

การออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการเคมีคอลูบปีงแก๊สซีพีเคชั้นของขยะมูลฝอย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design and analysis of chemical looping gasification for municipal waste



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการเคมีคอลลูบึงแก๊ส ซีพีเคชั่นของขยะมูลฝอย
โดย	น.ส.นฤต พรมศรีชา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พิมพ์พร พลเพชร)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธิดา อรรถยานันท์)	

นฤต พรหมศรีชา : การออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูล  
 ฝอย. ( Design and analysis of chemical looping gasification for municipal waste) อ.ที่  
 ปริญญาหลัก : ผศ. ดร.อมรชัย อารณวิธานพ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอยซึ่งเป็นจัดเป็นวัตถุประสงค์  
 ประเภทสารชีวมวลที่มีความชื้นสูงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในรูปของค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ด้วย  
 การสร้างแบบจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันซึ่งใช้นิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมิเนียม  
 ออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนซึ่งถูกดำเนินการด้วยโปรแกรมแอสเพนพลัส โดยแบบจำลองถูกพัฒนาบนพื้นฐาน  
 ทางอุณหพลศาสตร์ที่สภาวะสมดุลเพื่อใช้วิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่สำคัญที่ส่งผลต่อ  
 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน สำหรับตัวแปรกระบวนการที่ศึกษา  
 ประกอบด้วยอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ความดันของกระบวนการ และอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์  
 ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณ  
 ทหารในกระบวนการลดลง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้น  
 ของก๊าซมีเทนลดลงส่งผลให้ค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นการเพิ่มความดันจะสามารถ  
 ปรับปรุงความเข้มข้นของก๊าซมีเทนให้เพิ่มขึ้นได้ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่ออุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงสูงขึ้นส่งผลให้  
 ค่าพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ในกระบวนการจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การเพิ่มอัตราส่วนของนิกเกิล  
 ออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยจึงสามารถชดเชยความต้องการพลังงานความร้อนของกระบวนการ  
 ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่ทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน  
 สูงสุดภายใต้เงื่อนไขการใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการอย่างเพียงพอ พบว่าการดำเนินงานที่สภาวะความ  
 ดันกระบวนการ 1 บาร์ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 717 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของนิกเกิล  
 ออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.26 จะทำให้ก๊าซสังเคราะห์มีค่าความร้อนต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 0.27 เม  
 กะจูลต่อโมล และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 64.49 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
 ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....  
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970216021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Chemical looping gasification, Waste-To-Energy, Municipal waste, Synthesis gas  
 Narid Promsricha : Design and analysis of chemical looping gasification for municipal waste. Advisor: Asst. Prof. Amornchai Arpornwichanop, D.Eng.

The chemical looping gasification of municipal waste, which is regarded as high moisture biomass, was proposed for energy production considered in term lower heating value of synthesis gas. Modeling of the chemical looping gasification using nickel oxide on aluminum oxide support as oxygen carriers was performed by using Aspen plus. The developed model based on a thermodynamic equilibrium approach was used to analyze the effects of key operating parameters included a temperature of the fuel reactor, the pressure of the process and the ratio of nickel oxide to carbon in the municipal waste on the thermal efficiency of this process. The simulation results showed that when the temperature of the fuel reactor increased, the amount of tar in the process decreased and the concentration of carbon monoxide and hydrogen increased. However, the heating value of the synthesis gas was slightly increased due to the decreased fraction of methane. Although an increase in the operating pressure can increase the methane concentration, but decrease the fraction of carbon monoxide and hydrogen. It was also found that an increase in the operating temperature of the fuel reactor causes high total energy consumption and the increased ratio of nickel oxide to carbon to carbon in the municipal waste can offset the thermal energy requirement of the process. From the simulation study, the optimal operating conditions under which the gasification process can achieve the maximum thermal efficiency and operate at the thermal self-sufficiency condition should be operated under pressure of 1 bar, fuel temperature of 717 °C and ratio of nickel oxide to carbon in municipal waste was 0.26. The process can produce the synthesis gas with a lower heating value of 0.27 MJ/mol and has a thermal efficiency of 64.49 %.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อมรชัย อภรณ์วิชานพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ได้เสียสละเวลาและความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ให้การสนับสนุนและดูแลเอาใจใส่รวมถึงกรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งได้มอบโอกาสในการเข้ามาฝึกฝนและหาประสบการณ์การเรียนรู้ด้านวิศวกรรมเคมีที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งเป็นที่มีความค่าเป็นอย่างยิ่ง ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. พิมพ์พร พลเพชร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตา อรรถยานันทน์ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรแห่งภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ความรู้ การสนับสนุน ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ อีกทั้งเพื่อนๆ ทั้งรุ่นพี่และรุ่นน้อง ที่ได้ให้คำแนะนำ กำลังใจ การสนับสนุนและความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวพรหมศรีชา โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณพ่อและคุณแม่ที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน อีกทั้งน้องชายที่คอยให้คำแนะนำในด้านการเรียนการวางแผนในการใช้ชีวิตที่ดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นฤต พรหมศรีชา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	8
2.1 ขยะมูลฝอย (Municipal waste).....	8
2.1.1 ประเภทของขยะมูลฝอย.....	8
2.1.2 ลักษณะและองค์ประกอบของขยะมูลฝอย .....	9
2.1.3 ศักยภาพของขยะมูลฝอยในการผลิตพลังงาน.....	9
2.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process).....	10
2.3 การเกิดทาร์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Tar formation).....	14
2.4 กระบวนการเคมีคอลลูปปีง (Chemical looping process) .....	16
2.4.1 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปีง (Chemical looping combustion).....	16
2.4.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบเคมีคอลลูปปีง (Chemical looping reforming).....	17

2.4.3 กระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชัน (Chemical looping gasification).....	17
2.5 ค่าพลังอิสระกิบส์ต่ำที่สุด (Minimization Gibb free energy) .....	18
บทที่ 3 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
3.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน .....	21
3.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาจากความชื้นที่ส่งผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	21
3.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาจากการเกิดทาร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน....	26
3.2 กระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชัน.....	28
บทที่ 4 การจำลองกระบวนการ .....	31
4.1 การจำลองการขั้นตอนการไพโรไลซิส.....	31
4.2 การจำลองขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันและเคมีคอลลูปิง.....	38
4.3 การตรวจสอบแบบจำลอง .....	40
บทที่ 5 ผลการจำลองกระบวนการและการวิเคราะห์ผล.....	44
5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ.....	44
5.2 ผลกระทบของตัวแปรต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ.....	46
5.2.1 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุล ( $\Omega$ ) .....	46
5.2.2 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์และตัวรองรับในตัวพาออกซิเจน .....	47
5.2.3 ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง .....	50
5.2.4 ผลของความดันของกระบวนการ.....	52
5.3 ผลกระทบของตัวแปรต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ .....	54
5.3.1 ผลของความดันของกระบวนการ .....	54
5.3.2 ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง .....	57
5.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุล ( $\Omega$ ).....	59
5.4 ผลกระทบของตัวแปรต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ .....	60



5.4.1 ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง .....	62
5.4.2 ผลของความดันของกระบวนการ .....	63
5.4.3 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย .....	63
5.5 วิเคราะห์หาสภาวะดำเนินการที่มีเหมาะสมกับกระบวนการ .....	65
บทที่ 6 สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ .....	69
6.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ .....	69
6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย .....	70
บรรณานุกรม .....	71
ประวัติผู้เขียน .....	76



## สารบัญตาราง

## หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นและมีการกำจัดอย่างถูกต้องปี 2559-2551.....	10
ตารางที่ 2.2 ปฏิกริยาหลักทั้งหมดที่เกิดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	12
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงละเอียดของขยะมูลฝอย.....	33
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิของขยะมูลฝอย.....	33
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสขั้นทุติยภูมิของขยะกลุ่มเซลลูโลส.....	34
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลจากการคำนวณหาปริมาณของขยะกลุ่มเซลลูโลสและพลาสติก.....	36
ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของหน่วยจำลองที่ใช้ในขั้นตอนการไพโรไลซิสขยะมูลฝอย.....	37
ตารางที่ 4.6 รายละเอียดหน่วยจำลองที่ใช้ในขั้นตอนแก๊สซิฟิเคชันและเคมีคอลลูปปิง.....	39
ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงละเอียดของเศษไม้ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	41
ตารางที่ 4.8 รายละเอียดหน่วยจำลองที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเศษไม้.....	42
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโรงไฟฟ้าจริงและแบบจำลองที่สร้างขึ้น.....	43
ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรกระบวนการที่ทำให้สภาวะดำเนินการมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด	67
ตารางที่ 5.2 ผลจากการดำเนินการภายใต้สภาวะที่ได้จากการแก้ปัญหา.....	68

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	กระบวนการเปลี่ยนขยะมูลฝอยให้เป็นพลังงาน .....	2
รูปที่ 1.2	กระบวนการทางเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ .....	3
รูปที่ 1.3	หลักการของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน .....	5
รูปที่ 2.1	เทคโนโลยีในการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน .....	11
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน .....	11
รูปที่ 2.3	องค์ประกอบทางเคมีของทาร์ที่ได้จากระบวนแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล .....	15
รูปที่ 2.4	หลักการเกิดกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปีง .....	16
รูปที่ 2.5	หลักการเกิดกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบเคมีคอลลูบปีง .....	17
รูปที่ 2.6	หลักการเกิดกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน .....	18
รูปที่ 3.1	รูปแบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่ ..	24
รูปที่ 3.2	รูปแบบการไหลของวัสดุและพลังงานของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน .....	28
รูปที่ 3.3	กระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ แก๊สซิไฟเออร์แบบคู่ .....	29
รูปที่ 4.1	ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการไพโรไลซิสของขยะมูลฝอยทั้ง 2 ชั้น .....	32
รูปที่ 4.2	แบบจำลองขั้นตอนการไพโรไลซิสของขยะมูลฝอย .....	37
รูปที่ 4.3	แบบจำลองขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน .....	39
รูปที่ 4.4	แบบจำลองขั้นตอนเคมีคอลลูบปีงในกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน .....	39
รูปที่ 4.5	ภาพรวมทั้งหมดของแบบจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน .....	39
รูปที่ 4.6	แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของโรงไฟฟ้าชีวมวล .....	41
รูปที่ 5.1	ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ .....	45
รูปที่ 5.2	ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ ในขั้นตอนไพโรไลซิส .....	45

รูปที่ 5.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ.....	47
รูปที่ 5.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนต่อพลังงานความที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ .....	49
รูปที่ 5.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนต่อพลังงานความที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง .....	50
รูปที่ 5.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ .....	52
รูปที่ 5.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ .....	53
รูปที่ 5.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 1 .....	56
รูปที่ 5.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 2 .....	56
รูปที่ 5.10 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 1 .....	58
รูปที่ 5.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 2 .....	58
รูปที่ 5.12 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ( $\Omega$ ) ต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ .....	60
รูปที่ 5.13 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ .....	62
รูปที่ 5.14 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ.....	63
รูปที่ 5.15 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน .....	64
รูปที่ 5.16 แบบจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอย .....	66

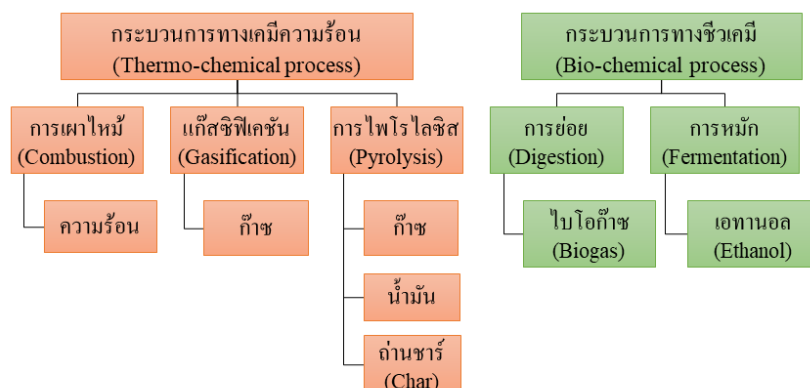
## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

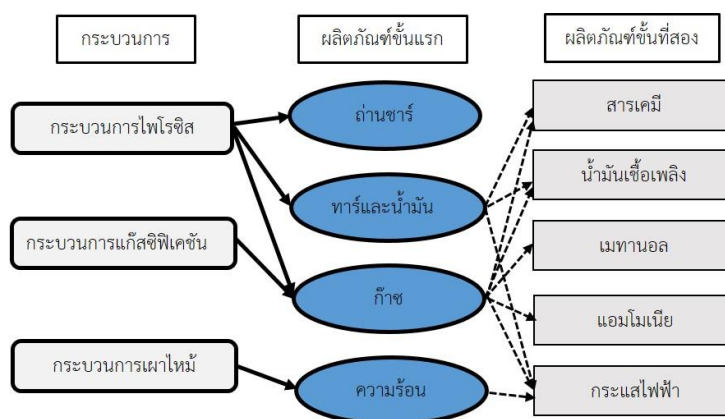
การเจริญเติบโตของปริมาณประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันพลังงานที่ใช้มาจากแหล่งพลังงานหลัก เช่น ถ่านหิน เชื้อเพลิงฟอสซิล และก๊าซธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตาม ความวิตกกังวลเกี่ยวกับวิกฤตการณ์สภาวะโลกร้อนเนื่องด้วยแหล่งเชื้อเพลิงดังกล่าวก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมาก ซึ่งถือเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกหลักและก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (Fernandez-Lopez และคณะ, 2017) นอกจากนี้ปัญหาเรื่องความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกยังนำมาซึ่งปัญหาการเกิดขยะมูลฝอยที่เพิ่มขึ้น (Aleisa และ Al-Jarallah, 2018) ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแรงผลักดันในการค้นหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ที่มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่ม อีกทั้งต้องเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย จึงนำไปสู่แนวคิดในการเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงาน (Waste-to-Energy) เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาประเด็นดังกล่าวได้พร้อมกัน

ขยะมูลฝอย (Municipal waste) ประกอบด้วย สารอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร กระดาษ พลาสติก เส้นใยสังเคราะห์ ยาง หนัง และไม้ และสารอนินทรีย์ เช่น แก้ว กระจก ดินเผา อลูมิเนียม โลหะ และอุปกรณ์เครื่องครัว ซึ่งองค์ประกอบของขยะมูลฝอยส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์จึงทำให้ขยะมูลฝอยจัดเป็นวัสดุติดประเภทสารชีวมวล สำหรับประเทศที่มีการพัฒนาด้านการจัดการขยะค่อนข้างดี ขยะมูลฝอยจะถูกแยกโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยสารอนินทรีย์ส่วนมากจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ ในขณะที่สารอินทรีย์จะถูกส่งไปกำจัด (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) สำหรับประเทศไทย ปัจจุบันการจัดการขยะมูลฝอยที่มียังขาดประสิทธิภาพ การฝังกลบเป็นวิธีการกำจัดขยะที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากสะดวกและไม่ซับซ้อน แต่กลับก่อให้เกิดผลเสียทางด้านสิ่งแวดล้อมและต้องใช้พื้นที่จำนวนมาก ดังนั้น การนำแนวคิดการเปลี่ยนขยะมูลฝอยเหล่านี้มาเปลี่ยนเป็นพลังงานจึงเป็นการจัดการขยะที่มีศักยภาพมากกว่าการจัดการด้วยวิธีฝังกลบ กระบวนการเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการทางชีวเคมี (Bio-chemical process) และกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo-chemical process) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 สำหรับกระบวนการทางชีวเคมีเป็นการย่อยสลายหรือการหมักโดยใช้จุลินทรีย์ แม้ว่ากระบวนการดังกล่าวจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ต้องใช้เวลาในการเกิดการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้การนำขยะมูลฝอยมาเปลี่ยนเป็นพลังงานด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อนจึงได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถจัดการปริมาณขยะมูลฝอยที่มีจำนวนมากโดยใช้ระยะเวลาสั้น อีกทั้งให้ผลิตภัณฑ์เป็นพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้



รูปที่ 1.1 กระบวนการเปลี่ยนขยะมูลฝอยให้เป็นพลังงาน (ดัดแปลงจาก Frombo และคณะ, 2008)

กระบวนการทางเคมีความร้อนที่นิยมใช้ในการเปลี่ยนขยะมูลฝอยให้เป็นพลังงาน มีอยู่ 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) (Arena, 2012) ดังรูปที่ 1.2 โดยกระบวนการเผาไหม้เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ระหว่างสารเชื้อเพลิงและอากาศหรือก๊าซออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์หลักคือ น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความร้อน กระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดจากการสลายตัวของสารเชื้อเพลิงด้วยความร้อนซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนแก่กระบวนการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของก๊าซ น้ำมัน ทาร์ (Tar) และถ่านชาร์ (Char) โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนแก่กระบวนการ (Basu, 2010) สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน (Partial oxidation) ของสารเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ ก๊าซออกซิเจน อากาศ ไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas หรือ syngas) ซึ่งเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้า เชื้อเพลิงเหลว หรือสารเคมี เป็นต้น (Li และคณะ, 2010) สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีทั้งที่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและคายความร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารที่นำมาออกซิไดซ์ หากตัวออกซิไดซ์เป็นอากาศหรือก๊าซออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน แต่ถ้าตัวออกซิไดซ์เป็นไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาชนิดคูดความร้อน (Belgiorno และคณะ, 2003)



รูปที่ 1.2 กระบวนการทางเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ (ดัดแปลงจาก Belgiorno และคณะ, 2003)

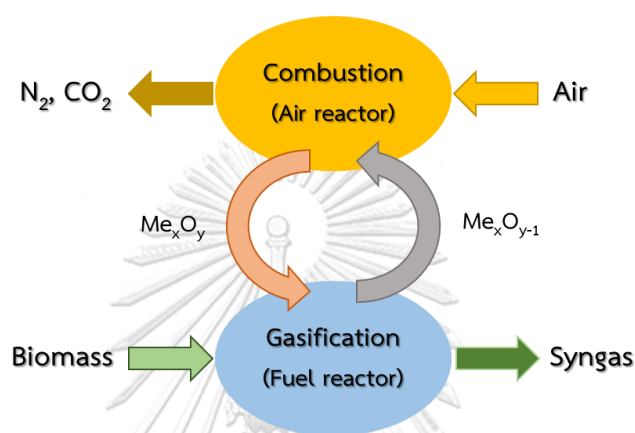
แม้ว่ากระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้รับความสนใจในการนำมาใช้เปลี่ยนขยะมูลฝอยให้เป็นพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของกระบวนการทั้งสองที่มีต่อวัตถุดิบประเภทขยะมูลฝอย คือ ค่าความชื้นของขยะมูลฝอยที่สูง เนื่องด้วยค่าความชื้นบ่งบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีในวัตถุดิบ เมื่อค่าความชื้นสูงจึงบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่เข้าสู่กระบวนการเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ด้วยการใช้ความร้อน ด้วยเหตุนี้เมื่อมีปริมาณน้ำเข้าสู่กระบวนการมากขึ้นจึงจำเป็นต้องให้ความร้อนแก่กระบวนการเพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง (Kaewluan และ Pipatmanomai, 2011) ดังนั้น การแก้ปัญหาเกี่ยวกับค่าความชื้นในขยะมูลฝอย คือ การนำขยะมูลฝอยผ่านขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเพื่อปรับค่าความชื้นให้เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการอบแห้งส่งผลต่อต้นทุนที่เพิ่มขึ้นตาม นอกจากนี้ค่าความชื้นยังส่งผลต่อพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จากที่กล่าวมาแล้วว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ตัวออกซิไดซ์เป็นไอน้ำเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน ดังนั้นค่าความชื้นที่สูงจึงแสดงถึงปริมาณไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความชื้นถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จึงทำให้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันต้องการพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นความชื้นที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้พลังงานที่ต้องให้แก่กระบวนการมากกว่าพลังงานที่ได้รับจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ (Yakaboylu และคณะ, 2015) จากปัญหาเกี่ยวกับความต้องการพลังงานความร้อนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับสารชีวมวลที่มีความชื้นสูง เช่น กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้น้ำที่สภาวะยิ่งยวด เพื่อให้พลังงานความร้อนแก่กระบวนการผ่านไอน้ำที่สภาวะยิ่งยวด แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสียหลักคือ การใช้พลังงานเพื่อเปลี่ยนน้ำที่สภาวะปกติให้เป็นน้ำที่สภาวะยิ่งยวด (Kruse, 2009)

นอกจากปัญหาเรื่องของความชื้นที่มีในสารชีวมวลที่ส่งผลเสียต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแล้ว การเกิดทาร์ก็เป็นอีกหนึ่งปัญหาหลักที่พบในกระบวนการดังกล่าว เนื่องจากทาร์ที่เกิดขึ้นปนอยู่ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ เมื่อนำก๊าซผลิตภัณฑ์ไปใช้ต่อจึงก่อให้เกิดปัญหากับการเครื่องมือและอุปกรณ์ปลายทางอันเนื่องมาจากทาร์ก่อให้เกิดการอุดตันหรือกัดกร่อนเครื่องมือ ด้วยเหตุนี้ก่อนนำก๊าซผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจำเป็นต้องมีการกำจัดทาร์ออกก่อน โดยวิธีการกำจัดทาร์มีทั้งแบบวิธีทางกายภาพ เช่น วิธีการกรอง (Filtration) วิธีการดูดซับ (Absorption) หรือวิธีทางเคมี เช่น กระบวนการรีฟอร์มด้วยไอน้ำ (Steam reforming) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายทาร์ (Catalytic method) ทั้งนี้ การกำจัดทาร์จำเป็นต้องมีหน่วยปฏิบัติการมากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

กระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน (Chemical looping gasification) เป็นเทคโนโลยีที่เกิดจากการปรับปรุงกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแบบเผาไหม้ (Chemical looping combustion) ซึ่งนิยมนำมาใช้ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยหลักการพื้นฐานของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันคล้ายคลึงกับกระบวนการเผาไหม้ แต่จะใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจน (Oxygen carrier) แทนการใช้ก๊าซออกซิเจนหรืออากาศโดยตรง ทั้งนี้โลหะออกไซด์จะหมุนเวียนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์สองเครื่อง ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel reactor) และเครื่องปฏิกรณ์อากาศ (Air reactor) หลักการทำงานของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันคือ ภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง โลหะออกไซด์ ( $Me_xO_y$ ) จะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง โดยโลหะออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ ( $Me_xO_{y-1}$ ) ในขณะที่เชื้อเพลิงจะถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นก๊าซสังเคราะห์ ส่วนภายในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ โลหะออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์จากเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศ เพื่อให้ได้โลหะออกไซด์ในรูปแบบที่สามารถออกซิไดซ์เชื้อเพลิงได้ก่อนหมุนเวียนกลับไปใช้ที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงอีกครั้ง หน้าที่ของโลหะออกไซด์นอกจากเป็นแหล่งของออกซิเจนที่ใช้การออกซิไดซ์เชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแล้ว ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์อากาศสามารถนำกลับมาใช้เป็นพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงได้โดยอาศัยโลหะออกไซด์เป็นตัวพาความร้อน ดังรูปที่ 1.3 ด้วยข้อดีดังกล่าว ทำให้มีการนำกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันมาประยุกต์ใช้กับสารชีวมวลเพื่อเปลี่ยนสารชีวมวลให้เป็นพลังงาน นอกจากนี้กระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่หลีกเลี่ยงการใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์สารเชื้อเพลิงโดยตรงซึ่งต่างจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากอากาศแม้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ราคาถูก แต่อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบของอากาศมีก๊าซไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ด้วยเหตุนี้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมักถูกเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจนส่งผลให้ค่าความร้อน (Lower heating value) ของก๊าซที่ผลิตได้จากกระบวนการลดลง จะเห็นได้ว่ากระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันสามารถผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้โดยไม่ถูกเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจน นอกจากนี้โลหะออกไซด์ได้มาจากเครื่องปฏิกรณ์



