

ผลของชนิดของเสียที่มีต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วย
คาร์บอนไดออกไซด์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF WASTE TYPES ON SYNGAS PRODUCTION THROUGH CO₂ GASIFICATION

MISS PIMCHANOK ANUTHAWONG

MISS PUTTARAK WISUWONG

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง ผลของชนิดของเสียที่มีต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการ
แก๊สซิฟิเคชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์
โดย นางสาวพิมพ์ชนก อนุทวงษ์ และ นางสาวพุทธรัศม์ วิสุวงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ
ปริญญาานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

ญาณิพร พัทธวรโชติ

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ)

กรรมการ

(ศ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

ธนวรรณ พิณรัตน์

กรรมการ

(ผศ.ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	ผลของชนิดของเสียที่มีต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์
โดย	นางสาวพิมพ์ชนก อนุทวงษ์ และ นางสาวพุทธรักษ์ วิสุวงษ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการศึกษาผลของชนิดของเสีย ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษชีไก่ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus V9 ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (H_2/CO) และค่าความร้อนต่ำ (LHV) จากการจำลองกระบวนการพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันและการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย ส่งผลให้อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงที่เหมือนกัน โดยมี การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์และการลดลงของไฮโดรเจนและมีเทน รวมถึงส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับของเสียทุกชนิด คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของของเสียแต่ละชนิดพบว่ายังไม่เป็นไปตามจุดประสงค์ เนื่องจากโครงการนี้มุ่งเน้นที่จะผลิตแก๊สสังเคราะห์ให้ได้อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 2 เพื่อใช้ในการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) ดังนั้นจึงปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยเพิ่มหน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ (เครื่องปฏิกรณ์วอเตอร์แก๊สซิฟิ) หลังเครื่องแก๊สซิฟิเคชันเพื่อลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และเพิ่มไฮโดรเจน จากการศึกษาพบว่าเครื่องปฏิกรณ์วอเตอร์แก๊สซิฟิซึ่งทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำที่ 400 องศาเซลเซียส จะได้อัตราส่วนของไฮโดรเจนประมาณ 2 ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของโครงการวิจัย

คำสำคัญ: แก๊สซิฟิเคชัน; แก๊สสังเคราะห์; คาร์บอนไดออกไซด์; ของเสีย; การจำลองกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Effect of waste types on syngas production through CO ₂ gasification
By	Miss Pimchanok Anuthawong and Miss Puttarak Wisuwong
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2022
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Yaneeporn Patcharavorachot

Abstract

This project presents a study on the effects of different types of waste, including pinewood, rice straw, poultry litter and high-density polyethylene plastic (HDPE), on syngas production through carbon dioxide gasification. The Aspen Plus V9 simulator was used to examine the influence of key parameters (i.e., gasifier temperature and gasifying agent to solid waste ratio) on syngas components, H₂/CO ratio, and lower heating value (LHV) of syngas produced. The result indicates that an increase in gasifier temperature and the gasifying agent to solid waste ratio resulted in similar trends of increasing carbon monoxide while decreasing hydrogen and methane contents in syngas. Additionally, LHV of the produced syngas tended to decrease. Therefore, the optimal operating conditions of gasification for all types of waste were at a temperature of 800 °C, atmospheric pressure, with a gasifying agent to solid waste ratio of 2. However, the H₂/CO of syngas obtained from each waste type did not meet the expected value because this study aimed to achieve a H₂/CO of approximately 2 to produce methanol. Consequently, the carbon monoxide removal unit (water gas shift reactor) was added after gasifier to decrease carbon monoxide and increase hydrogen. From our study, it was found that the water gas shift reactor which is operated at a low temperature of 400 °C can provide the H₂/CO ratio around 2.

Keywords: Gasification; Syngas; Carbon dioxide; Waste; Process simulation

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา คำแนะนำ เสนอแนวคิด ให้ความรู้ อันเป็นประโยชน์และถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้แก่ข้าพเจ้า และยังเอาใจใส่ในทุกรายละเอียด ทุกขั้นตอน ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตั้งแต่เริ่มดำเนินการจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นายธนวัฒน์ เอ็นตุง ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ ให้กำลังใจ อีกทั้งยังช่วยชี้แนะ แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จ

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม รวมไปถึงครอบครัวของข้าพเจ้า และเพื่อนนักศึกษา ปริญญาตรีวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่คอยสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

พิมพ์ชนก อนุทวงษ์
พุทธรักษ์ วิสุวงษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ของเสีย (Waste).....	4
2.1.1 ชีวมวล (Biomass).....	4
2.1.2 ของเสียพลาสติก (Plastic waste).....	5
2.1.3 องค์ประกอบของของเสีย.....	6
2.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	7
2.3 ตัวทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน	9
2.4 แก๊สสังเคราะห์.....	9
2.4.1 องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์.....	9
2.4.2 ค่าความร้อน (Heating Value).....	10
2.4.3 การประยุกต์ใช้แก๊สสังเคราะห์	11

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง	15
3.1 แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	15
3.2 แบบจำลองการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	17
3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง	18
3.3.1 การสร้างแบบจำลอง	18
3.3.2 การตรวจสอบแบบจำลอง	19
3.3.3 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	20
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผล.....	22
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	22
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์	23
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	26
4.4 ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิด	28
4.5 อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์	30
4.6 การปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	32
4.6.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	32
4.6.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	34
4.6.3 ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิด	37
4.6.4 อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์	38
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการ	42
5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
บรรณานุกรม.....	44
ภาคผนวก.....	49

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเสีย (เปอร์เซ็นต์โดยมวล)	7
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สสังเคราะห์	10
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเสีย (เปอร์เซ็นต์โดยมวล)	16
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาและสภาวะการดำเนินการ	17
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองและสภาวะดำเนินการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	19
ตารางที่ 3.4 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารและการวิเคราะห์แยกธาตุของฟางข้าวโพด (เปอร์เซ็นต์โดยมวล).....	20
ตารางที่ 4.1 สภาวะในการดำเนินการและอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ของของเสียทั้ง 4 ชนิด	32
ตารางที่ 4.2 สภาวะการดำเนินการหลังการปรับปรุงกระบวนการที่เหมาะสมและค่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ในการประยุกต์ใช้แก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตเมทานอลจากของเสียแต่ละชนิด	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรพลังงานชีวมวล	5
รูปที่ 2.2 ของเสียพลาสติกในประเทศไทย	5
รูปที่ 2.3 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	7
รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	15
รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองการปรับปรุงการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	17
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองและการทดลอง	23
รูปที่ 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วน	25
รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อองค์ประกอบ	27
รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์	28
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์	29
รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษซีเมนต์ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	31
รูปที่ 4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนของตัว ทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 หลังจากปรับปรุงกระบวนการ (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษซีเมนต์ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	34
รูปที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อองค์ประกอบ	36
รูปที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์	37
รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์	38
รูปที่ 4.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ หลังจากปรับปรุงกระบวนการ (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษซีเมนต์ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเศรษฐกิจมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความต้องการในการใช้พลังงานภายในประเทศเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามมนุษย์ก็เริ่มมีความตระหนักเกี่ยวกับผลเสียของการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีต่อสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตรายซึ่งเกิดจากแก๊สเรือนกระจก รวมถึงการหมดลงอย่างรวดเร็วของเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับแหล่งพลังงานทดแทนหรือพลังงานสะอาดเพื่อทดแทนการใช้พลังงานที่ผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล [1]

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ง่ายต่อการจัดเก็บ และขนส่ง อีกทั้งยังเป็นเชื้อเพลิงพลังงานสีเขียวที่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า เชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล (Biomass Energy Technology) ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) การไพโรไลซิส (Pyrolysis) และการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification) [2] จากกระบวนการผลิตพลังงานจากชีวมวลข้างต้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการที่แตกต่างกันจะได้ผลิตภัณฑ์หรือพลังงานที่ต่างกันด้วย ในการศึกษาชิ้นนี้สนใจกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนชีวมวลเป็นแก๊สสังเคราะห์ (ส่วนใหญ่เป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์) สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสม หรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยการใช้ประโยชน์ในรูปของแก๊สผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) ไดเมทิลอีเธอร์ (Dimethyl Ether: DME) การผลิตแอมโมเนีย และใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์สารเคมีหลายชนิด [3,4]

นอกจากของเสียประเภทชีวมวลแล้ว ปัจจุบันขยะพลาสติกก็มีมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง หาง่าย และราคาถูก แต่เทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการขยะพลาสติกยังไม่สามารถรองรับปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ จากผลสำรวจพบว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะพลาสติกเฉลี่ย 2 ล้านตันต่อปี โดยมีเพียงร้อยละ 20 เท่านั้นที่ถูกนำไปรีไซเคิลอย่างถูกวิธี ในขณะที่อีกร้อยละ 78 ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ และมีบางส่วนที่รั่วไหลสู่สภาพแวดล้อม [5] กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจึงเป็นเทคโนโลยีที่แสดงถึงความเป็นไปได้ในการลดปริมาณขยะพลาสติกที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ นอกจากนี้ยัง

สามารถผลิตพลังงานหรือแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า ซึ่งมีค่าความร้อนที่เหมาะสมกับการใช้งานที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลากหลาย โดยข้อได้เปรียบหลักของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเทียบกับการจัดการขยะพลาสติกวิธีอื่นคือ ความยืดหยุ่นของสภาวะการดำเนินการ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับพลาสติกที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันหรืออาจปนเปื้อนอยู่กับสารปนชนิดอื่นได้ เช่น ชีวมวล หรือขยะมูลฝอย เป็นต้น [6]

เมื่อพิจารณากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งถือเป็นกระบวนการเคมีเชิงความร้อนที่สามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงคาร์บอนให้เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีมูลค่า โดยมีไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย พบว่าองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสารป้อน เช่น ของเสียจากอุตสาหกรรม แปรรูปไม้ มูลสัตว์ ผลิตผลทางการเกษตร หรือพลาสติก สภาวะที่ใช้ในการดำเนินการ โดยทั่วไปจะทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ รวมถึงตัวทำปฏิกิริยา (Gasifying agent) ที่ใช้ ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคาร์บอนไดออกไซด์นับเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สไอเสียจากหลายอุตสาหกรรม และเป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน [7] จึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้นโครงการนี้จึงสนใจศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของชนิดของเสียที่มีผลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดของเสียที่มีผลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

1.2.2 เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ให้ได้อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 2 เพื่อใช้ในการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบและจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาด้วยโปรแกรม Aspen Plus

1.3.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการกับผลการทดลองของงานวิจัยที่ค้นคว้าจากวารสารวิจัย

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ของเสียต่างชนิดกัน ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกจำพวกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยสภาวะในการดำเนินงานมีรายละเอียด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อุณหภูมิในการดำเนินงานอยู่ในช่วง 500 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ
2. อัตราส่วนโดยโมลของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย เท่ากับ 0.5-3
3. อัตราการป้อนของเสีย 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
4. ตัวทำปฏิกิริยาถูกป้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์

1.3.4 ศึกษาผลของประเภทของเสียและสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และค่าความร้อนต่ำ (LHV)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถออกแบบกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus

1.4.2 ทราบถึงสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของของเสียแต่ละชนิด

1.4.3 ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของของเสียชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสีย (Waste)

ตามนิยามของกรมควบคุมมลพิษกล่าวว่า ของเสียหรือขยะมูลฝอย หมายถึง เศษผ้า เศษอาหาร เศษวัตถุ ถุงพลาสติก ภาชนะบรรจุอาหาร เศษ มูลสัตว์ หรือสิ่งอื่นใดที่เก็บกวาดได้จากถนน ตลาด หรือที่อื่น รวมถึงขยะมูลฝอยติดเชื้อที่เป็นพิษหรือมีอันตรายต่อชุมชน โดยปัญหาเรื่องขยะมูลฝอยถือว่าเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่ท้าทายสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา โดยเฉพาะในเขตเมือง เช่น กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีอัตราการขยายตัวของประชากร การขยายตัวของเมือง รวมถึงการขยายตัวของอุตสาหกรรมที่สูง ส่งผลให้ปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกผลิตขึ้นในแต่ละปีมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กลยุทธ์ในการจัดการของเสียในไทยนั้นมุ่งเน้นไปที่การรวบรวมของเสียในปริมาณมาก และการกำจัดมูล เช่น หลุมฝังกลบ (Landfills) หรือการเทกอง (Open dumps) อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้ย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศ การปนเปื้อนของน้ำ และดิน รวมถึงการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน โดยองค์ประกอบหลักของของเสียเหล่านี้ได้แก่ เศษอาหาร กระดาษ บรรจุภัณฑ์ เศษหญ้า เป็นต้น ในหลายประเทศจึงเริ่มศึกษาและสำรวจเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ขยะมูลฝอยที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืน รวมถึงลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกไปพร้อมกัน ในการวิจัยครั้งนี้จะจำแนกตัวอย่างของเสียออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ตัวอย่างของเสียที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือชีวมวล และของเสียที่มนุษย์สร้างขึ้นหรือพลาสติก ดังนี้ [8–10]

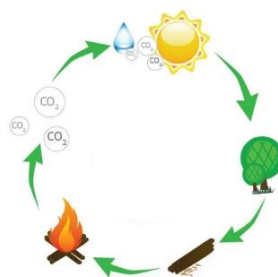
2.1.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงพลังงานสีเขียวที่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงโดยวิธีเคมีความร้อน (Thermochemical process) วิธีดังกล่าวสามารถแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยการใช้ความร้อนจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี รวมทั้งไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ ชีวมวลถือว่าเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มาจากสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติทั้งจากพืชและสัตว์ ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้การผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างแก๊สเรือนกระจก ดังนั้นชีวมวลจึงได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา [11, 12] แหล่งพลังงานชีวมวล ได้แก่

1. อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ (Woody biomass) เช่น กิ่งไม้ เศษไม้ ถ่านไม้ เป็นต้น
2. ผลผลิตทางการเกษตร (Non-woody biomass) เช่น แกลบ ชานอ้อย ฟางข้าว เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มวลสัตว์และสิ่งปฏิกูล



รูปที่ 2.1 วัฏจักรพลังงานชีวมวล [13]

2.1.2 ขยะพลาสติก (Plastic waste)

พลาสติกถือเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ด้วยราคาที่ต่ำ มีความแข็งแรงทนทาน สามารถใช้ซ้ำได้ และด้วยคุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่น สามารถขึ้นรูปได้หลากหลายตามการใช้งาน ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกและมีปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการรีไซเคิลหรือกำจัดพลาสติกเหล่านี้ยังไม่เพียงพอต่ออัตราการผลิตขยะพลาสติกในปัจจุบัน ดังรูปที่ 2.2 ขยะพลาสติกจำนวนมากจึงต้องถูกส่งไปที่หลุมฝังกลบ โดยองค์ประกอบของเสียเหล่านี้ ได้แก่ โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลีโพรพิลีน (PP) เป็นหลัก [14]



รูปที่ 2.2 ขยะพลาสติกในประเทศไทย [15]

โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากสารตั้งต้นเอทิลีน (ผลผลิตจากปิโตรเลียม) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.95 ถึง 0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โมเลกุลของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจะมีแบ็กโบนคาร์บอนที่ยาวมากแต่ไม่มีไซด์กรุป โมเลกุลเหล่านี้เชื่อมกันอย่างแน่นหนามากขึ้น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแข็งแรงกว่าและโปร่งแสงน้อยกว่าโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากเป็นพลาสติกที่ทนทานต่อสารทำลายต่างๆ ทำให้มีการนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์จำนวนมาก เช่น ภาชนะบรรจุต่างๆ โตะ แก้ว ถุงพลาสติก และภาชนะใส่สารเคมีบางชนิด เป็นต้น [16]

