็นของแข็งถูกบดเป็นผง แล้วนำไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 - 110 °C จนน้ำหนักคงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักเดิม คือ ปริมาณความชื้น หลังจากนั้นขยะพลาสติกมวลที่แห้งแล้วจะถูกทำให้ร้อนในภาชนะปิดเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 900 °C เพื่อไล่สารระเหยได้ จนน้ำหนักคงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไป คือ ปริมาณสารระเหยได้ หลังจากนั้นนำขยะพลาสติกที่ได้ไปอบในภาชนะเปิด ที่อุณหภูมิ 750 °C เพื่อให้เกิดการเผาไหม้จนได้น้ำหนักที่เหลือคงที่ ซึ่งจะเป็น้ำหนักของเถ้า ในขณะที่น้ำหนักส่วนที่หายไป คือ ปริมาณของคาร์บอนคงตัว [7]



รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงขยะพลาสติก

2.1.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เพื่อหาปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) ที่เป็นองค์ประกอบของขยะพลาสติก ซึ่งจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง (Dry Basis)

โดยปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในขยะพลาสติกหาโดยการเผาขยะพลาสติกในภาชนะปิดที่บรรจุออกซิเจนไว้เพียงพอ แล้ววัดองค์ประกอบของไอเสีย เพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในขยะพลาสติก ส่วนไนโตรเจน และซัลเฟอร์ หาโดยวิธีทางเคมี ส่วนออกซิเจนหาโดยระบุค่า 100 ลบด้วยปริมาณธาตุอื่นดังกล่าว

2.2 แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

แคลเซียมออกไซด์สามารถนำมาดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยจะเกิดปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ในปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกเรียกว่า คาร์บอเนชัน (Carbonation) และในปฏิกิริยาการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่า เรียกว่า แคลซิเนชัน (Calcination) ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์สำหรับกักเก็บ และได้แคลเซียมออกไซด์ เพื่อนำกลับไปใช้เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาคาร์บอเนชันต่อไป ซึ่งการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมด้วยเทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบอยู่หลายอย่างเช่น การประหยัดพลังงานในการรีเจนเนอเรต ไม่ต้องกำจัดของเสียและการเลือกการดูดซับ อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและการคายซับมากขึ้นเรื่อย ๆ [8]

2.3 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

2.3.1 หลักการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน เช่น ขยะพลาสติก ถ่านหิน ให้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ (Produced Gas) โดยทั่วไปกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะดำเนินการที่อุณหภูมิสูง อาศัยกระบวนการทางเคมี ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในสถานะจำกัดปริมาณอากาศ เมื่อให้ความร้อนแก่ขยะพลาสติกพร้อมกับเทคนิคการจำกัดปริมาณตัวทำปฏิกิริยา เช่น อากาศ แก๊สออกซิเจน ไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้เกิดสถานะที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนในสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ หรือก็คือเกิดเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์นั่นเอง ทำให้ขยะพลาสติกเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เรียกว่า แก๊สซิฟายเออร์ (Gasifier) แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามชนิดและคุณสมบัติของขยะพลาสติกที่ใช้เป็นสารตั้งต้น องค์ประกอบหลักของแก๊สแก๊สผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อาจมีแก๊สมีเทน (CH_4) บางส่วน โดยจะเรียกรวมประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจน (H_2) กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ว่า แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas) นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่น ได้แก่ ขี้เถ้า (Ash) เป็นต้น [9]

โดยภายในเตาแก๊สซิฟายเออร์แบ่งเป็นโซนต่าง ๆ 4 โซน ดังนี้

2.3.1.1 โซนอบแห้ง (Drying)

เป็นโซนที่อยู่ด้านบนสุด มีหน้าที่อบแห้งและระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบด้วยความร้อน ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 100 - 200 °C โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ความชื้นลดลงได้ และ

ค่าความชื้นของวัตถุดิบที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานควรมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 30 เพื่อให้วัตถุดิบเชื้อเพลิงมีความแห้งและง่ายต่อการติดไฟ

2.3.1.2 โชนกลั่นตัวหรือโชนไพโรไลซิส (Devolatilization or Pyrolysis)

เป็นโชนที่ติดอยู่กับโชนเผาไหม้และได้รับความร้อนโดยตรงจากโชนเผาไหม้ โดยกระบวนการกลั่นตัวหรือไพโรไลซิสเป็นการใช้ความร้อนทำลายพันธะเคมีเพื่อแยกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ที่อยู่ในขยะพลาสติกออกโดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจน จะได้ก้อนถ่านและแก๊สระเหยและได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคืออนุมูลของกรด (หรือน้ำส้มควันไม้) และน้ำมันดิน (tar) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 500 - 700 °C

2.3.1.3 โชนเผาไหม้ (Combustion)

เป็นโชนที่ผลิตความร้อนเพื่อส่งความร้อนไปสู่โชนอื่นในเตาแก๊สซิฟายเออร์ ในโชนนี้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน วัตถุดิบหรือถ่านคาร์บอนจากโชนไพโรไลซิสถูกเผาไหม้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกถ่ายเทโดยตรงให้กับโชนรีดักชันและโชนไพโรไลซิส และถ่ายเทให้กับโชนอบแห้ง

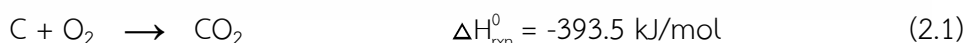
2.3.1.4 โชนรีดักชัน (Reduction)

เป็นโชนที่ผลิตแก๊สสังเคราะห์ ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยกระบวนการแปรรูปถ่านคาร์บอนให้เป็นก๊าซสังเคราะห์ปฏิกิริยาเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 800 - 1,000 °C ของการเผาไหม้ภายใต้สภาวะการจำกัดปริมาณอากาศ ซึ่งจะทำให้ถ่านคาร์บอนและน้ำมันดินแตกตัวเป็นแก๊สสังเคราะห์

2.3.2 ปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากขยะพลาสติกเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ดังนั้น ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนและสามารถเกิดผลิตภัณฑ์หรือแก๊สหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของขยะพลาสติกและเทคนิคในการจำกัดปัจจัยต่าง ๆ จึงไม่สามารถระบุปฏิกิริยาเคมีได้ครบทั้งหมด ซึ่งปฏิกิริยาเคมีหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการแสดงดังปฏิกิริยาที่ (2.1) – (2.11) [9]

1. Carbon complete combustion:



2. Carbon incomplete combustion:

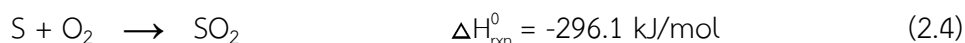


3. Hydrogen partial combustion:

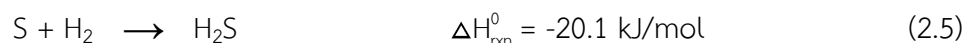


4. Sulfur combustion:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5. H₂S formation:



6. Boudouard:



7. Water-gas:



8. Water-gas shift:



9. Methanation of carbon:



10. Steam reforming of methane:



และในกรณีที่ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับ จะมีปฏิกิริยามาเกี่ยวข้องเพิ่มเติม คือ

11. Carbonation:



2.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

2.3.3.1 ชนิดของขยะพลาสติก

ขยะพลาสติกสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสามารถมีได้หลายชนิด ซึ่งในขยะพลาสติกแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันตามการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ซึ่งส่งผลให้องค์ประกอบของแก๊สที่เป็นผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันไปตามขยะพลาสติกที่นำมาใช้ [6]

2.3.3.2 สภาพของกระบวนการ (Operating Condition)

สภาพของกระบวนการ (Operating Condition) ในเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ ได้แก่ อุณหภูมิ และความดันของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีความสำคัญต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ต้องการ โดยเฉพาะอุณหภูมิดำเนินงาน (Operating Temperature) เนื่องจากในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นหลายปฏิกิริยา ทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) และคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยจะสอดคล้องกับหลักการของ Le Chatelier คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ปฏิกิริยาดูดความร้อนมีสมดุลของปฏิกิริยาไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางข้างหน้ามากขึ้น ในขณะที่ปฏิกิริยาคายความร้อนจะมีสมดุลของปฏิกิริยาในทิศทางย้อนกลับมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของแก๊สสังเคราะห์เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

ส่วนความดันดำเนินงาน (Operating Pressure) โดยจะสอดคล้องกับหลักการของ Le Chatelier ว่าความดันที่เพิ่มขึ้น สมดุลจะเปลี่ยนทิศไปยังด้านของปฏิกิริยาที่มีจำนวนโมลน้อยกว่า ในขณะที่ความดันที่ลดลงสมดุลจะเปลี่ยนทิศไปยังด้านของปฏิกิริยาที่มีจำนวนโมลมากกว่า ซึ่งได้มีงานวิจัยศึกษาอิทธิพลของความดันที่ส่งผลต่อแก๊สสังเคราะห์ เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้แก๊สไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ลดลง ดังนั้นเพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์มากที่สุดควรดำเนินงานที่ความดัน 1 บรรยากาศ [10,11]

2.3.3.3 ชนิดของตัวทำปฏิกิริยา (Gasifying agent)

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะต้องมีตัวทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ จะใช้เป็นอากาศ แก๊สออกซิเจน ไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของตัวทำปฏิกิริยาที่ใช้ ตัวทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่

1) อากาศ การใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยาจะมีความสะดวกและราคาถูก แต่แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) น้อยและค่าความร้อนต่ำกว่าตัวทำปฏิกิริยาอื่น ๆ เนื่องจากในอากาศมีแก๊สไนโตรเจนอยู่ค่อนข้างสูง

2) แก๊สออกซิเจน (Oxygen) เป็นตัวทำปฏิกิริยาที่ค่าความร้อนค่อนข้างสูง แต่การใช้ ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยาอาจทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในกระบวนการออกซิเดชันได้ และการแยกออกซิเจนมีต้นทุนสูง