อากาศไม่เพียงแต่เป็นแหล่งออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเท่านั้น แต่สามารถใช้เป็นตัวพาความร้อนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์อากาศป้อนมากลับมาที่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงได้อีกด้วย ความร้อนส่วนนี้สามารถนำมาใช้เพื่อกำจัดความชื้นในสารชีวมวลได้ ในขณะที่ความชื้นที่ถูกกำจัดออกจากสารชีวมวลซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำสามารถใช้เป็นตัวออกซิเดชันในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ (Zeng และคณะ, 2017) จึงถือเป็นแนวทางการลดต้นทุนในการกำจัดความชื้นและสามารถใช้ประโยชน์จากความชื้นภายในวัตถุดิบตั้งต้นได้อีกด้วย



รูปที่ 1.3 หลักการของกระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชัน (Zeng และคณะ, 2017)

การศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตพลังงานจากกระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชันเริ่มได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายท่าน อาทิเช่น Zeng และคณะ (2016) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากชีเลื่อยโดยผ่านกระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชัน โดยศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการ เช่น อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ไอน้ำ อัตราส่วนของไอน้ำต่อสารชีวมวล และอุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการ เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ซึ่งมีอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูง และ Zeng และคณะ (2017) ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ความชื้นในสารชีวมวลในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบเคมีคอลลูปิง นอกจากการศึกษาและพัฒนากระบวนการผ่านการทดลองแล้ว ยังมีการศึกษาโดยการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Liu และคณะ (2017) ได้ศึกษากระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชันโดยตรงเพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์จากถ่านหินโดยใช้แบบจำลองกระบวนการที่สภาวะคงตัว โดยได้ศึกษาตัวแปรกระบวนการที่มีผลต่อคุณภาพของก๊าซสังเคราะห์ ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอน (Carbon conversion) อุณหภูมิ ความดันและอัตราส่วนของไอน้ำที่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการ นอกจากนี้งานวิจัยของ Berguerand และคณะ (2012) ได้ศึกษากระบวนการเคมีคอลลูปิงรีฟอร์มมิงโดยใช้นิกเกิลออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนเพื่อกำจัดทาร์ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสารชีวมวล โดยตัวแปรกระบวนการที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณ

นิกเกิลออกไซด์และอุณหภูมิของกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนทาร์ให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานความร้อนในแง่ของค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์จากกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชัน โดยพิจารณาขยะมูลฝอยเป็นวัตถุดิบชีวมวลที่มีความชื้นสูงเป็นสารตั้งต้น ซึ่งแบบจำลองกระบวนการถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรมแอสเพน พลัส (Aspen Plus) ภายใต้พื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ที่สภาวะสมดุลและนำมาใช้ศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการ เช่น อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ เชื้อเพลิง อัตราส่วนของโลหะออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่ป้อน ปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนที่มีในของโลหะออกไซด์ที่ใช้ที่มีต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้ รวมถึงค่าความร้อนของกระบวนการโดยพิจารณาปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการร่วมด้วย นอกจากนี้ยังศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรกระบวนการในการผลิตก๊าซสังเคราะห์โดยให้ประสิทธิภาพของกระบวนการสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการผลิตพลังงานความร้อนในรูปของค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยซึ่งเป็นสารชีวมวลที่มีความชื้นสูง โดยใช้ตัวพาออกซิเจนคือนิกเกิลออกไซด์ (NiO) บนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ )

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 จำลองการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยที่มีความชื้นสูงผ่านกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแอสเพน พลัส ภายใต้พื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ที่สภาวะสมดุล

1.3.2 จำลองขั้นตอนไพโรไลซิสของขยะมูลฝอยที่มีความชื้นสูง โดยพิจารณาทาร์เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนไพโรไลซิส

1.3.3 วิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันและการเกิดทาร์ในกระบวนการ เช่น อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง อุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ อัตราส่วนของโลหะออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่ป้อน และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนที่มีในของโลหะออกไซด์ที่ใช้ที่มีต่อค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ องค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้และค่าพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชัน

1.3.4 วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันในเชิงความร้อนผ่านการพิจารณาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

1.3.5 ทาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมเพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ให้มีประสิทธิภาพในเชิงความร้อนมากที่สุดโดยใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการได้อย่างเพียงพอ

#### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากขยะมูลฝอยและตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ องค์ประกอบของก๊าซที่ผลิตได้ ค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ

1.4.2 ศึกษาการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากกระบวนการแบบเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันและตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ องค์ประกอบของก๊าซที่ผลิตได้ ค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ

1.4.3 ศึกษาหลักการเกิดทาร์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอยซึ่งเป็นสารชีวมวลที่มีความชื้นสูงและวิธีการจำลองขั้นตอนไพโรไลซิสในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

1.4.4 ออกแบบและจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้แบบจำลองขั้นตอนไพโรไลซิสที่มีทาร์เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ร่วมในกระบวนการโดยใช้โปรแกรมแอสเพนพลัส

1.4.5 ศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ พลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ของกระบวนการ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน

1.4.6 วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดโดยดำเนินการภายใต้การใช้พลังงานความร้อนที่เกิดในกระบวนการอย่างเพียงพอ

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ขยะมูลฝอย (Municipal waste)

ขยะ หรือ มูลฝอย หรือมูลฝอยชุมชน เป็นคำที่มีความหมายเดียวกัน โดยหมายถึง เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า เศษวัตถุ ถุงพลาสติก ภาชนะที่ใส่อาหาร เถ้า มูลสัตว์ ซากสัตว์หรือสิ่งอื่นใดที่เก็บกวาดจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์หรือที่อื่นรวมถึงขยะติดเชื้อ มูลฝอยที่เป็นพิษหรืออันตรายจากชุมชนหรือครว้เรือน ยกเว้นขยะที่มีลักษณะและคุณสมบัติที่กำหนดไว้ตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน

2.1.1 ประเภทของขยะมูลฝอย สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตรายได้จัดแบ่งประเภทของขยะมูลฝอยออกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1) ขยะย่อยสลาย (Compostable waste) หรือ มูลฝอยย่อยสลายคือ ขยะที่เน่าเสียและย่อยสลายได้เร็ว สามารถนำมาหมักทำปุ๋ยได้ เช่น เศษผัก เปลือกผลไม้ เศษอาหาร ใบไม้ เศษเนื้อสัตว์ เป็นต้นโดยที่ขยะย่อยสลายนี้เป็นขยะที่พบมากที่สุด คือ พบมากถึง 64 % ของปริมาณขยะทั้งหมดในกองขยะ

2) ขยะรีไซเคิล (Recyclable waste) หรือ มูลฝอยที่ยังใช้ได้ คือ ของเสียบรรจุภัณฑ์หรือวัสดุเหลือใช้ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ เช่น แก้ว กระดาษ เศษพลาสติก กล่องเครื่องดื่มแบบ UHT กระจกเครื่องดื่ม เศษโลหะ อะลูมิเนียม ยางรถยนต์ เป็นต้น สำหรับขยะรีไซเคิลนี้เป็นขยะที่พบมากเป็นอันดับที่สองในกองขยะ พบประมาณ 30 % ของปริมาณขยะทั้งหมดในกองขยะ

3) ขยะอันตราย (Hazardous waste) หรือ มูลฝอยอันตราย คือ ขยะที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนวัตถุอันตรายชนิดต่างๆ ซึ่งได้แก่ ถ่านไฟฉาย หลอดฟลูออเรสเซนต์ แบตเตอรี่ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ภาชนะบรรจุสารกำจัดศัตรูพืช กระจกสเปร์ยบรรจุสีหรือสารเคมี เป็นต้น ขยะอันตรายนี้เป็นขยะที่มักจะพบน้อยที่สุด กล่าวคือ พบประมาณเพียง 3% ของปริมาณขยะทั้งหมดในกองขยะ

4) ขยะทั่วไป (General waste) หรือ มูลฝอยทั่วไป คือ ขยะประเภทอื่นนอกเหนือจากขยะย่อยสลาย ขยะรีไซเคิล และขยะอันตราย มีลักษณะที่ย่อยสลายยากและไม่คุ้มค่าสำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เช่น ห่อพลาสติกใสขนม ถุงพลาสติกบรรจุผงซักฟอก พลาสติกห่อลูกอม ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ถุงพลาสติกเบื้อนเศษอาหาร โฟมเบื้อนอาหาร ฟิล์มเบื้อนอาหาร เป็นต้น สำหรับขยะทั่วไปนี้เป็นขยะที่พบประมาณ 3 % ของปริมาณขยะทั้งหมดในกองขยะ

2.1.2 ลักษณะและองค์ประกอบของขยะมูลฝอย สำหรับองค์ประกอบของขยะมูลฝอยจะมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งที่จัดเก็บขยะมูลฝอยด้วย แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของสัดส่วนขององค์ประกอบจะมีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นการนำขยะมูลฝอยมาเปลี่ยนให้เป็นพลังงานจำเป็นจะต้องรู้ถึงลักษณะองค์ประกอบทางเคมีของขยะมูลฝอยเพื่อใช้พิจารณาถึงการออกแบบหรือเลือกกระบวนการที่เหมาะสมในการแปรรูปขยะมูลฝอย นอกจากนี้ค่าองค์ประกอบทางเคมีสามารถบ่งบอกถึงความยากง่ายในการนำขยะมูลฝอยมาแปลงเป็นพลังงานได้อีกด้วย สำหรับค่าองค์ประกอบทางเคมีของขยะมูลฝอย ประกอบด้วย 3 ชนิด คือ

1) ค่าองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) คือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง องค์ประกอบเชื้อเพลิง ได้แก่ ความชื้น (Moisture) เป็นปริมาณน้ำที่มีในเชื้อเพลิง , สารระเหย (Volatile matter) เป็นส่วนประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ง่าย, คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) เป็นส่วนประกอบที่ให้ความร้อน ยังมีคาร์บอนมากก็ยิ่งให้ค่าความร้อนสูง และขี้เถ้า (Ash) เป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้

2) ค่าองค์ประกอบแบบละเอียด (Ultimate analysis) คือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุซึ่งประกอบด้วยธาตุหลัก 4 ชนิด คือ คาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และออกซิเจน (Oxygen) รวมทั้งธาตุอื่น ๆ ที่มีสัดส่วนน้อย เช่น กำมะถัน (Sulphur) และคลอรีน (Chlorine)

3) ค่าความร้อน (Heating value) คือค่าที่บอกปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนักซึ่งแสดงในรูปของค่าความร้อนต่ำ (Low Heating value: LHV) หรือค่าความร้อนสูง (High heating value: HHV) ซึ่งค่าความร้อนสูงเป็นค่าที่วัดได้โดย รวมความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกลั่นตัวของไอน้ำเข้าด้วย อย่างไรก็ตามค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะพิจารณาจากค่าความร้อนต่ำมาใช้ เนื่องจากไม่มีการกลั่นตัวของไอน้ำในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์

2.1.3 ศักยภาพของขยะมูลฝอยในการผลิตพลังงาน ในหลายประเทศทั่วโลกประสบกับปัญหาปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งในบางประเทศสามารถนำขยะมูลฝอยมาเปลี่ยนให้เป็นพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับประเทศไทยก็ประสบปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 2.1 แต่อย่างไรก็ตามจากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษในปี พ.ศ.2559 พบว่าการจัดการขยะมูลฝอยที่จัดเก็บมาได้กลับมีการจัดการที่ถูกต้องเพียงร้อยละ 20-35 เท่านั้น ดังนั้นจึงเหลือขยะมูลฝอยที่รอการจัดการมากกว่าครึ่งของที่เกิดขึ้นมา ด้วยเหตุนี้แนวคิดในการเปลี่ยนขยะให้เป็น

พลังงานจึงถูกนำมาใช้เพื่อช่วยจัดการขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในประเทศไทย โดยมีการจัดเก็บข้อมูลถึงศักยภาพในการผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยในประเทศไทยใน ปี พ.ศ. 2556 พบว่าปริมาณขยะที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตพลังงานคิดเป็นร้อยละ 50 ของปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) จึงสามารถกล่าวได้ว่าประเทศไทยมีแหล่งพลังงานทางเลือกที่สามารถผลิตพลังงานเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งทาง แนวคิดที่ใช้ขยะมูลฝอยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานจึงเหมาะเป็นทางเลือกที่ใช้จัดการขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นและเพิ่มปริมาณพลังงานที่ใช้ภายในประเทศได้อีกด้วย

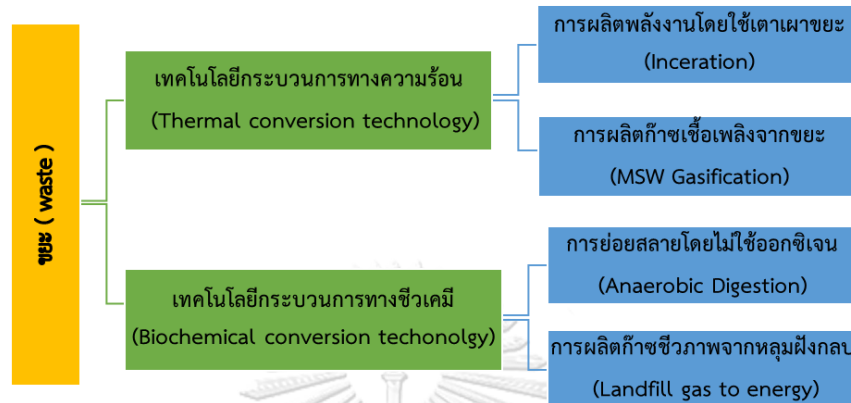
ตารางที่ 2.1 ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นและมีการกำจัดอย่างถูกต้องปี 2559-2551 (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

ปี พ.ศ.	ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น (ล้านตัน)	ปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกกำจัดอย่างถูกต้อง	
		(ล้านตัน)	(ร้อยละ)
2551	23.93	5.69	24
2552	24.11	5.97	25
2553	24.22	5.77	24
2554	25.35	5.64	22
2555	24.73	5.83	24
2556	26.77	7.27	27
2557	26.19	7.88	30
2558	26.85	8.34	31
2559	27.06	9.57	35

## 2.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process)

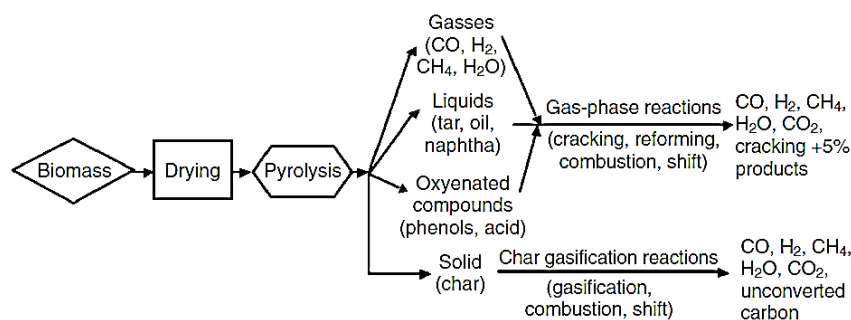
เทคโนโลยีที่เปลี่ยนขยะไปเป็นพลังงานในปัจจุบันที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งถูกใช้งานและมีการยอมรับอย่างแพร่หลายประกอบด้วย 2 เทคโนโลยีหลักแม้ว่าลักษณะของกระบวนการที่ใช้แต่ละเทคโนโลยีจะมีความแตกต่างกันแต่บางกระบวนการอาจให้ผลิตภัณฑ์ที่คล้ายกันดังรูปที่ 2.1 จากรูป แม้ว่าเทคโนโลยีการใช้เตาเผาสามารถแปรรูปขยะให้เป็นพลังงานได้ปริมาณมากโดยใช้ระยะเวลาสั้น แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกจากความร้อนแล้วยังให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยจึง

เป็นข้อเสียของเทคโนโลยีชนิดนี้ ในขณะที่เทคโนโลยีทางชีวเคมีสามารถแปรรูปขยะเป็นพลังงานได้แต่ต้องใช้พื้นที่มากกว่าและใช้เวลานานกว่าเทคโนโลยีทางความร้อน ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีทางความร้อนชนิดแก๊สซิฟิเคชันจึงเป็นทางเลือกที่ได้นำสนใจในการแปรรูปขยะให้เป็นพลังงาน



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีในการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบให้เป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการนี้จะเกิดที่อุณหภูมิช่วง 550–1000 °C ซึ่งสารตั้งต้นของปฏิกิริยานอกจากเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งแล้วในปฏิกิริยาต้องมีสารตั้งต้นร่วมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์เชื้อเพลิง ได้แก่ ก๊าซออกซิเจน อากาศ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือสารผสมของตัวออกซิไดซ์ดังกล่าว โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) ขั้นตอนการไพโรไลซิส (Thermal decomposition or Pyrolysis) ขั้นตอนการเกิดการเผาไหม้ (Combustion) ของก๊าซและถ่านชาร์และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากขั้นตอนการไพโรไลซิสดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Basu, 2010)

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันโดยในส่วนของขั้นตอนการอบแห้ง ขั้นตอนการไพโรไลซิส และปฏิกิริยาคูดความร้อน จำเป็นต้องได้รับพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยปฏิกิริยาเคมีสำคัญทั้งหมดที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันจะเป็นไปตามตารางที่ 2.2 ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้

ตารางที่ 2.2 ปฏิกิริยาหลักทั้งหมดที่เกิดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Basu, 2010)

ลำดับที่	ปฏิกิริยา	$\Delta H_{298}$ (กิโลจูล/โมล)
<b>ปฏิกิริยาของคาร์บอน (Carbon reaction)</b>		
2.1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	172
2.2 (water-gas or steam)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	131
2.3 (hydrogengasification)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74.8
2.4	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	-111
<b>ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reactions)</b>		
2.5	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
2.6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	-284
2.7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O$	-803
2.8	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	-242
<b>ปฏิกิริยาชิฟท์ (Shift Reaction)</b>		
2.9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41.2
<b>ปฏิกิริยาเมทานเนชัน (Methanation Reactions)</b>		
2.10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	-247
2.11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206
2.12	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	-165
<b>ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam-Reforming Reactions)</b>		



2.13	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	206
2.14	$\text{CH}_4 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	-36

1) ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) เป็นขั้นตอนการเริ่มต้นโดยเชื้อเพลิงจะต้องถูกปรับร้อยละ ความชื้นให้เหมาะสมก่อนเข้าขั้นตอนการไพโรไลซิสซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนนี้อยู่ในช่วง 100-200 °C เพื่อให้ค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 5 โดยมวล ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ขั้นตอนต่อไปเกิดได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

2) ขั้นตอนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นขั้นตอนการสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มี โมเลกุลขนาดใหญ่ให้กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงซึ่งเป็นขั้นตอนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น แต่ อย่งไรก็ตามสิ่งสำคัญในขั้นตอนนี้คือการเกิดทาร์ มีลักษณะเหนียวซึ่งในภาคอุตสาหกรรมถือเป็น ปัญหาที่ไม่ต้องการให้เกิดหรือเกิดให้น้อยที่สุดในกระบวนการ

3) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของถ่านชาร์ (Char gasification reaction) เป็น ขั้นตอนที่ต่อจากขั้นตอนการไพโรไลซิสโดยเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีของถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการ ไพโรไลซิสกับตัวออกซิไดซ์ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์ดังสมการต่อไปนี้



อย่างไรก็ตามจากสมการเกิดปฏิกิริยาข้างต้น (2.14) – (2.15) พบว่าการทำปฏิกิริยาของตัว ออกซิไดซ์ก๊าซออกซิเจน ไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับคาร์บอนที่เป็นของแข็งจะได้ก๊าซที่มี มวลโมเลกุลต่ำเช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซึ่งมีชื่อเรียกตามตารางที่ 2.15 โดยส่วน ใหญ่ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) แต่บางปฏิกิริยาเป็น ปฏิกิริยาแบบคายความร้อน อาทิเช่น ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซไฮโดรเจน ในปฏิกิริยาสมการที่ 2.3 ถึง 2.5 ดังตารางที่ 2.2 แต่ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่เป็นปฏิกิริยาดูดความ ร้อน ได้แก่ปฏิกิริยาสมการที่ 2.1 และ 2.2

#### 4) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านชาร์ (Char combustion reaction)

เนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจึงมีความจำเป็นที่ต้องป้อนพลังงานความร้อนให้กับกระบวนการโดยพลังงานความร้อนดังกล่าวจะมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ 2.4 และ 2.5 ในตารางที่ 2.2 แต่ปฏิกิริยา 2.4 จะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยา 2.5 พิจารณาได้จากสมการที่รวมระหว่างปฏิกิริยา 2.4 และ 2.5 ดังต่อไปนี้



ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  อยู่ในช่วงระหว่าง 1 และ 2 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งเป็นไปตามการคำนวณดังนี้ (Arthur, 1951)

$$\alpha = \frac{[CO]}{[CO_2]} = 2400e^{\frac{-6234}{T}} \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.19) จะพบว่าที่อุณหภูมิสูงการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งก๊าซที่เกิดที่อุณหภูมิสูงมักจะมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนั้นการปรับสัดส่วนของก๊าซที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจึงสามารถพิจารณาได้จากการปรับตัวแปรกระบวนการ อาทิเช่น อุณหภูมิของกระบวนการ สารที่ใช้ออกซิไดซ์เชื้อเพลิง หรือความชื้นของเชื้อเพลิง เป็นต้น

#### 2.3 การเกิดทาร์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Tar formation)

จากที่กล่าวมาแล้วในขั้นตอนการไพโรไลซิสของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันว่าในขั้นตอนดังกล่าวมักเกิดทาร์เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงความหมายและลักษณะของทาร์ที่เกิดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

ทาร์ (Tar) หรือน้ำมันดิน หมายถึงสารผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สามารถควบแน่นได้ซึ่งมักประกอบด้วยสารจำพวกวงแหวนอะโรมาติกตั้งแต่ 1 วง ไปจนถึง 5 วงซึ่งเป็นสารพวกออกซิเจนเตต (oxygenated compound) มักเรียกว่า โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน หรือ พีเอเอช (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs) อย่างไรก็ตามมีการบัญญัติถึงสารที่จะถูกพิจารณาว่าเป็นทาร์โดยองค์กร International Energy Agency (IEA) ว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนใดก็ตามที่มีมวลโมเลกุลมากกว่าเบนซีน (Benzene: C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) ให้พิจารณาเป็นทาร์ทั้งหมด (Maniatis และ Beenackers, 2000)

**องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะของทาร์ (Chemical composition and classification of tar)** องค์ประกอบของทาร์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยมากมายเช่น อุณหภูมิของปฏิกิริยา ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ และวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งชนิดขององค์ประกอบหลักของทาร์แสดงดังรูปที่ 2.3



**รูปที่ 2.3** องค์ประกอบทางเคมีของทาร์ที่ได้จากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล (Milne และคณะ, 1998)

อย่างไรก็ตาม Milne และคณะ (1998) ได้จำแนกทาร์ออกเป็น 4 ประเภทคือ สารประกอบทาร์ขั้นปฐมภูมิ (Primary tar) ซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ของสารชีวมวลประกอบด้วย กรด น้ำตาล แอลกอฮอล์ คีโตน อัลดีไฮด์ ฟีนอล พิวแรน และออกซีเบนซีน ต่อมาคือสารประกอบทาร์ขั้นทุติยภูมิ (Secondary tar) ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงโครงสร้างใหม่เมื่ออุณหภูมิสูงมากกว่า 500 °C โดยจะมีมวลโมเลกุลใหญ่ขึ้นเช่น ฟีนอลหรือโอเลฟิน สำหรับทาร์ขั้นทุติยภูมิจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือพวกอัลคิลและพวก PAHs

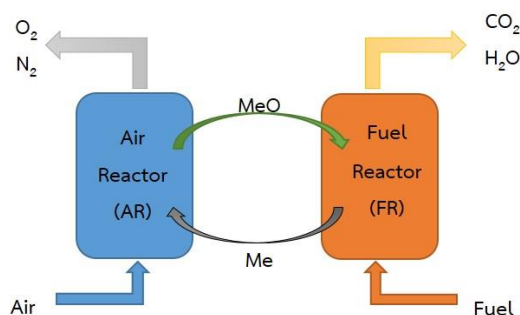
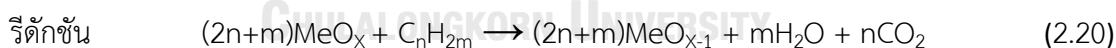
สำหรับกระบวนการกำจัดทาร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ กระบวนการทางกายภาพ (Physical methods) กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic methods) และกระบวนการที่ใช้ความร้อนบำบัด (Thermal treatment) อย่างไรก็ตามในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้ความร้อนในการสลายทาร์ที่เกิดขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกนิกเกิล โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก โลหะอัลคาไลน์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด และตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

## 2.4 กระบวนการเคมีคอลลูปปิง (Chemical looping process)

กระบวนการเคมีคอลลูปปิงเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงกับตัวพาออกซิเจน (Oxygen carrier) แทนการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงกับก๊าซออกซิเจนในอากาศโดยตรง ซึ่งกระบวนการนี้มีจุดเด่นคือก๊าซออกซิเจนไม่ถูกเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจนในอากาศจึงลดต้นทุนจากการใช้หน่วยแยกก๊าซ โดยทั่วไปกระบวนการเคมีคอลลูปปิงมีหลายประเภทอาทิเช่น กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical looping combustion), กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical looping reforming) และเคมีคอลลูปปิงแก๊สซิฟิเคชัน (Chemical looping gasification)

### 2.4.1 กระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical looping combustion)

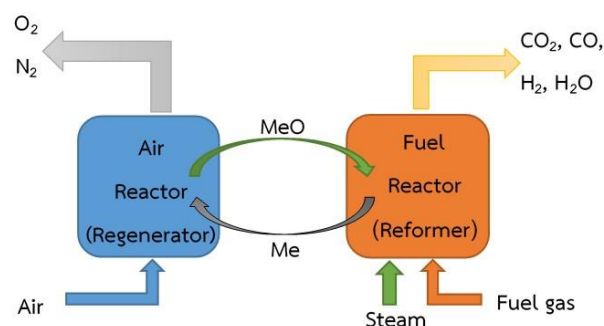
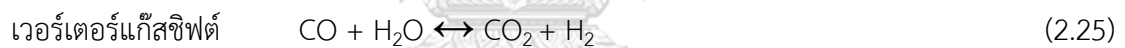
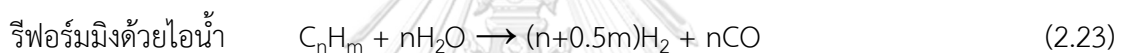
เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนามาจากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งเดิมเทคโนโลยีนี้ใช้เพื่อดักจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.4 หลักการของกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิงคือ การแบ่งเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ซึ่งมักใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด โดยการแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 จะอยู่ในรูปของตัวพาออกซิเจนซึ่งมักใช้เป็นสารจำพวกโลหะออกไซด์ (MeO) ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงตัวพาออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์จากโลหะออกไซด์ให้กลายเป็นโลหะส่วนเชื้อเพลิงจะถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำตามสมการที่ (2.20) ในส่วนเครื่องปฏิกรณ์อากาศโลหะที่มาจากเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศให้กลายเป็นโลหะออกไซด์อีกครั้งตามสมการที่ (2.21)



รูปที่ 2.4 หลักการเกิดกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (Marx และคณะ, 2011)

#### 2.4.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงแบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical looping reforming)

เป็นกระบวนการที่ลักษณะคล้ายกระบวนการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง แต่ต่างตรงที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและตัวพาออกซิเจนดังรูปที่ 2.5 ซึ่งพบว่าในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนเพื่อเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงให้กลายเป็นก๊าซสังเคราะห์ด้วยโลหะออกไซด์ตามสมการที่ (2.22) โดยในกระบวนการนี้จะควบคุมปริมาณโลหะออกไซด์เพื่อให้ปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการที่ (2.22) สำหรับการเพิ่มไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.23) และ (2.24) ตามลำดับ นอกจากนี้ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงยังเกิดปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water-gas shift reaction) ตามสมการที่ (2.25) ในส่วนของโลหะออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นโลหะจะถูกป้อนส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์อากาศเพื่อเปลี่ยนโลหะให้กลับเป็นโลหะออกไซด์ตามสมการที่ (2.26)



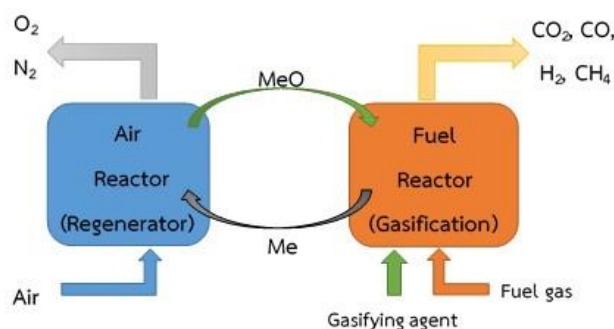
รูปที่ 2.5 หลักการเกิดกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบเคมีคอลลูปปิง (Pröll และคณะ, 2011)

#### 2.4.3 กระบวนการเคมีคอลลูปปิงแก๊สซิฟิเคชัน (Chemical looping gasification)

เป็นกระบวนการที่คล้ายเคมีคอลลูปปิงรีฟอร์มมิงเพียงแต่ใช้เชื้อเพลิงที่มีสถานะต่างกันโดยเคมีคอลลูปปิงแก๊สซิฟิเคชันเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็ง แต่เคมีคอลลูปปิงรีฟอร์มมิงเหมาะกับ

เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแก๊สซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเคมีคอลลูบปิ๊งแก๊สซิฟิเคชันคือแก๊สสังเคราะห์เป็นหลักดังรูปที่ 2.6 ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะเป็นไปตามปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบปกติเพียงแต่เปลี่ยนตัวออกซิไดซ์เชื้อเพลิงเป็นออกซิเจนที่มาจากตัวโลหะออกไซด์ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดคล้ายเคมีคอลลูบปิ๊งรีฟอร์มมิงตามสมการที่ (2.22)–(2.25) และในส่วนเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะเป็นส่วนเปลี่ยนโลหะให้กลับเป็นโลหะออกไซด์ดังสมการที่ (2.26)

จากหลักการของกระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งทั้ง 3 แบบพบว่าการใช้กระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งในการแปรรูปสารเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานจะได้พลังงานที่มีคุณภาพที่สูงกว่าพลังงานที่มาจากกระบวนการเผาไหม้หรือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเนื่องจากการไม่มีการเจือจางของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สที่ผลิตได้จึงทำให้ได้ค่าความร้อนของก๊าซที่สูงอีกทั้งยังลดต้นทุนในกระบวนการเนื่องจากไม่ต้องใช้หน่วยแยกก๊าซ



รูปที่ 2.6 หลักการเกิดกระบวนการเคมีคอลลูบปิ๊งแก๊สซิฟิเคชัน (Zeng และคณะ, 2017)

## 2.5 ค่าพลังงานอิสระกิบส์ต่ำที่สุด (Minimization Gibbs free energy)

การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคาดการณ์กระบวนการโดยใช้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมถึงการออกแบบกระบวนการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีหลากหลายวิธีโดยวิธีที่นิยมใช้ในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันคือแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ที่สภาวะสมดุล (Thermodynamic equilibrium model) ซึ่งเป็นการพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการโดยอาศัยค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant) หรือค่าพลังงานอิสระกิบส์ที่ต่ำที่สุด แม้ว่าแบบจำลองดังกล่าวไม่ขึ้นกับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน แต่สามารถใช้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อกระบวนการได้อย่างสะดวกซึ่งผู้ออกแบบวิธีการนี้ให้เหตุผลไว้ว่าเป็นการจำลองเป็นการคาดการณ์ถึงการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการที่มากที่สุดที่เป็นไปได้

ค่าพลังงานกิบ์บอิสระเป็นคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ซึ่งใช้ระบุสภาวะสมดุลได้ โดยค่าพลังงานอิสระกิบ์บขึ้นอยู่กับค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ค่าเอนโทรปี (Entropy) และอุณหภูมิ ตามสมการ (2.27)

$$G = H - TS \quad (2.27)$$

โดย G แทนพลังงานอิสระกิบ์บ, H แทนค่าเอนทัลปี, T แทนอุณหภูมิของระบบ, S แทนค่าเอนโทรปี

การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการภายใต้สภาวะคงที่สมดุลสามารถทำได้เมื่อค่าพลังงานอิสระกิบ์บต่ำสุด โดยการพิจารณาค่าพลังงานอิสระกิบ์บทั้งหมดของสารทั้งระบบ (สาร N ชนิด) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (15)

$$G' = \sum_{i=1}^N n_i G_i = \sum_{i=1}^N n_i \mu_i = \sum_{i=1}^N (n_i G_i^o + RT \ln \frac{f_i}{f_i^o}) \quad \text{ที่อุณหภูมิและความดันคงที่} \quad (2.28)$$

$$\frac{\Delta G_{fi}^o}{RT} = \frac{\Delta G_{f0i}^o - \Delta H_{f0i}^o}{RT_0} + \frac{\Delta H_{f0i}^o}{RT} + \frac{1}{T} \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_{Pi}^o}{R} dT - \frac{1}{T} \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_{Pi}^o}{R} \frac{dT}{T} \quad (2.29)$$

$$f_i = y_i \phi_i P \quad (2.30)$$

ค่า  $G_i^o$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับธาตุที่สภาวะมาตรฐาน ส่วนค่า  $G_i^o$  เท่ากับค่าพลังงานอิสระกิบ์บที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดสาร  $i$  ที่สภาวะมาตรฐาน ( $\Delta G_{fi}^o$ ) ซึ่งพิจารณาจากสมการที่ (2.27). สำหรับสารที่มีสภาวะเป็นแก๊ส  $f_i$  สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.30) และ  $f_i^o$  มีค่าเท่ากับค่ามาตรฐานที่สภาวะความดัน 1 บาร์ ในสมการที่ (2.30) ค่า  $y_i$  คือค่าสัดส่วนโมล (mole fraction) และค่า  $\phi_i$  คือค่าสัมประสิทธิ์ฟูกาซิตี (fugacity coefficient) ของสาร  $i$  ส่วนค่า  $T_0$  เป็นค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งอ้างอิงและค่า  $\Delta H_{f0i}^o$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการเกิดสาร  $i$  ที่สภาวะมาตรฐานสุดท้าย  $\Delta C_{Pi}^o$  คือค่าความจุความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของปฏิกิริยาในการเกิดสาร  $i$

จากที่กล่าวมาแล้วว่าหากกระบวนการจะเกิดขึ้นได้ค่าพลังงานอิสระกิบ์บจะต้องลดลงจนเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งค่าพลังงานอิสระกิบ์บทั้งหมดจะมีค่าต่ำสุด โดยการคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้เกิดค่าพลังงานอิสระกิบ์บที่ต่ำสุดสามารถคำนวณได้จากการแก้ปัญหาของสมการที่ (2.31)

$$\min_{n_i} (G')_{T,P} = \sum_{i=1}^N (n_i \Delta G_{fi}^o + RT \ln \frac{y_i \phi_i P}{P^o}) \quad (2.31)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^N a_{ji}n_i - b_j = 0$$

เมื่อ  $a_{ji}$  คือจำนวนอะตอมของธาตุ  $j$  ในสาร  $i$  ส่วน  $b_j$  คือจำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุ  $j$ , โดย  $n$  จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (2.32) ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์ของอะตอมของสาร โดยที่  $M$  คือจำนวนของธาตุทั้งหมด

$$\sum_{i=1}^N a_{ji}n_i = b_j \quad \text{for } 1 \leq j \leq N \quad (2.32)$$

จากปัญหาสมการทางคณิตศาสตร์ข้างต้นวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาในสมการที่ (2.31) คือวิธีการลากรางจ์มัลติพลายเออร์ (Lagrange multiplier method) อย่างไรก็ตามการใช้โปรแกรมจำลองสำเร็จรูปเช่น โปรแกรมเอสเพน พลัสเป็นเครื่องมือที่สามารถลดความซับซ้อนและยุ่งของการจำลองกระบวนการได้ เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการใช้ค่าทางอุณหพลศาสตร์ผ่านค่าพลังงานอิสระกิบส์ที่มีค่าต่ำที่สุดโดยการใช้แบบจำลอง RGibbs ที่มีอยู่ในโปรแกรม



### บทที่ 3

#### ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตจนถึงปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยด้านพลังงานทางเลือกได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อค้นหาพลังงานที่สะอาดและยั่งยืนทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้อยู่ ทั้งนี้มีเทคโนโลยีและกระบวนการใหม่ๆเกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงสาเหตุที่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้รับความนิยมเพื่อใช้เป็นกระบวนการในการแปรรูปขยะมูลฝอยให้กลายเป็นพลังงานทางเลือก ดังนั้นในบทนี้จะแสดงเนื้อหาการทบทวนงานวิจัยของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอย โดยพิจารณาปัญหาที่เกิดจากสารชีวมวลและขยะมูลฝอยที่มีความชื้นสูงพร้อมทั้งการเกิดทาร์ในกระบวนการ เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้กระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายท่านในปัจจุบัน

#### 3.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การศึกษาเกี่ยวกับการผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยและวัตถุดิบประเภทสารชีวมวลด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้รับความสนใจมานับทศวรรษจากนักวิจัยหลายท่านซึ่งจากการศึกษาได้พบปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้อยู่สองประการคือ ปัญหาจากความชื้นของวัตถุดิบและปัญหาจากทาร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ด้วยเหตุนี้จึงมีการค้นคว้าเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยวิธีการที่หลากหลายดังแสดงในงานวิจัยต่อไปนี้

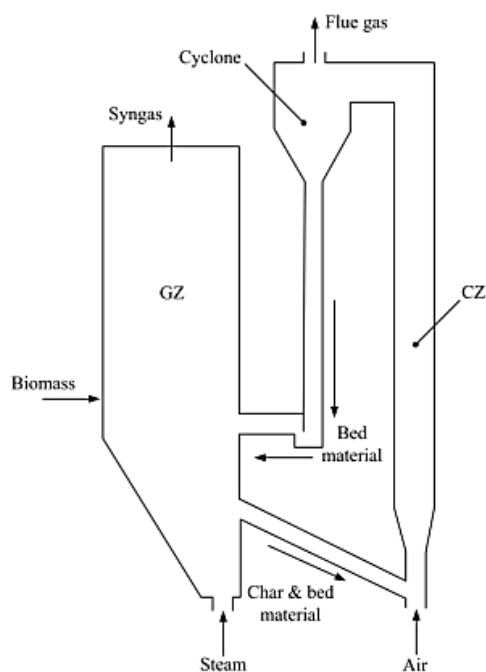
##### 3.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาจากความชื้นที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Wu และคณะ (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรกระบวนการที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบฟอง (Bubbling fluidized bed gasifier) โดยตัวแปรกระบวนการดังกล่าวได้แก่ อุณหภูมิของกระบวนการ อัตราการป้อนสารชีวมวลและปริมาณน้ำในสารชีวมวล โดยในการศึกษานี้ใช้แกลบเป็นวัตถุดิบ จากการศึกษาพบว่าค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของเบดลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาในการระเหยน้ำเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ด้วยเหตุนี้เมื่อความชื้นของวัตถุดิบสูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ผันผวนตามไปด้วย ดังนั้นกระบวนการที่ต้องใช้สารชีวมวลที่มีความชื้นสูงควรเพิ่มค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio: ER) เพื่อผลิตพลังงานความร้อนให้แก่กระบวนการ นอกจากการศึกษาผลจากความชื้นในสารชีวมวลชนิดเดียวในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแล้ว มีการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลที่ผสมกันด้วยการจำลองกระบวนการ โดย Ramzan และคณะ (2011) ได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะ 3 ชนิด คือ เศษอาหาร ขยะมูลฝอย และเศษซากสัตว์ปีก ซึ่งมี

องค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันผ่านการจำลองกระบวนการที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ฟิกส์เบด (Fixed bed gasifier) โดยใช้โปรแกรมเอสเพน พลัส ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ration: ER) ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ และปริมาณไอน้ำที่ป้อนในกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นด้วยในทางกลับกันค่าอัตราส่วนสมมูลที่เพิ่มขึ้นทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนลดลง แต่ก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณความชื้นเป็นตัวแปรกระบวนการสำคัญซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์และทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แย่งอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีผู้วิจัยที่สนใจศึกษาผลของค่าความชื้นของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อกระบวนการแก๊สซิเคชันและกระบวนการไพโรไลซิสโดยเฉพาะ โดย Dong และคณะ (2016) ได้ศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการและค่าความชื้นของขยะมูลฝอยในกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ ผลจากการศึกษาพบว่าค่าความชื้นของขยะมูลฝอยมีค่ามากส่งผลให้ก๊าซไฮโดรเจนเกิดมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์กลับมีค่าลดลงเนื่องจากประสิทธิภาพในการเปลี่ยนขยะมูลฝอยมีค่าลดลง นอกจากนี้ผู้วิจัยพบว่าค่าความชื้นที่เหมาะสมจะต้องมีค่าต่ำกว่า 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จากการศึกษาที่ขยะมูลฝอยจึงถือเป็นวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงควรได้รับการปรับค่าความชื้นก่อนนำเข้าสู่กระบวนการ จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าค่าความชื้นในสารวัตถุดิบส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแก๊สซิเคชันอย่างเห็นได้ชัด จากปัญหาดังกล่าวจึงนำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้กระบวนการแก๊สซิเคชันของสารชีวมวลที่มีค่าความชื้นสูงมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดย Kaewluan และ Pipatmanomai (2011) ได้ศึกษาผลของกระบวนการแก๊สซิเคชันของไม้ยางพาราสับที่มีความชื้นสูงผสมกับไม้ยางพาราที่ถูกหั่นและการอบแห้งแล้วผ่านเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ ขนาด 100 กิโลวัตต์-เทอร์มอล เนื่องจากผู้วิจัยต้องการแก้ปัญหาเกี่ยวกับปริมาณน้ำที่มีในเชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อกระบวนการแม้การเพิ่มขึ้นตอนการตากแห้งแบบธรรมชาติหรือการอบแห้งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ในระดับโรงงานที่มีขนาดใหญ่ค่อนข้างมีข้อจำกัดและเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงพัฒนากระบวนการโดยผสมไม้ยางพาราที่อบแห้งแล้วเข้ากับไม้ยางพาราที่มีความชื้นสูงซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนสมมูลและปริมาณไม้ยางพาราที่อบแห้งแล้วผ่านกระบวนการแก๊สซิเคชันจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพกว่าการใช้วัตถุดิบเป็นไม้ยางพาราสับที่มีความชื้นสูงเพียงอย่างเดียวและให้ประสิทธิภาพที่ดีใกล้เคียงกับการใช้วัตถุดิบที่เป็นไม้ยางพาราที่มีความชื้นต่ำ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้

เป็นเพียงการปรับปรุงค่าความชื้นของวัตถุดิบเท่านั้น นอกจากนี้มีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง โดยปรับปรุงเงื่อนไขในกระบวนการด้วยการเพิ่มไอน้ำเป็นสารออกซิไดซ์เข้าสู่กระบวนการเพื่อเพิ่มปริมาณการเกิดก๊าซไฮโดรเจน โดยคาดหวังว่าจะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการได้ ซึ่ง Wang และคณะ (2012) ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากขยะมูลฝอยด้วยการใช้ไอน้ำเป็นสารออกซิไดซ์เพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ นิกเกิลออกไซด์ จากการงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าขยะมูลฝอยจะเป็นของเสียที่มีความชื้นสูงแต่ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์และค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ลดลง แต่เนื่องจากปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่สูงจึงเหมาะแก่การนำมาเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนโดยผู้วิจัยได้พัฒนากระบวนการโดยใช้ไอน้ำป้อนเข้าสู่กระบวนการเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องการประเมินผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ที่ช่วยในการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการเปลี่ยนขยะมูลฝอยให้เป็นพลังงาน จากการศึกษาทำให้มีผู้วิจัยสนใจนำขยะมูลฝอยมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันผ่านการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมเอสเพน พลัส โดย Niu และคณะ (2013) ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองผ่านการจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรมเอสเพน พลัสซึ่งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถูกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนไพโรไลซิส ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) โดยในงานวิจัยนี้มีความน่าสนใจที่ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของตัวออกซิไดซ์ 2 ชนิดคือ ไอน้ำและอากาศ ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรกระบวนการที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ จากผลการศึกษาพบว่าอากาศที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมากขึ้น (ตั้งแต่ 21 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยโมล) ส่งผลต่อค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการความเข้มข้นของก๊าซที่เผาไหม้ได้เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมีผลเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสูงกว่า 900 °C และไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ช่วยเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $H_2/CO$  ratio) ให้เพิ่มขึ้นได้และสามารถทำให้ประสิทธิภาพของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นแม้ใช้ร่วมกับอากาศที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำ แม้ว่าข้อมูลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถบ่งบอกว่าขยะมีศักยภาพในการแปรรูปเป็นพลังงานได้ แต่ประสิทธิภาพของกระบวนการจะลดลงเสมอเมื่อค่าความชื้นในขยะมูลฝอยมีค่าสูงขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพตกลงแม้ว่าค่าความร้อนของก๊าซ

สังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการที่มีการใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์วัตถุดิบเพื่อเพิ่มการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ร่วมกับการใช้อากาศที่เพิ่มความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม



รูปที่ 3.1 รูปแบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่ (Doherty และคณะ, (2013))

จากการการศึกษาดังกล่าวจึงทำให้มีผู้สนใจเกี่ยวกับการใช้ไอน้ำเป็นสารออกซิไดซ์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการดูดความร้อนสูงดังนั้นเพื่อลดภาระจากความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นของกระบวนการจึงมีผู้วิจัยประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่ (Dual fluidized bed gasifier) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวสามารถผลิตความร้อนได้ในกระบวนการ โดย Doherty และคณะ (2013) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้สารชีวมวลเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานโดยใช้ไอน้ำเป็นสารออกซิไดซ์ผ่านการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมเอสเพน พลัสซึ่งจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่เนื่องจากการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด 2 เครื่องโดยเครื่องแรกเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification zone: GZ) ส่วนอีกเครื่องเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านชาร์ (Combustion zone: CZ) ที่ถูกแบ่งเพื่อใช้ผลิตความร้อนให้แก่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันดังรูปที่ 3.1 จากการศึกษพบว่าปัญหาที่