2.1.3 องค์ประกอบของของเสีย

ของเสียแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะอย่าง ต้องอาศัยกระบวนการต่างๆ เพื่อแยกองค์ประกอบ โดยดูจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี [2] ได้แก่

1. การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์กลุ่มองค์ประกอบของของเสียแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ
 - ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในของเสีย ส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง ถ้าต้องการนำของเสียมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้จะต้องมีความชื้นไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวล
 - คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของของเสียประกอบไปด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ของเสียที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงที่ต่ำจะมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำ ความรวดเร็วในการติดไฟจะช้าเนื่องจากมีความชื้นมาก
 - สารระเหย (Volatile Matter) คือ ส่วนที่เผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นของเสียใดที่มีค่า Volatile Matter สูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย
 - ขี้เถ้า (Ash) เป็นส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในของเสียที่ถูกออกซิไดส์สมบูรณ์ ของเสียส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์
2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์แยกธาตุและรายงานผลการวิเคราะห์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของของเสีย ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และขี้เถ้า เป็นต้น โดยองค์ประกอบของของเสียที่วิเคราะห์จากทั้ง 2 ขั้นตอนนี้ สามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเสี้ยว (เปอร์เซ็นต์โดยมวล) [17–20]

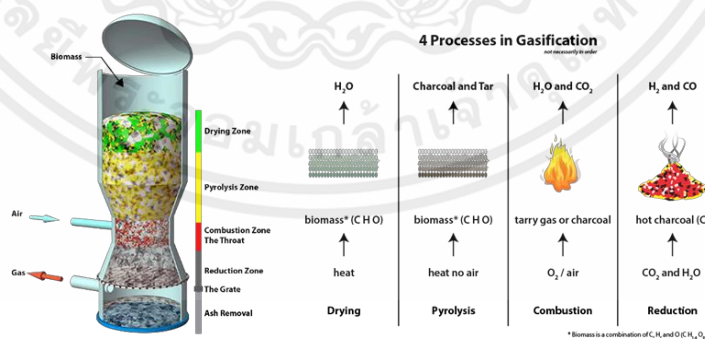
ชนิดของเสี้ยว	ไม้สนดิบ	ฟางข้าว	เศษซี้ไก่	HDPE
การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis)				
ความชื้น ^a	5.01	7.43	7.60	0.32
คาร์บอนคงที่ ^a	17.83	12.98	16.56	3.92
สารระเหย ^a	81.81	67.95	68.83	92.17
ซี้เถ้า ^a	0.36	19.07	14.61	3.92
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)				
คาร์บอน ^a	50.08	39.23	43.42	80.15
ไฮโดรเจน ^a	6.70	4.78	5.09	12.20
ไนโตรเจน ^a	42.50	0.65	4.57	1.04
ออกซิเจน ^a	0.16	36.12	31.57	2.69
ซัลเฟอร์ ^a	0.20	0.15	0.74	0.00
ซี้เถ้า ^a	0.36	19.07	14.61	3.92

หมายเหตุ: ^a คือ ความชื้นฐานแห้ง (dry basis)

HDPE (High Density Polyethylene) คือ พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

2.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชันหรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนแล้วเกิดปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงกับตัวทำปฏิกิริยา สามารถแสดงกลไกการเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ ดังรูปที่ 2.3 [4]



รูปที่ 2.3 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [21]

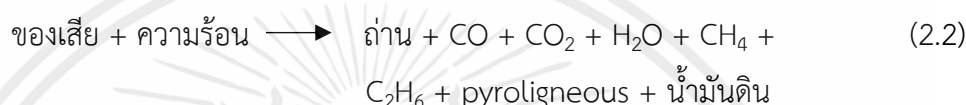
จากรูปจะเห็นว่าเตาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasifier) ถูกแบ่งออกเป็นโซนต่างๆ ที่เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันหลายอย่างพร้อมกัน โดยขั้นตอนหลักของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

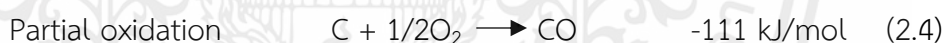
1. ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying Zone) เป็นขั้นตอนแรกของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิในส่วนนี้จะอยู่ระหว่าง 100-135 องศาเซลเซียส ความชื้นของของเสียจะถูกระเหยออกไปเป็นส่วนใหญ่ ดังสมการ



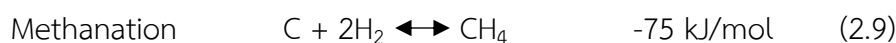
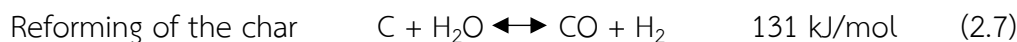
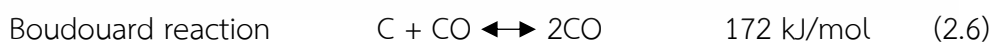
2. ขั้นตอนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) อุณหภูมิในส่วนนี้จะอยู่ระหว่าง 450-600 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเชื้อเพลิงจะถูกสลายโดยความร้อน สารระเหยจะถูกปล่อยออกมาในรูปของแก๊ส และเกิดถ่าน ดังสมการ



3. ขั้นตอนการเผาไหม้ (Combustion Zone) หรือเรียกว่า โซนออกซิเดชัน (Oxidation Zone) อากาศจะถูกส่งผ่านเข้ามาในบริเวณนี้ และสัมผัสกับเชื้อเพลิงทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอน และไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการ



4. ขั้นตอนรีดักชัน (Reduction Zone) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิในส่วนนี้จะอยู่ระหว่าง 600-700 องศาเซลเซียส เกิดแก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นต้น ดังสมการ [22], [23]



2.3 ตัวทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

ตัวทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน คือ สารหลักที่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในรูปของแข็งและไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ ให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโมเลกุลเล็ก เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น [24] โดยตัวทำปฏิกิริยาหลักในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีดังนี้

1. อากาศ (Air) สะดวก ราคาถูก และเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เนื่องจากอากาศพร้อมใช้งานและการแปรสภาพเป็นแก๊สในอากาศสามารถให้ความร้อนได้เพียงพอด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้แหล่งความร้อนจากภายนอก แต่แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความร้อนลดลงและยังลดประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากในอากาศมีแก๊สไนโตรเจนอยู่ค่อนข้างสูง [24]
2. แก๊สออกซิเจน (Oxygen) เป็นตัวทำปฏิกิริยาที่นิยมใช้มากที่สุด แต่มีค่าใช้จ่ายสูง สามารถป้องกันการลดลงของค่าความร้อนและประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ [25]
3. ไอน้ำ (Steam) มีราคาถูกกว่าออกซิเจน ช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับถ่านและปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งของไอน้ำกับมีเทนเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้แก๊สผลิตภัณฑ์มีไฮโดรเจนสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน จึงต้องมีการให้ความร้อนเพิ่มเติม [26]
4. คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) นำมาใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยาเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สไอเสียจากหลายอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน ต้องอาศัยแหล่งความร้อนจากภายนอกเพื่อรักษาอุณหภูมิการแปรสภาพเป็นแก๊ส เนื่องจากความร้อนที่มาจากการเผาไหม้บางส่วนของชีวมวลไม่เพียงพอ [27]

2.4 แก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์หรือซินแก๊ส สามารถผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่าน ชีวมวล หรือของเสียต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิสูง โดยมีการควบคุมสภาวะการดำเนินการและปริมาณออกซิเจนในระบบเพื่อกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบบางส่วน (Partial Oxidation) ของสารป้อน คุณสมบัติหลักของแก๊สสังเคราะห์มีดังนี้

2.4.1 องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์

องค์ประกอบหลักของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะประกอบด้วย ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

และอาจมีสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนหนักเป็นองค์ประกอบด้วย โดยทั่วไปแก๊สสังเคราะห์จะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือจางด้วยแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำที่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [26]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สสังเคราะห์

ผลิตภัณฑ์	ตัวทำปฏิกิริยา	องค์ประกอบ (% โดยปริมาตร)					
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	HC
แก๊สสังเคราะห์ (Syngas)	ไอน้ำ หรือ ออกซิเจน	25-30	30-60	5-15	0-5	-	-
	อากาศ	13-19	18-22	9-12	1-5	45-55	0.2-0.4

2.4.2 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อน (Heating Value) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงนั้นถูกเผาไหม้ โดยทั่วไปค่าความร้อนมี 2 ประเภท คือ [24, 28]

1. ค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) เป็นการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเสียรวมถึงความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไอน้ำ โดยทั่วไปของเสียจะมีน้ำหรือความชื้นเป็นส่วนหนึ่งในองค์ประกอบ ค่าความร้อนสูงจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในของเสีย ดังนั้นค่าความร้อนสูงของของเสีย สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.10)

$$\text{HHV} = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0015N - 0.0211A \quad (2.10)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูงของของเสีย (MJ/kg)

C คือ ปริมาณคาร์บอนในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

H คือ ปริมาณไฮโดรเจนในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

S คือ ปริมาณซัลเฟอร์ในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

O คือ ปริมาณออกซิเจนในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

N คือ ปริมาณไนโตรเจนในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

A คือ ปริมาณเถ้าในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

สำหรับกรณีที่ทราบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงโดยการประมาณ สามารถคำนวณหาค่าความร้อนสูงของของเสียได้จากสมการ (2.11)

$$\text{HHV} = 0.3536F_C + 0.1559V_M - 0.0078A_{sh} \quad (2.11)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูงของของเสีย (MJ/kg)

F_C คือ ปริมาณคาร์บอนคงที่ในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_M คือ ปริมาณสารละลายในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 Ash คือ ปริมาณเถ้าในของเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

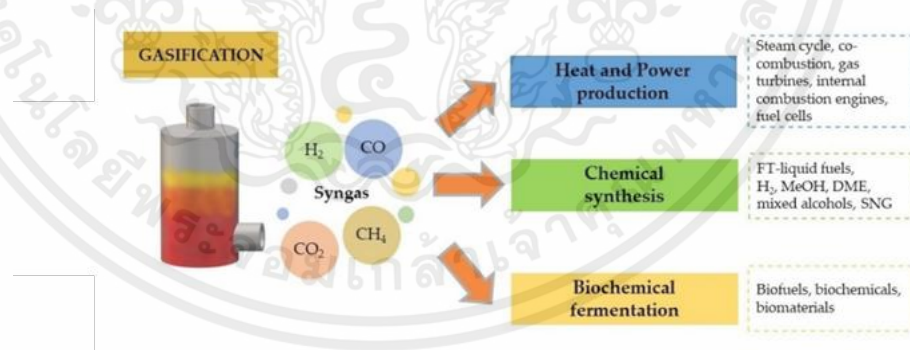
2. ค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value: LHV) เป็นการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยไม่นำค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไอน้ำมาพิจารณาด้วย ค่าความร้อนต่ำจึงไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในของเสีย และเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินค่าความร้อนของซินแก๊ส ดังนั้นค่าความร้อนต่ำของของเสีย สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.12)

$$LHV_{\text{syngas}} = 10.79X_{\text{H}_2} + 12.63X_{\text{CO}} + 35.83X_{\text{CH}_4} \quad (2.12)$$

เมื่อ LHV_{syngas} คือ ค่าความร้อนต่ำของซินแก๊ส (MJ/Nm^3)
 X_{H_2} คือ เศษส่วนโมลของไฮโดรเจน
 X_{CO} คือ เศษส่วนโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์
 X_{CH_4} คือ เศษส่วนโมลของมีเทน

2.4.3 การประยุกต์ใช้แก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสม หรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยรูปที่ 2.4 แสดงการใช้แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งสามารถ แบ่งการใช้งานได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและการใช้แก๊สสังเคราะห์ในขั้นตอนสุดท้าย [3]

- นำไปใช้เพื่อผลิตความร้อนและพลังงานผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แก๊สเทอร์ไบน์ เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน หรือเซลล์เชื้อเพลิง
- นำไปใช้ในการสังเคราะห์สารเคมี เช่น การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากกระบวนการฟิสเชอร์โทรป (Fischer-Tropsch) ไฮโดรเจน เมทานอล (Methanol) ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether: DME) แอลกอฮอล์ผสม แก๊สธรรมชาติสังเคราะห์ (Synthetic Natural Gas: SNG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำไปใช้ในการหมักทางชีวเคมีเพื่อผลิตสารเคมีชีวภาพ เชื้อเพลิงชีวภาพ และวัสดุชีวภาพ [3]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Vikram และคณะ [29] ทำการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากไม้สนดิบที่ใช้ไอน้ำผสมคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาผ่านโปรแกรม Aspen Plus ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิของแก๊สซิฟิเคชัน อุณหภูมิของปฏิกิริยา และองค์ประกอบของตัวทำปฏิกิริยา ที่มีต่อค่าความร้อนต่ำ (LHV) อัตราการเปลี่ยนแปลงคาร์บอน และประสิทธิภาพของแก๊สเย็น (CGE) จากการศึกษาการใช้ไอน้ำบริสุทธิ์พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคุณภาพของซินแก๊สจะเพิ่มขึ้น ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแก๊สซิฟิเคชันที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของไอน้ำต่อชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 0.6 เมื่อผสมคาร์บอนไดออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเข้าไปในตัวทำปฏิกิริยาพบว่าอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อชีวมวลที่เหมาะสมเท่ากับ 0.3 ซึ่งให้ค่าความร้อนต่ำเท่ากับ 8.3 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน อัตราการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนมีค่าประมาณ 91 เปอร์เซ็นต์ และในทางกลับกันประสิทธิภาพของแก๊สเย็นตามทฤษฎีของระบบเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 100 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ดังนั้นประสิทธิภาพของแก๊สเย็นจึงเพิ่มขึ้นจาก 55 เปอร์เซ็นต์ เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า การแทนที่น้ำด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแก๊สซิฟิเคชัน แต่เพิ่มพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวลและช่วยปรับอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่อไป

H. Yu และคณะ [30] ทำการศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของซีเลื่อยไม้สนและฟางข้าวที่มีคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยาในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเอนแทรนซ์เบด (Entrained-flow Gasifier) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคาร์บอน อุณหภูมิของปฏิกิริยา และชนิดของชีวมวลที่มีต่อองค์ประกอบของซินแก๊ส ดัชนีการแปรสภาพเป็นแก๊ส และผลผลิตน้ำมันดิน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยอากาศ พบว่าในงานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มผลผลิตของคาร์บอนมอนอกไซด์ ลดผลผลิตจากน้ำมันดิน และผลผลิตของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตจากชีวมวล นอกจากนี้ประสิทธิภาพของแก๊สเย็น (CGE) ของซีเลื่อยไม้สนและฟางข้าวเพิ่มขึ้น 4.20 เปอร์เซ็นต์ และ 9.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเช่นกัน งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ผลผลิตของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ผลผลิตของน้ำมันดินลดลง

ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของซินแก๊ส อย่างไรก็ตามการเพิ่มระดับของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมนั้นช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยรวม

M. Fernandez-Lopez และคณะ [31] ทำการศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลจากมูลสัตว์ในเครื่องแก๊สซิฟิเออร์คู่ (Dual gasifier) โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus พิจารณาแบบจำลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์พลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy reactor) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชัน อัตราส่วนตัวทำปฏิกิริยาต่อชีวมวล และใช้ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา ที่มีต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของซินแก๊สที่ผลิตได้จากการศึกษาพบว่าเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในขณะที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และในทางกลับกันการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะสูงขึ้นเมื่อใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา ส่วนการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาจะทำให้ได้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงกว่าการใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อใช้ไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะได้ซินแก๊สที่เหมาะสมกับกระบวนการฟิชเชอร์โทรปช์ เมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ซินแก๊สมีค่าความร้อนต่ำ (LHV) สูง สามารถนำไปใช้ในการผลิตพลังงานได้