3) ไอน้ำ (Steam) ในปัจจุบันไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากไอน้ำมีราคาถูกกว่าออกซิเจน ที่สำคัญไอน้ำช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับขยะพลาสติก และปฏิกิริยาอาร์พอร์มมิงของไอน้ำกับมีเทนเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้แก๊สผลิตภัณฑ์มีแก๊สไฮโดรเจนสูงชันมากกว่าการใช้ตัวทำปฏิกิริยาแบบอื่น ๆ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจึงต้องมีการให้ความร้อนเพิ่มเติม

4) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ถูกนำมาใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยาเนื่องจาก คาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเสียที่พบได้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานเพื่อให้กลายเป็นไอเหมือนไอน้ำ โดยการใช้ตัวทำปฏิกิริยาชนิดนี้ จะทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้น แต่มีแก๊สไฮโดรเจนลดลง [12]

2.4 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ซึ่งแก๊สสังเคราะห์นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมีอย่างหลากหลาย ส่วนใหญ่แก๊สสังเคราะห์จะนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนีย (Ammonia) เมทานอล (Methanol) ไดเมทิลอีเธอร์ (Dimethyl Ether, DME) ยูเรีย (Urea) และอื่น ๆ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Saebea D. และคณะ [6] ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ขยะพลาสติก ได้แก่ โพลีเอทิลีน (PE) และโพลีโพรพิลีน (PP) และใช้ตัวทำปฏิกิริยาเป็นไอน้ำ ผลกระทบของอุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิฟิเออร์และอัตราส่วนมวลไอน้ำต่อสายป้อนเข้า (S/F) ได้ถูกศึกษา ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องแก๊สซิฟิเออร์ควรทำงานที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยอัตราส่วนมวลไอน้ำต่อสายป้อนเข้า (S/F) ที่เหมาะสมคือ 1.5 และด้วยการพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนมวล PE/PP ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนมวล PE/PP เท่ากับ 100/0 หรือ PE บริสุทธิ์ สามารถให้อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์สูงสุด 21 kg/hr และได้อัตราส่วน H_2/CO เป็น 2.1

S. Hashmi และคณะ [9] ได้ทำการศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยมีวัตถุประสงค์หลักของงานนี้คือการประเมินศักยภาพของพืชฮาโลไฟต์ (Phragmites Australis) ซึ่งเป็นพืชทนความเค็มสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ และจัดให้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพทางเลือกที่มีแนวโน้มสำหรับการผลิตพลังงานที่ยั่งยืน ในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองสมดุลทางเคมีในสภาวะคงตัว (Steady-state Chemical Equilibrium Model) ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ โดยใช้พืชฮาโลไฟต์ (Phragmites Australis) เป็นขยะพลาสติก ที่มีการใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรม Aspen แบบจำลองนี้ทำงานบนหลักการของพลังงานอิสระของกิบส์ที่ต่ำที่สุด (Gibbs Free Energy Minimization) เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในช่วง $600 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราส่วนโดยมวลของตัวทำปฏิกิริยาไอน้ำต่อขยะพลาสติกในช่วง $0.2 - 1.0$ และอัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมออกไซด์ต่อขยะพลาสติกในช่วง $0.1 - 0.9$ ที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้และผลของค่าความร้อนสูง (HHV) ค่าความร้อนต่ำ (LHV) อัตราส่วนของ H_2/CO ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน (CCE) และประสิทธิภาพแก๊สเย็น (CGE) ได้รับการตรวจสอบสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 69.52 เป็น 75.16 vol\% ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 16.91 เป็น 5.4 \%vol สังเกตได้จากการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมออกไซด์ต่อขยะพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก 0.1 เป็น 0.9 เมื่อพิจารณาหาสภาวะสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีแก๊สไฮโดรเจนที่เหมาะสม จะพบว่าผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนของแก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีอัตราส่วนโดยมวลของตัวทำปฏิกิริยาไอน้ำต่อขยะพลาสติก เท่ากับ 0.4 และ อัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมออกไซด์ต่อขยะพลาสติก เท่ากับ 1.42 จะได้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจน สูงสุดคือ $75.16\text{ vol}\%$ โดยมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุดคือ $5.4\text{ vol}\%$ ที่สภาวะที่เหมาะสมเหล่านี้ ค่าของ HHV, LHV, CCE และ CGE คือ 13.32 MJ/Nm^3 , 15.20 MJ/Nm^3 , 42.91% และ 78.63% ตามลำดับ สรุปได้ว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะพลาสติกที่ใช้การดูดซับเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเทคนิคที่มีแนวโน้มสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

N. Sadhwani [13] ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไม้สน (Pine Wood) เป็นชีวมวล และใช้ตัวทำปฏิกิริยาเป็นไอน้ำผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus เพื่อศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิในช่วง $600 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความดันในช่วง $1 - 4\text{ atm}$ ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและอัตราส่วนโดยโมลของตัวทำปฏิกิริยาไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วง $0.1 - 4.0$ ที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำปฏิกิริยาที่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ได้แก่ ปฏิกิริยา Boudouard ปฏิกิริยา Water-gas และปฏิกิริยา Methane Steam Reforming เกิดปฏิกิริยาข้างหน้ามากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น เมื่อพิจารณาความดันพบว่าเมื่อความดันสูงขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วนโดยโมลของตัวทำปฏิกิริยาไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของตัวทำปฏิกิริยาไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น คือการเพิ่มปริมาณน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ใช้น้ำเป็นสารตั้งต้นมากขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยา Water-gas ปฏิกิริยา Water-gas Shift ปฏิกิริยา Methane Steam Reforming ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ จะได้ว่าที่อุณหภูมิเท่ากับ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดันเท่ากับ 1 atm และอัตราส่วนโดยโมลของตัวทำปฏิกิริยาไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.4 เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์

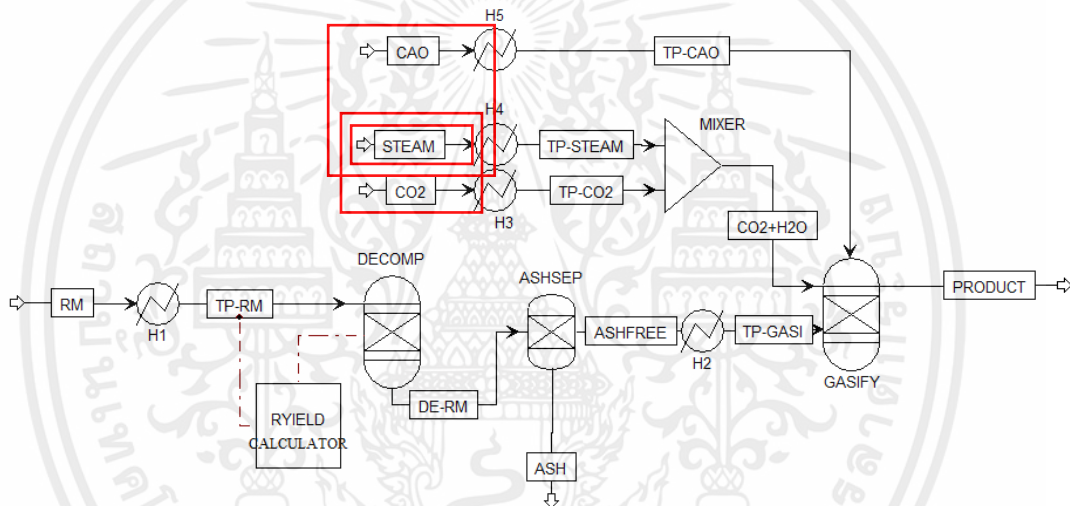
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 แผนภาพแบบการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

โดยในโครงงานนี้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 3 รูปแบบ ได้แก่

- (1) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา (Gasification using steam)
- (2) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา (Gasification using steam + CO₂)
- (3) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารวมกับใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับ (Combination of Gasification using steam with Sorption using CaO)



รูปที่ 3.1 แผนภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS หรือ PepPE เป็นวัสดุดูดซับ และใช้กระบวนการ (1) หรือ (2) หรือ (3)

การจำลองการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแสดงในรูปที่ 3.1 – 3.2 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ขยะพลาสติกเป็นถ่านโค้ก (PS) และกระดาษใบตองเทียม (PepPE) โดยถ่านโค้ก (PS) หรือกระดาษใบตองเทียม (PepPE) ถูกป้อนเข้าสู่หน่วย Decomposition เพื่อแยกโมเลกุลของถ่านโค้ก (PS) หรือกระดาษใบตองเทียม (PepPE) ให้เป็น N₂, H₂, O₂, C, H₂O, S และขี้เถ้า (Ash) ตามองค์ประกอบโดยการวิเคราะห์แบบปริมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของถ่านโค้ก (PS) และกระดาษใบตองเทียม (PepPE) จากนั้นนำเข้าสู่หน่วย Ash Separation เพื่อแยกเอาขี้เถ้าออก

หลังจากนั้นป้อนเข้าสู่หน่วย Gasification พร้อมกับตัวทำปฏิกิริยา ทำให้ได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ ตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังตามปฏิกิริยาที่ (1) – (11) หลังจาก

ทำปฏิกิริยาที่หน่วย Gasification แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน

3.2 วิธีการจำลองกระบวนการ

รายละเอียดในการจำลองกระบวนการแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การตรวจสอบโมเดล และการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยโครงการนี้จำลองกระบวนการผ่านโปรแกรม Aspen Plus V9 ในการจำลองกระบวนการ และใช้สมการสถานะ (Equation of State) หรือแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกเป็น Peng-Robinson with Boston-Mathias (PR-BM) ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) ทั้งหมดของสารที่เป็นส่วนประกอบ (Conventional Components) ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน วิธีนี้เหมาะสำหรับของผสมที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วน้อย เช่น ไฮโดรคาร์บอนและแก๊สเบา เป็นประโยชน์สำหรับความสัมพันธ์ของความดันไอของสารบริสุทธิ์ที่ส่วนประกอบเมื่ออุณหภูมิค่อนข้างสูง ดังนั้น PR-BM จึงเหมาะสมกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งแผนผังกระบวนการแสดงดังรูปที่ 3.1