เกิดจากความชื้นของสารชีวมวลที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ลดลง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่สามารถทำให้ค่าความร้อนมีค่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความชื้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของกระบวนการยังคงลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเกิดจากการเผาไหม้ถ่านชาร์จึงทำให้ถ่านชาร์ที่เป็นสารตั้งต้นหลักในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันลดลงเพื่อแบ่งไปเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์ที่เผาไหม้ถ่านชาร์ ด้วยเหตุนี้แม้เครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวจะสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้แต่ต้องแลกมากับการแบ่งสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซสังเคราะห์จึงทำให้ประสิทธิภาพยังคงลดลงเมื่อความชื้นของสารชีวมวลเพิ่มขึ้น ต่อมาผู้วิจัยสนใจศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่ เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้แม้จะมีการปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้ค่าความร้อนของก๊าซที่ได้เพิ่มสูงขึ้น เช่น การใช้ไอน้ำร่วมกับอากาศ แต่การใช้อากาศที่มีการปรับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนให้มีความเข้มข้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้ยังคงถูกจำกัดเนื่องด้วยอากาศที่ป้อนเข้ากระบวนการมีความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนสูงมาก ดังนั้นจึงทำให้ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้มีคุณภาพต่ำแต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นตัวออกซิไดซ์ยังคงไม่เหมาะสมเนื่องจากมีราคาแพงทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่เพื่อให้ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นเนื่องจากตัวออกซิไดซ์ไม่ถูกเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจน โดย Fernandez-Lopez และคณะ (2017) ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเสียที่ได้จากสัตว์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่ผ่านการจำลองโดยใช้โปรแกรมเอสเพน พลัส ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาตัวออกซิไดซ์ 2 ชนิดคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ผลจากการศึกษาพบว่าหากใช้ตัวออกซิไดซ์เป็นไอน้ำจะส่งผลให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ในขณะที่หากใช้ตัวออกซิไดซ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนของตัวออกซิไดซ์ต่อสารชีวมวล (Gasifying agent/Biomass ratio) จะส่งผลในเชิงลบต่อการเกิดก๊าซมีเทนซึ่งทำให้ค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ลดลง

จากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นเพียงการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาจากความชื้นในสารชีวมวลและการปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้ได้ค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นหรือการใช้กระบวนการที่สามารถผลิตพลังงานความร้อนใช้ในกระบวนการเพื่อให้พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเพียงพอเมื่อความชื้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามปัญหาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันยังมีเรื่องของทาร์ที่เกิดใน

กระบวนการดังที่กล่าวมาแล้ว โดยการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาของทาร์ที่เกิดและการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นจะแสดงในหัวข้อถัดไป

### 3.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาจากการเกิดทาร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การเกิดทาร์ระหว่างกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลถือเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ของกระบวนการนี้ซึ่งมีการศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวมานานหลายทศวรรษ อันเนื่องมาจากทาร์ที่เกิดขึ้นนอกจากจะส่งผลเสียแก่เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแล้วยังส่งผลถึงเครื่องยนต์หรืออุปกรณ์ปลายทางที่ใช้กับก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากการกระบวนการอีกด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาการเกิดทาร์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและงานวิจัยที่คิดค้นการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดปัญหาจากการเกิดทาร์

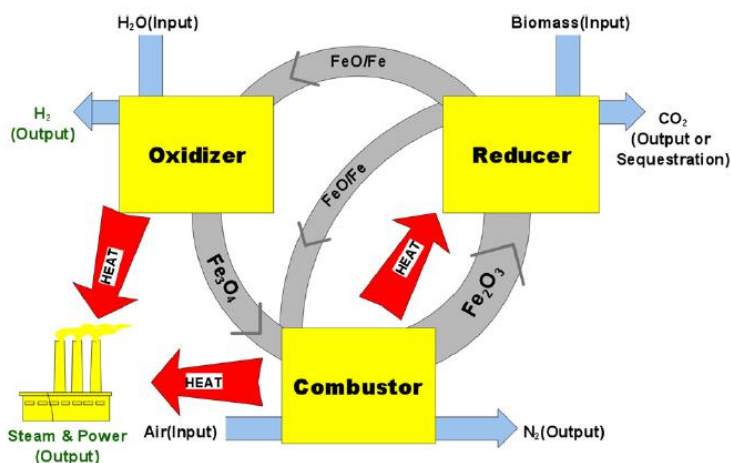
Kinoshita และคณะ (1994) ได้ศึกษาตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลให้เกิดทาร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิฟิเคชัน โดยตัวแปรกระบวนการที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนสมมูล และเวลาใช้ในกระบวนการ จากการศึกษาพบว่าทาร์ที่เกิดในกระบวนการเป็นสารประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเดี่ยว เช่น เบนซีน (Benzene) จนถึงพวกที่มี 5 วงแหวน เช่น เพริลีน (Perylene) เป็นองค์ประกอบในทาร์ที่เกิดประมาณ 70 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จากผลดังกล่าวทำให้ทราบถึงองค์ประกอบของทาร์ที่เกิดขึ้น ต่อมาได้มีผู้วิจัยต้องการศึกษาทาร์ที่เกิดเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงจลนศาสตร์ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำนายพฤติกรรมของทาร์ที่เกิดจากตัวแปรกระบวนการต่างๆของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดย Fagbemi และคณะ (2001) ได้ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสารชีวมวลเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงจลนศาสตร์ของการสลายทาร์ที่เกิดขึ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิที่ 400 ถึง 900 °C ผลจากการศึกษาทำให้สามารถสร้างสมการแบบจำลองเชิงจลนศาสตร์ได้ โดยแบบจำลองดังกล่าวสามารถบอกถึงปริมาณทาร์ที่เกิดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของไม้รวมถึงคำนวณค่าความร้อนได้อีกด้วย จากการศึกษาดังกล่าวทำให้มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาการสลายทาร์โดยพิจารณาผลของตัวแปรกระบวนการที่มีต่อการสลายทาร์ โดยในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้ความร้อนในการสลายทาร์ที่เกิดขึ้น โดยในงานวิจัยของ Huang และคณะ (2016) ได้ศึกษาการสลายทาร์ที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอยด้วยตัวเร่งที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมหลายชนิด จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ (NiO) บนตัวรองรับแกรมมาอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในกระบวนการไพโรไลซิสทาร์ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 750 ถึง 850 °C แต่อย่างไรก็ตามการสลายทาร์จะก่อให้เกิดผงไค้กัซซึ่งส่งผลให้เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้

การศึกษาทาร์ในการทดลองแล้ว การสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อศึกษาพฤติกรรมกระบวนการก็ยังพิจารณาการสร้างแบบจำลองการเกิดทาร์ร่วมในกระบวนการด้วยเพื่อให้แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีความใกล้เคียงกระบวนการจริงมากขึ้น โดย Adnan และคณะ (2017) ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันผ่านแบบจำลองกระบวนการที่มีการจำลองการเกิดทาร์ในขั้นตอนการไพโรไลซิสร่วมด้วย โดยแบบจำลองดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงปริมาณทาร์ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองยังมีความแม่นยำสูง โดยมีค่าความผิดพลาดเพียง 4 ถึง 11 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ด้วยเหตุนี้การสร้างแบบจำลองดังกล่าวจึงได้รับความสนใจโดย Adnan และ Hossain (2018) ได้สร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลจำพวกสาหร่ายที่มีการจำลองการเกิดทาร์ร่วมในกระบวนการด้วยเพื่อศึกษาตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อสมรรถนะของกระบวนการซึ่งได้แก่ ปริมาณของตัวออกซิไดซ์ 2 ชนิดที่ความดันแตกต่างกัน ผลจากการศึกษาพบว่าการเพิ่มความดันส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลงทั้งเชิงค่าองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ ค่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Cold gas efficiency: CGE) และประสิทธิภาพของพลังงานของระบบด้วย

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่าแม้ผู้วิจัยหลายท่านจะทำการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อให้ได้ก๊าซสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนที่สูงขึ้นหรือประสิทธิภาพของกระบวนการสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการข้างต้นมีข้อจำกัดที่เหมือนกันคือ ความชื้นในวัตถุดิบตั้งต้นต้องมีค่าต่ำเพื่อให้ค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์มีค่าสูงขึ้น แม้ว่าจะมีการใช้ตัวออกซิไดซ์เป็นไอน้ำก็ตาม แต่ก็ยังพบข้อจำกัดในเรื่องพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการเพื่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งต้องใช้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่สูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนอีกทั้งความร้อนที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาการไพโรไลซิสที่ต้องใช้พลังงานความร้อนมากขึ้น ดังนั้นการใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่มีความชื้นสูงจึงทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานเพื่อป้อนให้กระบวนการมากกว่าความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการ นอกจากนี้ปัญหาความชื้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลงแล้ว การที่ความชื้นมาส่งผลให้ความร้อนที่ใช้ในการกลั่นสลายไม่เพียงพอก่อให้เกิดทาร์มากขึ้น จึงนำไปสู่การพิจารณาทาร์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมด้วย ด้วยเหตุนี้การศึกษาที่ผ่านมาจึงนำไปสู่แนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยประยุกต์จากรูปแบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แก๊สซิไฟเออร์แบบคู่เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น กระบวนการที่ถูกประยุกต์ใช้เรียกว่ากระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน

### 3.2 กระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน

จากการศึกษาการแก้ปัญหาที่กล่าวมาแล้วนำไปสู่การประยุกต์ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับกระบวนการเคมีคอลลูบปีงโดยผ่านรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์แบบคู่ซึ่งเรียกว่ากระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน สำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันได้รับความสนใจในการนำมาใช้ผลิตพลังงานจากสารชีวมวลเมื่อไม่นานถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะมีการคิดค้นขึ้นมานานแล้ว โดย Li และคณะ. (2010) ได้ศึกษากระบวนการเคมีคอลลูบปีงโดยป้อนสารชีวมวลที่เป็นของแข็งเข้าสู่กระบวนการโดยตรงเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าโดยการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมเอสเพน พลัสซึ่งต่างจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ร่วมกับกระบวนการเคมีคอลลูบปีงคือกระบวนการแบบนี้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันก่อนจากนั้นจะได้ก๊าซสังเคราะห์ซึ่งก๊าซที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการเคมีคอลลูบปีงต่อไป โดยโลหะออกไซด์ที่ออกจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เป็นก๊าซไฮโดรเจน จากนั้นโลหะออกไซด์จึงจะไปทำปฏิกิริยากับก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจนเกิดเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับโลหะออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการคือไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ดังรูปที่ 3.2 ผลจากการศึกษาพบว่ากระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารชีวมวลได้ดีกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

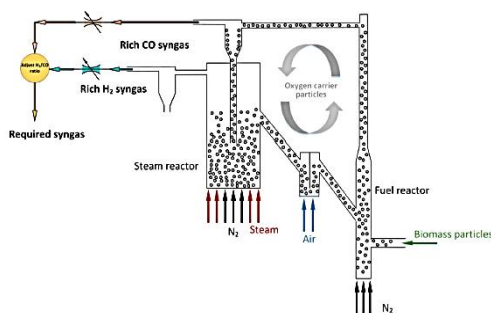


รูปที่ 3.2 รูปแบบการไหลของวัสดุและพลังงานของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน (Li และคณะ, 2010)

นอกจากการศึกษาดังกล่าวแล้วทำให้มีผู้วิจัยสนใจนำกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันมาศึกษาการผลิตพลังงานจากถ่านหินด้วยกระบวนการดังกล่าวอีกด้วย โดย Zeng และคณะ



(2012) ได้ออกแบบและจำลองการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากถ่านหินผ่านกระบวนการเคมีคอลูปปิงแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้โลหะออกไซด์คือ ไอรอนออกไซด์ โดยกระบวนการดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแยกก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการจำลองกระบวนการโดยที่เชื้อเพลิงที่อยู่ฝั่งรีดักชันจะทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในส่วนของไอน้ำฝั่งออกซิเดชันจะทำปฏิกิริยากับโลหะได้โลหะออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ผลจากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการนี้สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 30 เปอร์เซ็นต์ จากการนำกระบวนการเคมีคอลูปปิงแก๊สซิฟิเคชันไปใช้ในการผลิตพลังงานจากสารชีวมวลซึ่งให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจึงทำให้กระบวนการได้รับความสนใจในการศึกษาเพิ่มมากขึ้น โดยมีการปรับปรุงเงื่อนไขในการดำเนินการเพื่อให้กระบวนการมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมักให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มากกว่าให้ก๊าซไฮโดรเจนอันเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่ได้จากตัวพาออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารชีวมวลจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ด้วยเหตุนี้ Zeng และคณะ (2016) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซสังเคราะห์ซึ่งมีอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนออกไซด์สูงจากกระบวนการเคมีคอลูปปิงแก๊สซิฟิเคชันของซีลีเยนในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันฟลูอิดไดซ์เบดแบบคู่ โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยแบ่งเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดให้ทำหน้าที่ต่างกัันดังนี้ เครื่องแรกเป็นเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel reactor) เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของซีลีเยนซึ่งจะได้ก๊าซสังเคราะห์ที่มีก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงและเครื่องปฏิกรณ์ที่เหลือเป็นเครื่องปฏิกรณ์ไอน้ำ (Steam reactor) เป็นบริเวณที่เกิดก๊าซไฮโดรเจนจากการทำปฏิกิริยาของโลหะและไอน้ำดังรูปที่ 3.3 ผลจากการศึกษานี้พบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำและสะดวกกว่าการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 3.3 กระบวนการเคมีคอลูปปิงแก๊สซิฟิเคชันของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแก๊สซิฟิเคชันแบบคู่ (Zhang และคณะ, (2016))

ต่อมาผู้วิจัย Zeng และคณะ (2017) ได้พัฒนากระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันโดยศึกษาการใช้ความชื้นจากสารชีวมวลเป็นตัวออกซิไดซ์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงของกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้สารชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการอบแห้งเปรียบเทียบกับสารชีวมวลที่ผ่านการอบแห้งมาแล้วและกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลที่ใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ ผลจากการศึกษาพบว่าการใช้ความชื้นเป็นตัวออกซิไดซ์แทนการใช้ไอน้ำทำให้ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้มีอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนออกไซด์มากกว่าเนื่องจากการแพร่ของน้ำจากโมเลกุลของสารเชื้อเพลิงมีทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันได้ดีกว่าน้ำที่อยู่ภายนอกโมเลกุลเชื้อเพลิง จึงทำให้ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันโดยความชื้นภายในสารชีวมวลเกิดได้ดีกว่าไอน้ำ นอกจากนี้จากการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการเคมีคอลลูบปิงกับสารชีวมวลทั้งที่มีความชื้นและผ่านการอบแห้งมาแล้ว มีผู้วิจัยที่สนใจการศึกษากระบวนการดังกล่าวโดยพิจารณาทาร์ที่เกิดในกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชัน โดย Tian และคณะ (2018) ได้ศึกษากระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลซึ่งพิจารณาทาร์ที่เกิดในกระบวนการพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราส่วนของไอน้ำต่อสารชีวมวล และอัตราส่วนของออกซิเจนต่อสารชีวมวลจะทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลใหญ่ในทาร์มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง นอกจากนี้ตัวพวออกซิเจนสามารถช่วยสลายทาร์ทั้งที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และเล็กได้ส่งผลให้ทาร์ที่เกิดในกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันมีปริมาณลดลง จากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนำไปสู่ความน่าสนใจการศึกษาการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากสารชีวมวลด้วยกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันซึ่งสามารถใช้แบบจำลองกระบวนการในการศึกษาได้ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองของกระบวนการควรพิจารณาการเกิดทาร์ในกระบวนการด้วยเพื่อให้ผลการศึกษาที่ได้มีความใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากยิ่งขึ้น

## บทที่ 4

### การจำลองกระบวนการ

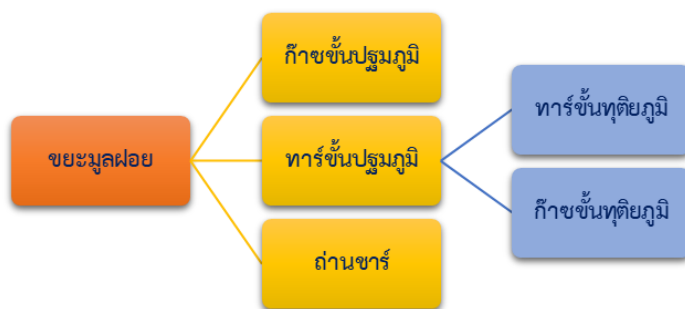
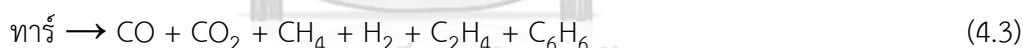
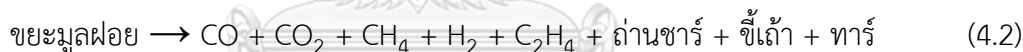
การศึกษาการเปลี่ยนขยะมูลฝอยให้เป็นก๊าซสังเคราะห์ซึ่งให้พลังงานความร้อนและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยใช้กระบวนการทางเคมีความร้อน แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทางเคมีความร้อนมักประสบปัญหาจากวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงเนื่องจากต้องใช้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิพีเคชันสามารถจัดการผลิตพลังงานความร้อนได้เองภายในกระบวนการดังนั้นจึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง โดยการศึกษากระบวนการดังกล่าวจะดำเนินการผ่านแบบจำลองกระบวนการที่ถูกสร้างขึ้นซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการเชิงอุณหพลศาสตร์ด้วยโปรแกรมเอสเพนพลัส สำหรับแบบจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิพีเคชัน

สำหรับกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิพีเคชันจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการไพโรไลซิส ขั้นตอนแก๊สซิพีเคชัน และขั้นตอนเคมีคอลลูบปีง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิพีเคชันจึงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

#### 4.1 การจำลองการขั้นตอนการไพโรไลซิส

จากที่กล่าวมาแล้วถึงการเกิดทาร์ในกระบวนการอันเนื่องมาจากขยะมูลฝอยเป็นสารวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง โดยทาร์ที่เกิดขึ้นจะเกิดในขั้นตอนการไพโรไลซิสซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ ไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิ (Primary pyrolysis) และไพโรไลซิสขั้นทุติยภูมิ (Secondary pyrolysis) สำหรับทาร์ซึ่งเป็นสารผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดจะเกิดการสลายที่อุณหภูมิแตกต่างกันซึ่งขยะมูลฝอยจะสลายให้ทาร์บางส่วนและผลิตภัณฑ์อื่นในขั้นปฐมภูมิที่อุณหภูมิ 500 °C จากนั้นทาร์ที่เกิดในขั้นปฐมภูมิจะสลายตัวในขั้นทุติยภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นได้ทาร์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กและผลิตภัณฑ์อื่นร่วมด้วยดังรูปที่ 4.1 ด้วยเหตุนี้เพื่อให้แบบจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิพีเคชันมีสถานะใกล้เคียงกระบวนการจริงจึงแบ่งการแบบจำลองไพโรไลซิสเป็น 2 ชั้น อย่างไรก็ตามการมีรายงานการผลิตทาร์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสของขยะมูลฝอย โดย Zhang และคณะ (2012) ได้รายงานการไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิของขยะมูลฝอยซึ่งมีองค์ประกอบดังตารางที่ 4.1 ซึ่งได้ผลิตทาร์ในขั้นปฐมภูมิดังแสดงในตารางที่ 4.2 สำหรับการศึกษาของ Zhang และคณะ (2012) ได้พิจารณาขยะมูลฝอยเป็น 2 กลุ่มหลักคือ ขยะกลุ่มเซลลูโลส (Cellulosic species) ได้แก่ ไม้ เศษกระดาษ ฟืช

กล่องกระดาษ เป็นต้นและขยะกลุ่มพลาสติก (Plastic species) ได้แก่ PE PP PVC และยางรถยนต์ เป็นต้น สำหรับขยะกลุ่มเซลลูโลสจะเกิดการไพโรไลซิสทั้ง 2 ชั้น โดยผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิแสดงในตารางที่ 4.3 แต่สำหรับขยะกลุ่มพลาสติกไม่มีการรายงานเกี่ยวกับการสลายทาร์ขั้นปฐมภูมิ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษา Williams และคณะ (1997) พบว่าการผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสของพลาสติกจะประกอบด้วยก๊าซ ของเหลว และชาร์ จากข้อมูลเบื้องต้นที่กล่าวมาจึงนำไปสู่การสร้างแบบจำลองขั้นตอนไพโรไลซิสของขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบดังตารางที่ 4.1 แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลดังกล่าวไม่ได้รายงานถึงปริมาณของขยะทั้ง 2 กลุ่มที่มีในขยะมูลฝอยจึงทำให้ไม่สามารถจำลองปริมาณและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองของขั้นตอนไพโรไลซิสได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องคำนวณหาปริมาณขยะทั้ง 2 กลุ่มในขยะมูลฝอยจากสมการสมดุลมวล (Mass balance) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากขั้นตอนการไพโรไลซิสทั้ง 2 ชั้นและใช้สำหรับคำนวณหาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากขยะกลุ่มพลาสติกในขั้นทุติยภูมิ โดยในการจำลองทาร์ที่เกิดในขั้นทุติยภูมิของขยะกลุ่มเซลลูโลสถูกพิจารณาแทนด้วยสารเบนซีน ( $C_6H_6$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน (Aromatic hydrocarbon compound) ที่มีความเสถียรและถ่านชาร์ถูกพิจารณาแทนด้วยคาร์บอนเท่านั้น สำหรับการคำนวณจะเป็นไปตามสมดุลมวลของปฏิกิริยาที่ (4.2) และ (4.3)



รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการไพโรไลซิสของขยะมูลฝอยทั้ง ชั้น 2 (ดัดแปลงจาก Boroson และคณะ, (1989))

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงละเอียดของขยะมูลฝอย (Zhang และคณะ, (2012))

ค่าวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Proximate analysis) [% โดยมวล]	
ค่าความชื้น (Moisture content)	20
ค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon)	10.7
ค่าสารระเหย (Volatile matter)	77.6
ค่าขี้เถ้า (Ash)	11.7
ค่าวิเคราะห์เชิงละเอียด (Ultimate analysis) [% โดยมวล]	
C	48.1
H	5.1
N	1.2
Cl	0
S	0.3
O	32.9

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสขั้นปฐมภูมิของขยะมูลฝอย (Zhang และคณะ, (2012))

ผลิตภัณฑ์	กลุ่มเซลล์ลูโลส	กลุ่มพลาสติก
ผลได้ของก๊าซ (กก./กก.ขยะมูลฝอยแห้ง)	0.248	0.148
องค์ประกอบของก๊าซ (% โดยปริมาตร)		
H <sub>2</sub>	33.3	7.8
CO	6.0	-
CO <sub>2</sub>	59.5	9.8
CH <sub>4</sub>	1.2	13.8
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	68.6
ผลได้ของทาร์ (กก./กก.ขยะมูลฝอยแห้ง)	0.491	0.839
องค์ประกอบของธาตุในทาร์ (% โดยมวล)		

C	53.4	87.4
H	7.9	12.6
O	38.7	-
ผลได้ของซาร์ (กก./กก.ขยะมูลฝอยแห้ง)		
	0.261	0.013
องค์ประกอบของซาร์ (% โดยมวล)		
C	47.3	100.0
ซีเฝ้า	52.7	-

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสขั้นทุติยภูมิของขยะกลุ่มเซลลูโลส (Hla, (2004))

ผลิตภัณฑ์	กลุ่มเซลลูโลส
ผลได้ของก๊าซ (กก./กก.ทาร์ปฐุมภูมิ)	0.248
องค์ประกอบของก๊าซ (% โดยมวล)	
H <sub>2</sub>	3.53
CO	59.84
CO <sub>2</sub>	13.87
CH <sub>4</sub>	11.05
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.493
ผลได้ของทาร์ (กก./กก.ทาร์ปฐุมภูมิ)	0.126

การคำนวณหาปริมาณขยะกลุ่มเซลลูโลสและกลุ่มพลาสติก

$$F_{MSW} = F_{\text{เซลลูโลส}} + F_{\text{พลาสติก}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $F_{MSW} = F - \text{ค่าความชื้น}$  (4.2)