X. Zheng และคณะ [32] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอย (Municipal Solid Waste) ด้วย Drop tube reactor โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา ที่สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไอน้ำในช่วง 0.5 ถึง 3 โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิ 1,000 ถึง 1,100 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไอน้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.5 ถึง 2.5 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สผลิตภัณฑ์ก็สูงขึ้นด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาบูดยาร์ดจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โดยคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไอน้ำจนมีค่ามากกว่า 2.5 อัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์จะค่อยๆลดลงเนื่องจากไม่มีคาร์บอนอะตอมเหลือสำหรับทำปฏิกิริยา ทำนองเดียวกันกับการเกิดไฮโดรเจนซึ่งมีอัตราการเกิดที่สูงในช่วงแรก และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไอน้ำมีค่าเกิน 2.5 เนื่องจากการฉีดคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบจำนวนมากจะทำให้ปฏิกิริยาโดยรวมเป็นแบบดูดความร้อนรุนแรง และเนื่องจากในเครื่องปฏิกรณ์มีคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นสูงบวกกับพลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าไม่มากพอ ทำให้ปฏิกิริยาแก๊สน้ำผ่นกลับเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์มาก นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้พบว่าจุดที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดคือ คาร์บอนไดออกไซด์ต่อไอน้ำ (CO_2/Steam) เป็น 2.5 โดยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำ 12.41 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอย สามารถใช้คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำในการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มองค์ประกอบของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์ได้ โดยอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไอน้ำ (CO_2/Steam) ที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ 2.5

A. Erkiaga และคณะ [33] ทำการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขึ้นพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (HDPE) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4 มิลลิเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Conical spouted bed โดยใช้ไอน้ำเป็นสารในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการดำเนินการและสัดส่วนของไอน้ำต่อพลาสติกในช่วง 0 ถึง 2 ที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส ความดันชั้นบรรยากาศ ในทุกการทดลองได้กำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของไอน้ำให้เป็น 1.86 มิลลิลิตรต่อนาที และป้อนขึ้นพลาสติกเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 1.5 กรัมต่อนาทีสำหรับอัตราส่วนไอน้ำต่อพลาสติกเท่ากับ 1 และลดอัตราการไหลของขึ้นพลาสติกให้เป็น 0.75 กรัมต่อนาที เมื่อต้องการให้อัตราส่วนไอน้ำต่อพลาสติกเป็น 2 โดยกำหนดให้ระยะเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์อย่างน้อย 20 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูงหรือมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาอันดับสอง เช่น ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันจะเกิดขึ้นได้ดี แต่จะถูกจำกัดด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้องค์ประกอบหลักของแก๊สสังเคราะห์ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนอื่นๆน้อยลง นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแก๊สสังเคราะห์ล้วนเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน รวมถึงการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งเสริมการสลายตัวของ HDPE ให้เกิดได้ดีขึ้น ปริมาณคาร์บอนที่ถูกแปลงไปตามปฏิกิริยาต่างๆจึงเพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกันกับการเพิ่มสัดส่วนไอน้ำต่อพลาสติก (S/P) จากการทดลองพบว่าหากไม่ป้อนไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะเกิดสารประกอบอะโรมาติกขึ้น ปริมาณน้ำมันดินจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนไอน้ำต่อพลาสติก (S/P) จะช่วยเสริมการสลายตัวของน้ำมันดินได้ดีกว่า นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณไอน้ำที่เข้าทำปฏิกิริยาจาก 1 เป็น 2 ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อองค์ประกอบแก๊สสังเคราะห์เท่านั้น โดยจะช่วยเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ และลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ต้องการมากที่สุดคืออุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินการ รองลงมาคือสัดส่วนไอน้ำต่อพลาสติก (S/P) ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดถ่านชาร์และน้ำมันดินเป็นหลัก

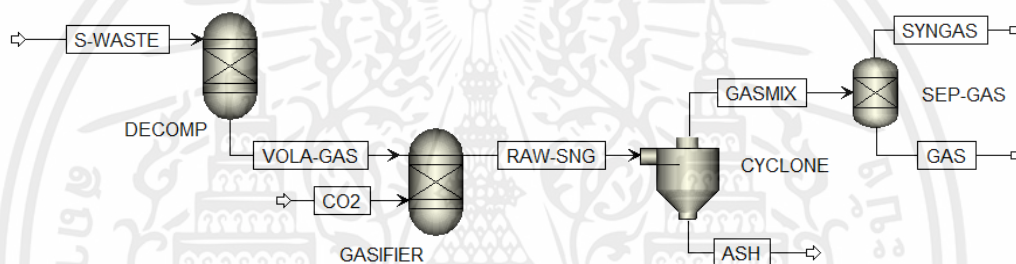
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและวิธีการทดลอง

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ของเสียต่างชนิดกัน ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษซี้โก้ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยจำลองกระบวนการผ่านโปรแกรม Aspen Plus โดยในหัวข้อที่ 3.1 จะแสดงรายละเอียดแบบจำลองของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หัวข้อที่ 3.2 แสดงรายละเอียดแบบจำลองการปรับปรุงของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และในหัวข้อที่ 3.3 แสดงถึงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

3.1 แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

จากของเสียแต่ละชนิด

การจำลองการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากของเสียแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยในโครงการนี้ใช้ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษซี้โก้ และพลาสติกจำพวกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เป็นตัวอย่างของเสียที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ ของเสียแต่ละชนิดมีองค์ประกอบจากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ดังตารางที่ 3.1

ของเสีย (S-WASTE stream) ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องแยกโมเลกุล (DECOMP) เพื่อแยกโมเลกุลของของเสียทั้ง 4 ชนิด ให้เป็นองค์ประกอบของธาตุต่างๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และซีลีเนียม หลังจากนั้นป้อนสาย VOLA-GAS เข้าสู่เครื่องแก๊สซิฟิเคชัน (GASIFIER) พร้อมกับป้อนตัวทำปฏิกิริยา (CO₂ stream) โดยภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน มีปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นดังสมการที่ (3.1) ถึง (3.10) [24]

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเสีย (เปอร์เซ็นต์โดยมวล) [17–20]

ชนิดของเสีย	ไม้สนดิบ	ฟางข้าว	เศษซีเมนต์	HDPE
การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis)				
ความชื้น ^a	5.01	7.43	7.60	0.32
คาร์บอนคงที่ ^a	17.83	12.98	16.56	3.92
สารระเหย ^a	81.81	67.95	68.83	92.17
ขี้เถ้า ^a	0.36	19.07	14.61	3.92
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)				
คาร์บอน ^a	50.08	39.23	43.42	80.15
ไฮโดรเจน ^a	6.70	4.78	5.09	12.20
ไนโตรเจน ^a	42.50	0.65	4.57	1.04
ออกซิเจน ^a	0.16	36.12	31.57	2.69
ซัลเฟอร์ ^a	0.20	0.15	0.74	0.00
ขี้เถ้า ^a	0.36	19.07	14.61	3.92

หมายเหตุ: ^a คือ ความชื้นฐานแห้ง (dry basis)

HDPE (High Density Polyethylene) คือ พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

ปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard reaction)



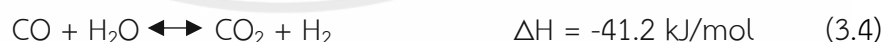
ปฏิกิริยาไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน (Hydrogasification reaction)



ปฏิกิริยาแก๊สน้ำ (Water gas reaction)



ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water gas shift reaction)



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reactions)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam-reforming reactions)



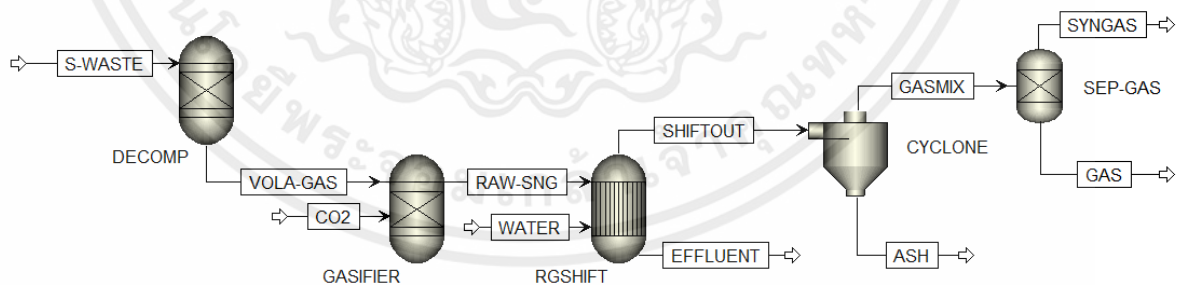
หลังจากทำปฏิกิริยาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ (RAW-SNG stream) ที่ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ถ้ำ และน้ำ เพื่อแยกขี้ถ้ำออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์จึงนำผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ป้อนเข้าสู่เครื่องไซโคลน (CYCLONE) จากนั้นนำแก๊สผลิตภัณฑ์ (GASMIX stream) ที่ได้มาป้อนเข้าหน่วยแยก (SEP-GAS) เพื่อแยกน้ำและแก๊สที่ไม่ต้องการให้มีในแก๊สสังเคราะห์ออก สุดท้ายจะได้แก๊สสังเคราะห์ในสาย SYNGAS ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน

จากการจำลองกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะศึกษาผลของประเภทของเสียและสภาวะการดำเนินการของพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์และอัตราส่วนตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และค่าความร้อนต่ำ (LHV) โดยตัวแปรและช่วงสภาวะการดำเนินงานที่ศึกษา แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาและสภาวะการดำเนินการ

พารามิเตอร์	สภาวะการดำเนินการ
อุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์	500 - 1,000 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ
อัตราส่วนตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	0.5 - 3

3.2 แบบจำลองการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองการปรับปรุงการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

จากของเสียแต่ละชนิด

เนื่องจากการจำลองการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากของเสียแต่ละชนิดในรูปที่ 3.1 พบว่าสัดส่วนโมลของแก๊สสังเคราะห์ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะเป้าหมายของโครงการวิจัยนี้ ต้องการผลิตไฮโดรเจนให้มีค่าสูงกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงต้องกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ให้มีค่าลดลง ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ดังรูปที่ 3.2 โดย

มีการเพิ่มหน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ (RGSIFT) หลังเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ โดยใช้ปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนข้อมูลไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส ดังสมการที่ (3.4) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำที่ 400 องศาเซลเซียส เพื่อลดคาร์บอนมอนอกไซด์ และเพิ่มไฮโดรเจนให้มีค่าที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปผลิตแก๊สสังเคราะห์ให้ได้ อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 2 เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์สารเคมี คือ เมทานอล (Methanol)

3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

โครงการนี้จะทำการออกแบบแบบจำลองและจำลองกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้ของเสียแตกต่างกัน 4 ชนิด โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ซึ่งเบื้องต้นมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การสร้างแบบจำลอง

สำหรับการสร้างแบบจำลองนี้จะใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ Peng-Robinson-Boston-Mathias ในการคำนวณ [34] ภายใต้สมมติฐาน 5 ข้อ ได้แก่

1. แก๊สซิฟิเคชันดำเนินการที่สภาวะคงตัวและอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)
2. ระยะเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานพอที่จะเข้าสู่สมดุล
3. ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสภาวะสมดุลและไม่เกิดความดันตกในระบบ
4. ทุกองค์ประกอบมีส่วนในการเกิดปฏิกิริยา ยกเว้นซัลเฟอร์และซีเถ้า
5. ไม่พิจารณาการเกิดสารจำพวกไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x)

โดยในการจำลองกระบวนการดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการทั้งหมด 5 หน่วย ได้แก่ หน่วยแยกโมเลกุล (Decomposition) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO removal) หน่วยแยกซีเถ้า (Ash separation) และหน่วยทำความสะอาดแก๊สสังเคราะห์ (Syngas cleaning system) โดยหน่วยแยกโมเลกุลจะถูกจำลองโดยใช้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RYield เนื่องจากแบบจำลองชนิดนี้สามารถแปลงองค์ประกอบที่มีความซับซ้อน (Non-conventional component) อย่างของเสียแข็งให้เป็นองค์ประกอบพื้นฐานอย่างองค์ประกอบธาตุที่ Aspen Plus สามารถคำนวณได้ (Conventional component) [35] โดยอาศัยผลจากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของของเสีย โดยในโครงการนี้มีองค์ประกอบที่ได้จากหน่วยแยกโมเลกุล คือ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และซีเถ้า ส่วนกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะถูกจำลองด้วยแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด RGibbs เพื่อคำนวณหาองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นภายใต้สมดุลเคมี ซึ่งคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมลของแต่ละสารในแต่ละช่วง โดยขึ้นอยู่กับปริมาณสารสัมพันธ์ที่ทำให้พลังงานอิสระกิบส์ของระบบมีค่าน้อยที่สุด [36] ในหน่วยกำจัด

คาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกจำลองด้วยแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิด REquil โดยใช้ปฏิกิริยาเปลี่ยนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำเป็นแก๊สเพื่อกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ลดลง เนื่องจากแบบจำลองชนิดนี้สามารถกำหนดปฏิกิริยาได้ ต่อมาหน่วยแยกซีไธ่จะใช้แบบจำลองเครื่องแยกชนิด SSplit เพื่อแยกซีไธ่ออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ และสุดท้ายหน่วยทำความสะอาดแก๊สสังเคราะห์จะใช้ Sep เพื่อแยกน้ำและแก๊สที่ไม่ต้องการในแก๊สสังเคราะห์ออก โดยสามารถสรุปแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองกระบวนการและสถานะการดำเนินการที่ใช้ในการศึกษา ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองและสถานะดำเนินการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

ชื่อหน่วย	แบบจำลองที่ใช้	สถานะการดำเนินการ
DECOMP	RYield	500 – 1,000 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ
GASIFI	RGibbs	500 – 1,000 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ
RGSHIFT	REquil	400 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ
CYCLONE	SSplit	สามารถแยกซีไธ่ออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้ทั้งหมด
SEP-GAS	Sep	สามารถแยกแก๊สออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้ทั้งหมด

3.3.2 การตรวจสอบแบบจำลอง

เมื่อสร้างแบบจำลองของกระบวนการการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ดังหัวข้อที่ 3.2.1 แล้วจะต้องทำการตรวจสอบแบบจำลองเพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไปได้ ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างไว้ในหัวข้อ 3.2.1 จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการ (Model) กับผลการทดลอง (Experimental) ของ C. Gai และคณะ [37] ภายใต้การใช้สารป้อนและสถานะการดำเนินงานเดียวกัน ซึ่งทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ในช่วง 300 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส รวมถึงศึกษาการปลดปล่อยสารประกอบจำพวกซัลเฟอร์และคลอรีน สามารถแสดงองค์ประกอบของฟางข้าวโพดที่ใช้ในการทดลองได้ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารและการวิเคราะห์แยกธาตุของฟางข้าวโพด (เปอร์เซ็นต์โดยมวล) [37]

ชนิดของเสีย	ฟางข้าวโพด
การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis)	
ความชื้น ^a	6.17
ชี้เถ้า ^a	5.93
สารระเหย ^a	75.95
คาร์บอนคงที่ ^a	13.75
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)	
คาร์บอน ^a	43.83
ไฮโดรเจน ^a	5.95
ออกซิเจน ^a	45.01
ไนโตรเจน ^a	0.97
ซัลเฟอร์ ^a	0.13
คลอรีน ^a	0.49

หมายเหตุ: a คือ ความชื้นฐานแห้ง (dry basis)