3.2.1 การตรวจสอบโมเดล (Model validation)

หลังจากที่ทำการออกแบบแบบจำลองของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยโปรแกรม Aspen Plus V9 เสร็จเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการตรวจสอบโมเดล โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองกระบวนการ กับค่าที่ได้จากการทดลองจริง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลว่ามีความเหมาะสมที่จะใช้ทำนายผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นได้

โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับการทดลองของ Chai Y. และคณะ [14] ซึ่งเป็นการทดลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่มีไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาและใช้วัสดุเป็นซีลีเยชั่นผสมกับพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในเครื่องแก๊สซิฟิเคอร์แบบฟลูอิดไดเบต (Fluidized bed gasifier)

หลังจากได้แบบจำลองที่สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้แล้ว ต้องทำการตรวจสอบแบบจำลองให้มั่นใจว่ามีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไปได้ โดยเปรียบเทียบผ่านค่า Root Mean Square Error (RMSE) กำหนดค่าที่ยอมรับได้ไว้ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (\text{Experiment} - \text{Simulation})^2}{N}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 องค์ประกอบของแกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของวัตถุดิบในการทดลอง

ชนิดวัตถุดิบ [14]	ขี้เลื่อยต้นสน (Pine sawdust)	HDPE
ความชื้น (Moisture Content) (%wt, wet basis)	9.40	0
การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) (%wt, dry basis)		
คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)	18.43	0.30
สารระเหยได้ (Volatile Matter)	81.02	99.70
ขี้เถ้า (Ash)	0.55	0
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) (%wt, dry basis)		
ขี้เถ้า (Ash)	0.55	0
คาร์บอน (C)	49.06	85.71
ไฮโดรเจน (H)	6.03	14.29
ไนโตรเจน (N)	0.04	0
กำมะถัน (S)	0	0
ออกซิเจน (O)	44.32	0

หมายเหตุ: HDPE (High Density Polyethylene) คือ พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

3.2.1.2 สภาวะการดำเนินงานกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สภาวะการดำเนินงานของสายป้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

Raw material feed	
Composition	50%wt Pine sawdust + 50%wt HDPE
Mass flow rate	0.75 g/min
Steam feed	
Mass flow rate	3 g/min
Decomposition unit	
Temperature	500 °C
Gasification unit	
Type	Fluidized bed gasifier
Temperature	700 °C

3.2.2 การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ในกาจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ขยะพลาสติกเป็น กล่องโฟม (PS) และกระดาษใบตองเทียม (PepPE) และในโครงการนี้นำเสนอการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา (Gasifying Agent) (2) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำผสมกับแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา และ (3) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารวมกับใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเพื่อหาสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์สูงสุด โดยการพิจารณาสัดส่วนโมล อัตราการไหลโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ (H₂, CO, CO₂ และ CH₄) รวมถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ผ่านการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus V9

3.2.2.1 องค์ประกอบของวัตถุดิบในแบบจำลอง

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์แบบประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของกล่องโฟม (PS) และกระดาษใบตองเทียม (PepPE)

ชนิดวัตถุดิบ	กล่องโฟม (PS)	กระดาษใบตองเทียม Plastic-coated paper (PepPE)	
	โพลีสไตรีน [15]	กระดาษ [16]	โพลีเอทิลีน [6]
	100%	82.45%	17.55%
ความชื้น (Moisture Content) (%wt, wet basis)	0.235	8.3	0.02
การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) (%wt, dry basis)			
คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)	0	20.72	0
สารระเหยได้ (Volatile Matter)	99.82	78.91	99.85
ขี้เถ้า (Ash)	0.18	0.37	0.15
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) (%wt, dry basis)			
ขี้เถ้า (Ash)	0.18	0.37	0.15
คาร์บอน (C)	90.31	57.5	85.81
ไฮโดรเจน (H)	9.41	5.3	13.86
ไนโตรเจน (N)	0	0.1	0.12
กำมะถัน (S)	0.08	0.03	0.06
ออกซิเจน (O)	0.02	36.7	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.3 สภาวะการดำเนินงานกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 3.4 สภาวะการดำเนินงานของสายป้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

Process	(1)	(2)	(3)
Raw material feed			
Temperature	25 °C		
Pressure	1 atm		
Mass flow rate	100 kg/hr		
Agent* feed			
Composition	Steam	Steam+CO ₂	Steam
Steam Temperature	200 °C		
Pressure	1 atm		
CO ₂ Temperature		25 °C	
Pressure		1 atm	
CO ₂ /Steam		0.5	
Agent/F**	1		
Sorbent feed			
Type			CaO
Temperature			25 °C
Pressure			1 atm
Sorbent/F			1
Heater 1: ปรับ condition ของสาย Raw material feed ก่อนเข้า Decomposition unit			
Unit	Heater		
Temperature	600 °C		
Pressure	1 atm		
Decomposition unit			
Unit	RYield		
Temperature	600 °C		
Pressure	1 atm		
Ash separation unit			
Unit	Sep		
Split fraction	ASH = 1		

*Agent = Gasifying agent

**Agent/F = Gasifying agent/Raw material feed ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สภาวะการดำเนินงานของสายป้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง (ต่อ)

Process	(1)	(2)	(3)
Heater 2: ปรับ condition ของสาย Raw material s ที่เอา ash ออกแล้ว ก่อนเข้า Gasification unit			
Unit	Heater		
Temperature	600 – 800 °C		
Pressure	1 atm		
Heater 3: ปรับ condition ของสาย Steam feed ก่อนเข้า Gasification unit			
Unit	Heater		
Temperature	600 – 800 °C		
Pressure	1 atm		
Heater 4: ปรับ condition ของสาย CO2 feed ก่อนเข้า Gasification unit			
Unit	Heater		
Temperature	600 – 800 °C		
Pressure	1 atm		
Heater 5: ปรับ condition ของสาย Sorbent feed ก่อนเข้า Gasification unit			
Unit	Heater		
Temperature	600 – 800 °C		
Pressure	1 atm		
Mixer unit			
Unit	Mixer		
Mixed	Steam+CO2		
Gasification unit			
Unit	RGibbs		
Temperature	600 – 800 °C		
Pressure	1 atm		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.4 กำหนดปฏิกิริยาเคมีใน Gasification unit (RGIBBS; Name: GASIFY)

ตารางที่ 3.6 ปฏิกิริยาเคมีที่กำหนดให้เกิดขึ้นใน Gasification unit

Rxn No.	Name	Reaction
1	Carbon complete combustion	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
2	Carbon incomplete combustion	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$
3	Hydrogen partial combustion	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$
4	Sulfur combustion	$S + O_2 \rightarrow SO_2$
5	H ₂ S formation	$S + H_2 \rightarrow H_2S$
6	Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$
7	Water-gas	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$
8	Water-gas shift	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
9	Methanation of carbon	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$
10	Steam reforming of methane	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$
11	Carbonation	$CaO + CO_2 \leftrightarrow CaCO_3$

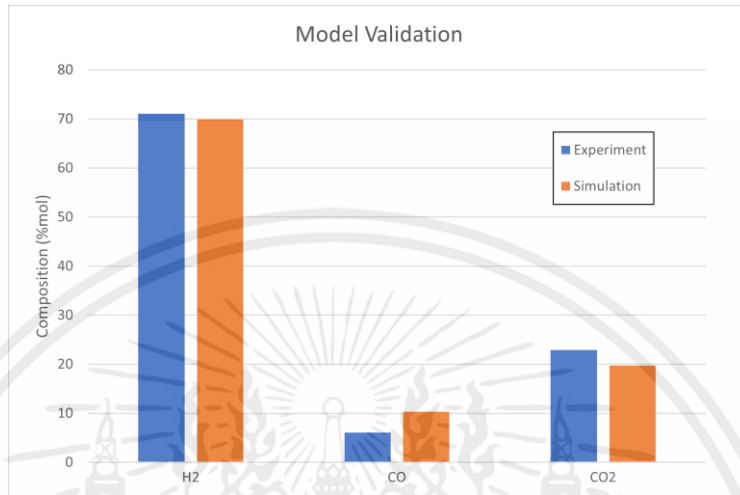
Process 3 (rows 1-11)
Process 1, 2 (rows 1-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับการทดลอง



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองกระบวนการกับการทดลอง

จากรูป 4.1 แสดงให้เห็นผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองดังกล่าวที่อุณหภูมิ 700 °C เห็นได้ว่าสัดส่วนโดยโมลของแก๊ส H₂, CO และ CO₂ ของการจำลองกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนด้วยรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยแล้ว พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือน้อยกว่า 10 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าเท่ากับ 2.69 แบบจำลองนี้จึงถือว่ามีความน่าเชื่อถือ สามารถใช้เป็นเครื่องมือศึกษาต่อไปได้

4.2 ผลของการจำลองกระบวนการ

ในการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยวัตถุดิบ 2 ชนิด ได้แก่ กล่องโพนอาหาร (PS) และ กระดาษใบตองเทียม (PepPE) และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 3 รูปแบบ ได้แก่

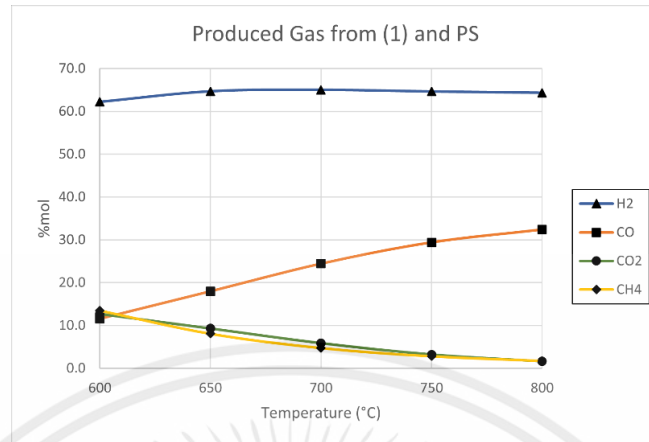
- (1) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา
- (2) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา
- (3) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารวมกับใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวดูดซับ

โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันในช่วง 600 ถึง 800 °C โดยแก๊สผลิตภัณฑ์ที่พิจารณาหลักๆ คือ แก๊ส H₂, CO, CO₂ และ CH₄ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ คือ แก๊ส H₂ และ CO

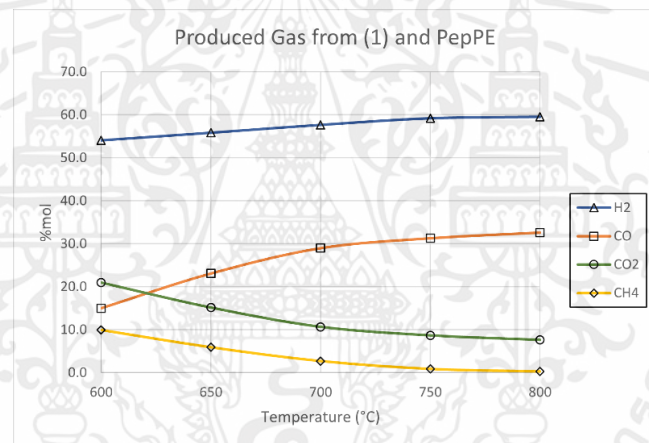
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลของผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

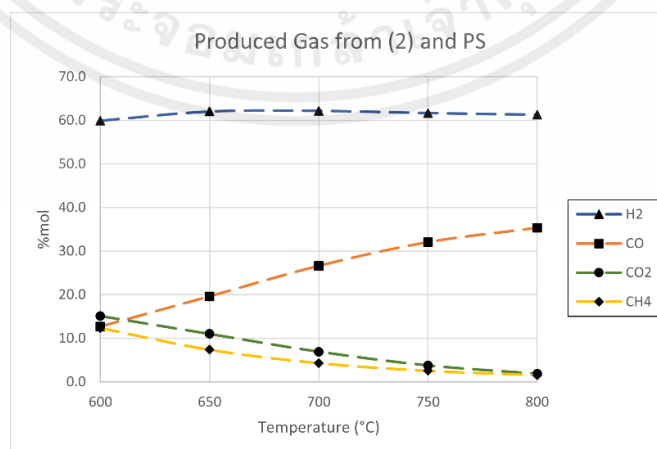
4.2.1.1 สัดส่วนโดยโมล (%mol) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ ในแต่ละกระบวนการ



รูปที่ 4.2 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (1)

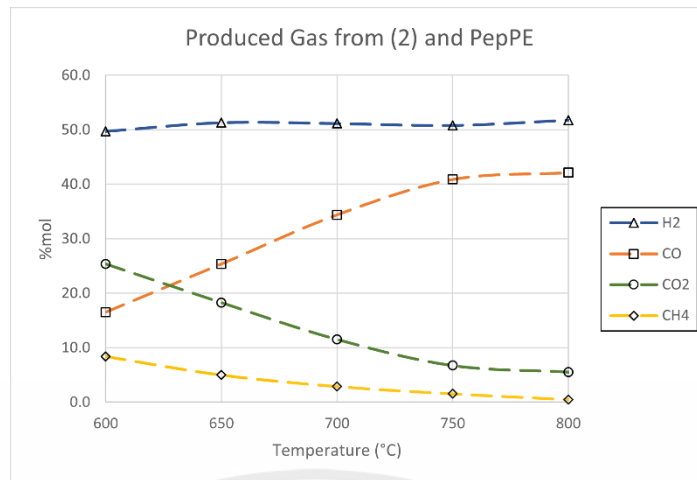


รูปที่ 4.3 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (1)

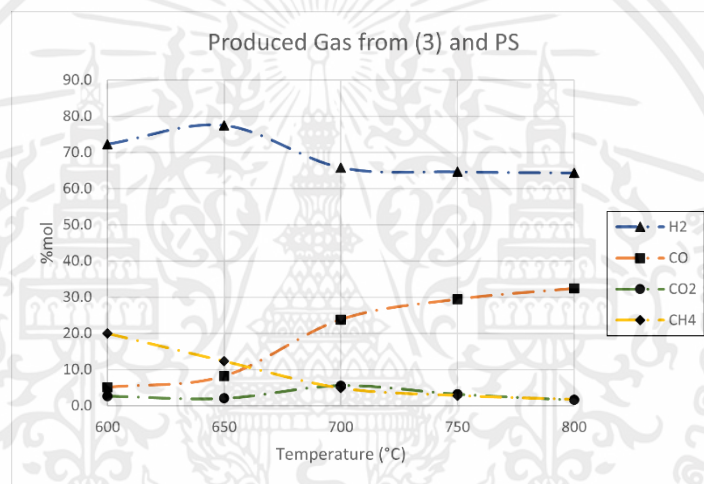


รูปที่ 4.4 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (2)

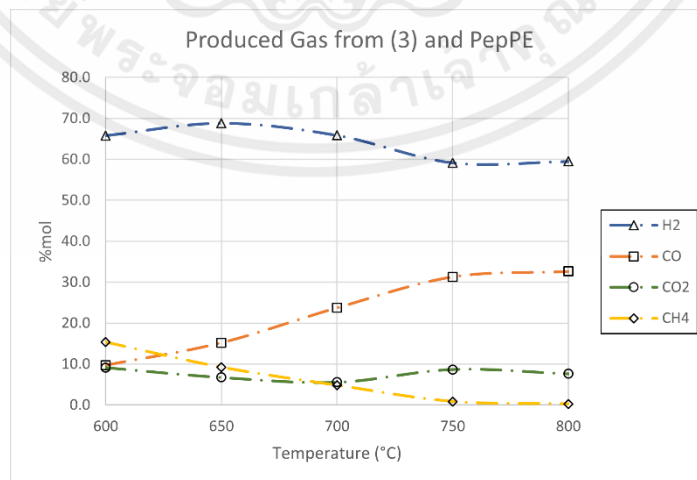
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (2)



รูปที่ 4.6 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (3)



รูปที่ 4.7 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ และใช้กระบวนการ (3)

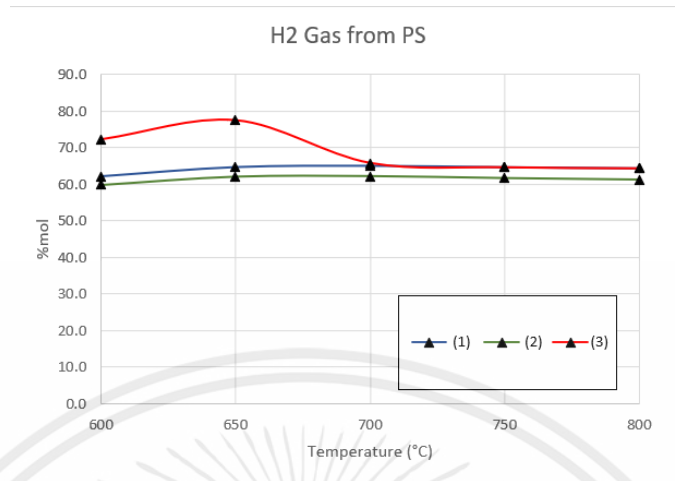
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 – 4.7 แสดงแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้งกระบวนการ 3 แบบ โดยกระบวนการแบบที่ (1) จะได้ว่า PS และ PepPE ได้ %mol ของ H_2 มากที่สุดในองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะส่งอิทธิพลให้ได้ %mol ของ H_2 เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในส่วน %mol ของ CO ก็เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในขณะที่ %mol ของ CO_2 และ CH_4 จะลดลงสวนทางกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาประเภทดูดความร้อนดำเนินไปข้างหน้าได้ดีขึ้น นั่นคือ rxn 6, 7 และ 10 (ปฏิกิริยา Boudouard, Water-gas, Steam reforming of methane ตามลำดับ)

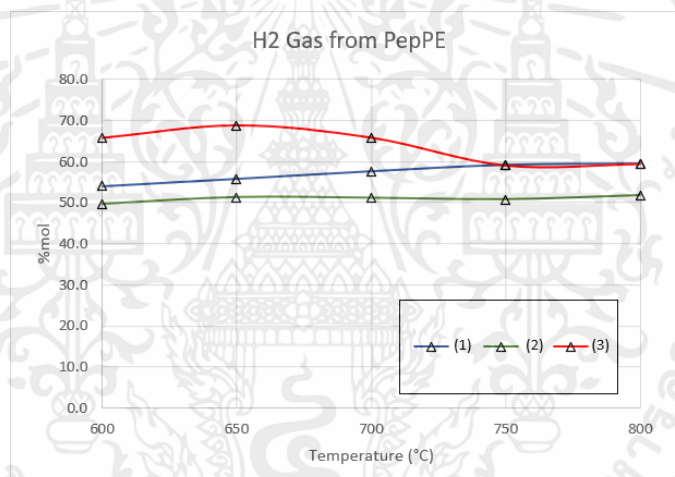
ต่อมากระบวนการแบบที่ (2) จะได้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกับกระบวนการแบบที่ (1) คือจะได้ว่า PS และ PepPE ได้ %mol ของ H_2 มากที่สุดในองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ $600 - 800\text{ }^{\circ}C$ จะส่งอิทธิพลให้ได้ %mol ของ H_2 เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในส่วน %mol ของ CO ก็เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในขณะที่ %mol ของ CO_2 และ CH_4 จะลดลงสวนทางกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

และกระบวนการแบบที่ (3) จะได้ว่า PS และ PepPE ได้ %mol ของ H_2 มากที่สุดในองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับกับกระบวนการทั้ง 2 แบบที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ แต่กรณีวัตถุดิบเป็น PS จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมให้ rxn 11 (ปฏิกิริยา Carbonation) ดำเนินไปข้างหน้า คือ อุณหภูมิ เท่ากับ $600 - 650\text{ }^{\circ}C$ ส่วน PepPE อยู่ในช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ $600 - 700\text{ }^{\circ}C$ ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกินช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ทำให้ %mol ของ H_2 ลดลง ในส่วน %mol ของ CO ก็เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในขณะที่ %mol ของ CO_2 มี %mol น้อย โดยในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม จะมี %mol ของ CO_2 เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากผลของ %mol ของ CO_2 ของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดนี้ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ๆ ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา จึงทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก และในส่วนของ %mol ของ CH_4 จะลดลงสวนทางกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

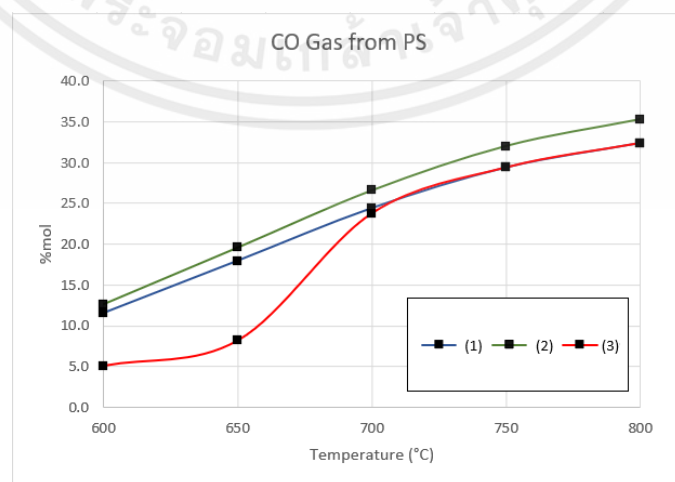
4.2.1.2 เปรียบเทียบสัดส่วนโดยโมล (%mol) ของแก๊สผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจากกระบวนการทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 4.8 H₂ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ

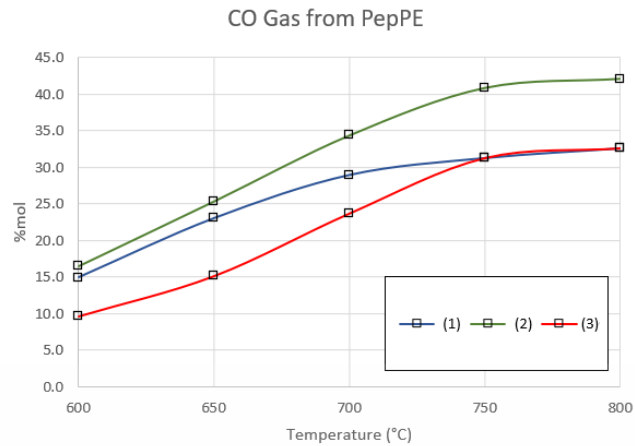


รูปที่ 4.9 H₂ ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ

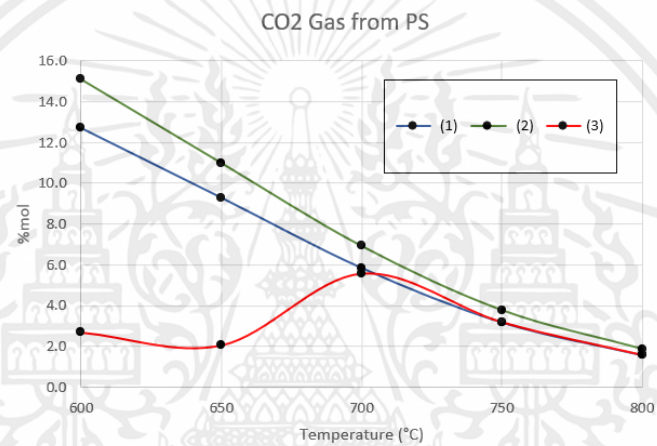


รูปที่ 4.10 CO ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ

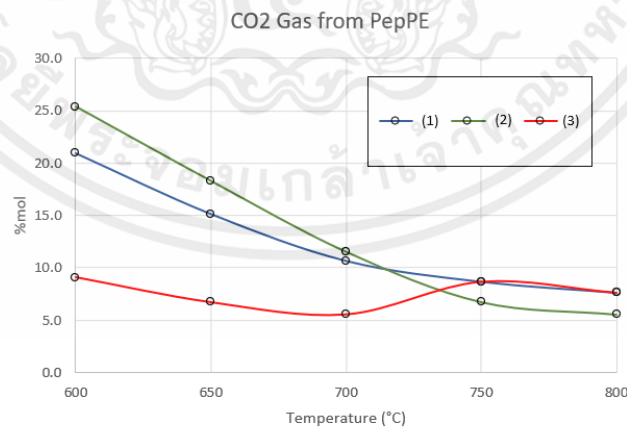
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 CO ที่ได้จากการบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ

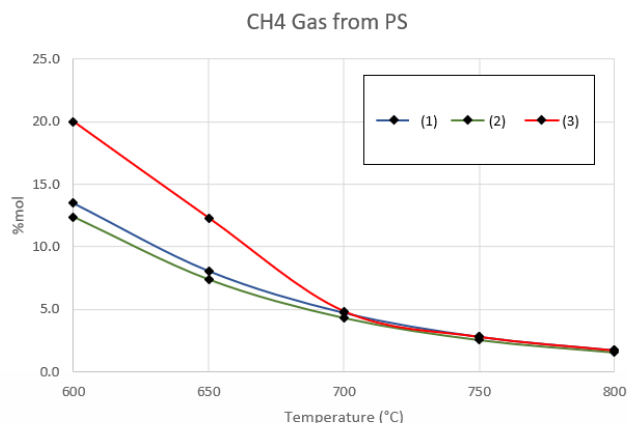


รูปที่ 4.12 CO₂ ที่ได้จากการบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ

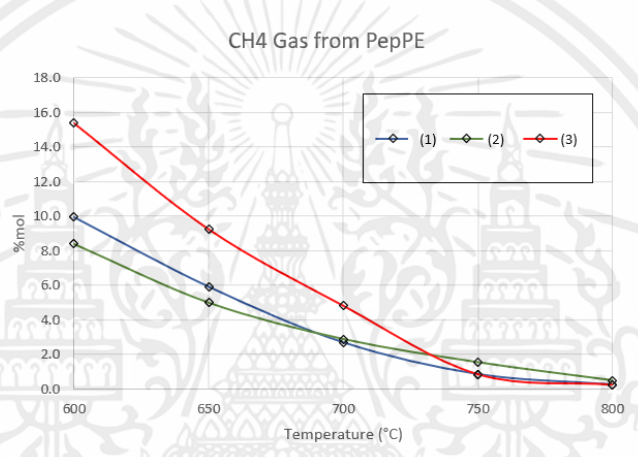


รูปที่ 4.13 CO₂ ที่ได้จากการบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 CH_4 ที่ได้จากการบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ



รูปที่ 4.15 CH_4 ที่ได้จากการบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ

จากรูปที่ 4.8 – 4.15 สัดส่วนโดยโมล (%mol) ของแก๊สผลิตภัณฑ์ในแต่ละชนิด จากกระบวนการทั้ง 3 แบบ เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้วัตถุดิบชนิดเดียวกัน จะได้ว่าในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมให้ rxn 11 ดำเนินไปข้างหน้าของ PS เท่ากับ 600 – 650 °C ส่วน PepPE อยู่ในช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ 600 – 700 °C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ %mol ของ H_2 จะเพิ่มขึ้น จะได้ค่า %mol ของ H_2 จากกระบวนการแบบที่ (3) มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือกระบวนการแบบที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

ในส่วนของ %mol ของ CO จะได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ %mol ของ CO จะเพิ่มขึ้น โดยผลจากวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด จะได้ %mol ของ CO จากกระบวนการแบบที่ (2) มากที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา และได้รองลงมาคือแบบที่ (1) และ (3) ตามลำดับ

ในส่วนของ %mol ของ CO_2 จะได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ %mol ของ CO_2 จะลดลง โดยผลจากวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด จะได้ %mol ของ CO_2 จากกระบวนการแบบที่ (2) มากกว่าแบบที่ (1) และ (3) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

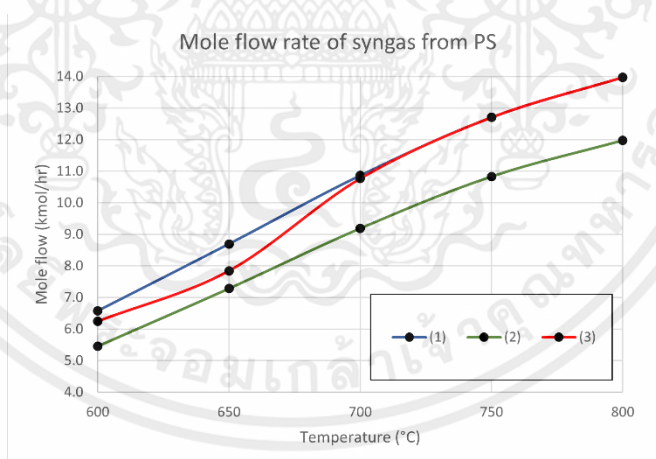
และในส่วนของ %mol ของ CH_4 จะได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ %mol ของ CH_4 จะลดลง โดยผลจากวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด จะได้ %mol ของ CH_4 จากกระบวนการแบบที่ (3) มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือแบบที่ (1) และแบบที่ (2) ตามลำดับ

แต่ในช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ $700 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของ PS และ $750 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของ PepPE จะได้ค่า %mol ของ H_2 , CO , CO_2 และ CH_4 จากกระบวนการแบบที่ (1) และแบบที่ (3) มีค่าเท่ากัน เนื่องจาก rxn 11 เกิดปฏิกิริยาผันกลับ ทำให้อิทธิพลของตัวดูดซับ CaO เกิดผลน้อยมากจนไม่มีอิทธิพล

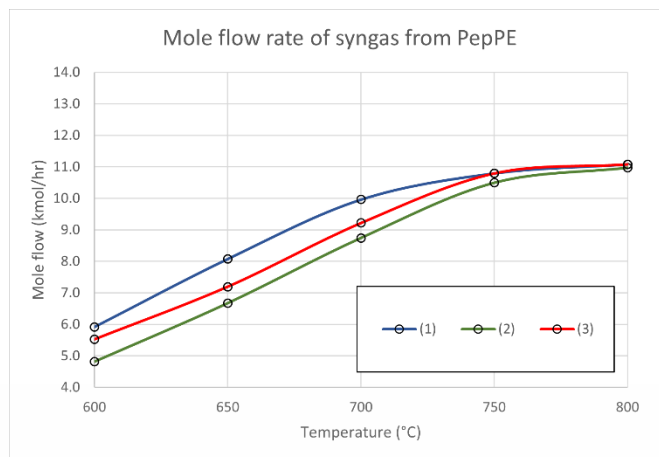
และเมื่อเปรียบเทียบ %mol ของ H_2 และ CO จากวัตถุดิบที่แตกต่างกัน 2 ชนิด จะได้ว่าที่อุณหภูมิ เท่ากับ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ H_2 จากกระบวนการ (3) เท่ากับ 77.47% ซึ่งมี %mol ของ H_2 มากกว่าการใช้ PepPE โดยเมื่อใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ H_2 จากกระบวนการ (3) เท่ากับ 68.83%

และที่อุณหภูมิ เท่ากับ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ CO จากกระบวนการ (2) เท่ากับ 32.03% ซึ่งมี %mol ของ CO น้อยกว่าการใช้ PepPE โดยเมื่อใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ CO จากกระบวนการ (2) เท่ากับ 40.90%

4.2.2 เปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงโมล (Mole flow rate) ของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 4.16 อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ PS เป็นวัตถุดิบ

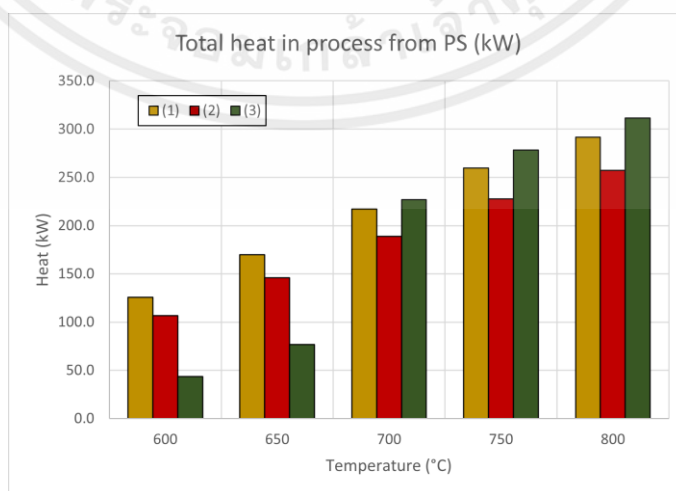


รูปที่ 4.17 อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ PepPE เป็นวัสดุติด

จากรูปที่ 4.16 – 4.17 แสดงอัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์ (แก๊ส H_2 และ CO) จะเห็นได้ว่ากระบวนการแบบที่ (1) มีอัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์มากที่สุด รองลงมาคือกระบวนการแบบที่ (2) และ (3) ตามลำดับ แต่ในช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ 700 - 800 °C ของ PS และช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ 750 - 800 °C ของ PepPE จะได้อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์ จากกระบวนการแบบที่ (1) และ (3) มีค่าเท่ากัน เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ rxn 11 เกิดปฏิกิริยาผันกลับ ทำให้อิทธิพลของตัวดูดซับ CaO เกิดผลน้อยมากจนไม่มีอิทธิพล

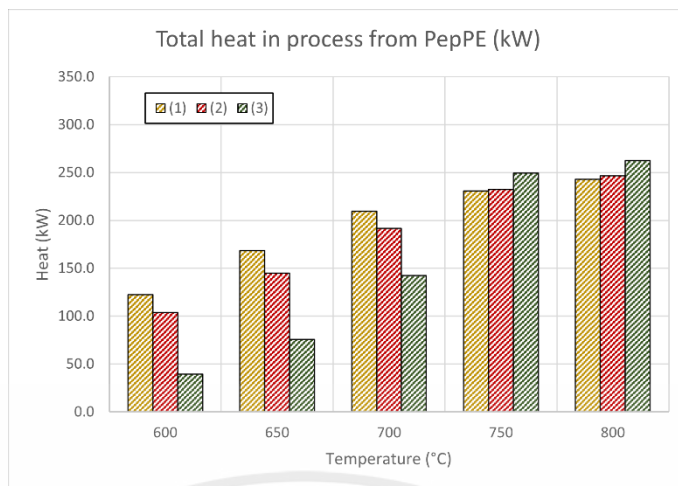
และเมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่อุณหภูมิหนึ่ง เช่น ที่อุณหภูมิเท่ากับ 700 °C เมื่อใช้ PS เป็นวัสดุติดจะได้อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการ (1) เท่ากับ 10.86 kmol/hr ซึ่งมีอัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์มากกว่าการใช้ PepPE โดยเมื่อใช้ PepPE เป็นวัสดุติดจะได้อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการ (1) เท่ากับ 9.96 kmol/hr

4.2.3 พลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 4.18 พลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PS เป็นวัสดุติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 พลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ

จากรูปที่ 4.18 – 4.19 แสดงพลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั้ง 3 แบบ เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อน จะได้ว่าในช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ 600 – 650 °C ของ PS และในช่วงอุณหภูมิ เท่ากับ 600 – 700 °C ของ PepPE จะได้ค่าพลังงานความร้อนในเครื่อง GASIFY ที่ได้จากกรณีใช้ (3) มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ CaO ทำงานเกิดเป็น rxn 11 เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และกรณีใช้กระบวนการ (2) มีค่าพลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการต่ำกว่า กรณีใช้กระบวนการ (1) เนื่องจากอัตราส่วน $CO_2/Steam$ ที่เข้าเครื่อง GASIFY ต่างกัน ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของ Gasifying agent จะส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการด้วย

และเมื่อเปรียบเทียบวัตถุดิบ เมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะได้ค่าพลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการมากกว่าการใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบตลอดช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

โครงการนี้ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของกล่องโฟม (PS) และกระดาดใบตองเทียม (PepPE) เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ (H_2 และ CO) โดยมีกระบวนการที่แตกต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ รูปแบบ ได้แก่ (1) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา (2) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา และ (3) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยารวมกับใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งจะทำการศึกษาด้วยการสร้างแบบจำลองกระบวนการผ่านโปรแกรม Aspen Plus V9 โดยทำการวิเคราะห์สัดส่วนโมล อัตราการไหลโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ (H_2 , CO , CO_2 และ CH_4) รวมถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่อง GASIFY ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ และได้กำหนดค่าความดันในกระบวนการ อัตราส่วนตัวทำปฏิกิริยาต่อวัตถุดิบ และอัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อวัตถุดิบคงที่ เพื่อหาสถานะการดำเนินงานของกระบวนการที่ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุด

จากการจำลองกระบวนการพบว่า เมื่อใช้วัตถุดิบเป็น PS และ PepPE แล้วต้องการให้ได้สัดส่วนโมลของแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด ควรเลือกกระบวนการเป็นแบบที่ (3) โดยให้ดำเนินกระบวนการที่อุณหภูมิ เท่ากับ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ H_2 และอัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการ (3) เท่ากับ 77.47% และ 7.84 kmol/hr ตามลำดับ ซึ่งมีมากกว่าการใช้ PepPE โดยเมื่อใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ H_2 และอัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการจากกระบวนการ (3) เท่ากับ 68.83% และ 7.20 kmol/hr ตามลำดับ และนอกจากนี้ ยังมีข้อดีที่ว่าพลังงานความร้อนที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันน้อยที่สุดด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 กระบวนการ โดยเมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะได้ค่าพลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการมากกว่าการใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ แต่อาจมีข้อเสียที่ว่าได้อัตราการไหลโดยโมลของแก๊สสังเคราะห์น้อยกว่าการเลือกกระบวนการเป็นแบบที่ (1) โดยเมื่อใช้ PS และ PepPE เป็นวัตถุดิบ จะได้ 8.70 kmol/hr และ 8.08 kmol/hr ตามลำดับ

และเมื่อต้องการให้ได้สัดส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด ควรเลือกกระบวนการเป็นแบบที่ (2) โดยให้ดำเนินกระบวนการที่อุณหภูมิ เท่ากับ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ CO และอัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการ (2) เท่ากับ 32.03% ซึ่งมีน้อยกว่าการใช้ PepPE โดยเมื่อใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบจะได้ %mol ของ CO เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40.90% แต่อัตราการไหลเชิงโมลรวมของแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการ (2) โดยเมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะมีค่ามากกว่าการใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.84 kmol/hr และ 10.49 kmol/hr ตามลำดับ และนอกจากนี้ ยังมีข้อดีที่ว่าพลังงานความร้อนที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันน้อยกว่ากระบวนการแบบที่ (1) โดยเมื่อใช้ PS เป็นวัตถุดิบจะได้ค่าพลังงานความร้อนรวมทั้งกระบวนการมากกว่าการใช้ PepPE เป็นวัตถุดิบ แต่อาจมีข้อเสียที่ว่าได้อัตราการไหลโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์น้อยกว่าการเลือกกระบวนการเป็นแบบที่ (1) เช่นเดียวกัน โดยเมื่อใช้ PS และ PepEP เป็นวัตถุดิบ จะได้ 12.70 kmol/hr และ 10.80 kmol/hr ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสถานะการดำเนินงานอื่นๆ ที่ส่งอิทธิพลต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มเติม เช่น ความดันที่ใช้ในการดำเนินงาน อัตราส่วนตัวทำปฏิกิริยาต่อวัตถุดิบ และอัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อวัตถุดิบ