กำหนดให้

F คือ ปริมาณขยะมูลฝอยที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ

$F_{MSW}$  คือ ปริมาณขยะมูลฝอยที่สภาวะแห้ง

$F_{\text{เซลลูโลส}}$  คือ ปริมาณของขยะกลุ่มเซลลูโลสในขยะมูลฝอย

$F_{\text{พลาสติก}}$  คือ ปริมาณของขยะกลุ่มพลาสติกในขยะมูลฝอย

สมดุลมวลของอะตอมคาร์บอน (C)

$$C_{MSW} = C_{\text{Product}} \quad (4.3)$$

$$C_{MSW} = F_{MSW} \cdot \%wt_{C,MSW} \quad (4.4)$$

$$C_{\text{Product}} = C_{\text{เซลลูโลส}} + C_{\text{พลาสติก}} \quad (4.5)$$

$$C_{\text{เซลลูโลส}} = F_{\text{เซลลูโลส}} \cdot [(y_{\text{gas}} \theta_{C,\text{gas}}) + (y_{\text{TAR}} \cdot \%wt_{C,\text{TAR}}) + (y_{\text{CHAR}} \cdot \%wt_{C,\text{CHAR}})] \quad (4.6)$$

$$C_{\text{พลาสติก}} = F_{\text{พลาสติก}} \cdot [(y_{\text{gas}} \theta_{C,\text{gas}}) + (y_{\text{TAR}} \cdot \%wt_{C,\text{TAR}}) + (y_{\text{CHAR}} \cdot \%wt_{C,\text{CHAR}})] \quad (4.7)$$

เมื่อ  $\theta_{C,\text{gas}} = [(a_{C,\text{CO}} \cdot \%wt_{\text{CO}}) + (a_{C,\text{CO}_2} \cdot \%wt_{\text{CO}_2}) + (a_{C,\text{CH}_4} \cdot \%wt_{\text{CH}_4}) + (a_{C,\text{C}_2\text{H}_4} \cdot \%wt_{\text{C}_2\text{H}_4})]$

กำหนดให้

$y_j$  คือ ผลได้ของสาร  $j$

$\%wt_{i,j}$  คือ เปอร์เซ็นต์โดยมวลของอะตอม  $i$  ในสาร  $j$

$a_{i,j}$  คือ สัดส่วนโดยมวลของอะตอม  $i$  ในสาร  $j$

เมื่อ  $a_{i,j} = \frac{\text{มวลโมเลกุลของอะตอม } i}{\text{มวลโมเลกุลของสาร } j}$

แทนสมการที่ (4.4) ถึง (4.7) ลงใน (4.3) จะได้สมการสมดุลมวลของอะตอมคาร์บอน

สมดุลมวลของอะตอมไฮโดรเจน (H)

$$H_{MSW} = H_{\text{Product}} \quad (4.8)$$

$$H_{MSW} = F_{MSW} \cdot \%wt_{H,MSW} \quad (4.9)$$

$$H_{\text{Product}} = H_{\text{เซลลูโลส}} + H_{\text{พลาสติก}} \quad (4.10)$$

$$H_{\text{เซลลูโลส}} = F_{\text{เซลลูโลส}} \cdot [(y_{\text{gas}} \theta_{H,\text{gas}}) + (y_{\text{TAR}} \cdot \%wt_{H,\text{TAR}})] \quad (4.11)$$

$$H_{\text{พลาสติก}} = F_{\text{พลาสติก}} \cdot [(y_{\text{gas}} \theta_{H,\text{gas}}) + (y_{\text{TAR}} \cdot \%wt_{H,\text{TAR}})] \quad (4.12)$$

$$\text{เมื่อ } \theta_{H, \text{gas}} = [(a_{H, H_2} \cdot \%wt_{H_2}) + (a_{H, CH_4} \cdot \%wt_{CH_4}) + (a_{H, C_2H_4} \cdot \%wt_{C_2H_4})]$$

แทนสมการ (4.9) ถึง (4.12) ลงในสมการ (4.8) จะได้สมการสมดุลมวลของอะตอมไฮโดรเจน

จากการสมการสมดุลมวลของอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนจะสามารถแก้สมการคำนวณหาค่า

$F_{\text{เซลล์โลส}}$  และ  $F_{\text{พลาสติก}}$  ได้ โดยค่าที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลจากการคำนวณหาปริมาณของขยะกลุ่มเซลล์โลสและพลาสติก

ปริมาณขยะมูลฝอยที่ ป้อนเข้าสู่กระบวนการ (กก.)	ปริมาณของขยะ กลุ่มเซลล์โลส (กก.)	ปริมาณของขยะ กลุ่มพลาสติก (กก.)
100	72.25	6.55

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณนำไปสู่การทราบปริมาณของผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิและทุติยภูมิของการไพโรไลซิสขยะมูลฝอยซึ่งทำให้สามารถสร้างแบบจำลองขั้นตอนไพโรไลซิสได้ภายใต้สมมติฐานที่กระบวนการดำเนินการภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ถ่านชาร์ที่ เกิดในกระบวนการพิจารณาเป็นธาตุคาร์บอนทั้งหมด ส่วนซีเฝ้าและสารอนินทรีย์ในขยะจะพิจารณาให้ไม่เกิดปฏิกิริยา (Inert) และไม่พิจารณาผลจากการสูญเสียความร้อนจากกระบวนการและขนาดของอนุภาคภายในระบบและขั้นตอนการไพโรไลซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Instantaneous) แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลงของทาร์ขั้นปฐมภูมิจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการไพโรไลซิสขั้นทุติยภูมิซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.13) สำหรับแบบจำลองขั้นตอนการไพโรไลซิสที่สร้างโดยใช้โปรแกรมเอสเพนพลัสแสดงในรูปที่ 4.2 และรายละเอียดของโมลคูลที่ใช้แสดงในตารางที่ 4.5

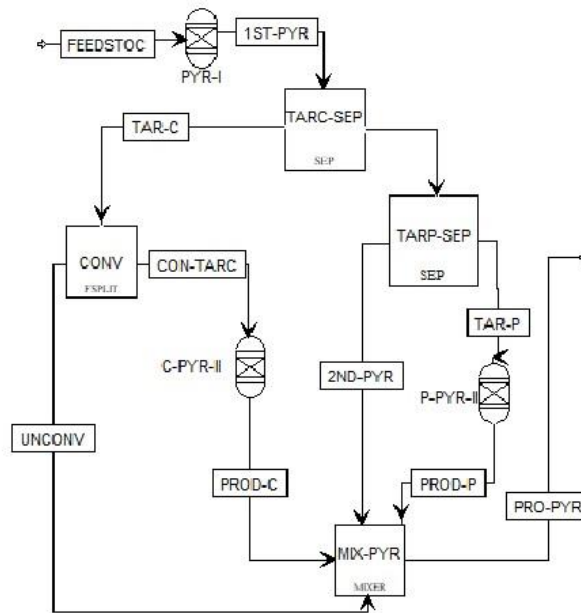
ความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของทาร์ที่เกิดจากเซลล์โลส

$$\epsilon = 1 - e^{-0.0058 (T_{\text{PYR}} - T_0)} \quad (4.13)$$

เมื่อ  $T_{\text{PYR}}$  คือ อุณหภูมิของการไพโรไลซิส ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$  คือ อุณหภูมิซึ่งทาร์เริ่มเกิดการสลายที่  $500^{\circ}\text{C}$





รูปที่ 4.2แบบจำลองขั้นตอนการไพโรไลซิสของขยะมูลฝอย

ตารางที่ 4.5รายละเอียดของหน่วยจำลองที่ใช้ในขั้นตอนการไพโรไลซิสขยะมูลฝอย

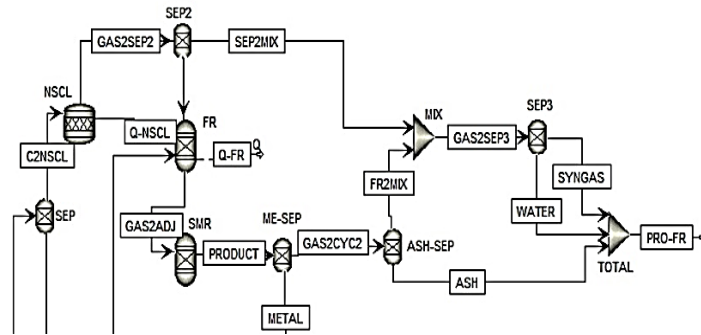
ชื่อบล็อก	ชนิด	รายละเอียด
PYR-I	RYIELD	ทำหน้าที่เปลี่ยนสารที่ไม่สามารถระบุโครงสร้างโมเลกุล (Non-conventional component) ให้เป็นสารที่มีสูตรโมเลกุลโดย (Conventional component) คำนวณจากสมการสมดุลของธาตุองค์ประกอบ
TARC-SEP	SEP	ทำหน้าที่แยกทาร์ปฏุมภูมิที่เกิดจากขยะกลุ่มเซลลูโลสที่จำลองขึ้นมาออกจากทาร์ปฏุมภูมิที่เกิดจากขยะกลุ่มพลาสติกและผลิตภัณฑ์จากการสลายขยะมูลฝอย
CONV	FSPLIT	ทำหน้าที่แยกทาร์ปฏุมภูมิที่เกิดจากขยะกลุ่มเซลลูโลสที่ไม่ยังไม่สลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นออกจากทาร์ปฏุมภูมิที่เกิดจากขยะกลุ่มเซลลูโลสที่สามารถสลายตัวเป็นทาร์ทุติยภูมิและผลิตภัณฑ์ในขั้นการไพโรไลซิสครั้งที่ 2 ได้แก่ CO CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> และก๊าซอื่นๆ
C-PYR-II	RYIELD	ทำหน้าที่จำลองการไพโรไลซิสทาร์ปฏุมภูมิที่เกิดจากขยะกลุ่มเซลลูโลส
TARP-SEP	SEP	ทำหน้าที่แยกทาร์ปฏุมภูมิที่เกิดจากขยะกลุ่มพลาสติกออกจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสขยะมูลฝอยในขั้นตอนที่ 1

P-PYR-II	RYIELD	ทำหน้าที่จำลองการไพโรไลซิสทาร์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากขยะกลุ่มพลาสติก
MIX-PYR	MIXER	ทำหน้าที่รวมผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในขั้นตอนการไพโรไลซิสขยะมูลฝอยให้อยู่ด้วยกัน

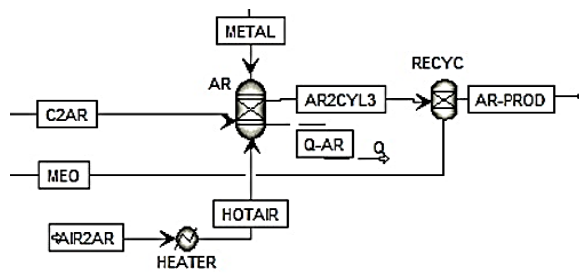
#### 4.2 การจำลองขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันและเคมีคอลลูปิง

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไพโรไลซิสจะเข้าสู่ขั้นตอนแก๊สซิฟิเคชันต่อไป แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมักจะพบทาร์ปนอยู่ด้วยเนื่องจากทาร์ที่เหลืออยู่เป็นทาร์ที่ต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 1000 °C ในการสลายแต่ด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ต่ำกว่า 1000 °C จึงไม่สามารถสลายทาร์ทั้งหมดได้ ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองที่สร้างมีผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงสภาวะจริงจึงจำเป็นต้องแยกส่วนของทาร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากทาร์ที่สามารถสลายได้ที่อุณหภูมิดำเนินงานซึ่งแทนด้วยก๊าซเบนซีน นอกจากนี้ทาร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องมีการประยุกต์การจำลองเพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการจริงแล้ว ก๊าซมีเทนเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่สภาวะจริงยังคงเหลืออยู่ซึ่งในแบบจำลองจะทำนายปริมาณก๊าซมีเทนต่ำกว่าสภาวะจริง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถทำนายปริมาณก๊าซมีเทนที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ใกล้เคียงสภาวะจริงด้วยการปรับอุณหภูมิที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำซึ่งแสดงในสมการที่ 4.14 โดกำหนดให้อุณหภูมิในการเข้าสู่สภาวะสมดุลต่ำกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 335 °C สำหรับแบบจำลองขั้นตอนแก๊สซิฟิเคชันจะแสดงในรูปที่ 4.3 และส่วนขั้นตอนเคมีคอลลูปิงเป็นเพียงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวพาออกซิเจนและอากาศซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานการเปลี่ยน Ni เป็น NiO มีประสิทธิภาพ 100 % สำหรับแบบจำลองขั้นตอนเคมีคอลลูปิงแสดงในรูปที่ 4.4 และรายละเอียดของโมดูลที่ใช้ในแบบจำลองทั้ง 2 ชั้นแสดงในตารางที่ 4.6 โดยรูปที่ 4.5 จะแสดงแบบจำลองของกระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชันที่สร้างขึ้นและใช้ในการศึกษากระบวนการต่อไป

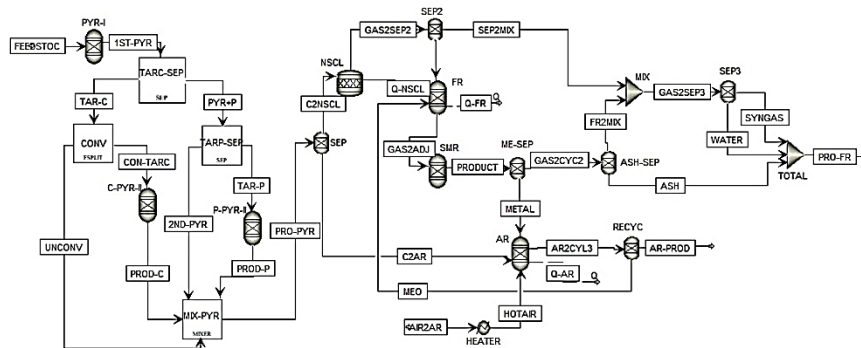




รูปที่ 4.3แบบจำลองขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันในกระบวนการเคมีคอลูปปิ้งแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 4.4แบบจำลองขั้นตอนเคมีคอลูปปิ้งในกระบวนการเคมีคอลูปปิ้งแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 4.5ภาพรวมทั้งหมดของแบบจำลองกระบวนการเคมีคอลูปปิ้งแก๊สซิฟิเคชัน

ตารางที่รายละเอียดหน่วยจำลองที่ใช้ในขั้นตอน 4.6 แก๊สซิฟิเคชันและเคมีคอลูปปิ้ง

ชื่อบล็อก	ชนิด	รายละเอียด
SEP	SEP	ทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งพิจารณาเป็น 10 % โดยมวลของถ่านชาร์ทั้งหมดออกจากผลิตภัณฑ์ที่จะเข้าสู่ขั้นตอนแก๊สซิฟิเคชัน
NSCL	RStoic	ทำหน้าที่จำลองการเกิดก๊าซ $NH_3$ , $HCl$ และ $H_2S$

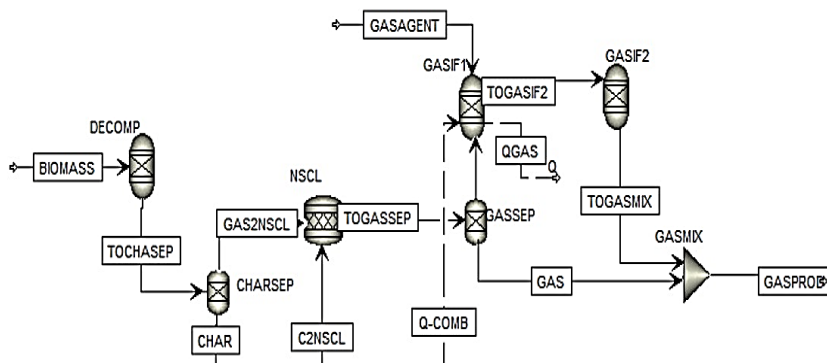
SEP2	SEP	ทำหน้าที่แยก $\text{NH}_3$ , $\text{HCl}$ $\text{H}_2\text{S}$ และ ทาร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ออกจากผลิตภัณฑ์อื่นๆ
FR	RGibbs	ทำหน้าที่จำลองการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน
SMR	RGibbs	ทำหน้าที่จำลองปฏิกิริยา Steam methane reforming ที่เข้าสู่สภาวะสมดุลต่างจากปฏิกิริยาอื่นโดยจำกัดอุณหภูมิในการเข้าสู่สมดุล
ME-SEP	SEP	ทำหน้าที่แยกตัวพาออกซิเจนที่ผ่านการออกซิไดซ์แล้วออกจากผลิตภัณฑ์
ASH-SEP	SEP	ทำหน้าที่แยกขี้เถ้าที่เกิดในกระบวนการออกจากผลิตภัณฑ์อื่น
MIX	MIXER	ทำหน้าที่รวมก๊าซผลิตภัณฑ์เข้ากับแก๊ส $\text{NH}_3$ , $\text{HCl}$ และ $\text{H}_2\text{S}$
SEP3	SEP	ทำหน้าที่แยกก๊าซสังเคราะห์ออกจากผลิตภัณฑ์อื่นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา
TOTAL	MIXER	ทำหน้าที่รวมผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง
AR	RGibbs	ทำหน้าที่จำลองกระบวนการในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ
RECYC	SEP	ทำหน้าที่แยกตัวพาออกซิเจนเพื่อวนกลับไปเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง
HEATER	HEATER	ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่อากาศที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.3 การตรวจสอบแบบจำลอง

จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการเคมีคอลรูปปิงแก๊สซิฟิเคชันในหัวข้อที่ผ่านมา จำเป็นต้องตรวจสอบแบบจำลองก่อนนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้เกิดจากการนำแบบจำลองของขั้นตอนย่อย 3 ขั้นตอนมารวมกันซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีข้อจำกัดในการหาข้อมูลเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง สำหรับแบบจำลองของขั้นตอนไพโรไลซิสถูกสร้างโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองโดยตรงดังนั้นจึงมีความใกล้เคียงกับข้อมูลของการทดลองจริงแล้ว ดังนั้นแบบจำลองที่ถูกนำไปตรวจสอบคือแบบจำลองขั้นแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งตรวจสอบเทียบกับแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของโรงไฟฟ้าชีวมวล Güssing ในประเทศออสเตรีย

สำหรับแบบจำลองของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวดำเนินการภายใต้สมมติฐานที่กระบวนการดำเนินการภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ถ่านชาร์จะประกอบด้วยคาร์บอนและซีเถ้าเท่านั้น สำหรับซีเถ้าจะไม่ร่วมในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ถ่านชาร์จะถูกเปลี่ยนในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั้งหมดและทุกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยรายละเอียดของหน่วยต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.7 โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนี้ดำเนินการที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของกระบวนการเท่ากับ 850 °C อัตราการป้อนสารชีวมวลเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวออกซิไดซ์สารชีวมวลคือ ไอน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 150 °C และอัตราการป้อนไอน้ำต่อสารชีวมวลเท่ากับ 0.7 ซึ่งองค์ประกอบของสารชีวมวลที่ใช้มาจากข้อมูลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงละเอียดตามตารางที่ 4.6 และรายละเอียดของหน่วยที่ใช้จำลองแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.6แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของโรงไฟฟ้าชีวมวล

ตารางที่ .47 ข้อมูลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงละเอียดของเศษไม้ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Laxmi และคณะ, (2017))

ค่าวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Proximate analysis) [%โดยมวล]	
ค่าความชื้น (Moisture content)	20
ค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon)	18.84
ค่าสารระเหย (Volatile matter)	80.00
ค่าซีเถ้า (Ash)	1.16
ค่าวิเคราะห์เชิงละเอียด (Ultimate analysis) [%โดยมวล]	
C	51.19
H	6.08

N	0.20
Cl	0.05
S	0.02
O	41.30

ตารางที่ .48 รายละเอียดหน่วยจำลองที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเศษไม้

ชื่อบล็อก	ชนิด	รายละเอียด
DECOMP	RYIELD	ทำหน้าที่เปลี่ยนสารที่ไม่สามารถระบุโครงสร้างโมเลกุล (Non-conventional component) ให้เป็นสารที่มีสูตรโมเลกุลโดย (Conventional component)
CHARSEP	SEP	ทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ออกจากผลิตภัณฑ์ตัวอื่น
NSCL	RStoic	ทำหน้าที่จำลองการเกิดก๊าซ $\text{NH}_3$ , $\text{HCl}$ และ $\text{H}_2\text{S}$
GASIF1	RGibbs	ทำหน้าที่จำลองการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน
GASIF2	RGibbs	ทำหน้าที่จำลองปฏิกิริยา Steam methane reforming และ Water gas shift ที่เข้าสู่สภาวะสมดุลต่างจากปฏิกิริยาอื่นโดยจำกัดอุณหภูมิในการเข้าสู่สมดุล
CSPLIT	FSPLIT	ทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ที่จำเป็นต้องใช้เพื่อเข้าสู่การเผาไหม้ในเกิดความร้อนป้อนเข้าสู่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน
COMBUST	RStoic	ทำหน้าที่จำลองกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์เพื่อให้เบตมีความร้อนแล้วป้อนกลับไปเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน
GASMIX	MIXER	ทำหน้าที่รวมผลิตภัณฑ์ที่เกิดทั้งหมดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของชั้นแก๊สซิฟิเคชันของกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าแบบจำลองขั้นตอนแก๊สซิฟิเคชันมีค่าความคลาดเคลื่อน 5 ถึง 7 % ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำแบบจำลองของขั้นตอนแก๊สซิฟิเคชันดังกล่าวไปใช้ในการศึกษากระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันต่อไป

ตารางที่ .49 ข้อมูลองค์ประกอบของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโรงไฟฟ้าจริงและแบบจำลองที่สร้างขึ้น

สารประกอบ (Compound)	จากโรงไฟฟ้า Güssing	จากแบบจำลอง ที่สร้างขึ้น
องค์ประกอบของก๊าซ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)		
H <sub>2</sub>	35-45	50
CO	22-25	17
CO <sub>2</sub>	20-25	23
CH <sub>4</sub>	10	11

## บทที่ 5

### ผลการจำลองกระบวนการและการวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้จะอภิปรายถึงการนำแบบจำลองที่สร้างมาใช้ศึกษาตัวแปรกระบวนการต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้วิเคราะห์และประเมินกระบวนการดังกล่าวเพื่อการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยที่มีความชื้นสูง แม้ว่าตัวแปรกระบวนการที่ศึกษาจะพิจารณาผลจากค่าพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ของกระบวนการ องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ แต่การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณทาร์ที่เกิดในกระบวนการก็เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของกระบวนการผ่านประสิทธิภาพเชิงความร้อน เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นสารชีวมวลประเภทความชื้นสูง (ค่าความชื้นมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล) ซึ่งส่งผลให้เกิดทาร์ในกระบวนการมาก ดังนั้นก่อนการศึกษาตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อก๊าซผลิตภัณฑ์จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงสถานะของการดำเนินการที่มีต่อการสลายทาร์โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิของกระบวนการเท่านั้น เนื่องจากเป็นตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อการสลายทาร์มากที่สุด ซึ่งการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณทาร์ที่เกิดจะแสดงในหัวข้อต่อไป