หลังจากได้แบบจำลองที่สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้แล้ว ต้องทำการตรวจสอบแบบจำลองให้มั่นใจว่ามีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไปได้ โดยทำการคำนวณตามสภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตามการทดลองที่นำมาอ้างอิงแล้วเปรียบเทียบผ่านค่า Root Mean Square Error (RMSE) ดังสมการที่ (3.11) กำหนดค่าที่ยอมรับได้ไว้ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 เนื่องจากมีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองที่คำนวณตามปริมาณสารสัมพันธ์และแบบจำลองที่คำนวณตามพลังงานอิสระกิบส์ กับการทดลองพบว่าหากพิจารณาค่าความคาดเคลื่อนของทุกองค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์ การใช้แบบจำลองทั้งสองจะให้ผลที่มีความเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 4 ถึง 7 แต่หากพิจารณาเพียงองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ แบบจำลองทั้งสองจะให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและมีความเหมาะสมมากขึ้น [38]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{experimental} - \text{model})^2}{N}} \quad (3.11)$$

3.3.3 การจำลองกระบวนการเพื่อศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

เมื่อทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างไว้ในหัวข้อ 3.2.1 แล้ว จะนำแบบจำลองดังกล่าวมาศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้ของเสียต่างกัน 4 ชนิด คือ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษซีเมนต์ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดอัตราการไหลของไม้สนดิบเท่ากับ 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และกำหนดอัตราส่วนโดยมวลของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 0.5
2. กำหนดอุณหภูมิของหน่วยแยกโมเลกุลและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของหน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และกำหนดค่าให้กับหน่วยแยกซีเมนต์และหน่วยทำความสะอาดแก๊สสังเคราะห์เป็น 1 หรือมีความสามารถในการแยกซีเมนต์และแก๊สออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้ 100 เปอร์เซ็นต์
3. จำลองกระบวนการ โดยจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นอัตราการไหลและค่าสัดส่วนโมลของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน
4. ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของหน่วยแยกโมเลกุลและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในช่วง 500 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อัตราส่วนโดยมวลของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 0.5 เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด
5. ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยมวลของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย ในช่วง 0.5 ถึง 3 โดยใช้อุณหภูมิที่ได้จากข้อ 4 ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อหาอัตราส่วนโดยมวลของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่เหมาะสมที่สุด
6. ปรับเปลี่ยนชนิดของของเสียจากไม้สนดิบ เป็น ฟางข้าว เศษซีเมนต์ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และดำเนินการซ้ำในข้อที่ 1 ถึง 5 จนครบทุกสภาวะการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

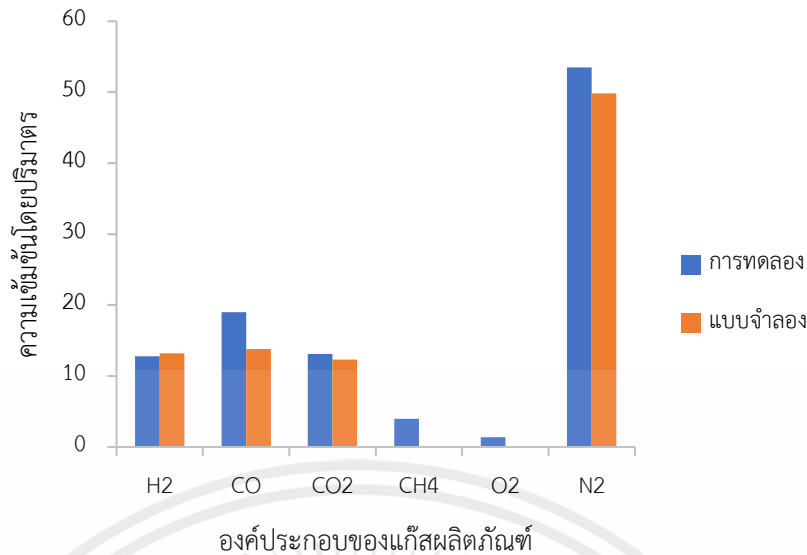
ผลและการวิเคราะห์ผล

จากการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ของเสียต่างชนิดกัน ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกจำพวกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วย โปรแกรม Aspen plus แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองกระบวนการกับการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และส่วนที่ 2 แสดงผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของของเสียแต่ละชนิด เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์และอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย ที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และค่าความร้อนต่ำ (LHV)

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นขั้นตอนสำหรับทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ C. Gai และคณะ [36] ซึ่งทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะการทำงานต่อประสิทธิภาพการแปรสภาพเป็นแก๊สของฟางข้าวโพด และใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส ที่มีต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์ แล้วแสดงผลในรูปของร้อยละความเข้มข้นโดยปริมาตร

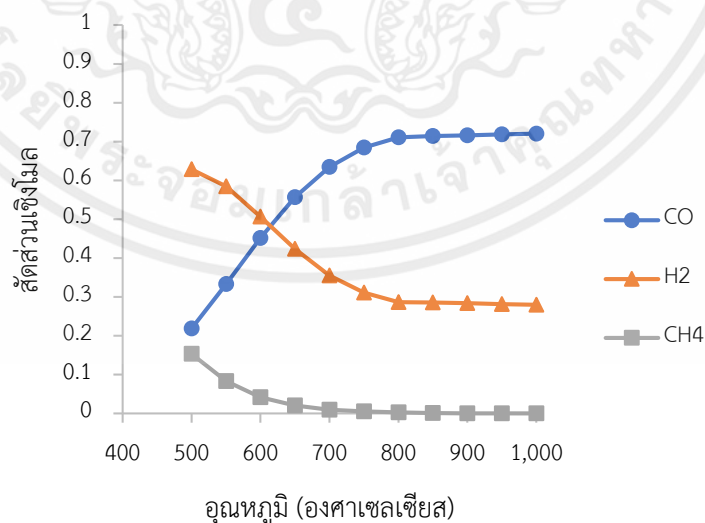
รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองดังกล่าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นว่าไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ในขณะที่มีเทนและออกซิเจนจะเกิดขึ้นในการทดลองเท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากสมมติฐานของแบบจำลองที่กำหนดให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล แต่เมื่อเปรียบเทียบความคาดเคลื่อนด้วยรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยแล้วพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือน้อยกว่า 7 โดยค่าความคาดเคลื่อนที่ได้มีค่าเท่ากับ 6.98 แบบจำลองนี้จึงถือว่ามีความน่าเชื่อถือ สามารถใช้เป็นเครื่องมือศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองของ C. Gai และคณะ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส [37]

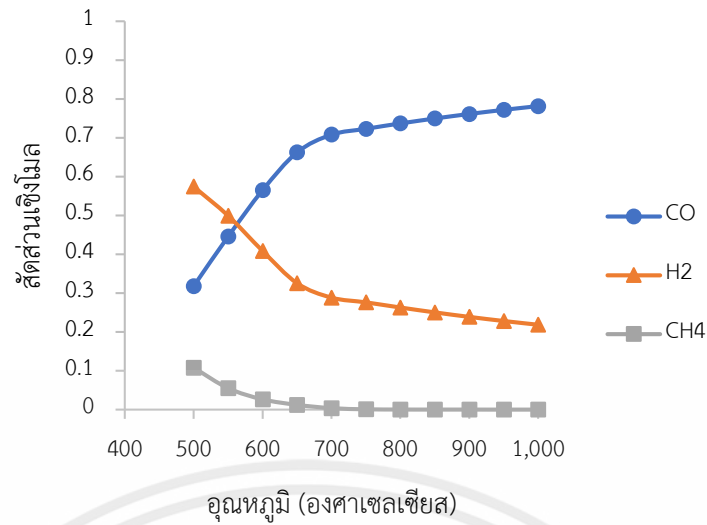
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์

ในการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ดำเนินการภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ในช่วง 500 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 จะพิจารณาจากองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองกระบวนการในสาย SYNGAS ที่ออกมาจากหน่วยแยก (SEP-GAS) ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่พิจารณาหลักๆ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน

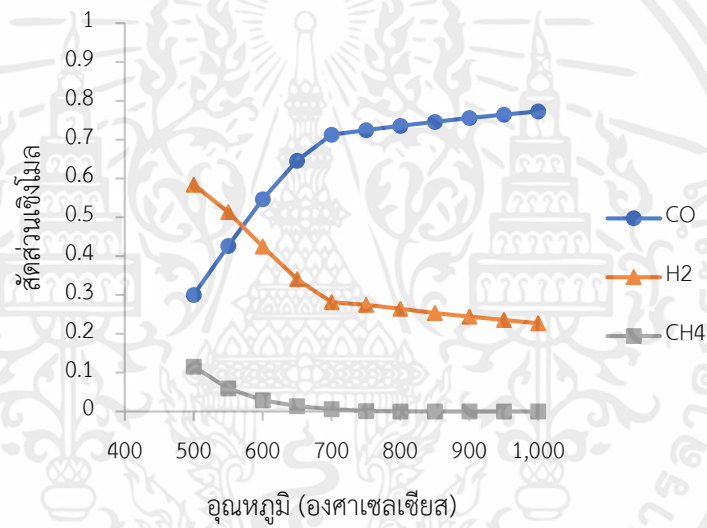


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

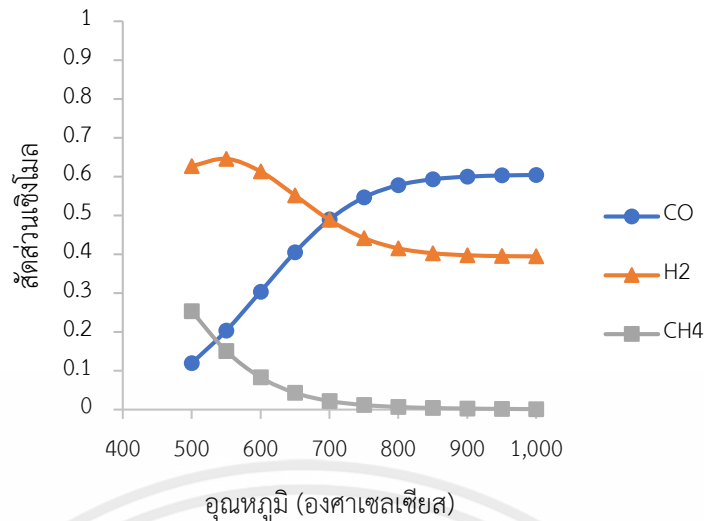


(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



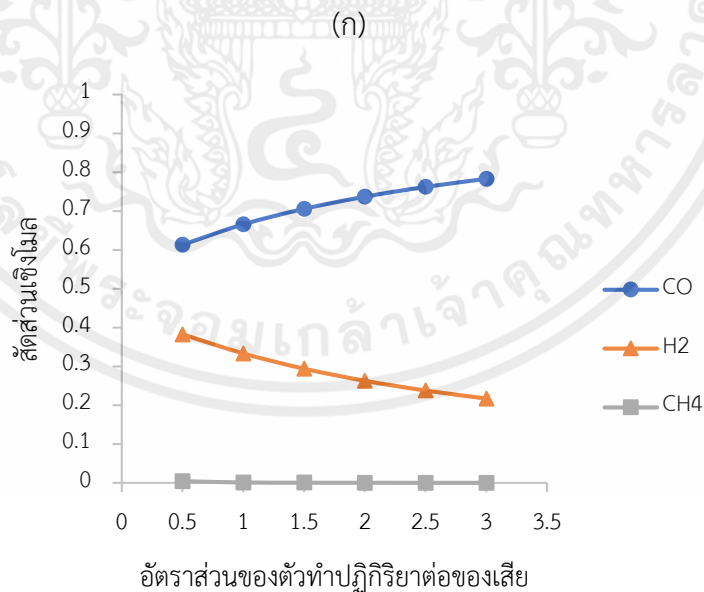
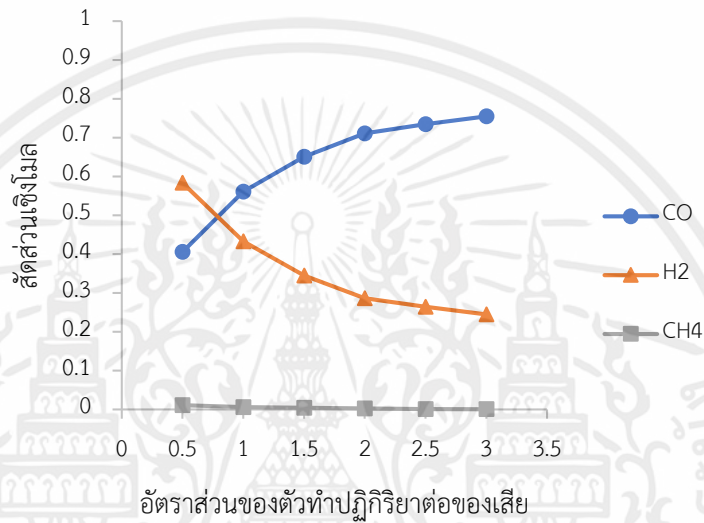
(ง)

รูปที่ 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษซีเมนต์ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

รูปที่ 4.2ก - 4.2ง แสดงให้เห็นแนวโน้มของการกระจายตัวขององค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของของเสียทั้ง 4 ชนิด เมื่ออุณหภูมิภายในแก๊สซิไฟเออร์เปลี่ยนไปจากรูปจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดแก๊สสังเคราะห์ ณ ที่นี้คือไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นหลัก โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะสูงสุดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับมีเทน ซึ่งเป็นผลมาจากการผันกลับของปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สดังสมการที่ (3.4) จากหลักการของเลอชาเตอลิเอ (Le Chatelier's Principle) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะเปลี่ยนสภาวะสมดุลโดยเป็นแบบผันกลับที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้เมื่อมีเทนลดลงยังส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สน้ำดังสมการที่ (3.3) กลายเป็นปฏิกิริยาเดียวที่ผลิตไฮโดรเจน ในขณะที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิตั้งแต่ช่วง 550 ถึง 800 องศาเซลเซียส ก่อนจะเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส โดยเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอน การผันกลับของปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สดังสมการที่ (3.4) และปฏิกิริยาบูดยาร์ดดังสมการที่ (3.1) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ดำเนินการไปข้างหน้าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้น และจะนำไปวิเคราะห์ถึงปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ต่อไป

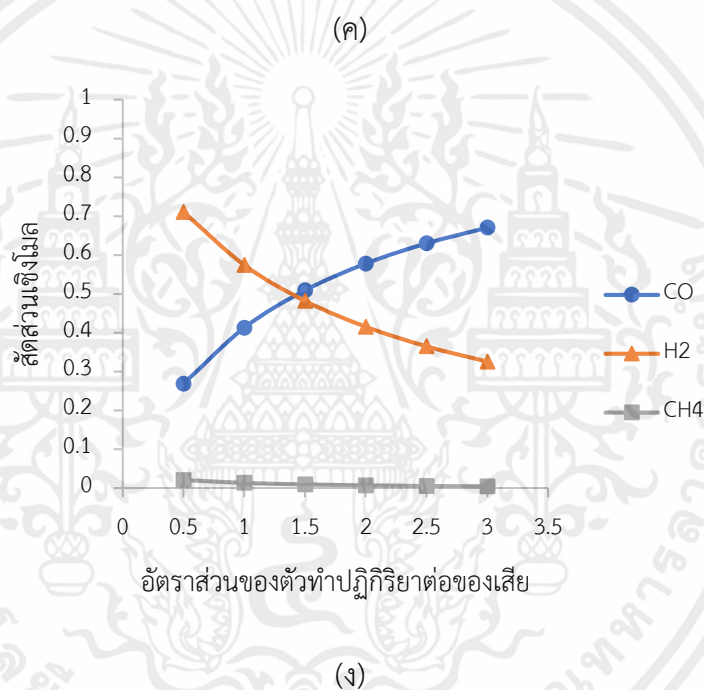
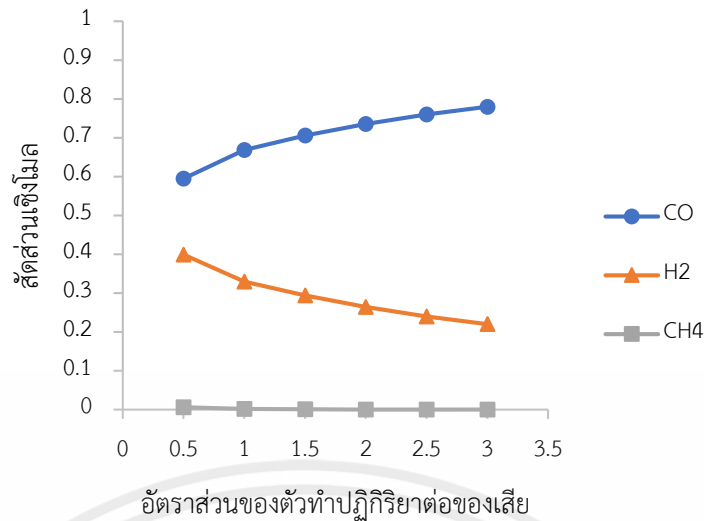
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย

ในการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่ดำเนินการภายในเครื่องแก๊สซีไฟเออร์ในช่วง 0.5 ถึง 3 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ โดยพิจารณาจากองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการในสาย SYNGAS ที่ออกมาจากหน่วยแยก (SEP-GAS) ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่พิจารณาหลักๆ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ผลกระทบของอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียแสดงดังรูปที่ 4.3



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษขี้ไก่ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

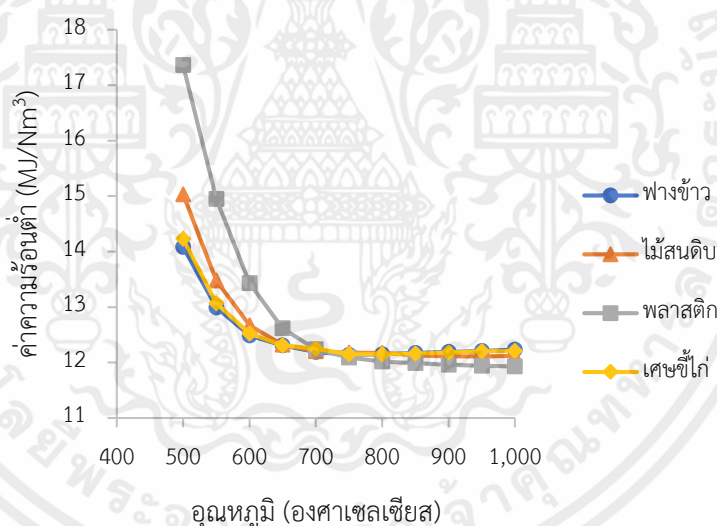
จากรูปที่ 4.3ก - 4.3ง แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ตามลำดับ ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 3 สัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนจะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์แต่ละตัวในของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกัน เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาเข้าไปในเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นว่าเอกสารนี้ละเมิดลิขสิทธิ์การคุ้มครองทางปัญญาใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สซิฟิเคชันสามารถเปลี่ยนปฏิกิริยาได้ ส่งผลให้ปฏิกิริยาบูดยาร์ดตั้งสมการที่ (3.1) ปฏิกิริยาแก๊สน้ำที่ตั้งสมการที่ (3.3) และปฏิกิริยาออกซิเดชันตั้งสมการที่ (3.5-3.8) ดำเนินการไปข้างหน้า ส่วนปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สตั้งสมการที่ (3.4) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำที่ตั้งสมการที่ (3.9-3.10) เกิดการย้อนกลับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 จะมีสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นได้ชัดจากของเสียที่เป็นพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

4.4 ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิด

ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิดที่นำมาพิจารณา จะคำนวณจากสาย SYNGAS ที่ออกมาจากหน่วยแยก (SEP-GAS) เพื่อแยกน้ำและแก๊สที่ไม่ต้องการให้มีในแก๊สสังเคราะห์ออก จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน จะคงที่เมื่อเครื่องแก๊สซิฟิเคชันทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการผลิตแก๊สมีความสมดุลจำกัดที่อุณหภูมินี้ เมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิด ดังรูปที่ 4.4

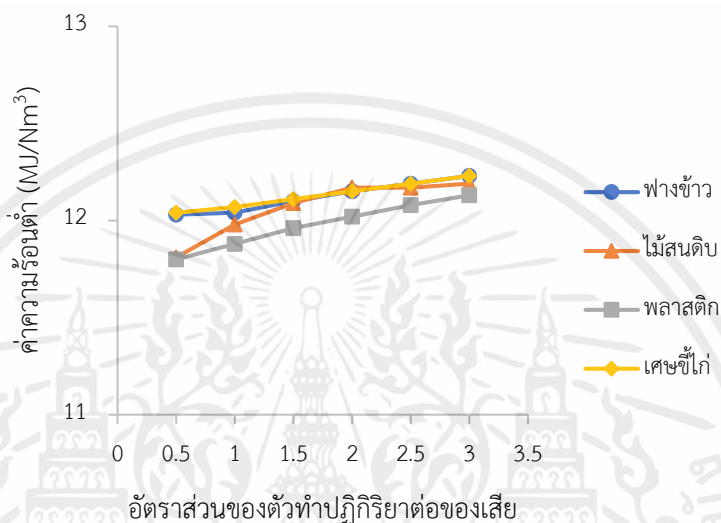


รูปที่ 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์

ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย เท่ากับ 2 พบว่าค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ลดลงเมื่อเครื่องแก๊สซิฟิเคชันทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าของเสียทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส เมื่อใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นของเสียจะได้ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุดประมาณ 17.36 MJ/Nm³ รองลงมาคือไม้สนดิบ เศษซีเมนต์ และฟางข้าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ฟางข้าวจะให้ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุดประมาณ 12.23 MJ/Nm^3 รองลงมาคือ เศษซีโก้ ไม้สนดิบ และพลาสติก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ตามลำดับ เป็นเพราะความจริงที่ว่าจากสมการที่ (2.12) จะเห็นได้ว่าสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิส่งผลต่อปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างเช่น ปฏิกิริยาบูดูยาร์ด และปฏิกิริยาแก๊สน้ำ เป็นต้น

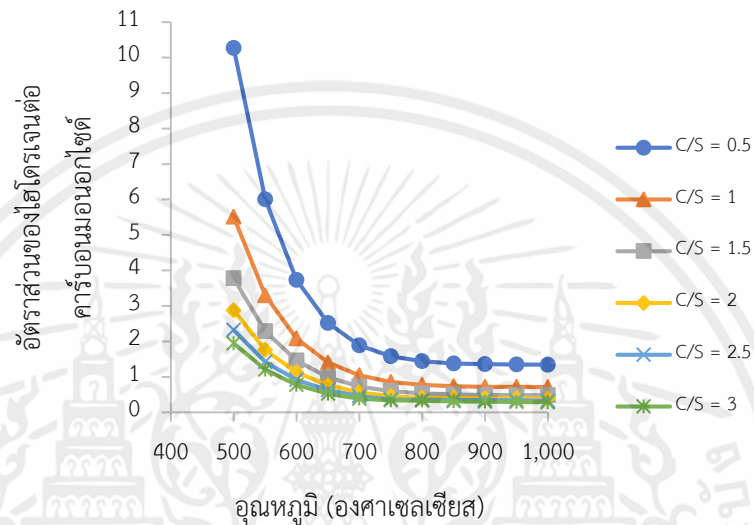


รูปที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

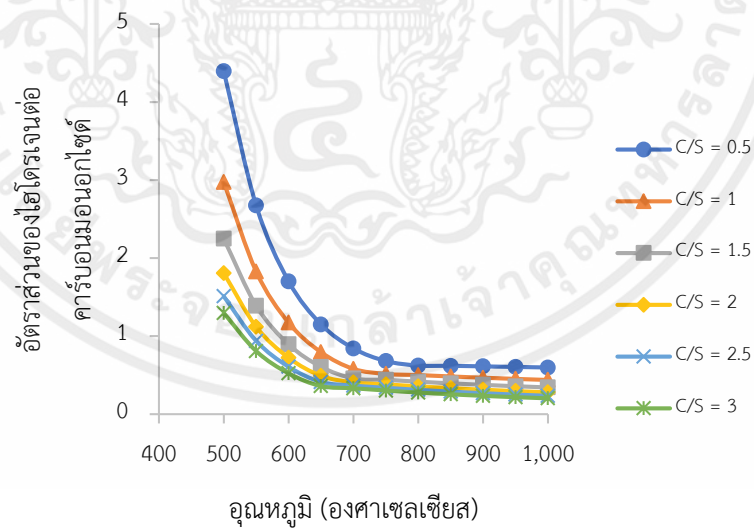
รูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่ใช้ของเสียต่างชนิดกันมีแนวโน้มเหมือนกัน คือเมื่ออัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเพิ่มสูงขึ้น ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์จะสูงขึ้นด้วย โดยที่ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่ใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นของเสียจะมีค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ต่ำที่สุดประมาณ 11.8 MJ/Nm^3 ในขณะที่ฟางข้าว ไม้สนดิบ และเศษซีโก้มีค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย สัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนจะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ แต่ในกรณีนี้แนวโน้มของค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์จะเป็นไปตามสัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์

4.5 อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ สามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้หลากหลาย เช่น นำไปใช้เพื่อผลิตความร้อนและพลังงานผ่านอุปกรณ์ต่างๆ นำไปใช้ในการสังเคราะห์สารเคมี การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากกระบวนการฟิสเชอร์โทรป (Fischer-Tropsch) ไฮโดรเจน เมทานอล (Methanol) หรือนำไปใช้ในการหมักทางชีวเคมีเพื่อผลิตสารเคมีชีวภาพ เป็นต้น [3]

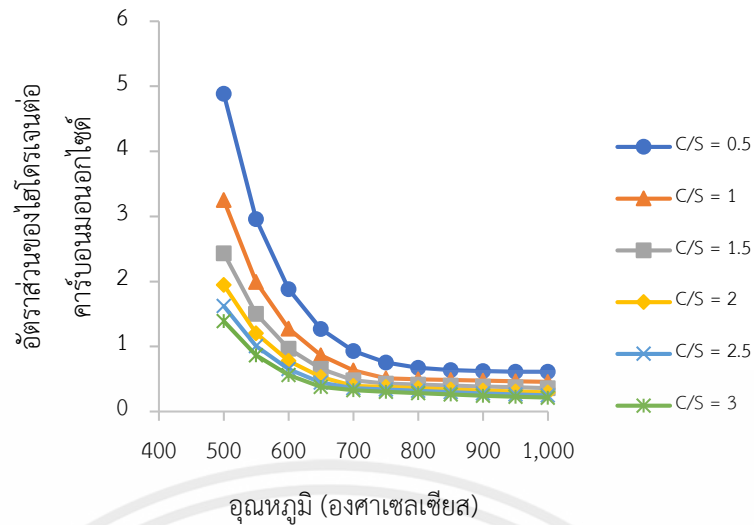


(ก)

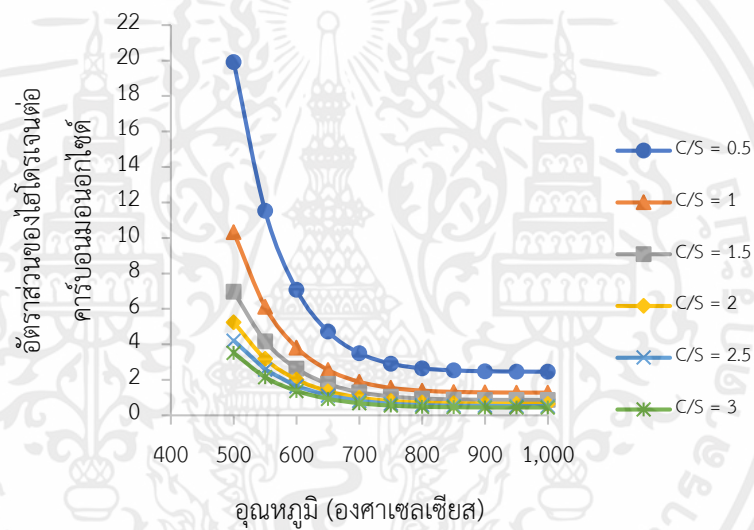


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

(ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษขี้ไก่ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

รูปที่ 4.6ก – 4.6ง แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อของเสียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ตามลำดับ ที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์เพิ่มขึ้น อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มลดลงเหมือนกัน ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 750 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์จะค่อยๆลดลง และเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป สามารถสรุปสถานะในการดำเนินการและอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ของของเสียทั้ง 4 ชนิด ได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สภาวะในการดำเนินการและอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ของของเสียทั้ง 4 ชนิด

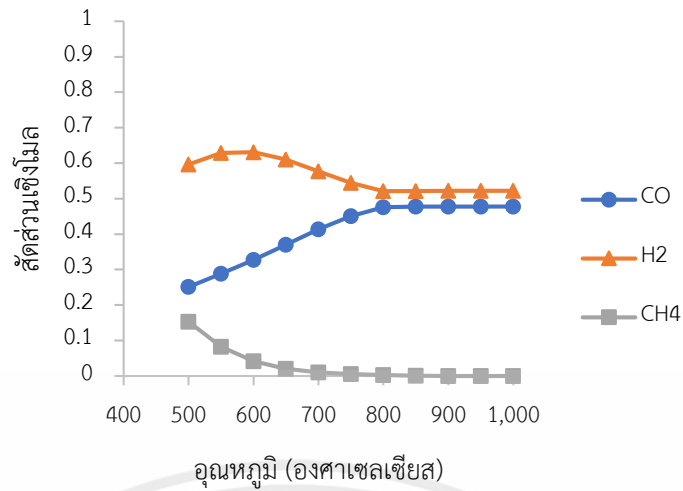
ของเสีย	อุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์
ไม้สนดิบ	500 - 690	0.5 - 3	≈ 2
ฟางข้าว	550 - 580	0.5 - 1.5	≈ 2
เศษซีเก้	500 - 590	0.5 - 2	≈ 2
พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	560 - 690	1 - 3	≈ 2

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าประมาณ 2 ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของโครงการวิจัย แต่สภาวะในการดำเนินการยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการสังเคราะห์สารเคมี คือ เมทานอล (Methanol) ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จึงทำการเพิ่มหน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ (RGSHIFT) หลังเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ ซึ่งใช้ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส ดังสมการที่ (3.4) โดยจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

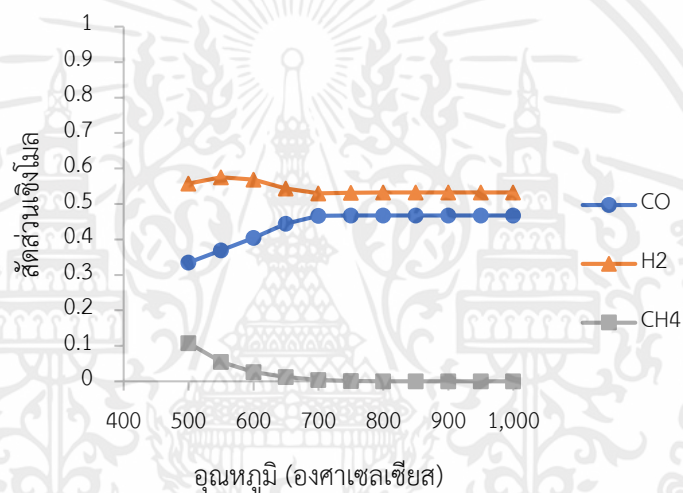
4.6 การปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