บรรณานุกรม

- [1] İ. Yildiz, Fossil Fuels, in: Comprehensive Energy Systems, Elsevier, 2018: pp. 521–567. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00111-5>.
- [2] C.M.U. Energy Research and Development Institute – Nakornping, 6 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะ, 2022. https://erdi.cmu.ac.th/?page_id=267 (accessed May 1, 2023).
- [3] Pollution Control Department, Thailand State of Pollution Report 2021, 2022. www.pcd.go.th.
- [4] วันดี สันติวุฒิเมธี, รีไซเคิลขยะโฟม สิ่งที่ยังไม่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย, (2020). http://sarakadee.com/feature/2000/11/recycled_foam.htm (accessed May 1, 2023).
- [5] Sandaru K., ขึ้นชื่อว่าเป็น ‘บรรจุภัณฑ์กระดาษ’ ทำไมยังมีพลาสติก?, 2020. <https://starthaiup.com/whats-happening/non-plastic-paper-packaging/> (accessed May 1, 2023).
- [6] D. Saebea, P. Ruengrit, A. Arpornwichanop, Y. Patcharavorachot, Gasification of plastic waste for synthesis gas production, Energy Reports. 6 (2020) 202–207. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.043>.
- [7] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน, 2012.
- [8] T. Witton, Capture and Separation Technologies of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel, KKU Engineering. 38 (2011) 453–467.
- [9] S. Hashmi, S.A.A. Taqvi, Z. Abideen, J.P. Ahmed, M. Talha, M.A. Bhatti, H. Shahid, S.R. Naqvi, F. Almomani, Simulation of steam gasification of halophyte biomass for syngas production using Aspen Plus®, Biomass Convers Biorefin. (2022). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02429-w>.
- [10] M. Faraji, M. Saidi, Hydrogen-rich syngas production via integrated configuration of pyrolysis and air gasification processes of various algal biomass: Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- simulation and evaluation using Aspen Plus software, *Int J Hydrogen Energy*. 46 (2021) 18844–18856. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.047>.
- [11] M. MAHISHI, D. GOSWAMI, An experimental study of hydrogen production by gasification of biomass in the presence of a CO₂ sorbent, *Int J Hydrogen Energy*. 32 (2007) 2803–2808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.030>.
- [12] P. Chaiwatanodom, S. Vivanpatarakij, S. Assabumrungrat, Thermodynamic analysis of biomass gasification with CO₂ recycle for synthesis gas production, *Appl Energy*. 114 (2014) 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.052>.
- [13] N. Sadhwani, Z. Liu, M.R. Eden, S. Adhikari, Simulation, Analysis, and Assessment of CO₂ Enhanced Biomass Gasification, in: 2013: pp. 421–426. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63234-0.50071-3>.
- [14] Y. Chai, N. Packham, M. Wang, Process improvement analysis of pyrolysis/gasification of biomass and waste plastics with carbon capture and utilisation through process simulation, *Fuel*. 324 (2022) 124571. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124571>.
- [15] I. Dubdub, M. Al-Yaari, Pyrolysis of Mixed Plastic Waste: I. Kinetic Study, *Materials*. 13 (2020) 4912. <https://doi.org/10.3390/ma13214912>.
- [16] S. Ladpala, N. Ketjoy, W. Rakwichian, P. Intanon, Performance Evaluation of a 25 kW e Biomass Power Generation System Prototype for Community in Thailand, 2007.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลที่ได้จากแบบจำลอง

1.1 อัตราการไหลเชิงโมล (Mole flow rate) ของ Product ที่ได้ออกจากเครื่อง DECOMP และ Agent ก่อนเข้าเครื่อง GASIFY

ตารางผนวกที่ 1 อัตราการไหลเชิงโมลของทุกสายเข้าเครื่อง GASIFY

Mass flow (kmol/hr)	Raw material		Process					
			Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6
	PS	PepPE	Process (1) (เมื่อใช้ PS)	Process (1) (เมื่อใช้ PepPE)	Process (2) (เมื่อใช้ PS)	Process (2) (เมื่อใช้ PepPE)	Process (3) (เมื่อใช้ PS)	Process (3) (เมื่อใช้ PepPE)
H ₂	4.657	3.194	-	-	-	-	-	-
CO ₂	-	-	-	-	0.757	0.757	-	-
C	7.501	4.873	-	-	-	-	-	-
O ₂	0.001	0.867	-	-	-	-	-	-
N ₂	-	0.003	-	-	-	-	-	-
S	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-
H ₂ O	0.013	0.380	5.538	5.171	3.688	3.321	5.538	5.171
CaO	-	-	-	-	-	-	1.783	1.783
Total	12.174	9.319	5.538	5.171	4.445	4.078	7.321	6.954

1.2 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ

ตารางผนวกที่ 2 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการใช้ (1) Steam เป็น Gasifying agent โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นถ่านโค้ก (PS)

Temperature (°C)	600	650	700	750	800
Stream	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT
Mole flow (kmol/hr)					
H2	5.54	6.80	7.90	8.73	9.30
CO	1.03	1.89	2.97	3.97	4.68
CO2	1.13	0.98	0.71	0.43	0.23
CH4	1.20	0.85	0.57	0.38	0.25
C	4.14	3.78	3.25	2.72	2.35
O2	2.48E-24	4.10E-23	4.23E-22	2.81E-21	1.27E-20
N2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	1.16E-15	1.01E-14	7.36E-14	4.52E-13	2.37E-12
H2O	2.26	1.70	1.16	0.72	0.42
H2S	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03
SO2	1.11E-12	1.97E-12	2.83E-12	3.30E-12	3.28E-12
CaO					
CaCO3					
Syngas flow rate	6.57	8.70	10.86	12.70	13.97
H2/CO	5.38	3.60	2.66	2.20	1.99
%mol					
4 gases (H ₂ +CO+CO ₂ +CH ₄)	8.91	10.52	12.15	13.51	14.45
H2	62.23	64.67	65.00	64.62	64.33
CO	11.56	17.97	24.42	29.39	32.38
CO2	12.71	9.30	5.86	3.19	1.58
CH4	13.50	8.06	4.72	2.79	1.71
Mass flow (kg/hr)					
H2	11.18	13.72	15.92	17.60	18.74
CO	28.85	52.96	83.09	111.25	131.05
CO2	49.85	43.08	31.34	18.99	10.08
CH4	19.29	13.61	9.20	6.06	3.96
C	49.68	45.44	39.03	32.68	28.19
O2	7.92E-23	1.31E-21	1.35E-20	8.98E-20	4.07E-19
N2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	3.7E-14	3.2E-13	2.4E-12	1.4E-11	7.6E-11
H2O	40.66	30.69	20.92	12.92	7.48
H2S	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
SO2	7.13E-11	1.26E-10	1.82E-10	2.12E-10	2.10E-10
ASH	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0
PAPER					
PE					
CaO					
CaCO3					
Total flow rate	199.59	199.59	199.59	199.59	199.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 3 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการใช้ (1) Steam เป็น Gasifying agent โดยวัสดุดิบที่ใช้เป็นกระดาดไบตองเทียม (PepPE)

Temperature (°C)	600	650	700	750	800
Stream	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT
Mole flow (kmol/hr)					
H2	4.64	5.72	6.63	7.06	7.16
CO	1.29	2.36	3.34	3.74	3.93
CO2	1.80	1.55	1.23	1.04	0.92
CH4	0.85	0.61	0.31	0.10	0.03
C	0.93	0.35	0.00	0.00	0.00
O2	3.93E-24	6.47E-23	9.62E-22	1.73E-20	2.65E-19
N2	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03
S	5.69E-16	4.95E-15	3.56E-14	2.19E-13	1.17E-12
H2O	2.40	1.81	1.49	1.48	1.53
H2S	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03
SO2	8.80E-13	1.55E-12	3.23E-12	1.04E-11	3.69E-11
CaO					
CaCO3					
Syngasl flow rate	5.92	8.08	9.96	10.80	11.08
H2/CO	3.60	2.42	1.99	1.89	1.82
%mol					
4 gases (H ₂ +CO+CO ₂ +CH ₄)	8.58	10.24	11.50	11.93	12.03
H2	54.04	55.81	57.63	59.16	59.49
CO	15.01	23.09	29.00	31.30	32.63
CO2	20.98	15.16	10.67	8.67	7.62
CH4	9.97	5.93	2.70	0.86	0.26
Mass flow (kg/hr)					
H2	9.34	11.52	13.36	14.23	14.43
CO	36.05	66.24	93.42	104.63	109.94
CO2	79.20	68.34	54.03	45.56	40.36
CH4	13.72	9.74	4.98	1.64	0.50
C	11.19	4.19	0.00	0.00	0.00
O2	1.26E-22	2.07E-21	3.08E-20	5.53E-19	8.48E-18
N2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
S	1.8E-14	1.6E-13	1.1E-12	7.0E-12	3.8E-11
H2O	43.22	32.70	26.93	26.65	27.49
H2S	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SO2	5.63E-11	9.91E-11	2.07E-10	6.68E-10	2.36E-09
ASH	0	0	0	0	0
PS					
PAPER	0	0.00	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO					
CaCO3					
Total flow rate	192.85	192.85	192.85	192.85	192.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 4 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการใช้ (2) Steam + CO₂ เป็น Gasifying agent โดยวัสดุที่ใช้เป็นถ่านโค้ก (PS)

Temperature (°C)	600	650	700	750	800
Stream	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT
Mole flow (kmol/hr)					
H ₂	4.50	5.54	6.44	7.13	7.60
CO	0.95	1.75	2.75	3.70	4.38
CO ₂	1.14	0.98	0.72	0.44	0.23
CH ₄	0.93	0.66	0.45	0.29	0.19
C	5.24	4.87	4.34	3.82	3.45
O ₂	2.49E-24	4.11E-23	4.26E-22	2.86E-21	1.35E-20
N ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	1.22E-15	1.06E-14	7.71E-14	4.73E-13	2.50E-12
H ₂ O	1.99	1.50	1.03	0.64	0.37
H ₂ S	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03
SO ₂	1.37E-12	2.43E-12	3.50E-12	4.10E-12	4.09E-12
CaO					
CaCO ₃					
Syngasl flow rate	5.46	7.28	9.19	10.84	11.98
H ₂ /CO	4.73	3.16	2.34	1.93	1.74
%mol					
4 gases (H ₂ +CO+CO ₂ +CH ₄)	7.52	8.92	10.35	11.57	12.41
H ₂	59.85	62.02	62.17	61.65	61.27
CO	12.66	19.60	26.60	32.03	35.30
CO ₂	15.11	11.00	6.93	3.78	1.88
CH ₄	12.37	7.38	4.30	2.54	1.55
Mass flow (kg/hr)					
H ₂	9.08	11.16	12.98	14.38	15.32
CO	26.68	48.99	77.13	103.76	122.68
CO ₂	50.04	43.23	31.58	19.26	10.28
CH ₄	14.94	10.56	7.14	4.71	3.08
C	62.91	58.48	52.15	45.92	41.48
O ₂	7.95E-23	1.32E-21	1.36E-20	9.15E-20	4.30E-19
N ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	3.9E-14	3.4E-13	2.5E-12	1.5E-11	8.0E-11
H ₂ O	35.85	27.08	18.51	11.48	6.66
H ₂ S	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
SO ₂	8.81E-11	1.56E-10	2.24E-10	2.63E-10	2.62E-10
ASH	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0
PAPER					
PE					
CaO					
CaCO ₃					
Total flow rate	199.59	199.59	199.59	199.59	199.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 5 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการใช้ (2) Steam + CO₂ เป็น Gasifying agent โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นกระดาษใบตองเทียม (PepPE)

Temperature (°C)	600	650	700	750	800
Stream	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT
Mole flow (kmol/hr)					
H ₂	3.62	4.47	5.23	5.81	6.05
CO	1.20	2.21	3.52	4.68	4.92
CO ₂	1.85	1.59	1.18	0.77	0.65
CH ₄	0.61	0.44	0.30	0.18	0.06
C	1.97	1.39	0.64	0.00	0.00
O ₂	4.03E-24	6.67E-23	7.01E-22	5.55E-21	8.00E-20
N ₂	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03
S	6.11E-16	5.39E-15	3.82E-14	2.40E-13	1.27E-12
H ₂ O	2.06	1.56	1.07	0.72	0.73
H ₂ S	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03
SO ₂	1.16E-12	2.03E-12	2.95E-12	4.07E-12	1.27E-11
CaO					
CaCO ₃					
Syngasl flow rate	4.82	6.68	8.74	10.49	10.97
H ₂ /CO	3.01	2.02	1.49	1.24	1.23
%mol					
4 gases (H ₂ +CO+CO ₂ +CH ₄)	7.28	8.70	10.22	11.44	11.68
H ₂	49.69	51.32	51.15	50.80	51.79
CO	16.52	25.38	34.41	40.90	42.15
CO ₂	25.38	18.29	11.54	6.74	5.56
CH ₄	8.41	5.00	2.90	1.55	0.50
Mass flow (kg/hr)					
H ₂	7.29	9.00	10.54	11.72	12.19
CO	33.67	61.88	98.51	131.12	137.88
CO ₂	81.25	70.06	51.90	33.97	28.58
CH ₄	9.81	6.99	4.75	2.85	0.94
C	23.67	16.74	7.67	0.00	0.00
O ₂	1.29E-22	2.13E-21	2.24E-20	1.78E-19	2.56E-18
N ₂	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
S	2.0E-14	1.7E-13	1.2E-12	7.7E-12	4.1E-11
H ₂ O	37.03	28.04	19.35	13.06	13.12
H ₂ S	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SO ₂	7.41E-11	1.30E-10	1.89E-10	2.61E-10	8.15E-10
ASH	0	0	0	0	0
PS					
PAPER	0	0.00	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO					
CaCO ₃					
Total flow rate	192.85	192.85	192.85	192.85	192.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 6 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการใช้ (3) Steam เป็น Gasifying agent และ CaO เป็นตัวดูดซับ เป็น Gasifying agent โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นถ่านหิน (PS)

Temperature (°C)	600	650	700	750	800
Stream	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT
Mole flow (kmol/hr)					
H2	5.84	7.09	7.91	8.73	9.30
CO	0.41	0.75	2.86	3.97	4.68
CO2	0.22	0.19	0.67	0.43	0.23
CH4	1.61	1.13	0.58	0.38	0.25
C	3.48	3.65	3.28	2.72	2.35
O2	4.73E-25	7.87E-24	3.98E-22	2.82E-21	1.18E-20
N2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	9.12E-16	7.96E-15	7.26E-14	4.52E-13	2.37E-12
H2O	1.14	0.86	1.13	0.72	0.42
H2S	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03	2.49E-03
SO2	2.02E-13	3.62E-13	2.66E-12	3.30E-12	3.28E-12
CaO	0.00	0.00	1.67	1.78	1.78
CaCO3	1.78	1.78	0.11	0.00	0.00
Syngasl flow rate	6.24	7.84	10.77	12.70	13.97
H2/CO	14.26	9.46	2.77	2.20	1.99
%mol					
4 gases (H ₂ +CO+CO ₂ +CH ₄)	8.07	9.16	12.02	13.51	14.45
H2	72.27	77.47	65.80	64.62	64.33
CO	5.07	8.19	23.79	29.39	32.38
CO2	2.68	2.05	5.57	3.19	1.58
CH4	19.98	12.29	4.84	2.79	1.71
Mass flow (kg/hr)					
H2	11.76	14.30	15.94	17.60	18.74
CO	11.46	21.01	80.07	111.25	131.05
CO2	9.53	8.27	29.45	18.99	10.08
CH4	25.88	18.06	9.33	6.06	3.96
C	41.78	43.89	39.41	32.68	28.19
O2	1.51E-23	2.52E-22	1.27E-20	9.02E-20	3.77E-19
N2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	2.9E-14	2.6E-13	2.3E-12	1.4E-11	7.6E-11
H2O	20.59	15.49	20.43	12.92	7.48
H2S	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
SO2	1.29E-11	2.32E-11	1.70E-10	2.12E-10	2.10E-10
ASH	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0
PAPER					
PE					
CaO	0.00	0.00	93.80	100.00	100.00
CaCO3	178.48	178.48	11.06	0.00	0.00
Total flow rate	121.10	121.10	194.72	199.59	199.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวกที่ 7 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการใช้ (3) Steam เป็น Gasifying agent และ CaO เป็นตัวดูดซับ เป็น Gasifying agent โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นกระดาสไบตองเทียม (PepPE)

Temperature (°C)	600	650	700	750	800
Stream	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT	PRODUCT
Mole flow (kmol/hr)					
H ₂	4.82	5.90	6.78	7.06	7.16
CO	0.71	1.30	2.44	3.74	3.93
CO ₂	0.67	0.58	0.57	1.04	0.92
CH ₄	1.13	0.79	0.50	0.10	0.03
C	0.59	0.42	0.00	0.00	0.00
O ₂	1.46E-24	2.42E-23	3.42E-22	1.73E-20	2.74E-19
N ₂	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03	3.45E-03
S	4.49E-16	3.91E-15	3.02E-14	2.19E-13	1.17E-12
H ₂ O	1.68	1.26	0.97	1.48	1.53
H ₂ S	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03	1.04E-03
SO ₂	3.14E-13	5.57E-13	1.11E-12	1.04E-11	3.69E-11
CaO	0.00	0.00	0.42	1.78	1.78
CaCO ₃	1.78	1.78	1.36	0.00	0.00
Syngas flow rate	5.53	7.20	9.22	10.80	11.08
H ₂ /CO	6.79	4.53	2.77	1.89	1.82
%mol					
4 gases (H ₂ +CO+CO ₂ +CH ₄)	7.32	8.57	10.29	11.93	12.03
H ₂	65.81	68.83	65.86	59.16	59.49
CO	9.69	15.19	23.74	31.30	32.63
CO ₂	9.11	6.73	5.57	8.67	7.62
CH ₄	15.39	9.25	4.82	0.86	0.26
Mass flow (kg/hr)					
H ₂	9.71	11.89	13.66	14.23	14.43
CO	19.87	36.46	68.43	104.63	109.94
CO ₂	29.34	25.38	25.23	45.56	40.36
CH ₄	18.07	12.71	7.96	1.64	0.50
C	7.06	5.04	0.00	0.00	0.00
O ₂	4.66E-23	7.73E-22	1.10E-20	5.53E-19	8.77E-18
N ₂	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
S	1.4E-14	1.3E-13	9.7E-13	7.0E-12	3.8E-11
H ₂ O	30.19	22.76	17.55	26.65	27.49
H ₂ S	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SO ₂	2.01E-11	3.57E-11	7.12E-11	6.68E-10	2.36E-09
ASH	0	0	0	0	0
PS					
PAPER	0	0.00	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	23.70	100.00	100.00
CaCO ₃	178.48	178.48	136.19	0.00	0.00
Total flow rate	114.37	114.37	132.96	192.85	192.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวธัชกร ปานเนียม
วัน เดือน ปีเกิด	9 มกราคม พ.ศ. 2544
ที่อยู่	39/2 หมู่ 1 ต.บางมัญ อ.เมืองสิงห์บุรี จ.สิงห์บุรี 16000
Email	62010408@kmitl.ac.th, thachakorn.pn@gmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 – 2562 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย พ.ศ. 2562 – ปัจจุบัน ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	นักศึกษาฝึกงาน ที่ บริษัท พีเอสอี พอร์ สปีด จำกัด มิถุนายน – กรกฎาคม พ.ศ. 2565



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้