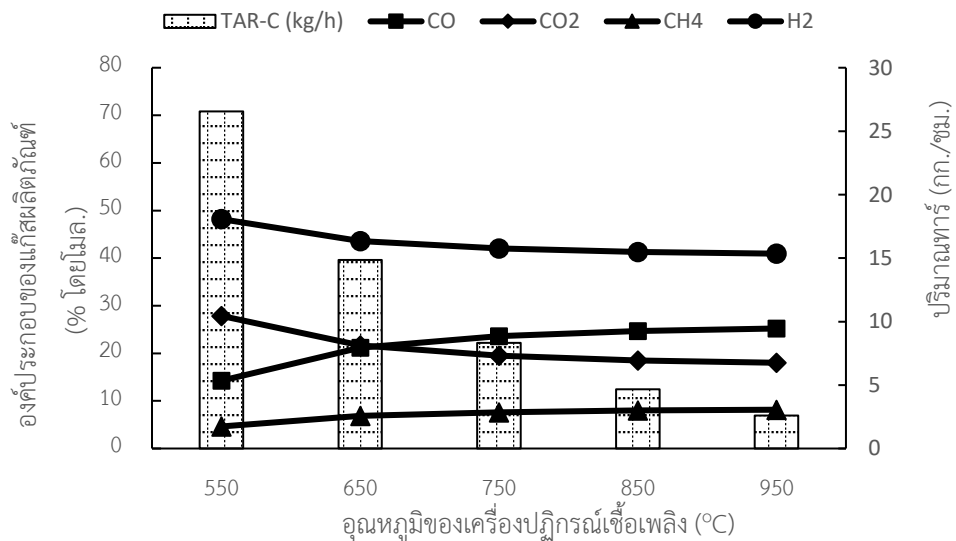
#### 5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

จากที่กล่าวมาแล้วถึงการเกิดทาร์ในกระบวนการอันเนื่องมาจากวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นสารชีวมวลที่มีความชื้นสูง ดังนั้นในการจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันจึงได้จำลองการเกิดทาร์ร่วมด้วย เพื่อให้กระบวนการจำลองมีการพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ได้ใกล้เคียงสถานะจริงมากขึ้น โดยตัวแปรของกระบวนการที่ส่งผลต่อการสลายทาร์คืออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะดำเนินการภายใต้สมมติฐานที่ไม่พิจารณาผลเชิงจลนศาสตร์ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ที่มีต่อการสลายทาร์และการสลายทาร์ไม่ขึ้นอยู่กับเทอมของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาด้วย ดังนั้นการสลายทาร์จึงขึ้นกับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพียงตัวแปรเดียวเท่านั้น โดยผลขององค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและปริมาณทาร์ที่เหลือในกระบวนการเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแสดงในรูปที่ 5.1 และผลของค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการสลายทาร์เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 5.2 อย่างไรก็ตามการพิจารณาผลของตัวแปรดังกล่าวดำเนินการภายใต้ความดัน 1 บาร์

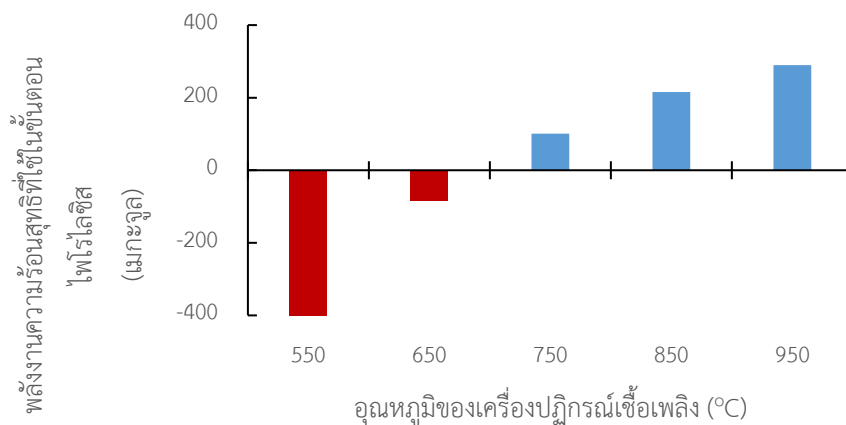
จากรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะทำให้ปริมาณทาร์ที่เหลืออยู่ในกระบวนการมีปริมาณลดลง แสดงให้เห็นถึงการสลายทาร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อ



พิจารณาองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามแม้ว่าที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 750 °C) ปริมาณคาร์บอนที่อยู่จะลดลงแต่เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ พบว่าการสลายทาร์เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ด้วยเหตุนี้กระบวนการสลายทาร์จึงจำเป็นต้องได้รับความร้อนเข้าสู่กระบวนการเพื่อให้กระบวนการสามารถดำเนินต่อไปได้ ดังนั้นการออกแบบกระบวนการเคมีคอลลูบึงแก๊สซิฟิเคชันจึงควรพิจารณาพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในขั้นตอนการสลายทาร์ด้วยเพื่อให้เกิดขั้นตอนการสลายทาร์ที่มีประสิทธิภาพซึ่งจะทำให้ได้ก๊าซสังเคราะห์ที่มีคุณภาพเนื่องจากการปนเปื้อนจากทาร์ต่ำ



รูปที่ 5.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 5.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ในขั้นตอนไพโรไลซิส

## 5.2 ผลกระทบของตัวแปรต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ

เนื่องด้วยการศึกษาที่มีจุดประสงค์ในการศึกษาการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยซึ่งถือเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความชื้นสูงด้วยกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันโดยคาดว่ากระบวนการนี้สามารถเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงานได้โดยใช้พลังงานจากภายในกระบวนการได้อย่างเพียงพอ เพื่อสามารถเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาในการนำวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง เช่น ขยะมูลฝอย ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ไม่มีมูลค่ามาผลิตเป็นพลังงานที่มีมูลค่าด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งประสบปัญหาประสิทธิภาพต่ำ อันเนื่องมาจากต้องให้พลังงานความร้อนแก่กระบวนการมากเพื่อให้ได้ก๊าซสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรกระบวนการที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิที่ต้องใช้ในกระบวนการเป็นประการสำคัญ โดยตัวแปรกระบวนการที่ต้องการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ความดันของกระบวนการ และอัตราส่วนของตัวพาออกซิเจนต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ซึ่งผลจากการศึกษาได้แสดงดังต่อไปนี้

### 5.2.1 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ( $\Omega$ )

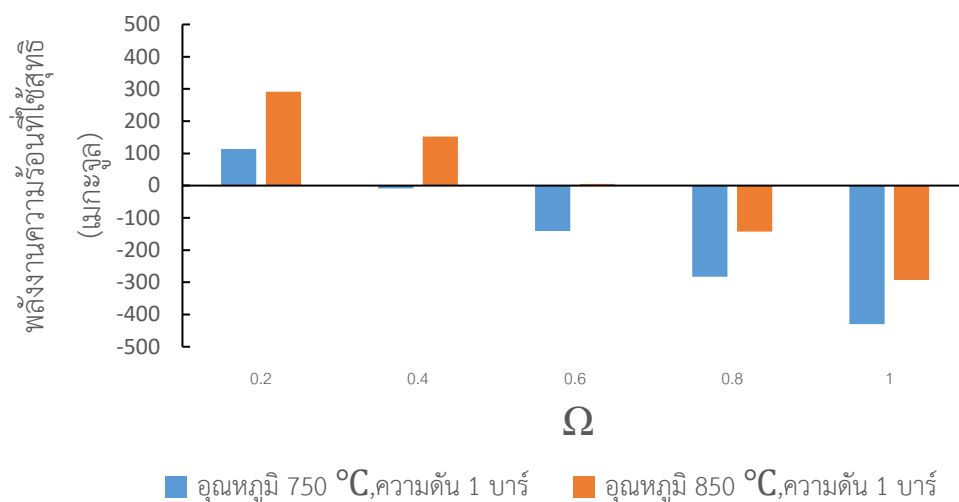
เนื่องจากกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันเป็นการใช้ประโยชน์จากตัวพาออกซิเจน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเริ่มพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ ภายใต้เงื่อนไขในการดำเนินการดังนี้

แบบที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C ความดันของกระบวนการ 1 บาร์

แบบที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 850 °C ความดันของกระบวนการ 1 บาร์

ผลการศึกษาอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าเมื่อค่า  $\Omega$  เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณนิกเกิลออกไซด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยส่งผลให้มีออกซิเจนในกระบวนการมากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างคาร์บอนในขยะมูลฝอยและออกซิเจนเกิดมากขึ้นซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ด้วยเหตุนี้การเพิ่ม  $\Omega$  จึงทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามจากการศึกษาผลของความดันที่ส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิพบว่าเมื่อเพิ่มความดันสูงถึง 10 บาร์ อุณหภูมิ 850 °C และค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.6 ก็ไม่สามารถทำให้พลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิเป็นศูนย์ได้ แต่จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Omega$  โดยเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.6 พบว่าที่สภาวะดังกล่าวสามารถทำให้ค่า

พลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิมีค่าติดลบได้ ดังนั้นในการพิจารณาช่วงการเปลี่ยนของกระบวนการจากการดำเนินงานที่ต้องใช้พลังงานความร้อนเป็นการดำเนินงานแบบการใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการได้อย่างเพียงพอจะอยู่ในช่วงค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 ถึง 0.6



**รูปที่ 5.3** ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ

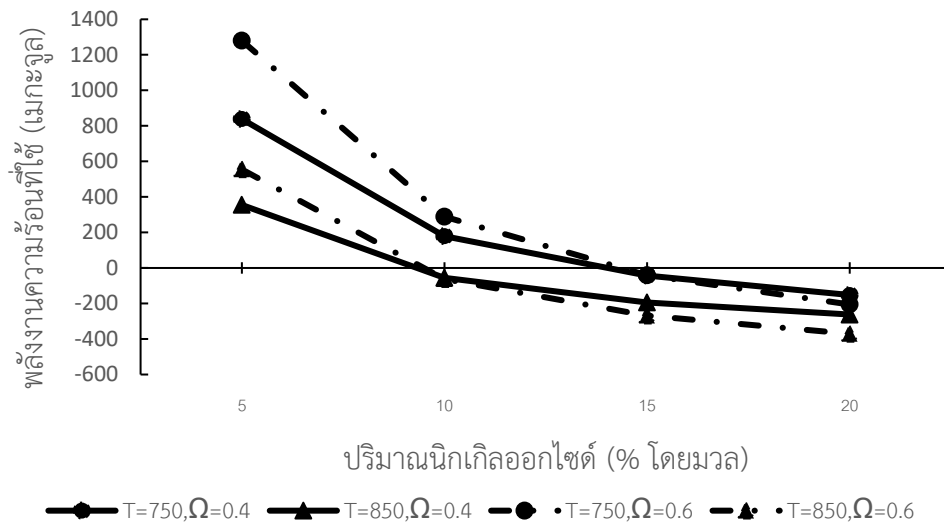
#### 5.2.2 ผลของปริมาณนิกเกิลออกไซด์และตัวรองรับในตัวพาออกซิเจน

ตัวพาออกซิเจนที่ใช้ประกอบด้วย นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ซึ่งนิกเกิลออกไซด์จะอยู่บนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) อย่างไรก็ตามแม้ว่าอะลูมิเนียมออกไซด์ไม่ได้เป็นตัวออกซิไดซ์ขยะมูลฝอย แต่เนื่องจากนิกเกิลออกไซด์ฝังตัวอยู่บนตัวรองรับดังนั้นปริมาณของตัวรองรับจึงมีผลต่อพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงนำไปสู่การศึกษาหาปริมาณนิกเกิลออกไซด์และปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สัมพันธ์กับจุดประสงค์ของกระบวนการคือสามารถให้พลังงานความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงได้อย่างเพียงพอโดยใช้พลังงานจากภายนอกน้อยที่สุด โดยการศึกษาจะพิจารณาผลของปริมาณของนิกเกิลออกไซด์ในเชิงสัดส่วนร้อยละโดยมวลของตัวพาออกซิเจน กล่าวคือ หากนิกเกิลออกไซด์มีสัดส่วนร้อยละโดยมวลเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สัดส่วนโดยมวลของอะลูมิเนียมออกไซด์ลดลง แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะคงที่อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง และความดันกระบวนการ โดยเลือกสภาวะดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่ใช้เมื่อตัวแปรกระบวนการมีเปลี่ยนแปลง ซึ่งสภาวะดำเนินการที่เลือกคือ

อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 และ 850 °C และค่าอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุล ( $\Omega$ ) เท่ากับ 0.4 และ 0.6 ดังรูปที่ 5.4 ถึง 5.5

ผลจากการศึกษาพบว่าปริมาณของตัวรองรับส่งผลต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศและเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง โดยในรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเพิ่มขึ้นหรือปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งเป็นตัวรองรับมีค่าลดลงส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศมีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาที่สภาวะดำเนินการที่ต่างกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพิ่มจาก 750 เป็น 850 °C ทำให้ตัวพาออกซิเจนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วยส่งผลให้เมื่อป้อนกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ ค่าพลังงานความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศต้องใช้เพื่อให้เกิดกระบวนการดำเนินการภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ 1000 °C มีค่าลดลง ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศที่อุณหภูมิ 850 °C จึงมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 750 °C ในทุกช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจน นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุล ส่งผลให้ทั้งปริมาณของนิกเกิลออกไซด์และปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศที่  $\Omega$  เท่ากับ 0.6 มีค่ามากกว่าที่  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 ในช่วงของปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่ำ โดยพิจารณาจากรูปที่ 5.4 กราฟแสดงที่สภาวะดำเนินการภายใต้อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 850 °C เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ เมื่อค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 และ 0.6 ในช่วงของปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนอยู่ที่ 5 ถึง 10 % โดยมวล ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $\Omega$  มีค่ามาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนมากกว่า 10 % โดยมวล พบว่าค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศมีค่าติดลบซึ่งแสดงถึงเครื่องปฏิกรณ์อากาศคายความร้อนออกมา นอกจากนี้ที่ค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.6 จะคายความร้อนมากกว่าที่ 0.4 เป็นผลมาจากปริมาณของนิกเกิลออกไซด์ที่เข้าสู่กระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องปฏิกรณ์อากาศเกิดมากขึ้น โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นคายความร้อนสูงจึงทำให้เมื่อค่า  $\Omega$  มากขึ้นพร้อมกับปริมาณของอะลูมิเนียมลดลง (ค่าสัดส่วนของปริมาณนิกเกิลออกไซด์เพิ่มขึ้น) ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศมีค่าเป็นลบมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงค่าสัดส่วนของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่สามารถดำเนินการภายใต้สภาวะที่เปลี่ยนแปลงโดยไม่ต้องการความร้อนจากภายนอกเพิ่มพบว่าที่

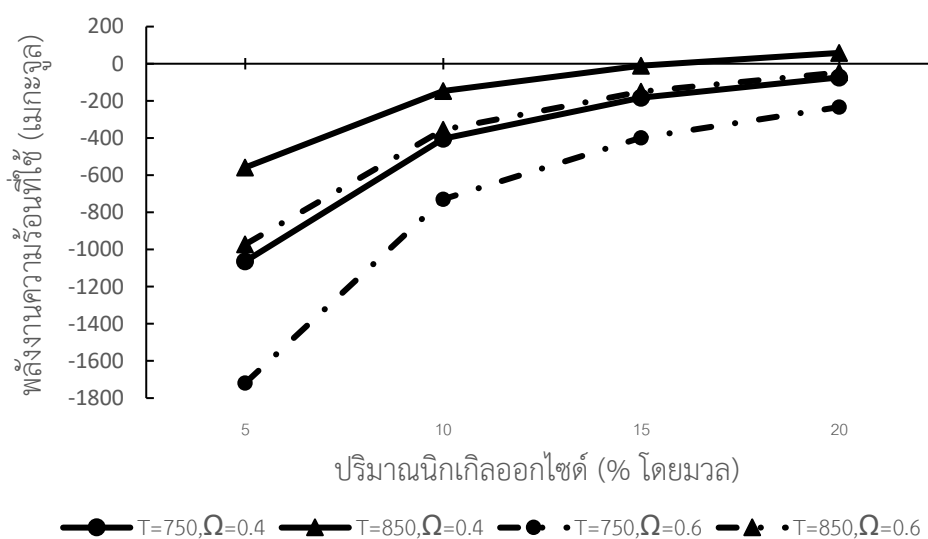
ค่าสัดส่วนของปริมาณนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 15 และ 20 % โดยมวล เป็นค่าที่เหมาะสมในการเลือกใช้เป็นเงื่อนไขสภาวะในการศึกษาตัวแปรกระบวนการอื่นๆ



**รูปที่ 5.4** ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนที่ส่งผลต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในรูปที่ 5.5 พบว่ามีแนวโน้มที่สวนทางกับเครื่องปฏิกรณ์อากาศซึ่งเป็นผลมาจากตัวพาออกซิเจนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะมีอุณหภูมิที่สูงยิ่ง แม้ว่าปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนจะต่ำแต่อะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีปริมาณมากสามารถทำหน้าที่เป็นตัวพาความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์อากาศมาสู่เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงได้ โดยพิจารณาที่สภาวะการดำเนินการที่แตกต่างกัน พบว่าแม้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือค่า  $\Omega$  เพิ่มขึ้น แนวโน้มของพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะเป็นไปในแนวทางเดียวกันคือเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นจะสังเกตจากค่าพลังงานที่ใช้มีค่าติดลบลดลงแสดงถึงเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงดูดความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสัดส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนลดลง โดยคงที่ค่า  $\Omega$  แต่อย่างไรก็ตามแม้ที่ค่าปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนต่ำทำให้เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่าพลังงานที่ใช้ติดลบมากแต่เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนที่ใช้ของเครื่องปฏิกรณ์อากาศพบว่าต้องใช้ความร้อนสูงมาก

จากผลของการศึกษาพบว่า การพิจารณาปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนควรคำนึงถึงพลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งเครื่องปฏิกรณ์อากาศและเชื้อเพลิง เพื่อให้สามารถได้เงื่อนไขที่เครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองสามารถจัดการความร้อนในกระบวนการได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนที่มีผลต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองพบว่าที่ค่าปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสภาวะที่เครื่องปฏิกรณ์อากาศมีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้เป็นค่าลบทุกสภาวะดำเนินการ ในขณะที่ค่าพลังงานความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่าติดลบเช่นกัน



รูปที่ 5.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

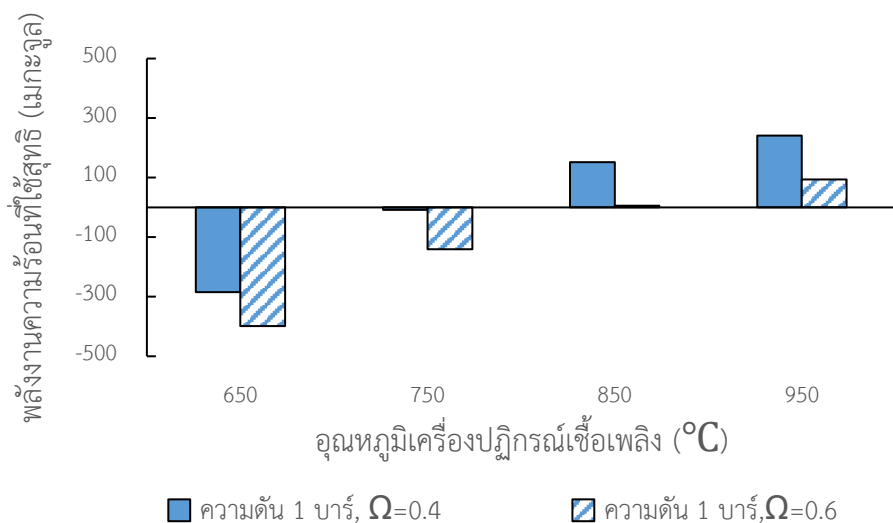
### 5.2.3 ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

เนื่องจากกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการประเภทใช้ความร้อนในกระบวนการดังนั้นตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการโดยตรงคือช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งจะเกิดในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 650 ถึง 950 °C ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการเมื่อใช้วัตถุดิบเป็นสารที่มีความชื้นสูง โดยดำเนินการภายใต้สภาวะดำเนินการที่แตกต่างกันดังนี้

แบบที่ 1 ดำเนินการศึกษาอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ที่ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุลเท่ากับ 0.4 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

แบบที่ 2 ดำเนินการศึกษาอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ที่ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุลเท่ากับ 0.6 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะดำเนินการทั้ง 2 แบบ แสดงในรูปที่ 5.6 เมื่อพิจารณารูปแล้วพบว่าเมื่ออุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่ 750 °C จะพบว่ามีเพียงที่สภาวะดำเนินการที่ความดัน 1 บาร์และค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 ที่พลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิยังมีค่าใกล้เคียงศูนย์แต่ยังคงเป็นกระบวนการคายความร้อนเนื่องจากค่าความร้อนสุทธิของกระบวนการยังมีค่าติดลบ แต่เมื่ออุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 850 °C ทุกสภาวะดำเนินการมีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิเป็นบวกทั้งหมดซึ่งหมายถึงกระบวนการต้องการพลังงานความร้อนเพิ่มจากภายนอก แต่ที่สภาวะความดัน 1 บาร์และค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.6 แม้ค่าจะเป็นบวกแต่มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่กระบวนการสามารถใช้พลังงานจากภายในกระบวนการได้อย่างเพียงพอจะมีค่าในช่วงต่ำกว่า 850 °C แม้ว่าที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเท่ากับ 650 °C ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิมีค่าติดลบก็ตาม แต่จากการศึกษาเกี่ยวกับช่วงอุณหภูมิที่สลายตัวพบว่าที่อุณหภูมิ 650 °C ปริมาณทาร์ยังคงพบอยู่ในปริมาณมากด้วยเหตุนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมจะใช้เป็นเงื่อนไขของสภาวะในการศึกษาตัวแปรอื่นๆควรใช้ค่าอุณหภูมิที่ 750 °C



### รูปที่ 5.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ

#### 5.2.4 ผลของความดันของกระบวนการ

นอกจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแล้ว ความดันของกระบวนการก็เป็นอีกตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชันเช่นกัน จากการศึกษาตัวแปรกระบวนการที่ในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการโดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการใช้ความร้อนในกระบวนการอย่างเพียงพอคือ การดำเนินการที่ปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 % โดยมวล อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงอยู่ที่ 750 และ 850 °C ด้วยเหตุนี้จึงทำการศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการภายใต้สภาวะเงื่อนไข 4 แบบ ดังนี้

แบบที่ 1 ศึกษาความดันของกระบวนการ ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.4 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

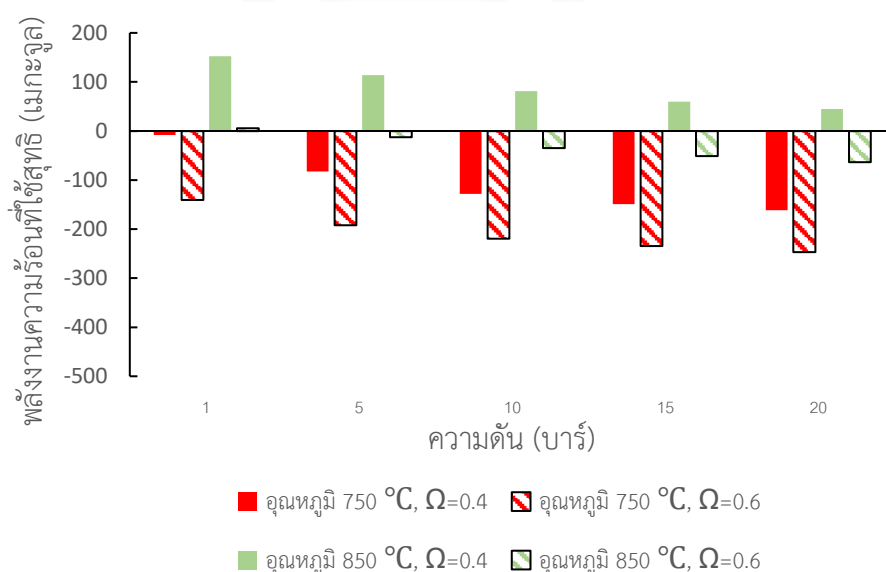
แบบที่ 2 ศึกษาความดันของกระบวนการ ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.6 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล



แบบที่ 3 ศึกษาความดันของกระบวนการ ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 850 °C อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.4 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