4.6.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

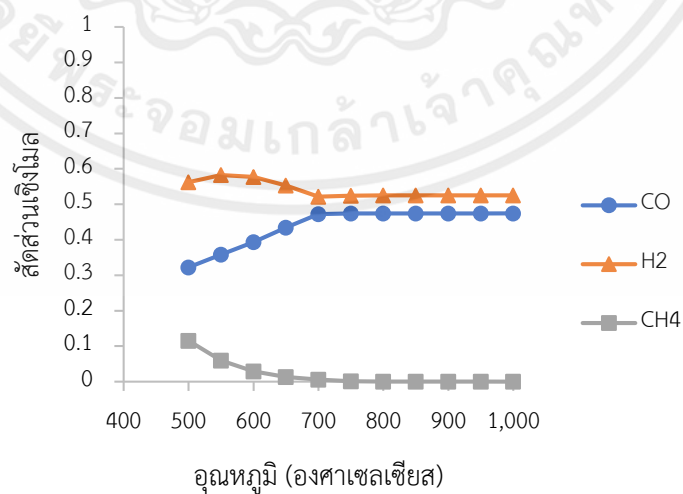
ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊สดังสมการที่ (3.4) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่ผันกลับได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส [37] ในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ดำเนินการในเครื่องแก๊สซิฟายเออร์จะปรับอุณหภูมิในช่วง 500 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และหน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ โดยพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการในสาย SYNGAS ที่ออกมาจากหน่วยแยก (SEP-GAS) ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่พิจารณาหลักๆ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน



(ก)

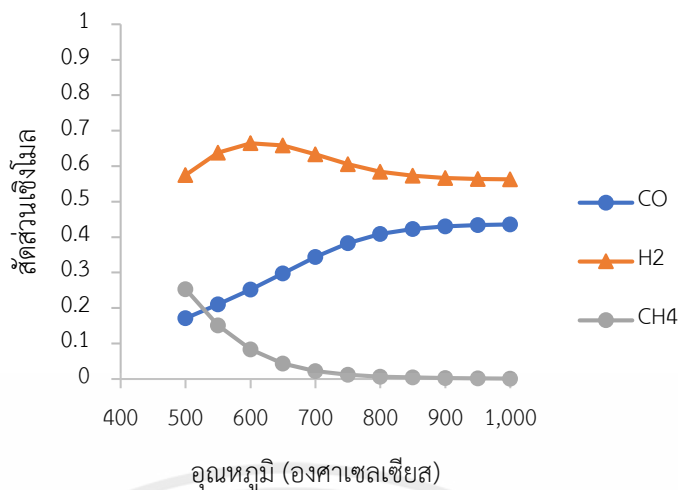


(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 หลังจากปรับปรุงกระบวนการ (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษขี้ไก่ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

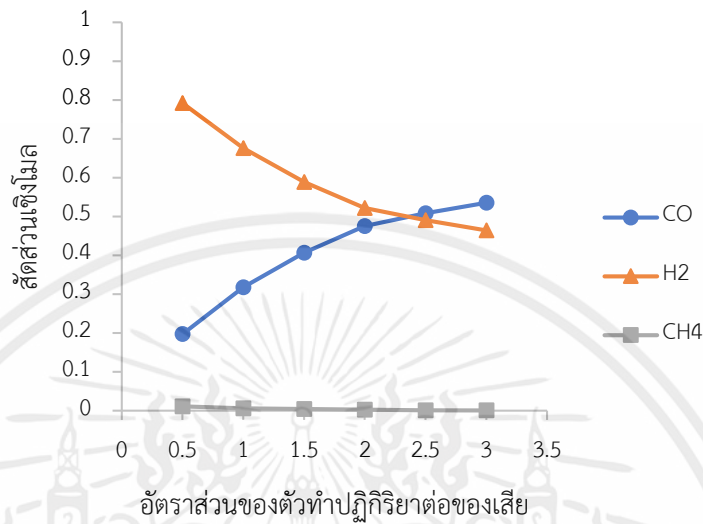
จากรูปที่ 4.7ก - 4.7ง แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อของเสียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ตามลำดับ ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 หลังจากปรับปรุงกระบวนการ จากรูปที่ 4.7 เมื่ออุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนจะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์แต่ละตัวในของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกัน หลังจากการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันโดยเพิ่มหน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส พบว่าไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายโครงการวิจัย ผลจากการจำลองกระบวนการของไม้สนดิบและพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนจะคงที่ และในส่วนของฟางข้าวและเศษขี้ไก่จะมีแนวโน้มเหมือนกัน คือสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนจะคงที่ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

4.6.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย

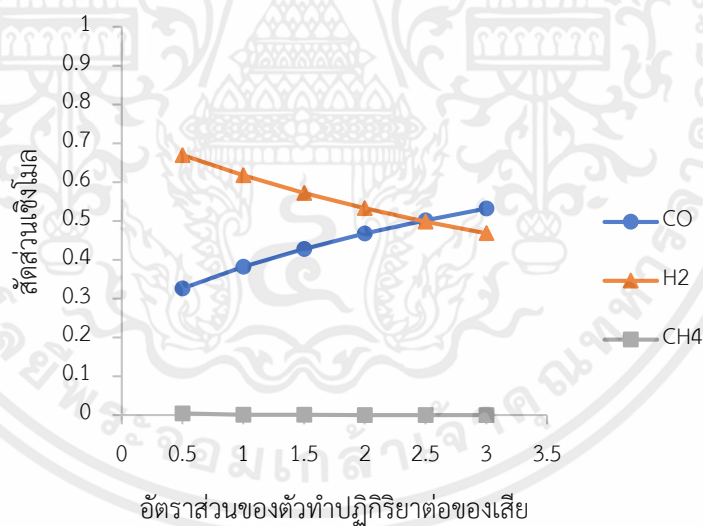
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนมีปริมาณน้อยเกินไป ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณมากเกินไปซึ่งยังไม่เป็นไปตามเป้าหมายของโครงการวิจัย จึงได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการ ที่ดำเนินการภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ในช่วง 0.5 ถึง 3 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ โดยพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่ได้จากการจำลองกระบวนการในสาย SYNGAS ที่ออกมาจากหน่วยแยก (SEP-GAS) ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่พิจารณาหลักๆ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน

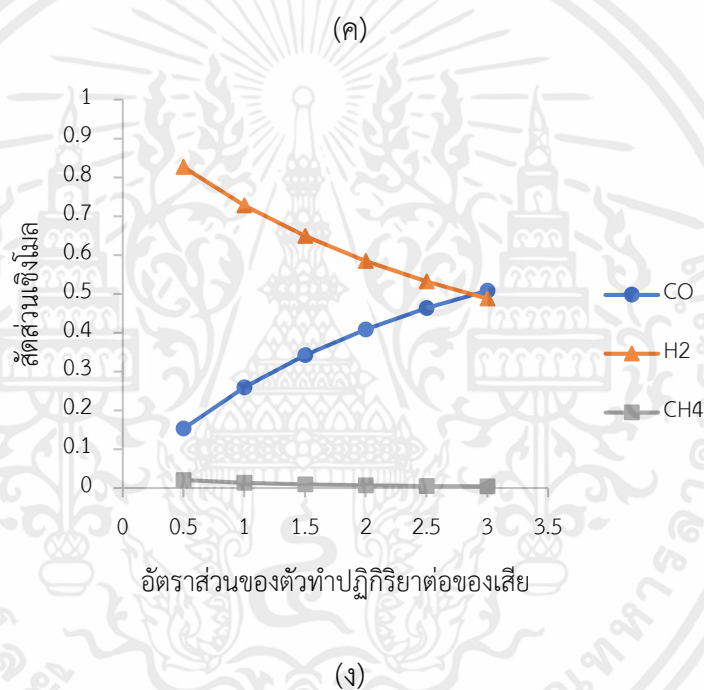
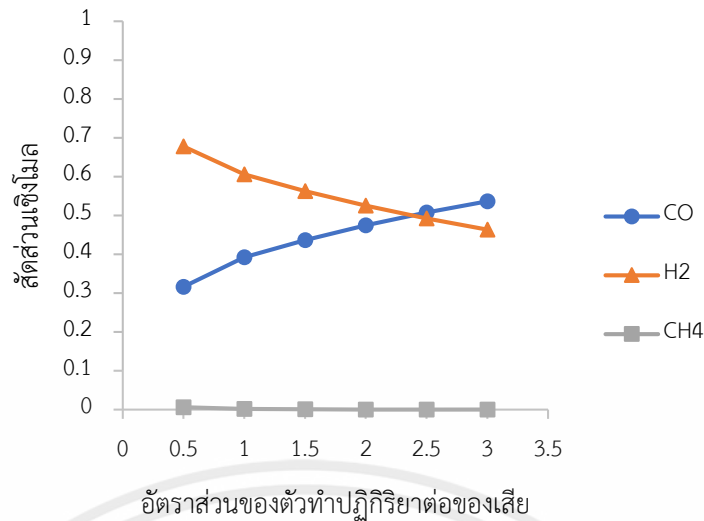


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



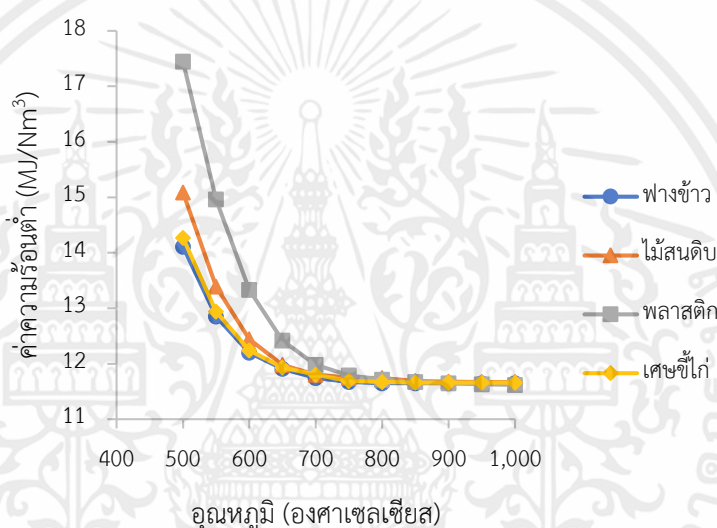
รูปที่ 4.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หลังจากปรับปรุงกระบวนการ (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษขี้ไก่ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

จากรูปที่ 4.8ก - 4.8ง แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ตามลำดับ ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หลังจากปรับปรุงกระบวนการ จากรูปที่ 4.8 เมื่ออัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเพิ่มขึ้น สัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนจะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์แต่ละตัวในของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มการเพิ่มและลดลงเหมือนกัน หลังจากการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยเพิ่มหน่วยกำจัด

คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส พบว่าไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ เช่นเดียวกับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายโครงการวิจัย ผลจากการจำลองกระบวนการจะเห็นว่าที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียในช่วง 2.5 ถึง 3 ของของเสีย ทั้ง 4 ชนิด จะมีสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน

4.6.3 ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิด

อิทธิพลของสภาวะการดำเนินงานต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ และค่าความร้อนต่ำ พิจารณาจากองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการในสาย SYNGAS ที่ออกมาจากหน่วยแยก (SEP-GAS) โดยแก๊สสังเคราะห์ที่พิจารณาหลักๆ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ดังสมการที่ (2.12)

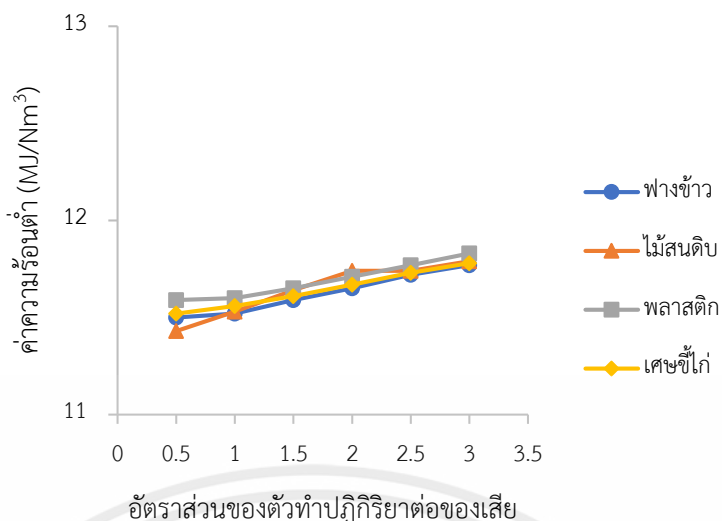


รูปที่ 4.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์

ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 หลังจากปรับปรุงกระบวนการ

รูปที่ 4.9 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 หลังจากปรับปรุงกระบวนการ พบว่าค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์จากของเสียทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าไม่ต่างกันมากหลังจากปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิไฟเคชัน ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส เมื่อใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นของเสียจะได้ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์สูงที่สุดประมาณ 17.45 MJ/Nm³ จาก 17.36 MJ/Nm³ รองลงมาคือไม้สนดิบ เศษซีโก้ และฟางข้าว ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.9 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าของเสียทั้ง 4 ชนิด หลังจากปรับปรุงกระบวนการมีค่าความร้อนต่ำคงที่ และเข้าสู่สมดุลมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

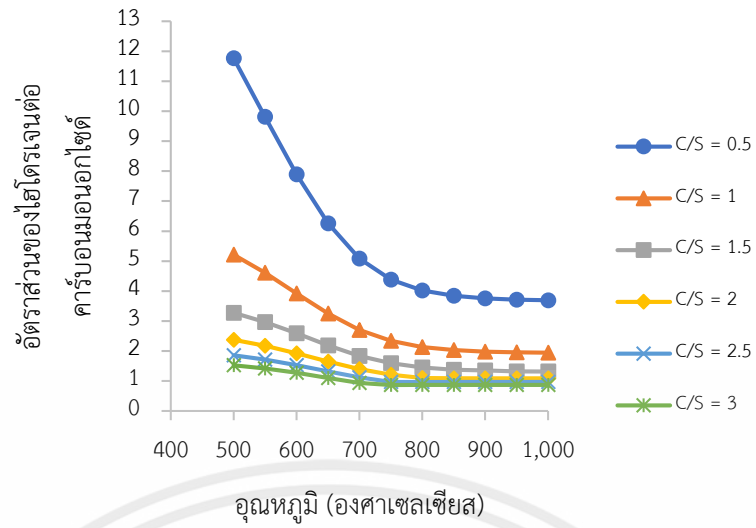


รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หลังจากปรับปรุงกระบวนการ

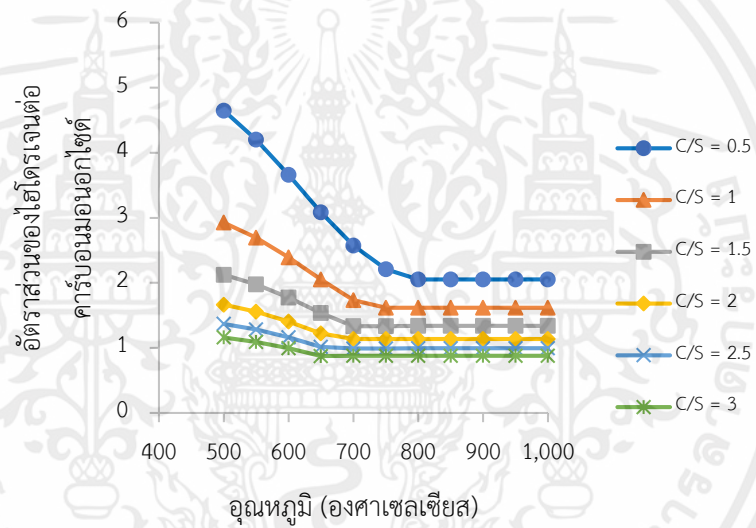
รูปที่ 4.10 แสดงผลของอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หลังจากปรับปรุงกระบวนการ พบว่าค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่ใช้ของเสียต่างชนิดกันมีแนวโน้มเหมือนกัน คือเมื่ออัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเพิ่มสูงขึ้น ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งมีค่าไม่ต่างกันมาก หลังจากปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิเคชันเช่นเดียวกับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 ผลจากการจำลองกระบวนการแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่ใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจะมีค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ที่สูงที่สุดประมาณ 11.59 MJ/Nm³ และไม้สนดิบจะมีค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ต่ำที่สุดประมาณ 11.43 MJ/Nm³ รองลงมาคือ ฟางข้าว และเศษซีเมนต์ ตามลำดับ

4.6.4 อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

จากหัวข้อที่ 4.5 จะเห็นว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 1.9 ซึ่งยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากโครงการวิจัยนี้ต้องการผลิตแก๊สสังเคราะห์ให้ได้อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 2 เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์สารเคมี คือ เมทานอล (Methanol)

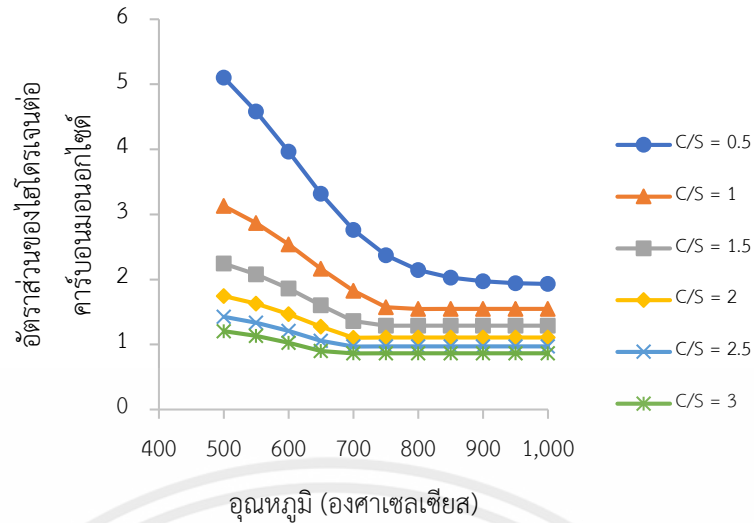


(ก)

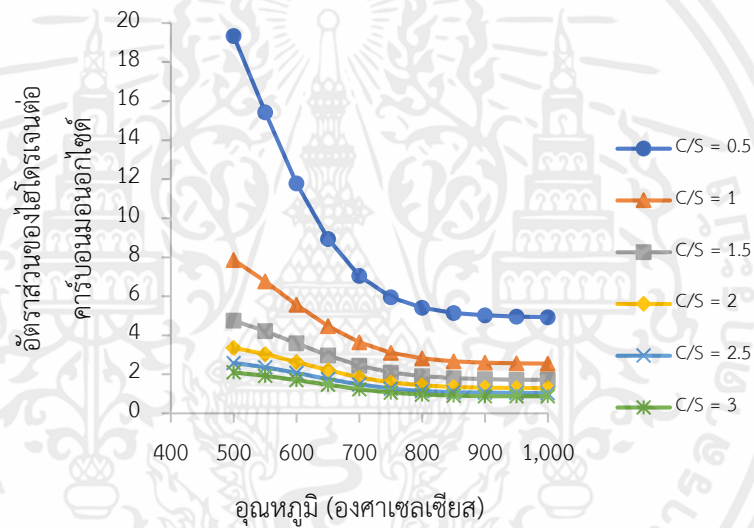


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจานยนต์ที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ หลังจากปรับปรุงกระบวนการ (ก) ไม้สนดิบ (ข) ฟางข้าว (ค) เศษซีโก้ และ (ง) พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

รูปที่ 4.11ก - 4.11ง แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจานยนต์ของเสียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษซีโก้ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ตามลำดับ ที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ หลังจากปรับปรุงกระบวนการ จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิจานยนต์ของเครื่องแก๊สซีพีเออร์เพิ่มขึ้น อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มลดลงเหมือนกัน แต่ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเท่ากับ 0.5 จะมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด รองลงมาคือ ไม้สนดิบ เศษซีโก้ และฟางข้าว ตามลำดับ ที่อุณหภูมิจานยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 750 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าโดดที่สดุที่ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 0.5 ในขณะที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 1 ถึง 3 จะมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 0.5 ถึง 3 จะลดลงจนค่อนข้างคงที่ ดังนั้นสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมและค่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ในการประยุกต์ใช้แก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตเมทานอลจากของเสียแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สภาวะการดำเนินการหลังการปรับปรุงกระบวนการที่เหมาะสมและค่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ในการประยุกต์ใช้แก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตเมทานอลจากของเสียแต่ละชนิด

ของเสีย	อุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์
ไม้สนดิบ	580 - 880	1 - 2	≈ 2
ฟางข้าว	550 - 670	1 - 1.5	≈ 2
เศษซีเมนต์	580 - 880	0.5 - 1.5	≈ 2
พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	520 - 780	1.5 - 3	≈ 2

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าหากนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากของเสียแต่ละชนิดไปผลิตเมทานอล ซึ่งควรมีสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 2 สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้แก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตเมทานอลจากของเสียแต่ละชนิดย่อมต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของของเสียที่นำมาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

โครงการนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ของเสียต่างชนิดกัน ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษซีเมนต์ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยจำลองกระบวนการผ่านโปรแกรม Aspen Plus เพื่อศึกษาผลของประเภทของเสียทั้ง 4 ชนิด และสภาวะการดำเนินการของพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิฟิเคชันและอัตราส่วนตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ และค่าความร้อนต่ำ (LHV) จากการจำลองกระบวนการพบว่าเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันเพิ่มขึ้น สัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนจะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ในของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน รวมถึงค่าความร้อนต่ำในของเสียแต่ละชนิดก็มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียจะส่งผลให้สัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนในแก๊สสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งถือเป็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน รวมถึงค่าความร้อนต่ำในของเสียแต่ละชนิดที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเพิ่มขึ้น และในส่วนของอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิฟิเคชันเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มลดลงเหมือนกันแต่พบว่าจะไม่เป็นไปตามจุดประสงค์ ต้องการให้มีสภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมซึ่งเป้าหมายในงานวิจัยมุ่งเน้นที่จะผลิตแก๊สสังเคราะห์ให้ได้อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 2 เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์สารเคมี คือ เมทานอล (Methanol) ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จึงทำการเพิ่มหน่วยกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์หลังเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส หลังจากการปรับปรุงกระบวนการพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิฟิเคชันและอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเพิ่มขึ้น สัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนและมีเทนมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เป็นไปตามเป้าหมาย

โครงการวิจัย ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยของเสียเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างชนิด มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกัน รวมถึงค่าความร้อนต่ำมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเช่นเดียวกับก่อนการปรับปรุงกระบวนการ จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ของเสียต่างชนิดกัน ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2 ส่วนอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของของเสียแต่ละชนิดพบว่ามีค่าประมาณ 2 ที่มีสภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสม คือ มีช่วงอุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์และอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่กว้างขึ้น ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของโครงการวิจัย จะเห็นว่าพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นของเสียที่นำมาผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ดีที่สุด และสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้แก๊สสังเคราะห์เพื่อผลิตเมทานอลจากของเสียแต่ละชนิดย่อมต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของของเสียที่นำมาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ของเสียต่างชนิดกัน ได้แก่ ไม้สนดิบ ฟางข้าว เศษขี้ไก่ และพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา ควรศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อดังนี้

5.2.1 ศึกษาการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับตัวทำปฏิกิริยาชนิดอื่นในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ผสมไอน้ำ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอากาศ

5.2.2 ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ใช้ตัวทำปฏิกิริยาอื่น

5.2.3 ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์และเสนอแนวทางการจัดการมลพิษที่เกิดขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] H. Suopajarvi, E. Pongrácz, and T. Fabritius, “Bioreducer use in Finnish blast furnace ironmaking – Analysis of CO₂ emission reduction potential and mitigation cost,” *Appl Energy*, vol. 124, pp. 82–93, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.03.008.
- [2] “สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน, โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานเพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต รายงานฉบับสุดท้าย (Final Report).”
- [3] C. Ciliberti *et al.*, “processes Syngas Derived from Lignocellulosic Biomass Gasification as an Alternative Resource for Innovative Bioprocesses”, doi: 10.3390/pr8121567.
- [4] H. Sciences, “Gasification,” vol. 4, no. 1, pp. 1–23, 2016.
- [5] “pcdnew-2021-10-19_08-59-54_995414”.
- [6] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Alvarez, J. Bilbao, and M. Olazar, “Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 576–596, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.09.032.
- [7] M. Shahbaz, T. Al-Ansari, M. Inayat, S. A. Sulaiman, P. Parthasarathy, and G. McKay, “A critical review on the influence of process parameters in catalytic co-gasification: Current performance and challenges for a future prospectus,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110382, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110382.
- [8] กรมควบคุมมลพิษ, “คู่มือแนวทางและข้อกำหนดเบื้องต้น การลดและใช้ประโยชน์ขยะมูลฝอย,” 2552.
- [9] S. Udomsri, M. P. Petrov, A. R. Martin, and T. H. Fransson, “Clean energy conversion from municipal solid waste and climate change mitigation in

- Thailand: Waste management and thermodynamic evaluation,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, no. 4, pp. 355–364, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.ESD.2011.07.007.
- [10] S. Vassanadumrongdee and S. Kittipongvises, “Factors influencing source separation intention and willingness to pay for improving waste management in Bangkok, Thailand,” *Sustainable Environment Research*, vol. 28, no. 2, pp. 90–99, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.SERJ.2017.11.003.
- [11] M. Balat and G. Ayar, “Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends,” *Energy Sources*, vol. 27, no. 10, pp. 931–940, Jul. 2005, doi: 10.1080/00908310490449045.
- [12] “Biomass explained - U.S. Energy Information Administration (EIA).” <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/> (accessed Dec. 13, 2022).
- [13] “วิถัจกรพลังงานชีวมวล สารชีวมวลคืออะไร - ส่วนการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภาคป่าไม้.” <http://reddplus.dnp.go.th/?p=5017> (accessed Dec. 13, 2022).
- [14] S. K. Tulashie *et al.*, “Recycling of plastic wastes into alternative fuels towards a circular economy in Ghana,” *Cleaner Chemical Engineering*, vol. 4, p. 100064, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CLCE.2022.100064.
- [15] “Plastic Waste Material Flow Analysis for Thailand.” <https://www.worldbank.org/en/country/thailand/publication/plastic-waste-material-flow-analysis-for-thailand> (accessed Dec. 13, 2022).
- [16] “โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) คืออะไร? - บริษัท ที.เอ.เน็ตติ้ง จำกัด.” <https://www.tanetting.co.th/> (accessed Dec. 13, 2022).
- [17] S. Fremaux, S. M. Beheshti, H. Ghassemi, and R. Shahsavan-Markadeh, “An experimental study on hydrogen-rich gas production via steam gasification of biomass in a research-scale fluidized bed,” *Energy Convers Manag*, vol. 91, pp. 427–432, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2014.12.048.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] L. F. Calvo, M. Otero, B. M. Jenkins, A. Morán, and A. I. García, “Heating process characteristics and kinetics of rice straw in different atmospheres,” *Fuel Processing Technology*, vol. 85, no. 4, pp. 279–291, Mar. 2004, doi: 10.1016/S0378-3820(03)00202-9.
- [19] D. K. Singh and J. V. Tirkey, “Process modelling and thermodynamic performance optimization of biomass air gasification fuelled with waste poultry litter pellet by integrating Aspen plus with RSM,” *Biomass Bioenergy*, vol. 158, p. 106370, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2022.106370.
- [20] R. K. Singh, B. Ruj, A. K. Sadhukhan, and P. Gupta, “Thermal degradation of waste plastics under non-sweeping atmosphere: Part 1: Effect of temperature, product optimization, and degradation mechanism,” *J Environ Manage*, vol. 239, pp. 395–406, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2019.03.067.
- [21] “Waste Gasification Process - Ankur Scientific.” <https://www.ankurscientific.com/technology.html> (accessed May 15, 2023).
- [22] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, “Biomass gasification technology: The state-of-the-art overview,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.JECHEM.2015.11.005.
- [23] สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน, “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Gasification),”.
- [24] “คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน แก๊สซิพีเคชั่นจากชีวมวล (ส่วนทฤษฎี),”.
- [25] Y. Zhang *et al.*, “Gasification Technologies and Their Energy Potentials,” *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches*, pp. 193–206, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-444-64200-4.00014-1.
- [26] M. Fiore, V. Magi, and A. Viggiano, “Internal combustion engines powered by syngas: A review,” *Appl Energy*, vol. 276, p. 115415, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115415.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] C. C. Xu *et al.*, “1.19 Biomass Energy,” *Comprehensive Energy Systems*, vol. 1–5, pp. 770–794, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00121-8.
- [28] A. Ramos and A. Rouboa, “Syngas production strategies from biomass gasification: Numerical studies for operational conditions and quality indexes,” *Renew Energy*, vol. 155, pp. 1211–1221, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.03.158.
- [29] S. Vikram, P. Rosha, S. Kumar, and S. Mahajani, “Thermodynamic analysis and parametric optimization of steam-CO₂ based biomass gasification system using Aspen PLUS,” *Energy*, vol. 241, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122854.
- [30] H. Yu, G. Chen, Y. Xu, and D. Chen, “Biomass gasification,” 2016.
- [31] M. Fernandez-Lopez, J. Pedroche, J. L. Valverde, and L. Sanchez-Silva, “Simulation of the gasification of animal wastes in a dual gasifier using Aspen Plus®,” *Energy Convers Manag*, vol. 140, pp. 211–217, May 2017, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2017.03.008.
- [32] X. Zheng, Z. Ying, B. Wang, and C. Chen, “Hydrogen and syngas production from municipal solid waste (MSW) gasification via reusing CO₂,” *Appl Therm Eng*, vol. 144, pp. 242–247, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.058.
- [33] A. Erkiaga, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, and M. Olazar, “Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor,” *Fuel*, vol. 109, pp. 461–469, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.FUEL.2013.03.022.
- [34] M. Shahabuddin and S. Bhattacharya, “Co-gasification characteristics of coal and biomass using co₂ reactant under thermodynamic equilibrium modelling,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217384.
- [35] S. Begum, M. G. Rasul, and D. Akbar, “A Numerical Investigation of Municipal Solid Waste Gasification Using Aspen Plus,” *Procedia Eng*, vol. 90, pp. 710–717, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROENG.2014.11.800.