แบบที่ 4 ศึกษาความดันของกระบวนการ ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 850 °C อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.6 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลการศึกษาความดันของกระบวนการที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นส่งผลให้แนวโน้มของค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิในทุกสภาวะดำเนินการมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความดันทำให้กระบวนการต้องการความร้อนจากภายนอกลดลง นอกจากนี้พบว่าค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิที่  $\Omega$  เท่ากับ 0.6 มีค่าน้อยกว่าที่  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 ในทุกช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาและทุกค่าความดันที่เพิ่มขึ้นและมีเพียงที่อุณหภูมิ 850 °C ความดัน 1 บาร์เท่านั้นที่ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิมีค่าเป็นบวกซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ เมื่อเพิ่มความดันค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิมีค่าลดลงในสภาวะที่ค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.6 เท่านั้น แต่ที่ค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 การเพิ่มความดันยังไม่สามารถทำให้กระบวนการใช้ความร้อนจากกระบวนการได้อย่างเพียงพอ แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 850 °C และ  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 กระบวนการต้องการความร้อนสูงเนื่องจากการเพิ่มความดันไม่สามารถลดค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการให้เป็นศูนย์ได้



รูปที่ 5.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ

จากการศึกษาตัวแปรทั้ง 4 ชนิดที่มีผลต่อพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการเคมีคอลลูบปีง แก๊สซิฟิเคชัน สามารถสรุปได้จากผลการศึกษาว่า หากต้องการให้กระบวนการสามารถใช้พลังงานความร้อนภายในกระบวนการได้อย่างเพียงพอจำเป็นต้องหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลายตัวพร้อมกัน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาผลของตัวแปรดังกล่าวเป็นเพียงการพิจารณาผลของตัวที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการเท่านั้น หากจะพิจารณาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ค่าของความร้อนของก๊าซที่ผลิตได้ เพื่อใช้พิจารณาถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากขยะที่มีความชื้นสูงได้ และสำหรับค่าตัวแปรที่ใช้ศึกษาในหัวข้อถัดไปจะพิจารณาที่สภาวะการดำเนินงานที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการอย่างเพียงพอ ดังนี้

ปริมาณนิกเกิลออกไซด์ที่มีในตัวพาออกซิเจนที่ใช้เป็นเงื่อนไขการศึกษา คือ 15% โดยมวล

อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย 0.4 และ 0.6

อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง คือ  $750^{\circ}\text{C}$

ความดันกระบวนการยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด

### 5.3 ผลกระทบของตัวแปรต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์

จากการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี้ถึงผลตัวแปรกระบวนการที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ความดันของกระบวนการ และค่าอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ( $\Omega$ ) ที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์ (Lower heating value: LHV) เพื่อนำไปใช้ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานในรูปของก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.3.1 ผลของความดันของกระบวนการ

จากการศึกษาศึกษาผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในสภาวะที่ความดันของกระบวนการแตกต่างกันส่งผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นให้หัวข้อนี้จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการที่มีองค์ประกอบของก๊าซ

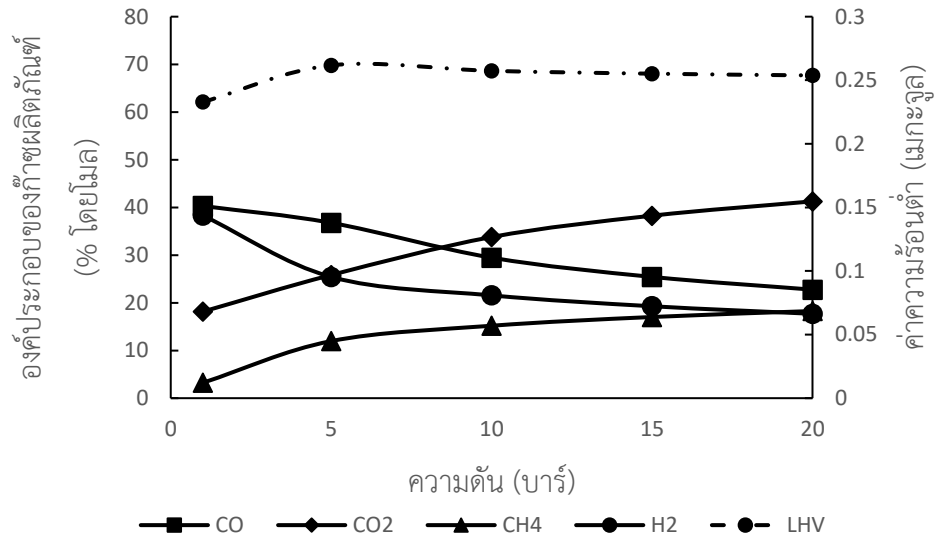
ผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์ โดยดำเนินการภายใต้สภาวะดำเนินการที่แตกต่างกันดังนี้

แบบที่ 1 ดำเนินการศึกษาความดันของกระบวนการ ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.4 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

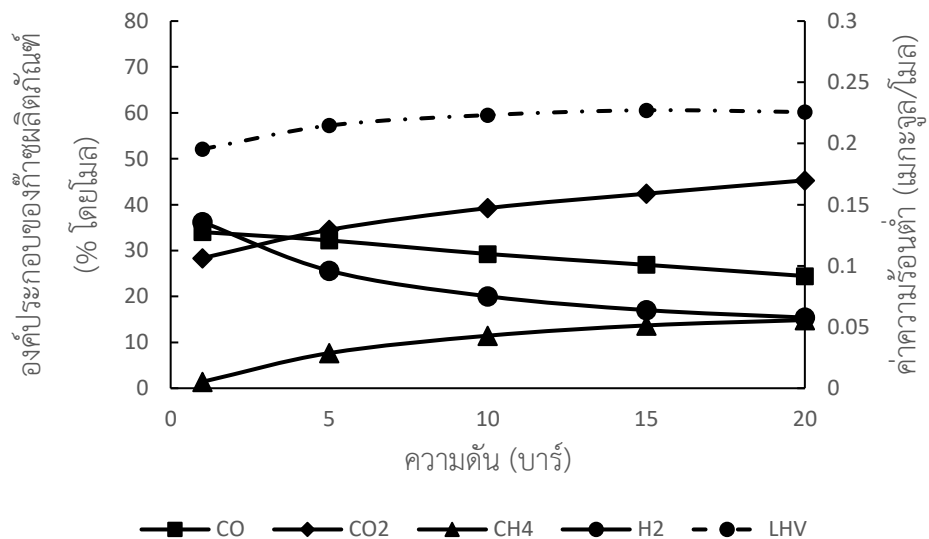
แบบที่ 2 ดำเนินการศึกษาความดันของกระบวนการ ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.6 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ภายใต้สภาวะการดำเนินการทั้ง 2 แบบ แสดงในรูปที่ 5.8-9 พิจารณาที่สภาวะการดำเนินการที่อุณหภูมิ 750 °C ค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 ในรูปที่ 5.8 พบว่าเมื่อความดัน 1 บาร์ ค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนมีค่ามากที่สุด แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความดันของกระบวนการลดลง แต่อย่างไรก็ตามที่ความดันสูงกว่า 10 บาร์ การลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกันค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่ความดัน 1 บาร์มีค่าน้อยที่สุดและเพิ่มขึ้นเมื่อความดันของกระบวนการเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ความดันสูงกว่า 10 บาร์ ค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคล้ายคลึงกับของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไปเป็นไปตามปฏิกิริยาการผันกลับของมีเทนรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam methane reforming) และปฏิกิริยาเมทาเนชัน (Methanation) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยพบว่าการเพิ่มความดันแม้จะส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น แต่ผลของความดันไม่สามารถชดเชยผลของอัตราส่วนนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยได้ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่ก๊าซอื่นมีความเข้มข้นลดลงส่งผลในค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์มีค่าลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้การเพิ่มความส่งผลให้เกิดน้ำเป็นผลพลอยได้จากจากปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงซึ่งส่งผลเสียต่อกระบวนการแม้ว่าค่าความร้อนต่ำของก๊าซจะลดลงไม่มาก แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณก๊าซที่ได้ซึ่งลดลงอย่างมากจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความดันส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ของกระบวนการเคมีคอล

ลูปปิงแก๊สซิฟิเคชันจึงทำให้ความดันที่เหมาะสมในการพิจารณาใช้เป็นเงื่อนไขในการศึกษาจึงเลือกที่ความดันเท่ากับ 1 บาร์ เนื่องจากที่ความดันดังกล่าวให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงที่สุด



รูปที่ 5.8 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 1



รูปที่ 5.9 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 2

### 5.3.2 ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

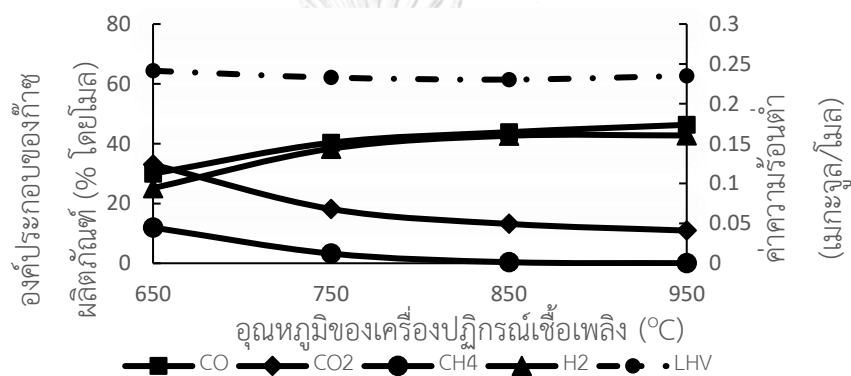
สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้การพิจารณาภาวะในการดำเนินการจากศึกษาค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิ เพื่อให้กระบวนการสามารถดำเนินอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการใช้ความร้อนภายในกระบวนการอย่างเพียงพอ โดยสถานะในการดำเนินการเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังนี้

แบบที่ 1 ดำเนินการศึกษาอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ที่ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุลเท่ากับ 0.4 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

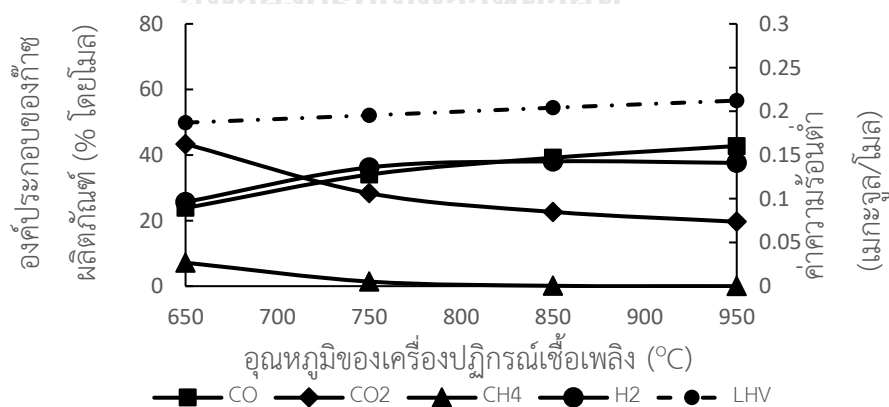
แบบที่ 2 ดำเนินการศึกษาอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ที่ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุลเท่ากับ 0.6 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงภายใต้สถานะดำเนินการแบบที่ 1-3 โดยแสดงในรูปที่ 5.10-5.11 ตามลำดับ จากรูป 5.10 ที่สถานะความดัน 1 บาร์ ค่า  $\Omega$  เท่ากับ 0.4 พิจารณาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่ 650 °C ค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิในช่วงอื่น ซึ่งตรงข้ามกับค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่มีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนหลัก (ปฏิกิริยา Boudouard, Steam gasification และ Steam reforming ) เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน นอกจากนี้ปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซไฮโดรเจนใช้ก๊าซมีเทนเป็นสารตั้งต้นจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซมีเทนลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์มีค่าไม่แตกต่างกันมากแม้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพิ่ม เนื่องจากค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์พิจารณาจากค่าสัดส่วนโดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจนและค่าความร้อนของก๊าซดังกล่าวซึ่งค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซมีเทนมีค่ามากกว่าค่าความร้อนต่ำของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนประมาณ 4 เท่า ดังนั้นแม้ว่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงสูงขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่ำ

ของก๊าซสังเคราะห์พบว่า การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนไม่สามารถส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นได้ซึ่งเป็นผลมาจากก๊าซมีเทนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลลดลง อย่างไรก็ตามที่สภาวะการดำเนินการแบบที่ 2 มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับที่สภาวะดำเนินการแบบที่ 1 แต่อย่างไรก็ตามที่สภาวะดำเนินการแบบที่ 2 ค่า  $\Omega$  มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ออกซิเจนที่เข้าสู่กระบวนการเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะดำเนินการแบบที่ 2 มีค่ามากกว่าแบบที่ 1 ในขณะที่เปอร์เซ็นต์โดยโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซมีเทนและไฮโดรเจนในสภาวะดำเนินการแบบที่ 2 มีค่าน้อยกว่าแบบที่ 1 ดังนั้นค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ที่สภาวะดำเนินการที่ 2 มีค่าน้อยกว่าแบบที่ 1



รูปที่ 5.10 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 1



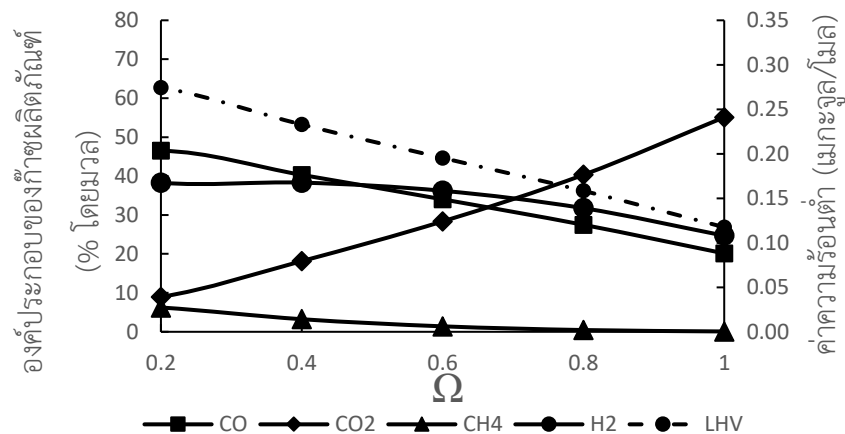
รูปที่ 5.11 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะดำเนินการแบบที่ 2

### 5.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอย ( $\Omega$ )

เนื่องจากนิกเกิลออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวพาออกซิเจนในกระบวนการเนื่องด้วยกระบวนการเคมีคอลลูปิงแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่มีจุดประสงค์ในการออกซิไดซ์สารตั้งต้นโดยจำกัดออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ (Partial oxidation) ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอยจึงเป็นตัวแปรกระบวนการที่สำคัญที่ส่งผลจากกระบวนการซึ่งพิจารณาองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์ จากเหตุผลข้างต้นจึงเป็นผลให้ดำเนินการศึกษาผลของตัวแปรดังกล่าว โดยการศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการนี้ดำเนินการภายใต้สภาวะการดำเนินงานที่อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอย ที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ ปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลจากการศึกษาตัวแปรกระบวนการที่มีต่อองค์ประกอบก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนที่ได้จากก๊าซแสดงในรูปที่ 5.12 พิจารณาได้ว่าแนวโน้มของแก๊สผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) และก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ที่เกิดขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอยเพิ่มขึ้นจะมีลักษณะที่ต่างกันไป โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนจะเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อค่า  $\Omega$  มากกว่า 0.6 แต่อย่างไรก็ตามมีเพียงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับหลักการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกล่าวคือเมื่อค่า  $\Omega$  เพิ่มขึ้นแสดงถึงปริมาณออกซิเจนที่ออกซิไดซ์คาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์เพิ่มขึ้นตามซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาในสมการที่ (5.1) ถึง (5.2) ด้วยเหตุนี้ค่าเปอร์เซ็นต์โดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น จากแนวโน้มขององค์ประกอบก๊าซที่กล่าวมาแล้วส่งผลให้เมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่ำสุดซึ่งขึ้นกับสัดส่วนโดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน พบว่าเมื่อค่า  $\Omega$  เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนต่ำสุดมีค่าลดลงเนื่องมาจากแนวโน้มของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจนมีค่าลดลง





รูปที่ 5.12 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอย ( $\Omega$ ) ต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้และก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่าตัวแปรกระบวนการจะส่งผลในทางตรงข้ามกันระหว่างผลที่มีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้และก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยถ้าความดันกระบวนการและอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอยเพิ่มขึ้นจะส่งผลดีต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ซึ่งพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ลดลงแต่ปริมาณก๊าซที่เกิดจะลดลงเช่นกันซึ่งเป็นผลเสียต่อกระบวนการ ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลเสียต่อกระบวนการแต่การเพิ่มดังกล่าวจะส่งผลให้ก๊าซสังเคราะห์เกิดมากขึ้นซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาอิทธิพลของตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเพื่อที่จะสรุปได้ว่าตัวแปรกระบวนการดังกล่าวส่งผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

#### 5.4 ผลกระทบของตัวแปรต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

จากการศึกษาผลของตัวแปรของกระบวนการที่มีต่อค่าความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการและองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์นำไปสู่การพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชัน โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency:  $\eta$ ) ซึ่งคำนวณจากความร้อนที่ได้จากความร้อนของก๊าซสังเคราะห์เทียบกับความร้อนที่ใช้ในกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชันซึ่งพิจารณาค่าพลังงานความร้อนสุทธิในกระบวนการและค่าความร้อนต่ำสุดของขยะมูลฝอยที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการดังสมการ (5.3)



ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชิงความร้อนของกระบวนการเคมีคอลลูบึงแก๊สซิพีเคชั่น

$$\eta (\%) = \frac{\text{พลังงานที่ได้จากแก๊สสังเคราะห์}}{\text{พลังงานสุทธิที่เข้าสู่กระบวนการ}} = \frac{\text{LHV}_{\text{syngas}} \times \dot{N}_{\text{syngas}}}{Q + (\text{LHV}_{\text{MSW}} \times \dot{m}_{\text{MSW}})} \times 100 \quad (5.3)$$

กำหนดให้

$\eta$  คือ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ

$\text{LHV}_{\text{syngas}}$  คือ ค่าความร้อนต่ำของแก๊สสังเคราะห์ มีหน่วยเป็น เมกะจูลต่อโมล

$\dot{N}_{\text{syngas}}$  คือ ค่าอัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สสังเคราะห์ มีหน่วยเป็น โมลต่อชั่วโมง

$Q$  คือ ค่าพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ในกระบวนการ มีหน่วยเป็น เมกะจูลต่อชั่วโมง

$\text{LHV}_{\text{MSW}}$  คือ ค่าความร้อนต่ำของขยะมูลฝอย มีหน่วยเป็น เมกะจูลต่อกิโลกรัม

$\dot{m}_{\text{MSW}}$  คือ ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของขยะมูลฝอย มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อย่างไรก็ตามขยะมูลฝอยเป็นสารอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลที่หลากหลายเนื่องจากสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบของขยะมูลฝอยมีค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นกับแหล่งที่มาและองค์ประกอบของขยะมูลฝอยด้วยเหตุนี้ค่าความร้อนของขยะมูลฝอยจึงมาจากประมาณค่าจากการคำนวณค่าความร้อนโดยพิจารณาจากสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบของขยะมูลฝอย โดยการประมาณค่าค่าความร้อนของขยะชุมชนจากสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของขยะมูลฝอยมาจากการประยุกต์สมการดูลองก์ (Modified Dulong's equation) ซึ่งแสดงในสมการ (5.4) และ (5.5) (Shi และคณะ, 2016)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 0.349 \cdot C + 1.01 \cdot H - 0.174 \cdot N + 0.886 \cdot S - 0.0812 \cdot O \quad (5.4)$$

กำหนดให้ C, H, N, S, O คือ ค่าร้อยละโดยมวลของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ตามลำดับ โดยมาจากการวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุองค์ประกอบอย่างละเอียด (Ultimate analysis) ที่สภาวะมวลแห้ง (dry basis)

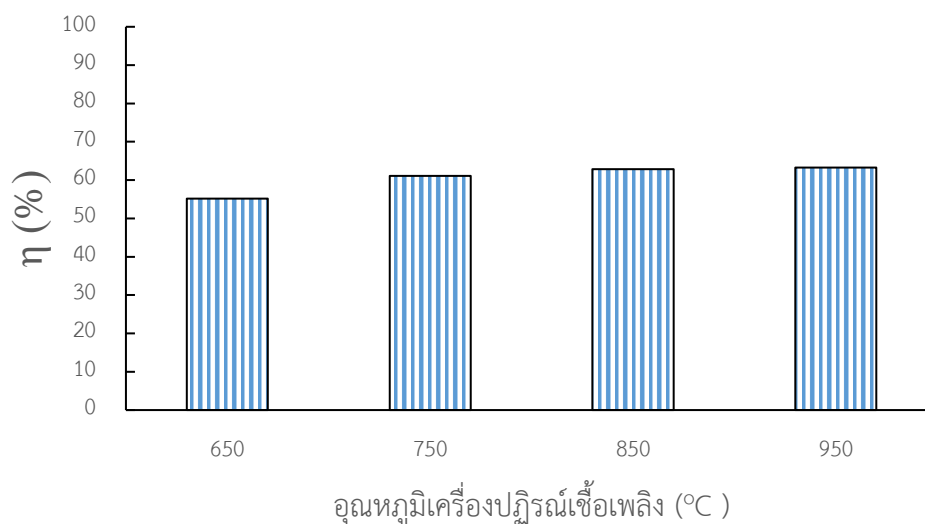
$$\text{HHV (MJ/kg)} = \text{LHV} + h_{\text{H}_2\text{O}} \quad (5.5)$$

กำหนดให้  $h_{\text{H}_2\text{O}}$  คือ ค่าความร้อนจากการกลายเป็นไอของไอน้ำ ที่ 25 °C มีค่าเท่ากับ 2.445 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

#### 5.4.1 ผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการลดค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า เมื่ออุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงสูงขึ้นพบว่าพลังงานความร้อนที่ใช้มีค่าเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนภายใต้สภาวะดำเนินงานที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ที่ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุลเท่ากับ 0.4 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิช่วง 650 ถึง 750 °C มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดแต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 750 °C การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเริ่มคงที่เป็นผลมาจากที่อุณหภูมิไม่สูงมากจึงทำให้กระบวนการต้องการใช้พลังงานความร้อนน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง อีก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 850 °C พบว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

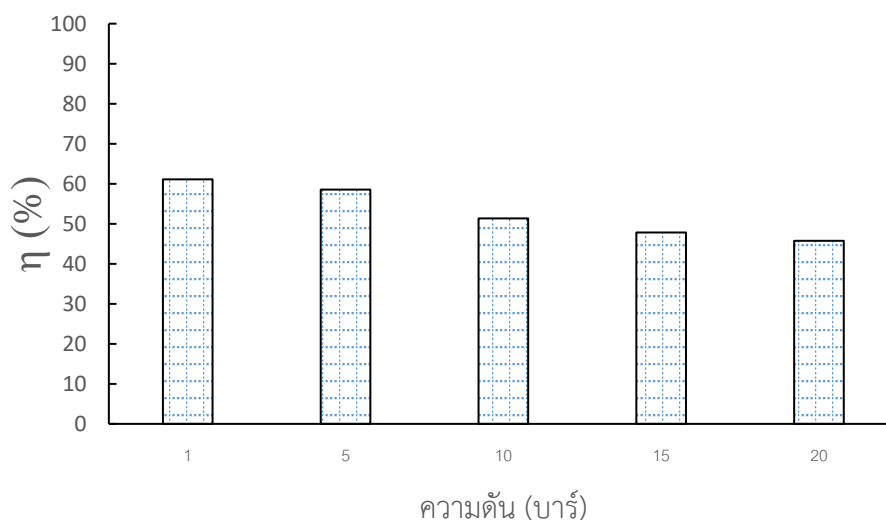


รูปที่ 5.13 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ

#### 5.4.2 ผลของความดันของกระบวนการ

จากการศึกษาผลของความดันของกระบวนการที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการลดค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมา ด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาผลความดันของกระบวนการที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนภายใต้สภาวะดำเนินงานที่ความดันของกระบวนการ ที่อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.4 และปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันของกระบวนการที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแสดงในรูปที่ 5.14 ซึ่งพบว่าที่ความดันของกระบวนการ 1 บาร์มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่สภาวะดำเนินการเดียวกัน โดยที่สภาวะดำเนินงานที่ความดันเพิ่มขึ้นแม้ว่าจะทำให้กระบวนการใช้พลังงานความร้อนลดลงแต่เนื่องจากการเพิ่มความดันส่งผลต่อปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงจึงทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซสังเคราะห์มีค่าลดลงอย่างมากจนส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแม้ว่ากระบวนการจะใช้พลังงานความร้อนลดลงก็ตาม