- [36] S. I. Sandler, “Using Aspen Plus® in Thermodynamics Instruction A Step-by-Step Guide.”
- [37] C. Gai and Y. Dong, “Experimental study on non-woody biomass gasification in a downdraft gasifier,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 4935–4944, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2011.12.031.
- [38] M. P. González-Vázquez, F. Rubiera, C. Pevida, D. T. Pio, and L. A. C. Tarelho, “Thermodynamic analysis of biomass gasification using aspen plus: Comparison of stoichiometric and non-stoichiometric models,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14010189.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

**การเปลี่ยนอนุมัติและอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย
ที่มีต่อแก๊สสังเคราะห์ ก่อนปรับปรุงกระบวนการ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. 1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อสัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ก่อนปรับปรุงกระบวนการ ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์											
	ไม้สนดิบ			ฟางข้าว			เศษซี้ไก่			พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง		
	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄
500	0.2187	0.6282	0.1531	0.3180	0.5742	0.1078	0.3002	0.5844	0.1155	0.1194	0.6270	0.2536
550	0.3329	0.5843	0.0828	0.4456	0.4992	0.0552	0.4264	0.5140	0.0596	0.2031	0.6459	0.1510
600	0.4515	0.5067	0.0417	0.5649	0.4086	0.0265	0.5464	0.4248	0.0289	0.3038	0.6132	0.0830
650	0.5563	0.4235	0.0202	0.6623	0.3255	0.0122	0.6456	0.3409	0.0134	0.4051	0.5518	0.0431
700	0.6348	0.3554	0.0098	0.7080	0.2883	0.0037	0.7124	0.2819	0.0058	0.4893	0.4885	0.0221
750	0.6842	0.3107	0.0051	0.7230	0.2762	0.0008	0.7242	0.2745	0.0013	0.5463	0.4418	0.0118
800	0.7105	0.2867	0.0029	0.7369	0.2629	0.0002	0.7355	0.2642	0.0003	0.5780	0.4152	0.0068
850	0.7138	0.2853	0.0009	0.7496	0.2503	0.0000	0.7459	0.2540	0.0001	0.5932	0.4027	0.0042
900	0.7160	0.2837	0.0003	0.7612	0.2387	0.0000	0.7556	0.2444	0.0000	0.5999	0.3974	0.0027
950	0.7182	0.2817	0.0001	0.7718	0.2281	0.0000	0.7646	0.2354	0.0000	0.6029	0.3953	0.0018
1,000	0.7203	0.2797	0.0000	0.7815	0.2185	0.0000	0.7728	0.2272	0.0000	0.6042	0.3946	0.0012

ตารางที่ ก. 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำก่อนปรับปรุงกระบวนการที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนต่ำ (MJ/Nm ³)			
	ไม้สนดิบ	ฟางข้าว	เศษซีเมนต์	พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง
500	15.0269	14.0751	14.2332	17.3593
550	13.4758	12.9910	13.0681	14.9459
600	12.6660	12.4918	12.5179	13.4277
650	12.3197	12.3148	12.3145	12.6157
700	12.2034	12.1854	12.2471	12.2446
750	12.1763	12.1399	12.1544	12.0911
800	12.1710	12.1505	12.1508	12.0230
850	12.1264	12.1705	12.1646	11.9853
900	12.1148	12.1910	12.1803	11.9609
950	12.1140	12.2103	12.1970	11.9442
1,000	12.1163	12.2280	12.2118	11.9327

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อสัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ก่อนปรับปรุงกระบวนการ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยา ต่อของเสีย	สัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์											
	ไม้สนดิบ			ฟางข้าว			เศษซี้ไก่			พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง		
	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄
0.5	0.4056	0.5834	0.0110	0.6133	0.3823	0.0044	0.5947	0.3992	0.0061	0.2685	0.7109	0.0206
1	0.5606	0.4331	0.0063	0.6657	0.3333	0.0010	0.6683	0.3297	0.0020	0.4126	0.5742	0.0132
1.5	0.6511	0.3449	0.0041	0.7056	0.2940	0.0004	0.7057	0.2937	0.0007	0.5089	0.4819	0.0092
2	0.7105	0.2867	0.0029	0.7369	0.2629	0.0002	0.7355	0.2642	0.0003	0.5780	0.4152	0.0068
2.5	0.7349	0.2640	0.0010	0.7621	0.2378	0.0001	0.7597	0.2401	0.0002	0.6300	0.3649	0.0052
3	0.7548	0.2447	0.0005	0.7829	0.2171	0.0001	0.7799	0.2200	0.0001	0.6705	0.3254	0.0041

ตารางที่ ก. 4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำ ก่อนปรับปรุงกระบวนการ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยา ต่อของเสีย	ค่าความร้อนต่ำ (MJ/Nm ³)			
	ไม้สนดิบ	ฟางข้าว	เศษซีเมนต์	พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง
0.5	11.8117	12.0282	12.0370	11.8002
1	11.9793	12.0398	12.0698	11.8799
1.5	12.0918	12.0980	12.1071	11.9566
2	12.1710	12.1505	12.1508	12.0230
2.5	12.1662	12.1947	12.1929	12.0791
3	12.1916	12.2319	12.2275	12.1266

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของไม้สนดิบก่อนปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของไม้สนดิบ					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500	10.2685	5.5099	3.7745	2.8730	2.3201	1.9460
550	6.0017	3.2984	2.2880	1.7551	1.4248	1.1997
600	3.7307	2.0816	1.4556	1.1222	0.9142	0.7718
650	2.5177	1.4081	0.9863	0.7614	0.6208	0.5245
700	1.8863	1.0438	0.7275	0.5599	0.4557	0.3844
750	1.5776	0.8586	0.5932	0.4541	0.3682	0.3343
800	1.4384	0.7726	0.5297	0.4035	0.3592	0.3242
850	1.3796	0.7354	0.5021	0.3997	0.3515	0.3130
900	1.3555	0.7201	0.4906	0.3963	0.3432	0.3022
950	1.3459	0.7139	0.4860	0.3923	0.3353	0.2921
1,000	1.3421	0.7115	0.4841	0.3883	0.3280	0.2828

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของฟางข้าวก่อนปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของฟางข้าว					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500	4.3930	2.9733	2.2469	1.8057	1.5094	1.2965
550	2.6732	1.8270	1.3886	1.1202	0.9388	0.8081
600	1.7029	1.1719	0.8943	0.7234	0.6074	0.5236
650	1.1506	0.7940	0.6069	0.4915	0.4130	0.3596
700	0.8425	0.5801	0.4583	0.4073	0.3659	0.3321
750	0.6806	0.5161	0.4393	0.3820	0.3380	0.3032
800	0.6234	0.5006	0.4167	0.3568	0.3120	0.2773
850	0.6196	0.4834	0.3952	0.3339	0.2890	0.2547
900	0.6127	0.4671	0.3757	0.3136	0.2688	0.2350
950	0.6053	0.4521	0.3583	0.2956	0.2510	0.2179
1,000	0.5982	0.4386	0.3426	0.2796	0.2354	0.2029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของเศษซีไก่อ่อนปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของเศษซีไก่อ่อน					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500	4.8841	3.2497	2.4349	1.9468	1.6218	1.3897
550	2.9594	1.9908	1.5013	1.2054	1.0071	0.8649
600	1.8800	1.2744	0.9654	0.7774	0.6509	0.5599
650	1.2696	0.8631	0.6549	0.5280	0.4425	0.3809
700	0.9316	0.6315	0.4784	0.3957	0.3594	0.3287
750	0.7551	0.5088	0.4312	0.3790	0.3379	0.3048
800	0.6713	0.4933	0.4162	0.3592	0.3160	0.2821
850	0.6345	0.4844	0.4002	0.3405	0.2961	0.2619
900	0.6192	0.4744	0.3851	0.3235	0.2783	0.2441
950	0.6130	0.4648	0.3714	0.3079	0.2624	0.2283
1,000	0.6110	0.4559	0.3589	0.2941	0.2482	0.2143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงก่อนปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง						
	อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยา ต่อของเสีย	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500		19.9266	10.3265	6.9644	5.2526	4.2159	3.5207
550		11.5275	6.1143	4.1796	3.1802	2.5685	2.1550
600		7.0810	3.8203	2.6366	2.0188	1.6376	1.3785
650		4.7232	2.5626	1.7747	1.3620	1.1068	0.9329
700		3.5067	1.8890	1.3036	0.9983	0.8101	0.6821
750		2.9149	1.5491	1.0611	0.8087	0.6540	0.5493
800		2.6475	1.3915	0.9468	0.7184	0.5792	0.4853
850		2.5336	1.3235	0.8971	0.6789	0.5463	0.4571
900		2.4867	1.2953	0.8764	0.6624	0.5325	0.4453
950		2.4678	1.2839	0.8680	0.6557	0.5269	0.4444
1,000		2.4606	1.2795	0.8647	0.6531	0.5247	0.4443

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

การเปลี่ยนอนุมัติและอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย
ที่มีต่อแก๊สสังเคราะห์ หลังปรับปรุงกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. 1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อสัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ ที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์											
	ไม้สนดิบ			ฟางข้าว			เศษซี้ไก่			พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง		
	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄
500	0.2510	0.5959	0.1531	0.3348	0.5574	0.1078	0.3223	0.5623	0.1155	0.1712	0.5752	0.2536
550	0.2885	0.6287	0.0828	0.3696	0.5753	0.0552	0.3579	0.5825	0.0596	0.2106	0.6383	0.1510
600	0.3273	0.6310	0.0417	0.4047	0.5689	0.0265	0.3938	0.5774	0.0289	0.2525	0.6645	0.0830
650	0.3699	0.6099	0.0202	0.4442	0.5436	0.0122	0.4340	0.5526	0.0134	0.2981	0.6587	0.0431
700	0.4137	0.5764	0.0098	0.4663	0.5300	0.0037	0.4727	0.5215	0.0058	0.3442	0.6337	0.0221
750	0.4508	0.5441	0.0051	0.4672	0.5320	0.0008	0.4740	0.5247	0.0013	0.3828	0.6054	0.0118
800	0.4756	0.5215	0.0029	0.4674	0.5324	0.0002	0.4743	0.5254	0.0003	0.4085	0.5847	0.0068
850	0.4777	0.5214	0.0009	0.4675	0.5325	0.0000	0.4744	0.5255	0.0001	0.4229	0.5730	0.0042
900	0.4779	0.5218	0.0003	0.4675	0.5325	0.0000	0.4744	0.5256	0.0000	0.4302	0.5671	0.0027
950	0.4779	0.5220	0.0001	0.4675	0.5325	0.0000	0.4744	0.5256	0.0000	0.4339	0.5643	0.0018
1,000	0.4779	0.5220	0.0000	0.4675	0.5325	0.0000	0.4744	0.5256	0.0000	0.4358	0.5629	0.0012

ตารางที่ ค. 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนต่ำหลังปรับปรุงกระบวนการที่อัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียเท่ากับ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนต่ำ (MJ/Nm ³)			
	ไม้สนดิบ	ฟางข้าว	เศษซีเมนต์	พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง
500	15.0864	14.1060	14.2739	17.4547
550	13.3942	12.8510	12.9421	14.9598
600	12.4374	12.1970	12.2371	13.3334
650	11.9768	11.9136	11.9250	12.4188
700	11.7978	11.7407	11.8050	11.9775
750	11.7468	11.6692	11.6941	11.7901
800	11.7367	11.6546	11.6704	11.7112
850	11.6920	11.6514	11.6649	11.6720
900	11.6767	11.6505	11.6635	11.6487
950	11.6719	11.6503	11.6631	11.6333
1,000	11.6704	11.6502	11.6630	11.6229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อสัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์หลังปรับปรุงกระบวนการ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยา ต่อของเสีย	สัดส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์											
	ไม้สนดิบ			ฟางข้าว			เศษซี้ไก่			พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง		
	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄	CO	H ₂	CH ₄
0.5	0.1971	0.7919	0.0110	0.3260	0.6696	0.0044	0.3163	0.6776	0.0061	0.1529	0.8265	0.0206
1	0.3175	0.6762	0.0063	0.3816	0.6174	0.0010	0.3921	0.6059	0.0020	0.2590	0.7278	0.0132
1.5	0.4068	0.5891	0.0041	0.4278	0.5718	0.0004	0.4364	0.5629	0.0007	0.3420	0.6488	0.0092
2	0.4756	0.5215	0.0029	0.4674	0.5324	0.0002	0.4743	0.5254	0.0003	0.4085	0.5847	0.0068
2.5	0.5082	0.4908	0.0010	0.5018	0.4981	0.0001	0.5074	0.4925	0.0002	0.4629	0.5319	0.0052
3	0.5353	0.4642	0.0005	0.5319	0.4680	0.0001	0.5364	0.4635	0.0001	0.5083	0.4876	0.0041

ตารางที่ ค. 4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสียที่มีต่อค่าความร้อนต่ำ หลังปรับปรุงกระบวนการ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยา ต่อของเสีย	ค่าความร้อนต่ำ (MJ/Nm ³)			
	ไม้สนดิบ	ฟางข้าว	เศษซีเมนต์	พลาสติกพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง
0.5	11.4288	11.4996	11.5249	11.5875
1	11.5319	11.5170	11.5608	11.5973
1.5	11.6407	11.5868	11.6097	11.6495
2	11.7367	11.6546	11.6704	11.7112
2.5	11.7512	11.7158	11.7276	11.7718
3	11.7878	11.7702	11.7793	11.8281

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง. 1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของไม้สนดิบหลังปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของไม้สนดิบ					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500	11.7664	5.2121	3.2748	2.3741	1.8568	1.5236
550	9.8191	4.6084	2.9677	2.1792	1.7184	1.4173
600	7.8973	3.9250	2.5910	1.9279	1.5334	1.2722
650	6.2585	3.2525	2.1898	1.6488	1.3212	1.1020
700	5.0887	2.7023	1.8386	1.3933	1.1212	0.9380
750	4.3845	2.3350	1.5915	1.2070	0.9719	0.8652
800	4.0178	2.1298	1.4481	1.0965	0.9658	0.8672
850	3.8397	2.0277	1.3756	1.0915	0.9668	0.8676
900	3.7563	1.9792	1.3555	1.0919	0.9668	0.8676
950	3.7139	1.9553	1.3238	1.0923	0.9670	0.8678
1,000	3.6938	1.9437	1.3153	1.0923	0.9670	0.8678

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง. 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของฟางข้าวหลังปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของฟางข้าว					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500	4.6496	2.9261	2.1246	1.6648	1.3675	1.1598
550	4.2041	2.6941	1.9749	1.5565	1.2836	1.0917
600	3.6626	2.3931	1.7724	1.4058	1.1643	0.9933
650	3.0859	2.0516	1.5338	1.2237	1.0175	0.8749
700	2.5757	1.7316	1.3326	1.1366	0.9912	0.8790
750	2.2106	1.6170	1.3358	1.1386	0.9924	0.8797
800	2.0536	1.6181	1.3365	1.1390	0.9927	0.8799
850	2.0531	1.6183	1.3367	1.1391	0.9927	0.8799
900	2.0530	1.6184	1.3367	1.1391	0.9927	0.8799
950	2.0529	1.6184	1.3367	1.1391	0.9927	0.8799
1,000	2.0529	1.6184	1.3367	1.1391	0.9927	0.8799

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง. 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของเศษซีไก่อ่หลังปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยาต่อของเสีย	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของเศษซีไก่อ่					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500	5.1045	3.1294	2.2433	1.7445	1.4259	1.2051
550	4.5835	2.8692	2.0790	1.6274	1.3360	1.1326
600	3.9637	2.5370	1.8598	1.4661	1.2093	1.0287
650	3.3189	2.1663	1.6047	1.2733	1.0548	0.9001
700	2.7613	1.8245	1.3606	1.1033	0.9681	0.8625
750	2.3697	1.5719	1.2886	1.1068	0.9702	0.8638
800	2.1427	1.5454	1.2900	1.1076	0.9707	0.8641
850	2.0268	1.5461	1.2904	1.1078	0.9708	0.8641
900	1.9707	1.5463	1.2905	1.1078	0.9708	0.8641
950	1.9434	1.5464	1.2905	1.1078	0.9708	0.8641
1,000	1.9311	1.5464	1.2905	1.1078	0.9708	0.8641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง. 4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงหลังปรับปรุงกระบวนการ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง						
	อัตราส่วนของ ตัวทำปฏิกิริยา ต่อของเสีย	0.5	1	1.5	2	2.5	3
500		19.3352	7.8647	4.7481	3.3599	2.5872	2.0986
550		15.4256	6.7565	4.2094	3.0310	2.3598	1.9287
600		11.7902	5.5692	3.5872	2.6317	2.0735	1.7088
650		8.9357	4.4748	2.9633	2.2095	1.7594	1.4608
700		7.0408	3.6350	2.4456	1.8412	1.4757	1.2310
750		5.9578	3.1002	2.0950	1.5817	1.2702	1.0611
800		5.4066	2.8095	1.8969	1.4313	1.1489	0.9594
850		5.1431	2.6664	1.7976	1.3549	1.0867	0.9069
900		5.0187	2.5982	1.7500	1.3181	1.0567	0.8816
950		4.9588	2.5654	1.7271	1.3005	1.0423	0.8789
1,000		4.9291	2.5491	1.7157	1.2917	1.0352	0.8795

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้