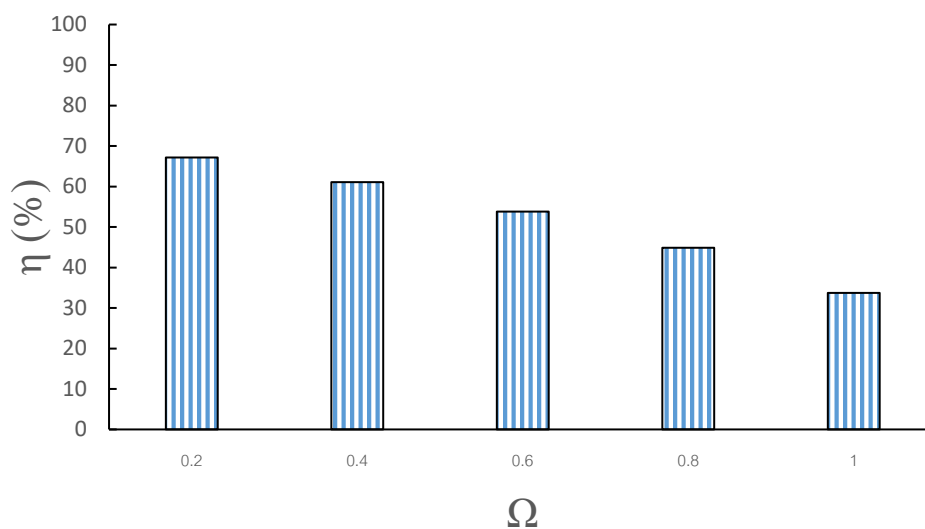
รูปที่ 5.14 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ

#### 5.4.3 ผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยที่มีต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการลดค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมา

มา ด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาผลของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอยที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนภายใต้สภาวะดำเนินงานที่อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอย ที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 750 °C ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ ปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอยที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแสดงในรูปที่ 5.15 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอยเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ อันเนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลเสียต่อก๊าซสังเคราะห์ที่ได้ โดยก๊าซที่ได้จากกระบวนการเป็นก๊าซสังเคราะห์บางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากค่าความร้อนต่ำของก๊าซสังเคราะห์ลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลงด้วย แม้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลให้พลังงานความร้อนที่เข้าสู่กระบวนการมีมากขึ้นก็ตาม



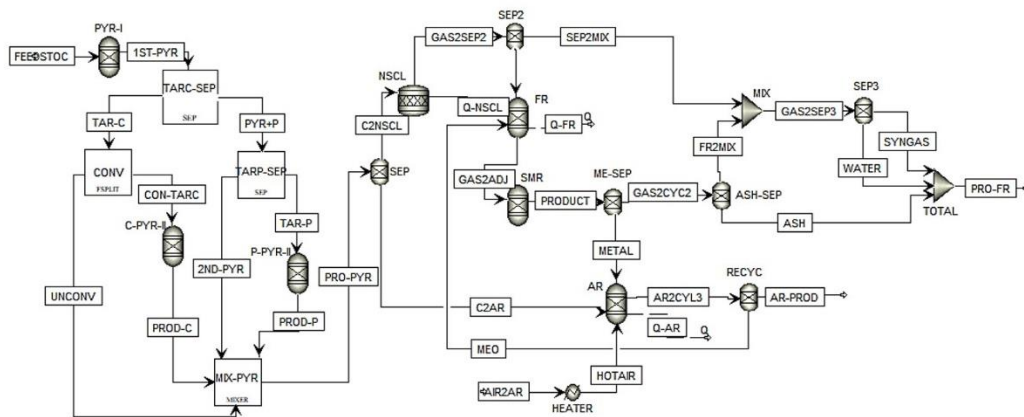
**รูปที่ 5.15** ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอยที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน

จากการศึกษาตัวแปรกระบวนการได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ความดันของกระบวนการ และอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะมูลฝอย ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเคมีคอลลูบปิงแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงที่มากกว่า 850 °C แม้เพิ่มความดันของกระบวนการแต่ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่

เพิ่มขึ้นได้ เมื่อพิจารณาผลของความดันพบว่าที่ความดัน 1 และ 5 บาร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงขึ้นภายใต้สภาวะของค่า  $\Omega$  บางค่าและผลการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขณะสมดุลส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการศึกษาตัวแปรกระบวนการดังกล่าวพิจารณาที่จำกัดสภาวะดำเนินงานไว้ที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นการจะสรุปให้ได้ว่ากระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันสามารถผลิตพลังงานความร้อนจากก๊าซสังเคราะห์ได้จากขยะมูลฝอยที่มีความชื้นสูงจึงจำเป็นต้องหาทุกช่วงของค่าตัวแปรทั้งหมดพร้อมๆกัน จึงนำไปสู่หัวข้อหาสภาวะที่เหมาะสมซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้การดำเนินงานที่สภาวะการใช้พลังงานความร้อนอย่างเพียงพอ

### 5.5 วิเคราะห์หาสภาวะดำเนินการที่มีเหมาะสมกับกระบวนการ

จากการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าการผลของตัวแปรทั้งหมดส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ไม่เหมือนกัน บางสภาวะดำเนินการให้ค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์มากที่สุดแต่ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กระบวนการใช้ความร้อนจากภายในกระบวนการอย่างเพียงพอหรือที่สภาวะดำเนินการดังกล่าวสามารถดำเนินการภายใต้การใช้ความร้อนภายในกระบวนการอย่างเพียงพอแต่ให้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องหาสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการอย่างเพียงพอ ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การแก้ปัญหาการหาค่าตัวแปรกระบวนการที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดภายใต้เงื่อนไขค่าพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้ในกระบวนการมีค่าน้อยกว่าเท่ากับศูนย์ ( $Q \leq 0$ ) เนื่องจากค่าพลังงานความร้อนสุทธิที่ใช้บ่งบอกถึงกระบวนการเป็นดูดหรือคายความร้อน โดยกระบวนการจะต้องการพลังงานความร้อน (ดูดความร้อน) เมื่อค่าเป็นบวก แต่หากค่าเป็นลบแสดงถึงกระบวนการให้ความร้อนออกมา (คายความร้อน) โดยการแก้ปัญหาใช้โปรแกรมเอสเพน พลัส เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งการจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้สำหรับการแก้ปัญหาในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากที่สุดเป็นไปตามรูปที่



รูปที่ 5.16 แบบจำลองกระบวนการเคมีคอลูปปิ้งแก๊สซิฟิเคชันของขยะมูลฝอย

สำหรับปัญหาที่ต้องการแก้เพื่อให้ได้สถานะที่ต้องการแสดงในสมการวัตถุประสงค์ของปัญหา (Objective function) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ (5.6)

$$\text{Objective function} \quad \max_i \eta_{\text{thermal}} \quad (5.6)$$

กำหนดให้  $i$  คือ ตัวแปรออกแบบ (Design variables) ได้แก่ อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ เชื้อเพลิง ความดันกระบวนการ และอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย

การแก้ปัญหาตามสมการ (5.6) จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้พลังงานความร้อนภายในกระบวนการอย่างเพียงพอซึ่งแสดงในสมการเงื่อนไข (Constraints function) ตามสมการ (5.8) โดยพิจารณาพลังงานความร้อนสุทธิจากหน่วยจำลองในกระบวนการตามสมการ (5.6) และจำกัดขอบเขตของการพิจารณาการแก้ปัญหาดังกล่าวตามสมการที่ (5.9) – (5.11)

$$Q_{\text{Total}} \text{ (MJ/h)} = Q_{\text{PYR-I}} + Q_{\text{C-PYR-II}} + Q_{\text{P-PYR-II}} + Q_{\text{NSCL}} + Q_{\text{FR}} + Q_{\text{SMR}} + Q_{\text{AR}} + Q_{\text{HEATER}} \quad (5.7)$$

กำหนดให้  $Q_{\text{PYR-I}}$ ,  $Q_{\text{C-PYR-II}}$ ,  $Q_{\text{P-PYR-II}}$ ,  $Q_{\text{NSCL}}$ ,  $Q_{\text{FR}}$ ,  $Q_{\text{SMR}}$ ,  $Q_{\text{AR}}$ ,  $Q_{\text{HEATER}}$  คือ ค่าภาระทางความร้อน (Heat duty) ของหน่วยจำลอง PYR-I, C-PYR-II, P-PYR-II, NSCL, FR, SMR, AR และ HEATER ตามลำดับ

$$\text{Constraint function} \quad Q_{\text{Total}} \leq 0 \quad (5.8)$$

$$650 \leq T_{\text{fuel reactor}} \leq 950 \quad (5.9)$$

$$1 \leq P \leq 20 \quad (5.10)$$

$$0 \leq \Omega \leq 1 \quad (5.11)$$

กำหนดให้

$T_{\text{fuel reactor}}$  (°C) คือ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วยหน่วยจำลอง PYR-I, C-PYR-II, P-PYR-II, NSCL, FR และ SMR

P (บาร์) คือ ความดันของกระบวนการซึ่งประกอบด้วยหน่วยจำลอง PYR-I, C-PYR-II, P-PYR-II, NSCL, FR, SMR และ AR

$\Omega$  คือ อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย โดยกำหนดให้ปริมาณสัดส่วนของนิกเกิลออกไซด์ในตัวพาออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 15 % โดยมวล

เมื่อกำหนดสมการเพื่อแก้ปัญหาและเงื่อนไขพร้อมขอบเขตเพื่อให้สถานะที่เหมาะสม โดยใช้เครื่องมือแก้ปัญหาคือโปรแกรมสำเร็จรูปเอสเพน พลัส พบว่าที่สถานะที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงสุดโดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการได้อย่างเพียงพอ เป็นไปตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรกระบวนการที่ทำให้สถานะดำเนินการมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด

ตัวแปรกระบวนการ	สถานะที่เหมาะสม
อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ( $T_{\text{fuel reactor}}$ )	717.2 °C
ความดันของกระบวนการ (P)	1 บาร์
อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย ( $\Omega$ )	0.2585

ผลจากการแก้ปัญหาเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่ทำให้กระบวนการเคมีคอลูปปิ้งแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดโดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการอย่างเพียงพอ คือค่าตัวแปรกระบวนการทั้ง 3 ค่า เมื่อทำการดำเนินการภายใต้สถานะดำเนินการพบว่าจะได้ค่าองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์และค่าความร้อนต่ำสุดของแก๊สสังเคราะห์ ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สุทธิของกระบวนการและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นไปตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลจากการดำเนินการภายใต้สภาวะที่ได้จากการแก้ปัญหา

อุณหภูมิ (°C)	ความ ดัน (บาร์)	$\Omega$	องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์				LHV (MJ/mol)	พลังงาน	
			(% โดยโมล)					ความร้อน ที่ใช้ (MJ)	$\eta$ (%)
			CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>			
717.2	1	0.26	43.12	14.44	8.13	34.31	0.2704	-2.049	64.49





## บทที่ 6

### สรุปผลการจำลองกระบวนการและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

จากการศึกษาการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะมูลฝอยด้วยกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ตัวพาออกซิเจนคือนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมเอสเพน พลัส พบว่าตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอย และความดันของกระบวนการ อย่างไรก็ตามเพื่อให้แบบจำลองกระบวนการมีความใกล้เคียงกระบวนการจริงจึงได้มีการจำลองการเกิดทาร์ในกระบวนการด้วยเนื่องจากขยะมูลฝอยเป็นสารที่มีความชื้นสูง โดยพบว่าทาร์จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนสูงซึ่งส่งผลต่อพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ แต่จากการพิจารณาที่สถานะดำเนินการที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงสูงกว่า  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในการกลั่นสลายทาร์เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน แต่กระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันสามารถจัดการพลังงานความร้อนภายในกระบวนการได้อย่างเพียงพอ โดยการเพิ่มค่าอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะ แม้ว่าค่าการเพิ่มปริมาณนิกเกิลออกไซด์ในกระบวนการจะสามารถทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดในกระบวนการมีเพิ่มขึ้น แต่ผลเสียที่เกิดตามมาคือความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุนี้การเพิ่มอัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลงได้ ด้วยเหตุนี้จึงต้องหาสถานะที่เหมาะสมที่สามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะที่มีความชื้นสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยมวลจากกระบวนการเคมีคอลลูบิงแก๊สซิฟิเคชันให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยยังสามารถใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการได้อย่างเพียงพอ การแก้ปัญหาดังกล่าวได้ใช้เครื่องมือจากโปรแกรมเอสเพน พลัสซึ่งได้ค่าของตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสม โดยอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเท่ากับ  $717.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความดันของกระบวนการ 1 บาร์ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อากาศเท่ากับ  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราส่วนของนิกเกิลออกไซด์ต่อคาร์บอนในขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.2585 ซึ่งที่สถานะดำเนินการดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าสัดส่วนโดยโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 0.4312 สัดส่วนโดยโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.1444 สัดส่วนโดยโมลของก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.0813 สัดส่วนโดยโมลของก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 0.3431 และให้ค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์เท่ากับ 0.2704 เมกะจูลต่อโมล โดยค่าพลังงานความร้อนของกระบวนการมีค่าเท่ากับ -2.049 เมกะจูลแสดงให้เห็นว่ากระบวนการยังคงคายความร้อนออกมาจึงไม่

ต้องการความร้อนจากภายนอก จากค่าความร้อนต่ำสุดของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้และค่าพลังงานความร้อนสุทธิของกระบวนการทำให้พิจารณาได้ว่าประสิทธิภาพสูงสุดที่กระบวนการนี้มีค่าเท่ากับ 64.49 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์จากขยะที่มีความชื้นสูงได้โดยมีประสิทธิภาพมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยที่กระบวนการสามารถจัดการความร้อนได้ด้วยตัวเอง

## 6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย

จากการศึกษาที่ผ่านมาแม้ว่าจะสามารถทราบถึงผลของตัวแปรกระบวนการที่มีต่อก๊าซสังเคราะห์ที่ได้และประสิทธิภาพของกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามการหาสภาวะที่เหมาะสมเป็นเพียงส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาให้เห็นถึงมุมมองที่กว้างเกี่ยวกับกระบวนการแปรรูปขยะให้เป็นพลังงานด้วยกระบวนการเคมีคอลลูบปีงแก๊สซิฟิเคชัน แต่การจะพิจารณาถึงมุมมองที่หลากหลายมิติควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ใช้กระบวนการนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเคมีคอลลูบปีงนี้ยังขาดการศึกษาในเชิงของเศรษฐศาสตร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการลงทุน การพิจารณาประสิทธิภาพที่ได้เทียบกับกระบวนการอื่นๆที่ใช้เพื่อแปรรูปขยะให้เป็นพลังงาน และควรมีการศึกษาเชิงจลศาสตร์ของตัวปฏิกิริยาที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวเพื่อให้สามารถพิจารณาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการที่ใกล้เคียงสภาวะจริงมากขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองควรได้รับการพัฒนาการพิจารณาการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้เนื่องจากค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ที่ได้ยังมีเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นอาจมีการเพิ่มตัวแปรกระบวนการเช่น การป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ เป็นต้น

## บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

พลังงาน, กระทรวง.กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย [ออนไลน์] 2556. แหล่งที่มา <http://www.dede.go.th>.

ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย [ออนไลน์] 2559. แหล่งที่มา <http://www.pcd.go.th>

Adnan, M., and Hossain, M. (2018). Gasification performance of various microalgae biomass – A thermodynamic study by considering tar formation using Aspen plus. *Energy Conversion and Management*, 165: 783-93.

Adnan, M., Susanto, H., Binous, H., Muraza, O., and Hossain, M. (2017). Enhancement of hydrogen production in a modified moving bed downdraft gasifier – A thermodynamic study by including tar. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 10971-85.

Aleisa, E., and Rawa, A. (2018). A triple bottom line evaluation of solid waste management strategies: a case study for an arid Gulf State, Kuwait. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23: 1460-75.

Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Manag*, 32: 625-39.

Arthur, JR. (1951). Reactions between carbon and oxygen. *Transactions of the Faraday Society*, 47: 164-78.

Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. First edition. Academic press.

Belgiorno, V., G. De Feo, C. Della Rocca, and R. M. A. Napoli. 2003. Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*, 23: 1-15.

Berguerand, N., Lind, F., Israelsson, M., Seemann, M., Biollaz, S., and Thunman, H. (2012). Use of Nickel Oxide as a Catalyst for Tar Elimination in a Chemical-Looping Reforming Reactor Operated with Biomass Producer Gas. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51: 16610-16.

Cao, Y., and Wei-Ping, P. (2006). Investigation of Chemical Looping Combustion by Solid Fuels. *Energy and Fuels*, 20: 1836-44.

- Doherty, W., Reynolds, A., and Kennedy, D. (2013). Aspen Plus simulation of biomass gasification in a steam blown dual fluidised bed. *Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments*. Méndez-Vilas edition. Formatex Research Centre.
- Dong, J., Chi, Y., Tang, Y., Ni, M., Nzihou, A., Weiss-Hortala, E., and Huang, Q. (2016). Effect of Operating Parameters and Moisture Content on Municipal Solid Waste Pyrolysis and Gasification. *Energy and Fuels*, 30: 3994-4001.
- Fagbemi, L., Khezami, L., and Capart, R. (2001). Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. *Applied Energy*, 69: 293-306.
- Fernandez-Lopez, M., Pedroche, J., Valverde, J. L. and Sanchez-Silva, L. (2017). Simulation of the gasification of animal wastes in a dual gasifier using Aspen Plus®. *Energy Conversion and Management*, 140: 211-17.
- Hla, S. (2004). A Theoretical and Experimental Study on a Stratified Downdraft Biomass Gasifier. PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Huang, Q., Lu, P., Hu, B., Chi, Y., and Yan, J. (2016). Cracking of Model Tar Species from the Gasification of Municipal Solid Waste Using Commercial and Waste-Derived Catalysts. *Energy and Fuels*, 30: 5740-48.
- Johari, A., Hashim, H., Mat, R., Alias, H., Hassim, M., Rozzainee, M. (2012). Generalization, formulation and heat contents of simulated MSW with high moisture content. *Journal of Engineering Science and Technology*, 7: 701-10.
- Kaewluan, S., and Suneerat, P. (2011). Gasification of high moisture rubber woodchip with rubber waste in a bubbling fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 92: 671-77.
- Kinoshita, C. M., Wang, Y., and Zhou, J. (1994). Tar formation under different biomass gasification conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 29: 169-81.
- Kruse, A. (2009). Hydrothermal biomass gasification. *The Journal of Supercritical Fluids*, 47: 391-99.
- Li, F., Liang, Z. and Liang-Shih, F. (2010). Biomass direct chemical looping process: Process simulation. *Fuel*, 89: 3773-84.

- Liu, L., Yan, C., Dongran, M., Qingcai, L., and Jian, Y. (2017). Process simulation of coal-direct chemical looping gasification for syngas production. *RSC Advances*, 7: 55450-58.
- Maniatis, K., and Beenackers, A. (2000). Tar Protocols. IEA Bioenergy Gasification Task. *Biomass and Bioenergy*, 18, 1-4.
- Marx, K., Johannes, B., Tobias, P., and Hermann, H. (2011). Chemical looping combustion for power generation—Concept study for a 10MWth demonstration plant. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5: 1199-205.
- Milne, T. A., Evans, R. J., and Abatzaglou, N. (1998). Biomass gasifier "Tars": their nature, formation, and conversion. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO (US).
- Niu, M., Yaji, H., Baosheng, J., and Xinye, W. (2013). Simulation of Syngas Production from Municipal Solid Waste Gasification in a Bubbling Fluidized Bed Using Aspen Plus. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52: 14768-75.
- Pröll, T., Philipp, K., Johannes, B., and Hermann, H. (2011). Chemical looping pilot plant results using a nickel-based oxygen carrier. *Oil and Gas Science and Technology—Revue d'IFP Energies nouvelles*, 66: 173-80.
- Ramzan, N., Asma, A., Shahid, N., and Abdullah, M. (2011). Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. *Biomass and Bioenergy*, 35: 3962-69.
- Shi, H., Mahinpey, N., Aqsha, A., and Silbermann, R. (2016). Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Manag*, 48: 34-47.
- Tian, X., Niu, P., Ma, Y., and Zhao, H. (2018). Chemical-looping gasification of biomass: Part II. Tar yields and distributions. *Biomass and Bioenergy*, 108: 178-89.
- Wang, J., Gong, C., Yanli, Y., Bo, X., Shiming, L., Piwen, H., Dabin, G., Xianjun, G., and Guijuan, Z. (2012). Hydrogen-rich gas production by steam gasification of municipal solid waste (MSW) using NiO supported on modified dolomite. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37: 6503-10.

- Wu, C., Yin, X., Ma, L., Zhou, Z., and Chen, H. (2009). Operational characteristics of a 1.2-MW biomass gasification and power generation plant. *Biotechnology Advances*, 27: 588-92.
- Yakaboylu, O., John, H., Smit, K. and Wiebren, J. (2015). Supercritical Water Gasification of Biomass: A Literature and Technology Overview. *Energies*, 8: 859-94.
- Zeng, J., Xiao, R., Zeng, D., Zhao, Y., Zhang, H., and Shen, D. (2016). High H<sub>2</sub>/CO Ratio Syngas Production from Chemical Looping Gasification of Sawdust in a Dual Fluidized Bed Gasifier. *Energy and Fuels*, 30: 1764-70.
- Zeng, J., Xiao, R., Zhang, H., Chen, X., Zeng, D., and Ma, Z. (2017). Syngas production via biomass self-moisture chemical looping gasification. *Biomass and Bioenergy*, 104: 1-7.
- Zeng, J., Xiao, R., Zhang, H., Wang, Y., Zeng, D., and Ma, Z. (2017). Chemical looping pyrolysis-gasification of biomass for high H<sub>2</sub>/CO syngas production. *Fuel Processing Technology*, 168: 116-22.
- Zeng, L., He, F., Li, F., and Fan, L. (2012). Coal-Direct Chemical Looping Gasification for Hydrogen Production: Reactor Modeling and Process Simulation. *Energy and Fuels*, 26: 3680-90.
- Zhang, Q., Dor, L., Zhang, L., Yang, W., and Blasiak, W. (2012). Performance analysis of municipal solid waste gasification with steam in a Plasma Gasification Melting reactor. *Applied Energy*, 98: 219-29.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาว นฤต พรมศรีชา
วัน เดือน ปี เกิด	8 กรกฎาคม 2530
สถานที่เกิด	จังหวัด ร้อยเอ็ด
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	370 ถ. อนรรฆนาค ต. กาฬสินธุ์ อ. เมือง จ. กาฬสินธุ์
ผลงานตีพิมพ์	Direct chemical-looping gasification of municipal solid waste: Process analysis and evaluation



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY