

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการแก๊สซีฟิเคชันของสารชีวมวล  
โดยใช้พลังงานอิสระกิบส์



นาย สุภศักดิ์ แก้ววิชิต

สถาบันวิทยบริการ  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MATHEMATICAL MODELS OF BIOMASS GASIFICATION PROCESSES  
USING GIBBS FREE ENERGY



Mr. Supasak Kaewwichit

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2006

Copyright of Chulalongkorn University



ศุภศักดิ์ แก้ววิจิต : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล โดยใช้พลังงานอิสระกิบส์. (MATHEMATICAL MODELS OF BIOMASS GASIFICATION PROCESSES USING GIBBS FREE ENERGY) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช, 125 หน้า.

สารชีวมวลจากแกลบ ฟางข้าว เปลือกอัลมอนต์ เศษไม้ยางพารา ชานอ้อยและซังข้าวโพด ถูกจำลองได้ด้วยกลุ่มสารประกอบของฟีนิล โพรเพน ( $C_9H_8O$ ) กลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ) เพนโตส ( $C_5H_{10}O_5$ ) และ แอลกอฮอล์โมเลกุลใหญ่ ( $C_{28}H_{58}O$ ) เครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงถูกจำลองได้ด้วยแบบจำลองลำดับเครื่องปฏิกรณ์สมดุลเคมีที่ปฏิบัติการแบบแอเดียติกของปฏิกิริยาไฟโรไลซิส ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอน ปฏิกิริยากำจัดกำร ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของธาตุคาร์บอน ปฏิกิริยาการเติมน้ำของธาตุคาร์บอน ปฏิกิริยาการเติมน้ำของคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยาการสังเคราะห์มีเทนจากคาร์บอนมอนอกไซด์ ในขณะที่เครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิด ไคซ์ที่ปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัลถูกจำลองได้ด้วยเครื่องปฏิกรณ์สมดุลเคมีที่ซึ่งทุกๆ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกัน อุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์จะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้นและอุณหภูมิจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สายตัวออกซิไดซ์ การเปลี่ยนอุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์นี้ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สสังเคราะห์เปลี่ยนไป นอกจากนี้ แก๊สผลิตภัณฑ์จากเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงจะมีความร้อนเหลือใช้ 1,900 กิโลจูลต่อกิโลกรัมสารชีวมวล ที่อุณหภูมิ 940 เคลวิน ในขณะที่แก๊สผลิตภัณฑ์จากเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิด ไคซ์มีความร้อนเหลือใช้ 2,600 กิโลจูลต่อกิโลกรัมสารชีวมวล ที่อุณหภูมิ 1,100 เคลวิน

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต..... ศุภศักดิ์ แก้ววิจิต  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... เดชา ฉัตรศิริเวช  
ปีการศึกษา .....2549.....

# # 4870496021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : BIOMASS MODEL / GASIFICATION MODEL / CHEMICAL EQUILIBRIAM /  
DOWNDRAFT GASIFIER/ FLUIDZED GASIFIER

SUPASAK KAEWWICHIT : MATHEMATICAL MODELS OF BIOMASS  
GASIFICATION PROCESSES USING GIBBS FREE ENERGY. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D., 125 pp.

Biomasses from rice husk, rice straw, almond shell, parawood, bagasse, and corncob have been modeled as a mixture of phenylpropane ( $C_9H_9O$ ), glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ), pentose ( $C_5H_{10}O_5$ ) and high molecule alcohol ( $C_{28}H_{38}O$ ) correspondingly. Downdraft gasifier has been represented by a series of adiabatic equilibrium reactors of pyrolysis, oxidation, Boudouard reaction, hydro-gasification, steam-gasification, water-gas shift reaction, and methanation. While a fluidized gasifier has been represented by an isothermal equilibrium reactor, in which all reactions occur simultaneously. The temperature of a gasifier can be reduced by increase in the moisture content, or can be raised by preheating the oxidizing gas. Consequently, the gas composition of synthesis gas produced has been shifted. In addition to gaseous products, the downdraft gasifier has produced heat 1,900 kJ/kg biomass at 940 K, while the fluidized gasifier has been produced heat 2,600 kJ/kg biomass at 1,100 K.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Engineering.....Student's Signature.....*Supasak Knewwichit*

Field of Study.....Chemical Engineering.....Advisor's Signature.....*Deecha Chatsiriwech*

Academic Year .....2006.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัทรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำและการดูแลเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา รวมทั้งกรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์ที่มีความสมบูรณ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดามารดา ญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ซึ่งคอยเป็น กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	๗
สัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ด
<b>บทที่</b>	
1 สารชีวมวลและแก๊สสังเคราะห์.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ศักยภาพของชีวมวลเพื่อเป็นแหล่งพลังงานของประเทศไทย.....	2
1.3 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์.....	4
1.4 การใช้ประโยชน์ของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	6
1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	7
1.6 ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
1.7 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	8
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล.....	10
2.1 คุณสมบัติสารชีวมวลที่เกี่ยวข้องต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	11
2.1.1 ข้อมูลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis).....	11
2.1.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ(Ultimate Analysis).....	13
2.1.3 ข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี(Chemical Compound Analysis).....	14
2.2 กระบวนการเปลี่ยนสารชีวมวลเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์.....	15
2.2.1 การเตรียมสารชีวมวลก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์.....	15
2.2.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	16
2.2.2.1 ไพโรไลซิส.....	16
2.2.2.1 ออกซิเดชัน.....	17
2.2.2.1.1 ออกซิเดชันเพียงบางส่วน.....	17

บทที่	หน้า
2.2.2.1.2 ออกซิเดชันระหว่างแก๊สผลิตภัณฑ์.....	17
2.2.2.1.3 Boudouard equation.....	17
2.2.2.2 รีดักชัน.....	18
2.2.3 การกำจัดกากของแข็งที่ปนอยู่ในแก๊สผลิตภัณฑ์.....	19
2.3 เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์.....	19
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเคชัน.....	22
3.1 การคำนวณทางอุณหพลศาสตร์.....	23
3.1.1 การแก้ระบบสมการโดยใช้ค่าคงที่สมดุลเคมี.....	23
3.1.2 การแก้ระบบสมการโดยใช้การคำนวณพลังงานอิสระของกิบส์ต่ำที่สุด.....	27
3.1.2.1 การดุลอะตอมมวลสาร.....	27
3.1.2.1 การดุลพลังงาน.....	27
3.1.2.3 การคำนวณ องค์ประกอบของแก๊สที่สมดุล.....	29
4 วิธีการจำลองกระบวนการการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวล.....	32
4.1 การสร้างแบบจำลองสารชีวมวลเพื่อใช้แทนสารชีวมวล (Biomass model).....	32
4.2 การสร้างแบบจำลองของระบบปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเคชัน (Gasification model).....	34
4.2.1 ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิไฟเคชัน ของสารชีวมวล.....	34
4.2.2 การหาสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จากแบบ จำลองกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันโดยใช้วิธีการจัดลำดับของปฏิกิริยา.....	36
4.2.2.1 แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวล โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	37
4.2.2.2 แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวล โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์.....	39
4.3 การตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวลและแบบจำลองกระบวนการ แก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวล.....	40
4.3.1 การตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวล.....	40
4.3.2 การตรวจสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวล.....	41
4.4 การทดสอบแบบจำลองที่พัฒนา.....	41
4.5 การประเมินพลังงานสำหรับกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวล.....	41



บทที่	หน้า
5 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล.....	42
5.1 ผลการพิจารณากลุ่มสารประกอบที่ใช้แทนสารชีวมวล.....	43
5.2 ผลการสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	52
5.2.1 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้ อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	52
5.2.1.1 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ภายในเครื่องแก๊สซิฟิเออร์ แบบอากาศไหลลง.....	53
5.2.1.1 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ภายในเครื่องแก๊สซิฟิเออร์ แบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	61
5.2.2 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดย ใช้น้ำเป็นตัวออกซิไดซ์.....	63
5.3 ผลการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนา.....	66
5.3.1 ผลการทดสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	66
5.3.1.1 ผลการเปลี่ยนสัดส่วนโดยมวลระหว่างปริมาณตัวออกซิไดซ์ และปริมาณสารชีวมวลต่อสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	66
5.3.1.2 ผลการเปลี่ยนปริมาณความชื้นในสารชีวมวลต่อสัดส่วน แก๊สผลิตภัณฑ์ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	68
5.3.1.3 ผลการเปลี่ยนอุณหภูมิตัวออกซิไดซ์ต่อสัดส่วน แก๊สผลิตภัณฑ์ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	70
5.3.2 ผลการทดสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน ใช้น้ำเป็นตัวออกซิไดซ์.....	72

บทที่	หน้า
5.3.2.1 ผลการเปลี่ยนสัดส่วนโดยมวลระหว่างปริมาณตัวออกซิไดซ์ และปริมาณสารชีวมวลต่อสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์.....	72
5.3.1.2 ผลการเปลี่ยนปริมาณความร้อนที่ให้แก่ระบบต่อสัดส่วน แก๊สผลิตภัณฑ์ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์.....	73
5.4 ผลการประเมินพลังงานความร้อนของระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ของสารชีวมวล.....	74
6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	78
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	78
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก.....	85
ภาคผนวก ข.....	87
ภาคผนวก ค.....	93
ภาคผนวก ง.....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	10
2.2 สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของสารชีวมวล.....	12
2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส.....	16
2.4 ระบบปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	18
2.5 ระบบปฏิกิริยารีดักชัน.....	18
2.6 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า.....	20
3.1 ความสัมพันธ์ของค่า K กับสวนกลับอุณหภูมิ.....	24
3.2 การแลกเปลี่ยนเอนโทรปีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	28
4.1 แผนผังการสร้างกลุ่มสารประกอบเพื่อใช้แทนสารชีวมวล.....	33
4.2 การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ปฏิบัติการแบบแอเดียบาติก.....	35
4.3 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเออร์โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว.....	37
4.4 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเออร์โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกิริยา.....	37
4.5 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเออร์โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกิริยา.....	38
4.6 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเออร์โดยใช้ออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว.....	38
4.7 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเออร์โดยใช้ออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกิริยา.....	39
4.8 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเออร์โดยใช้ออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกิริยา.....	39
5.1 โมโนเมอร์ที่พบในลิกนิน.....	47
5.2 โครงสร้างของอนุพันธ์น้ำตาลกลูโคส.....	47
5.3 โครงสร้างของ (ก) อนุพันธ์น้ำตาลเพนโตส (ข) แอลดีไฮด์ของน้ำตาลเพนโตส.....	48
5.4 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 และจากผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซิฟิเออร์แบบอากาศไหลลง โดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ชังข้าวโพด.....	54
5.5 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลอง	

ภาพประกอบ	หน้า
รูปแบบที่ 2 และจากผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ช้างข้าว โปด.....	56
5.6 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 2 และจากผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ช้างข้าว โปด.....	56
5.7 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 2 และ 3 กับผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ช้างข้าว โปด.....	59
5.8 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างแบบจำลองรูปแบบที่ 3 กับผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ช้างข้าว โปด.....	60
5.9 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 2 และ 3 กับผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์ฟลูอิด ไคซ์เบคโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ของช้างข้าว โปด.....	62
5.10 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบต่างๆ กับผลทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบฟลูอิด ไคซ์เบคโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์โดยสารชีวมวลที่ใช้คือเปลือกอัลมอนด์.....	64
5.11 ปริมาณ อากาศต่อสารชีวมวลโดยมวล(ER) ของแบบจำลองในแต่ละกระบวนการต่างๆ ต่อร้อยละ โดยโมลของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้.....	67
5.12 ปริมาณความชื้นในสารชีวมวลของแบบจำลองในแต่ละกระบวนการแก๊สซีไฟเคชันของสารชีวมวลต่างๆ ต่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซีไฟเออร์.....	69
5.13 ผลของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงต่อร้อยละ โดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	70
5.14 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิของสายตัวออกซิไดซ์ในกระบวนการแก๊สซีไฟเคชันของช้างข้าว โปดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ต่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์.....	71
5.15 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิของสายตัวออกซิไดซ์ในกระบวนการแก๊สซีไฟเคชันของช้างข้าว โปดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์	

ภาพประกอบ	หน้า
ต่อร้อยละโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	71
5. 16 ผลการเปลี่ยนปริมาณไอน้ำต่อสารชีวมวลโดยมวล (ER) ในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์.....	72
5. 17 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในแบบจำลองกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันของเปลือกอัลมอนต์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ โดยใช้รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว ต่อร้อยละโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	73
5. 18 การนำความร้อนไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลง.....	74
5. 19 การนำความร้อนไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	75
5. 20 การนำความร้อนไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์.....	76
ก.1 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	85
ก.2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....	85
ก.3 โครงสร้างของลิกนิน.....	86

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ปริมาณ ชีวมวลที่เหลือใช้ในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2548.....	2
1.2 ความเหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ.....	3
1.3 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์.....	5
1.4 การนำไปใช้ของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	6
1.5 องค์ประกอบแก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลชนิดต่างๆ.....	7
2.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ โดยคร่าวของเชื้อเพลิงของแข็งบางชนิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง).....	12
2.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ โดยคร่าวของสารชีวมวลบางชนิดที่เหลืออยู่ในประเทศไทย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง).....	13
2.3 สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในสารชีวมวลที่เหลือในประเทศไทย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	13
2.4 ร้อยละ โดยน้ำหนักขององค์ประกอบทางเคมีของสารชีวมวลบางชนิด.....	14
2.5 คุณสมบัติเด่นและด้อยของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด.....	19
3.1 ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ณ สมดุลเคมีของระบบปฏิกิริยา.....	25
3.2 การแลกเปลี่ยนเอนโทรปีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	28
4.1 องค์ประกอบหลักและสารประกอบที่ใช้ในการจำลองแต่ละส่วนของสารชีวมวล.....	34
4.2 สมการสถานะที่สามารถใช้ได้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	35
4.3 ระบบปฏิกิริยาที่ใช้ในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	36
5.1 ข้อมูลสถานะและสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองจาก สารชีวมวลบางชนิด.....	42
5.2 ร้อยละ โดยมวลแห้งขององค์ประกอบของธาตุ เฉพาะส่วนที่เผาไหม้ได้และค่า ความร้อนจากการเผาไหม้.....	43
5.3 อัตราส่วน โดยโมลอย่างง่ายของธาตุคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่อออกซิเจนของ สารชีวมวลบางชนิด.....	44
5.4 ผลการพิจารณาสารประกอบสำหรับแบบจำลองสารชีวมวล โดยใช้เกณฑ์ต่างๆ.....	45
5.5 ผลการเปรียบเทียบร้อยละโดยมวลและอัตราส่วนอย่างง่ายของธาตุ C: H: O ใน ฟางข้าว ชังข้าวโพด และเปลือกอัลมอนต์ และแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้น จากกลุ่มสารประกอบจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี.....	49



ตาราง	หน้า
5.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของฟางข้าว ชังข้าวโพด และเปลือกอัลมอนต์ และแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้นจากกลุ่มสารประกอบ จากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี.....	50
5.7 ผลการเปรียบเทียบร้อยละโดยมวลและอัตราส่วนอย่างง่ายของธาตุ C: H: O ในแกลบ เศษไม้ และขานอ้อยและแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้นจาก กลุ่มสารประกอบจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี.....	51
5.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของในแกลบ เศษไม้และขานอ้อย และแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้นจากกลุ่มสารประกอบจาก ข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี.....	52
5.9 ค่า RSS ของรูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับผลการทดลองจากเครื่อง แก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงของฟางข้าวและชังข้าวโพด.....	57
5.10 ค่า RSS และร้อยละความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสายผลิตภัณฑ์ของรูปแบบ การจัดลำดับปฏิกิริยาแบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ภายในเครื่องแก๊สซีไฟเออร์อากาศไหลลง.....	58
5.11 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาต่างๆในระบบปฏิกิริยาแก๊สซีไฟเคชัน.....	61
5.12 ค่า RSS ของรูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยาแบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองภายในเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดของชังข้าวโพดโดยใช้ อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์.....	63
5.13 ผลการหักสัดส่วนอะตอมไฮโดรเจนที่เกินมาในแบบจำลองสารชีวมวลต่อค่า RSS ของกระบวนการต่างๆ.....	65
5.14 สรุปการนำพลังงานความร้อนไปใช้ในแต่ละกรณี.....	77
ข.1 ข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีของฟางข้าว.....	87
ข.2 ผลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีตามสารประกอบ ที่เลือกในฟางข้าว.....	87
ข.3 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนัก ระหว่างฟางข้าวและแบบจำลอง.....	88
ข.4 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนัก ระหว่างฟางข้าวและแบบจำลอง.....	88
ข.5 ข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีของชังข้าวโพด.....	89

ตาราง	หน้า
ข.6 ผลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีตามสารประกอบ ที่เลือกในซังข้าวโพด.....	89
ข.7 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนัก ระหว่างซังข้าวโพดและแบบจำลอง.....	90
ข.8 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนัก ระหว่างซังข้าวโพดและแบบจำลอง.....	90
ข.9 ข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีของเปลือกอัลมอนต์.....	91
ข.10 ผลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีตามสารประกอบ ที่เลือกในเปลือกอัลมอนต์.....	91
ข.11 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนัก ระหว่างเปลือกอัลมอนต์และแบบจำลอง.....	92
ข.12 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนัก ระหว่างเปลือกอัลมอนต์และแบบจำลอง.....	92
ค.1 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าว โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยาแบบที่ 1 และ 2.....	93
ค.2 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยาแบบที่ 1 และ 2.....	93
ค.3 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าว โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G1-->X-->X-->X.....	94
ค.4 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าว โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G2-->X-->X-->X.....	96
ค.5 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าว โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G3-->X-->X-->X.....	98
ค.6 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าว โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G4-->X-->X-->X.....	100

ตาราง	หน้า
ค.7 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าว โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G5-->X-->X-->X.....	102
ค.8 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G1-->X-->X-->X.....	104
ค.9 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G2-->X-->X-->X.....	106
ค.10 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G3-->X-->X-->X.....	108
ค.11 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G4-->X-->X-->X.....	110
ค.12 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพด โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G5-->X-->X-->X.....	112

## สัญลักษณ์และอักษรย่อ

### สัญลักษณ์

$a_{ik}$	จำนวนอะตอมของธาตุองค์ประกอบ $k$ ที่มีอยู่จริงใน แต่ละโมเลกุลที่อยู่ในสารประกอบ $i$
$A_k$	ผลรวมน้ำหนักอะตอมรวมของธาตุองค์ประกอบ $k$ ที่มีอยู่จริงในในระบบ
$C_{ic}$	ค่าความเข้มข้นของสารประกอบ $i$ (%) ที่ได้จากการทดลอง
$C_{ie}$	ค่าความเข้มข้นของสารประกอบ $i$ (%) ที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลอง
$E_a$	พลังงานก่อกัมมันต์
$k_0$	ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา
$k=1-3$	แทน 3 สมการสำหรับ คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจนอะตอม
$N$	จำนวนสารประกอบก๊าซ
$n_i$	จำนวนโมลของสารประกอบ $i$ ในระบบ
$P$	ความดันของระบบ (บรรยากาศ)
$Q$	พลังงานความร้อนที่ออกจากระบบการเกิดก๊าซ
$R$	ค่าคงที่ของก๊าซ (จูล/ โมล เคลวิน)
$T$	อุณหภูมิของระบบ (องศาเซลเซียส)
$W$	งานที่ต้องใส่ไปในกระบวนการเกิดก๊าซ
$y_i$	สัดส่วนโมลของสารประกอบ $i$ ในระบบ

### อักษรกรีก

$\alpha$	สัดส่วนอะตอมของคาร์บอนในสารชีวมวลหลังเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนแล้ว
$\beta$	สัดส่วนอะตอมของไฮโดรเจนในสารชีวมวลหลังเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนแล้ว
$\gamma$	สัดส่วนอะตอมของออกซิเจนในสารชีวมวลหลังเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนแล้ว
$\Delta G_{ff}^{\circ}$	พลังงานอิสระของกิบส์ของการเกิดเป็นสารประกอบ $i$ ที่สภาวะความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิ $T_K$ ( กิโลจูลต่อกิโลกรัม โมล )
$\Delta H$	เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงไปภายในระบบ

## อักษรกรีก

$\Delta H_{ic}$  ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของสารประกอบ i

$\lambda_k$  Langrangian multiplier corresponding to the k<sup>th</sup> atomic balance constraints

$\hat{\phi}_i$  สัมประสิทธิ์ของฟูกาซิตี



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### สารชีวมวลและก๊าซสังเคราะห์

#### 1.1 ความเป็นมา

พลังงาน เป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีพของมนุษย์มาช้านานแล้ว ชีวมวลเป็นพลังงานแหล่งแรก ๆ ของคนเรา เราใช้ชีวมวลในการหุงต้มอาหารและให้ความอบอุ่น แต่เมื่อเรามีความก้าวหน้าทางวิทยาการมากขึ้น จึงได้นำเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงาน ซึ่งมีความสะดวกมากกว่า ในที่สุดก็กลายเป็นแหล่งพลังงานหลักจนทำให้ชีวมวลลดความสำคัญลง [1]

พลังงานชีวมวลยังคงเป็นแหล่งพลังงานที่มีความสำคัญเป็นอันดับที่สี่ของการใช้ในโลกของเรา โดยมีสัดส่วนเป็นร้อยละ 15 ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในโลก นอกจากนี้ชีวมวลยังเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนา ประมาณกันว่าประชากรกว่าร้อยละ 40 ของประชากรโลก ยังอาศัยชีวมวลในการหุงต้มและให้ความอบอุ่น ประเทศกำลังพัฒนาหลายประเทศในเอเชียและแอฟริกาใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานถึงร้อยละ 80 ส่วนประเทศไทยของเรามีการใช้ชีวมวลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงมากเป็นอันดับที่สี่ รองจาก น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ [2-5] เราได้ชีวมวลจากผลิตผลภายในประเทศค่อนข้างมาก แต่ปริมาณที่ได้ไม่คงที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลผลิตทางการเกษตรในแต่ละปี

ชีวมวล หรือเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากอินทรีย์สาร หรือสิ่งมีชีวิต [2] เช่น จากผลิตผลทางการเกษตรต่างๆ เช่น แกลบ ฟางข้าว กากอ้อย ต้นอ้อย กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม กะลามะพร้าว เศษไม้ เศษหญ้า นอกจากนี้ยังรวมถึงมูลสัตว์ที่ใช้ในการเกษตร เช่น โคและสุกร และของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร [6,7] เช่น เปลือกสับปะรด จากโรงงานสับปะรดกระป๋อง หรือน้ำเสียจากโรงงาน เป็นต้น จะเห็นได้ว่าชีวมวลเป็นสิ่งที่เราพบเห็นได้ทั่วไปรอบ ๆ ตัวเรานั่นเอง และเป็นเชื้อเพลิงที่คนเรารู้จักใช้กันมาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ในครัวเรือนในชีวิตประจำวัน เช่น ฟืน ถ่าน จนถึงปัจจุบันก็ยังมีใช้กันอยู่ แม้จะไม่แพร่หลาย เพราะมีเชื้อเพลิงอื่นเข้ามาแทนที่ ประกอบกับมีความยุ่งยากในการใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้ แต่ก็นับว่า ชีวมวลยังเป็นเชื้อเพลิงที่ใกล้ชิดกับชีวิตคนเรามากทีเดียว



## 1.2 ศักยภาพของชีวมวลเพื่อเป็นแหล่งพลังงานของประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งในกระบวนการทางการเกษตรที่ต่อเนื่องด้วยการแปรรูปของ อุตสาหกรรมการเกษตรทำให้เกิดของเหลือทิ้งซึ่งเป็นอินทรีย์สาร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์มได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผล ปาล์มสด กากมันสำปะหลังได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก กาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิและน้ำมัน มะพร้าว ลำห่อได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งปริมาณชีวมวลที่เหลือยังไม่ได้นำไปใช้งานในแต่ละปีนั้นมีอยู่ประมาณ 30 ล้านตันเศษ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณ ชีวมวลที่เหลือใช้ในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2548 [8]

ผลิตภัณฑ์เกษตร	ชีวมวล	ปริมาณคงเหลือ* (ตัน)
ข้าว	แกลบ	100,000
ข้าว	ฟางข้าว	1,000,000
อ้อย	กากอ้อย	500,000
ยางพารา	เศษไม้และขี้เลื่อย	500,000
ต้นปาล์ม	กากปาล์ม	400,000
มันสำปะหลัง	กากมันสำปะหลัง	800,000
ข้าวโพด	ชังข้าวโพด	700,000

\* ปริมาณคงเหลือ = ผลผลิต × อัตราส่วนชีวมวล × อัตราส่วนคงเหลือ

- ผลผลิต คือ ปริมาณผลิตผลทางการเกษตรมีหน่วยเป็น ตัน เช่น ข้าวเปลือก อ้อยสด ทะลายปาล์ม น้ำมัน และเมล็ดข้าวโพด เป็นต้น ยกเว้นเศษไม้ยางพาราใช้พื้นที่โค่นสวนยางในการคำนวณ มีหน่วยเป็นไร่
- อัตราส่วนชีวมวล คือ อัตราส่วนชีวมวลต่อผลิตผลทางการเกษตร มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ยกเว้น เศษไม้ยางพารา มีหน่วยเป็น ตัน/ไร่
- อัตราส่วนคงเหลือ หมายถึง อัตราส่วนที่ยังไม่ได้นำมาใช้งาน

จะเห็นว่าปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้ภายในประเทศ ขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตร และมีหลายชนิดที่เป็นผลิตผลเหลือใช้จากโรงงานแปรรูปทางเกษตรกรรม นอกจากนี้สภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ อาทิเช่น ภัยพิบัติต่าง ๆ ยังส่งผลโดยต่อปริมาณและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรในแต่ละปี และยังส่งผลต่อเนื่องต่อปริมาณคงเหลือของชีวมวลแต่ละชนิด จึงสมควรพิจารณาความเหมาะสมของชีวมวลแต่ละประเภทที่จะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ความเหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ [2]

สารชีวมวล	ข้อดี	ข้อด้อย
แกลบ	มีความชื้นต่ำและขนาดเล็ก เหมาะเป็นเชื้อเพลิง	มีปริมาณชี้ต่ำ 16-18 % โดยน้ำหนัก
ฟางข้าว	ยังมีฟางข้าวอีกมากที่ไม่ได้ นำไปใช้ให้เป็นประโยชน์	รวบรวมได้ยากถ้าใช้แรงคน เพราะอยู่กระจัด กระจาย ต้องใช้เครื่องทุ่นแรง มาช่วยในการ รวบรวม
เศษไม้ ยางพารา	ยังมีเศษไม้ยางพารา คือ ราก ไม้ และกิ่งไม้ เหลืออีกมากที่ ยังไม่ได้นำไปใช้งาน	มีขนาดใหญ่ และถ้าเป็นเศษไม้สดจะมี ความชื้นค่อนข้างสูง ประมาณ 50 %
กากอ้อย	ยังมีกากอ้อยเหลืออีกส่วนหนึ่ง ที่ยังไม่ได้นำไปใช้งาน	มีความชื้นสูง
ใบอ้อยและ ยอดอ้อย	ใบอ้อยและยอดอ้อยส่วนใหญ่ จะถูกเผาทิ้งในไร่ ยังไม่มีการ นำไปใช้ประโยชน์	มีเฉพาะเดือนธันวาคมถึงเมษายนของทุกปี และการรวบรวมเก็บ ค่อนข้างใช้แรงงานมาก จำเป็นต้องหาเครื่องทุ่นแรงมาช่วย
เหง้ามัน ลำปะหลัง	เนื่องจากส่วนมากยังไม่ได้ นำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ จึง ไม่มีคู่แข่งในการจัดหา	ความชื้น โดยเฉลี่ย 60 % และมีขนาดรูปทรง ไม่แน่นอน จึงต้องมีกระบวนการทำให้เล็กลง ก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิง

## ตารางที่ 1.2 ความเหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ

สารชีวมวล	ข้อดี	ข้อด้อย
กากปาล์ม	กะลาปาล์มมีค่าความร้อนสูงสุด เหมาะนำมาเป็นเชื้อเพลิง ทะลายปาล์มเปล่านั้นเหลืออีกมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ และถ้านำมาเผา จะได้ขี้เถ้าที่มีแร่ธาตุโปตัสเซียมสูงมาก	การนำทะลายปาล์มเปล่านั้นเป็นเชื้อเพลิง ต้องนำมาผ่านขบวนการย่อย หรือตัดก่อน เพราะมีขนาดใหญ่
ใบปาล์ม และต้นปาล์ม	ยังไม่มีการศึกษานำไปใช้ประโยชน์เป็นอย่างอื่น	ทางปาล์มมีความชื้นสูงถึง 80 % และขนาดใหญ่
ซังข้าวโพด และ ลำต้น	ซังข้าวโพดมีค่าความร้อนสูง เมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆ ส่วนลำต้นข้าวโพดมีส่วนหนึ่งที่ไม่ได้นำไปใช้งาน ชาวไร่ข้าวโพดจะไถฝังกลบในไร่	ส่วนลำต้น ข้าวโพดจะเก็บรวบรวมลำบาก ต้องใช้แรงคนมาก

ดังนั้น หากดูด้านศักยภาพจะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีศักยภาพในเรื่องของแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลอย่างมาก แต่ปัจจุบันยังอยู่ในระยะของการศึกษาเพื่อหันมาใช้ชีวมวลอย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพ

### 1.3 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์

ในปัจจุบันนั้นมนุษย์เราได้มีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตต่าง ๆ นั้นต่างกันขึ้นอยู่กับตัวกลางหรือตัวกระตุ้นที่ใช้ในกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังตารางที่ 1.3

### ตารางที่ 1.3 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

กระบวนการผลิต	ตัวกลางในกระบวนการผลิต	ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้	หลักฐานอ้างอิง
การย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน	แบคทีเรีย	มีเทน	[9]
การหมัก		แอลกอฮอล์ และ แอลดีไฮด์	[9]
ไบโอไฟโตรไรซิส		ไฮโดรเจน	[9]
การทำให้เป็นของเหลว	ความร้อนหรือ สารเคมี	น้ำมันเชื้อเพลิง และ น้ำมันเตา	[9,10]
แก๊สซิฟิเคชัน		แก๊สผลิตภัณฑ์	[9,10]
การเผาไหม้โดยตรง		แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และความร้อน	[9]
ไฟโตรอิเล็กโตรไรซิส	พลังงานแสง	ไฮโดรเจน	[9]

โดยส่วนมากแล้วกระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์นั้น คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีมูลค่าสูงและกระบวนการนี้เป็นกระบวนการควบคุมได้ง่ายเมื่อเทียบกับกับกระบวนการอื่น ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

**การทำให้เป็นของเหลว** เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นของเหลว โดยกระบวนการนี้ปฏิบัติการ ณ อุณหภูมิไม่สูงมากนักและต้องใช้ แคตตาลิสต์ควบคุมไปด้วยเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น สารตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการนั้นโดยส่วนมากจะใช้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะได้ของเหลวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมสูง เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงหรือน้ำมันเตา

**การเผาไหม้โดยตรง** เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเชื้อเพลิงแข็ง มีขั้นตอนคือเผาเชื้อเพลิงชีวมวลโดยตรงในเตาเผา ความร้อนที่ได้จะถูกนำไปใช้ผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำที่ผลิตได้นี้จะถูกนำไปใช้ขับเคลื่อนไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำจะเข้าสู่คอนเดนเซอร์ เพื่อให้เย็นลงและกลั่นตัวกลายเป็นน้ำ เพื่อปั๊มกลับขึ้นไปป้อนหม้อไอน้ำ โดยถูกอุ่นด้วยไอน้ำที่มาจากกังหัน ณ ความดันช่วงกลาง ก่อนป้อนกลับเข้าสู่หม้อไอน้ำอีกครั้ง

**แก๊สซิฟิเคชัน** เป็นการเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊ส โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้นในที่ที่มีอากาศจำกัด ภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์ ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเร่งปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องให้กลายเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ แก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน การเผาไหม้ในที่ที่มีอากาศจำกัดเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่จะเกิดความร้อนเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ มากมาย เช่น ปฏิกิริยารีดักชัน ไพโรไลซิส และออกซิเดชัน ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนนั้นโดยทั่วไปจะเรียกรวมกันว่า แก๊สสังเคราะห์ ซึ่งจากการที่แก๊สสังเคราะห์มีประโยชน์มากในภาคอุตสาหกรรม ระบบปฏิกิริยา แก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลจึงน่าสนใจและเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้

#### 1.4 การใช้ประโยชน์ของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สสังเคราะห์ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งสำหรับกังหันแก๊ส และเครื่องยนต์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันหลายประเทศให้ความสนใจผลิตไฟฟ้าจาก แก๊สสังเคราะห์ โดยใช้กังหันแก๊สกันมากขึ้น เห็นได้จากการเพิ่มจำนวนการก่อสร้างโรงไฟฟ้ากังหันแก๊ส นอกจากนี้ในต่างประเทศยังได้มีการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ใน วงจรไฟฟ้าเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างกว้างขวางอีกด้วย การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้นั้นจะต่างกันขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ออกจากเตาปฏิกรณ์ ซึ่งความแตกต่างของสัดส่วนนี้เกิดขึ้นจากการใช้ตัวออกซิไดซ์ต่างชนิดกัน ดังแสดงในตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 การนำไปใช้ของแก๊สผลิตภัณฑ์ [10]

ตัวออกซิไดซ์ที่ใช้	การนำไปใช้หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้
อากาศ	ใช้ผลิตความร้อน ไฟฟ้า และผลิตเมทานอล
ออกซิเจน	ผลิตเมทานอล แอมโมเนีย และมีเทน
ไอน้ำ	ผลิต เมทานอลและมีเทน
ไฮโดรเจน	ผลิตเมทานอล

ถ้ามองลงไปถึงองค์ประกอบแก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล นอกจากที่ต่างกันตามตัวชนิดออกซิไดซ์แล้วยังต่างกันที่ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ และชนิดเครื่อง

ปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์อีกด้วย ซึ่งองค์ประกอบแก๊สที่ได้จากระบบแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวลชนิดต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 1.5 สำหรับชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์จะกล่าวในบทต่อไป

ตารางที่ 1.5 องค์ประกอบแก๊สที่ได้จากระบบแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวลชนิดต่างๆ [11-14]

สารชีวมวล	ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์	ตัวออกซิไดซ์	สัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยโมล)					
			CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
ซังข้าวโพด	ฟลูอิดไดซ์เบด	อากาศ	22	17	10	3		
ซังข้าวโพด	แบบไหลลง	อากาศ	18	16.5	9	4		
ฟางข้าว	แบบไหลลง	อากาศ	14	19	11	5		
เปลือกอัลมอนด์	ฟลูอิดไดซ์เบด	ไอน้ำ	25	38	12	5	20	

โดยในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองระบบปฏิกิริยากระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวล รวมทั้งจำลองตัวสารชีวมวลเอง เพื่อทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบปฏิกิริยากระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวลที่เหลืออยู่ภายในประเทศ ทั้งนี้เนื่องจากระบบปฏิกิริยาดังกล่าวเข้าสู่สมดุลภายใต้สภาวะที่เกิดกระบวนการนี้ การแก้ระบบสมการที่เกี่ยวข้องกับสมดุลเคมีจึงได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สภาวะนี้เอง

### 1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาตัวแทนของสารชีวมวลและเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์

### 1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

1. หาสารประกอบที่สามารถใช้เป็นตัวแทนสำหรับ แบบจำลองปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเคชันของซังข้าวโพด ฟางข้าว และเปลือกอัลมอนด์

2. สร้างแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายผลของแก๊สผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบระหว่างการทดลองและแบบจำลอง โดยใช้เกณฑ์ของลำดับการเกิดปฏิกิริยา ของระบบปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเคชันในเครื่อง



ปฏิกรณ์แบบไหลลงของฟางข้าวและซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ที่ปฏิบัติการแบบแอเดียบติก โดยใช้ปริมาณตัวออกซิไดซ์ต่อสารชีวมวลโดยมวล คือ 0.3

3. สร้างแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายผลของแก๊สผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบระหว่างการทดลองและแบบจำลองโดยใช้เกณฑ์ของลำดับการเกิดปฏิกิริยา ของระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบดของเปลือกอัลมอนต์ โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 1,093 เคลวิน โดยใช้ปริมาณไอน้ำต่อสารชีวมวลโดยมวล คือ 0.56

4. ศึกษาผลของสัดส่วนปริมาณอากาศต่อสารชีวมวลโดยมวลระหว่าง 0 ถึง 1 ผลของปริมาณความชื้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักในชีวมวล และอุณหภูมิในสายตัวออกซิไดซ์จาก 303 ถึง 803 เคลวินต่อ สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ของแบบจำลองระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลลงที่ปฏิบัติการแบบแอเดียบติก

5. ศึกษาผลของสัดส่วนปริมาณไอน้ำต่อสารชีวมวลโดยมวลระหว่าง 0 ถึง 1 และอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ตั้งแต่ 800 -1200 เคลวินต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ของแบบจำลองระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบดที่ปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัล

### 1.7 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. กำหนดปริมาณสัดส่วนอะตอมของคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่อออกซิเจนของสารชีวมวลต่าง ๆ ที่เหลือใช้ภายในประเทศ

2. เลือกสารที่ใช้เป็นตัวแทน โดยเปรียบเทียบสัดส่วนอะตอมคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่อออกซิเจนให้ใกล้เคียงกับสารชีวมวล

3. หาปริมาณตัวออกซิไดซ์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเกิดเป็นแก๊สของสารชีวมวล

4. หาปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นได้จริงภายใต้สภาวะที่กำหนด

5. สร้างแบบจำลองระบบปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล โดยใช้อากาศและไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ เพื่อทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบนี้

6. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณอากาศต่อสารชีวมวล ความชื้น และอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมดุลเคมี ซึ่งมีผลต่อเนื่องกับสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล

7. ประเมินพลังงานความร้อนสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั้งสองแบบ

### 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพยากรณ์แก๊สผลิตภัณฑ์จากระบบปฏิบัติการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้อากาศหรือ ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ของสารชีวมวล ภายใต้สภาวะที่กำหนดได้

2. สามารถนำความร้อนที่เหลืออยู่มาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

3. สามารถนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการอื่นที่ระบบปฏิบัติการเกี่ยวข้องกับสมดุลเคมี



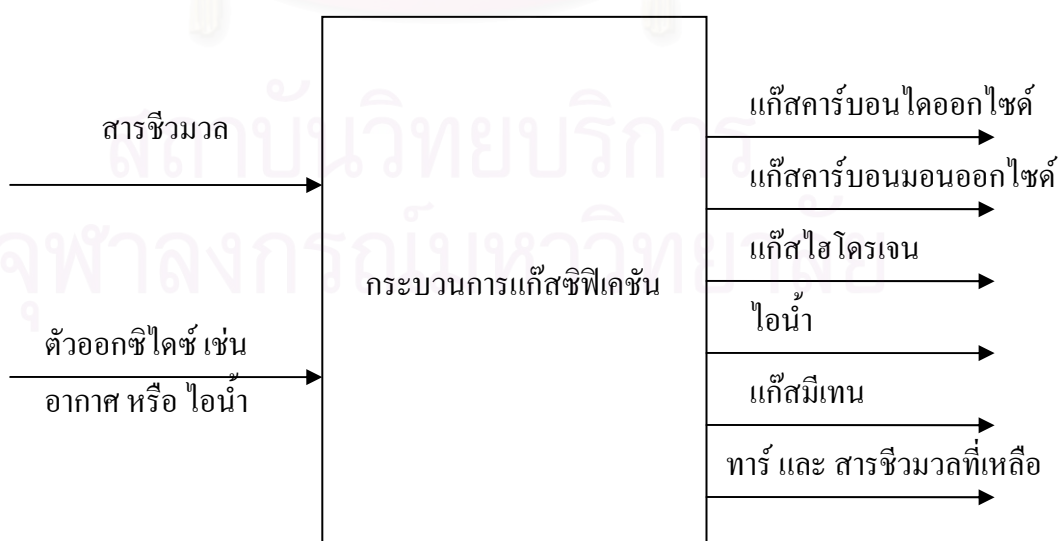
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล คือ กระบวนการที่สารชีวมวลเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ กับตัวออกซิไดซ์ เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรือไอน้ำ และเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 K [15] ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์หรือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้น แก๊สผลิตภัณฑ์หลัก ๆ จะประกอบไปด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน หรือรวมเรียกว่า แก๊สสังเคราะห์ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 นอกจากนี้ยังมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และไอน้ำเป็นองค์ประกอบรองลงมา ซึ่งแก๊สผสมเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เนื่องจากมีค่าการเผาไหม้ของแก๊สที่มีค่าสูง ต่างจากกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ซึ่งแก๊สเหล่านี้มีค่าการเผาไหม้ไม่สูงเมื่อเทียบกับแก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล แต่อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ขององค์ประกอบของแข็งนั้น จะได้สารจำพวก ผุ่น ทาร์และส่วนของสารชีวมวลที่เผาไหม้ไม่ได้ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการต้องมีการกำจัดทิ้งต่อไป

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล คือ ความชื้นภายในสารชีวมวล องค์ประกอบของสารชีวมวล อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิของตัวออกซิไดซ์ที่เข้าสู่ระบบ ปริมาณของสารชีวมวล และตัวออกซิไดซ์ที่เข้าสู่ระบบ [16] ทั้งนี้เพราะปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อสมดุลเคมี ซึ่งทำให้สัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง



รูปที่ 2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

## 2.1 คุณสมบัติสารชีวมวลที่เกี่ยวข้องต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การเข้าใจถึงโครงสร้างและองค์ประกอบของสารชีวมวลเป็นสิ่งจำเป็นในการจำลองสารชีวมวล เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ในส่วนนี้จะกล่าวถึงข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารชีวมวลที่จำเป็นในการจำลองตัวสารชีวมวล ซึ่งได้แก่ ข้อมูลการวิเคราะห์โดยประมาณ การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ และ การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของสารชีวมวล

### 2.1.1 ข้อมูลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis)

ข้อมูลการวิเคราะห์โดยประมาณ แบ่งสารชีวมวลหรือสสารทั่วไป ออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ดังรูปที่ 2.2 คือ

1. ความชื้น หมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารชีวมวล

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนที่ระเหยได้ง่าย คือส่วนที่ถูกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่านี้สูง แสดงว่าติดไฟได้ง่าย

ส่วนที่สลายตัว\* คือส่วนเป็น โพลีเมอร์ของสารชีวมวลที่สลายตัวเมื่อโดนความร้อน คาร์บอนคงตัว คือ องค์ประกอบของคาร์บอนที่เหลืออยู่ในสารชีวภาพ หลังจากผ่านการเผาไหม้แบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือที่เรียกว่าไพโรไลซิส โดยให้ความร้อน 333 K ต่อ นาที จนอุณหภูมิถึง 1150 K [17]

3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หรือเรียกว่า จี๊ถ้ำ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีจี๊ถ้ำประมาณ 1 -3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนจี๊ถ้ำประมาณ 10 -20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสสมควร

---

\* สำหรับ M. Graboski และผู้ร่วมงาน [17] รวมสารชีวมวลในส่วนที่เป็นส่วนที่สลายตัวไว้ในส่วนคาร์บอนคงตัวและได้ให้ความหมายไว้ว่า เป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรเมติกที่เหลืออยู่หลังจากเกิดปฏิกิริยาควบแน่นซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนของไพโรไลซิส



**รูปที่ 2.2** สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆของสารชีวมวล

สำหรับข้อมูลการวิเคราะห์โดยประมาณของเชื้อเพลิงของแข็งบางชนิดที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 M. Graboski [17] ได้อธิบายไว้ว่า ไม้โดยทั่วไปนั้นจะสลายตัวด้วยความร้อนมากกว่าเชื้อเพลิงของแข็งชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ เป็นต้น โดยพิจารณาได้จากสัดส่วนคาร์บอนคงตัวที่มีปริมาณน้อยกว่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ถ่านหินมีความเป็นอะโรเมติกมากกว่า ซึ่งมาจากการก่อรวมตัวทางธรณีวิทยาของถ่านหินนั่นเอง จึงทำให้ไม้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดหนึ่งนั้นมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สำหรับข้อมูลการวิเคราะห์ชีวมวลที่เหลือในประเทศไทยนั้นแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.1** ข้อมูลการวิเคราะห์โดยคร่าวของเชื้อเพลิงของแข็งบางชนิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง) [17]

เชื้อเพลิงของแข็ง	คาร์บอนคงตัว	ส่วนที่ระเหยได้	จีเอ็ม
ถ่านหิน	55.8	33.9	10.3
ลิกไนต์	43.0	46.6	10.4
ไม้	15.0	84.8	0.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลการวิเคราะห์โดยประมาณของสารชีวมวลบางชนิดที่เหลืออยู่ในประเทศไทย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง) [17]

เชื้อเพลิงของแข็ง	คาร์บอนคงตัว	ส่วนที่ระเหยได้	ขี้เถ้า
แกลบ	19.7	58.9	13.2
ฟางข้าว	18.9	60.7	10.39
ซังข้าวโพด	21.2	70.4	1.4

### 2.1.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Ultimate Analysis)

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเป็นวิธีวิเคราะห์สารชีวมวลโดยแสดงเป็นค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุ C H O N และ S ที่อยู่ในสารชีวมวล โดยทั่วไปแล้วจะแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากไม่ต้องการให้สับสนในการคิดธาตุไฮโดรเจน และ ออกซิเจนที่เป็นธาตุองค์ประกอบในโมเลกุลของน้ำ หรือไม่ก็จะแยกเป็นความชื้นออกต่างหาก ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบนี้มีความสำคัญในการจำลองสารชีวมวลเพื่อใช้ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล เนื่องจากสารชีวมวลนั้นมีสูตรโมเลกุลที่ไม่แน่นอน

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในสารชีวมวลที่เหลือในประเทศไทย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) [18]

ธาตุองค์ประกอบ	แกลบ	ชานอ้อย	เศษไม้ยางพารา	ซังข้าวโพด
คาร์บอน,C	39.1	21.33	25.575	43.7
ไฮโดรเจน,H	4.59	3.06	3.19	5.21
ออกซิเจน,O	34.7	23.29	24.475	42.5
ไนโตรเจน,N	0.18	0.12	0.138	0.19
ซัลเฟอร์,S	0.04	0.03	0.022	0.04
คลอรีน,Cl	0.09	-	0.0055	0.08
ขี้เถ้า	13.2	1.43	1.595	1.4
ความชื้น	8.2	50.73	45	7



### 2.1.3 ข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี (Chemical Compound Analysis)

เนื่องจากสารชีวมวลเป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งได้มาจากผลผลิตทางการเกษตร ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ซึ่งไม่มีสูตรโมเลกุลตายตัว ทำให้ยากต่อการจำลองสารชีวมวลขึ้นมา ข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีจึงมีความสำคัญที่บ่งบอกถึงโครงสร้างหลักในสารประกอบชีวมวลไว้ใช้เป็นแนวทางสำหรับสารชีวมวลจำลอง โดยข้อมูลนี้ได้แบ่งสารชีวมวลออกเป็นส่วน ๆ โดยแบ่งตามความแตกต่างของความไวในการเกิดปฏิกิริยาด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยสารประกอบทางเคมีในสารชีวมวลแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก\* คือ

1. ส่วนที่สกัดได้
2. พนังเซลล์ ประกอบด้วย ลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต และคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วย เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส
3. จี๊เจ้า เป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้

ถ้าพิจารณาเฉพาะในส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาได้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล จะแบ่งชีวมวลตามข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีได้เป็น 4 ส่วนหลักคือ ส่วนที่สกัดได้ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งทั้ง 4 ส่วนนี้มีโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันต่างกัน โดยชีวมวลแต่ละชนิดนั้นจะมีสัดส่วนของทั้ง 4 ส่วนนี้ต่างกัน โดยตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างร้อยละ โดยนำหน้าขององค์ประกอบทางเคมีของสารชีวมวลบางชนิด

ตารางที่ 2.4 ร้อยละ โดยนำหน้าขององค์ประกอบทางเคมีของสารชีวมวลบางชนิด [19]

สารชีวมวล	ลิกนิน	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ส่วนที่สกัดได้
ฟางข้าว	14.1	35.7	29	21.2
ซังข้าวโพด	6	44	36	14
เปลือกอัลมอนต์	21	41	29	9
แกลบ	13.7	42.4	35	12.3
เศษไม้ยางพารา	18.5	39.2	36.3	6
ชานอ้อย	9	47	36	8

\*สารชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากพืช การแบ่งโครงสร้างสารประกอบเคมีจึงแบ่งตามพืชโดยทั่วไป

## 2.2 กระบวนการเปลี่ยนสารชีวมวลเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์

ในการเปลี่ยนสารชีวมวล เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก [20] คือ การเตรียมสารชีวมวลก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์ กระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ และการกำจัดกากของแข็งที่ปนอยู่ในแก๊สผลิตภัณฑ์

### 2.2.1 การเตรียมสารชีวมวลก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์

ในการเตรียมสารชีวมวลก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ ในขั้นแรกนั้นต้องลดขนาดสารชีวมวล กระบวนการนี้จะเป็นการควบคุมขนาดของอนุภาค เพื่อให้พอเหมาะสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ อีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์อีกด้วย ในขั้นต่อไป คือ การอบแห้งสารชีวมวล เพื่อรักษาสภาพของสารชีวมวล เนื่องจากสารชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีที่มีความชื้นสูง และการอบแห้งนั้นยังลดต้นทุนในการขนส่งสารชีวมวลอีกด้วย ในกระบวนการอบแห้งนั้นเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสาร โดยใช้ความร้อนที่เหลืออยู่ในกระบวนการแก๊สซิไฟเคชัน และอากาศแห้งที่ใช้รับความชื้นนั้น สามารถนำมาใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ในกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันได้ด้วย โดยปกติแล้วในกระบวนการอบแห้งสารชีวมวลนั้น ความชื้นจะคงเหลืออยู่ในประมาณไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารชีวมวล แต่อย่างไรก็ตามถ้าจะผลิตแก๊สผลิตภัณฑ์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ อาจจะไม่ต้องนำความชื้นออกไปทั้งหมด เนื่องจากไอน้ำที่ได้จากการระเหยความชื้นนั้นสามารถเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ในกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

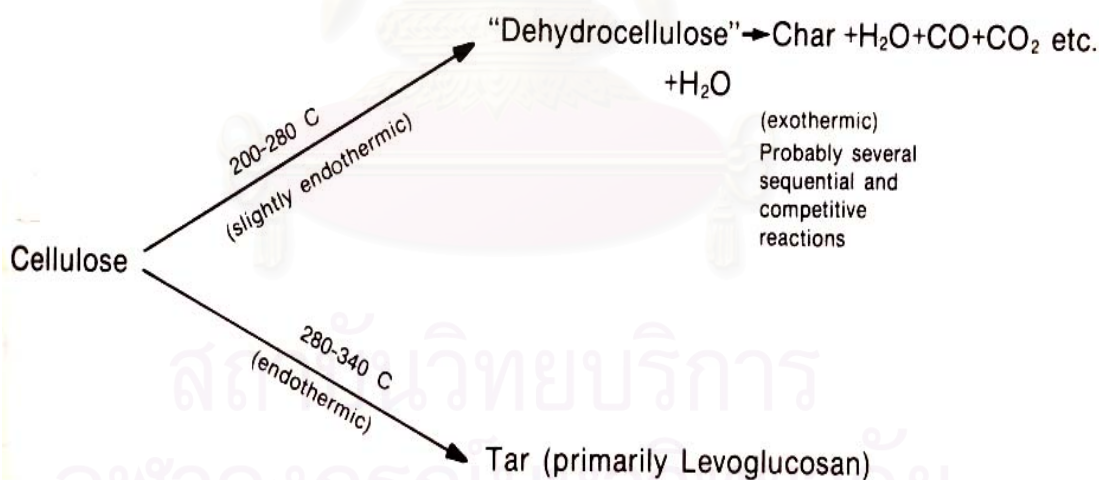
Reed และผู้ร่วมงาน [21] เปรียบเทียบความร้อนที่ใช้ไล่ความชื้นโดยการการอบแห้งไม่กับการระเหยน้ำ โดยการระเหยน้ำ 0.45 กิโลกรัม เท่ากัน การอบแห้งไม่ต้องใช้ความร้อน 1,600 ประมาณ 2,600 กิโลจูล ซึ่งมากกว่าการระเหยน้ำประมาณ 1,500 กิโลจูล

## 2.2.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์

หลังจากที่เอาความชื้นออกจากสารชีวมวลแล้ว สารชีวมวลจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน ปฏิกริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล สามารถจำแนกได้ 3 ขั้นตอนตามชนิดของปฏิกริยา คือ ไพโรไลซิส ออกซิเดชัน และรีดักชัน\*

### 2.2.2.1 ไพโรไลซิส

เป็นการเผาไหม้ของสารชีวมวล โดยใช้ความร้อนเป็นตัวหลักในการทำให้องค์ชีวมวลเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส ภายใต้สภาวะไร้ออกซิไดซ์ โดยสัดส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนต่อไฮโดรเจน ของสารชีวมวลจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยสัดส่วนที่ลดลงนี้จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ แก๊สผลิตภัณฑ์บางส่วนที่มีมวลโมเลกุลสูงสามารถควบแน่นกลับเป็นของเหลวได้ เรียกว่า ทาร์ โดยส่วนที่เหลืออยู่ในสภาวะของแข็ง เรียกว่า ถ่าน ส่วนความชื้นส่วนที่เหลือในสารชีวมวลจะกลายเป็นไอน้ำในช่วงนี้เช่นกัน ปฏิกริยานี้ต้องใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกริยา เนื่องจากต้องสลายโพลีเมอร์ของสารชีวมวลก่อนแล้วจากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนหนึ่งก็จะเกิดปฏิกริยาต่อได้เป็นแก๊สและถ่าน โดยปฏิกริยาส่วนนี้เป็นปฏิกริยาคายความร้อน ส่วนผลิตภัณฑ์อีกส่วนหนึ่งจะสลายไปเป็นทาร์ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งโดยรวมแล้วปฏิกริยาไพโรไลซิสเป็นปฏิกริยาคูดความร้อน



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกริยาไพโรไลซิส [17]

\* มีผู้วิจัยบางกลุ่มได้รวมการอบแห้งเข้าไปด้วย แต่ทั้งนี้ตัวผู้วิจัยเห็นว่าการอบแห้งนั้นเป็นการเพียงแค่ดึงความชื้นออกจากตัวชีวมวล แต่ไม่ได้เปลี่ยน โครงสร้างแต่อย่างใด จึงไม่รวมไว้ในระบบปฏิกริยา

### 2.2.2.2 ออกซิเดชัน

เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ หรือเป็นปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นมีเลขออกซิเดชันของเพิ่มขึ้น ซึ่งถ่านที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาแยกสลายด้วยความร้อนนั้น จะเข้าทำปฏิกิริยาต่อกับตัวออกซิไดซ์ ซึ่งแต่ละปฏิกิริยามีชื่อเรียกต่างกันตามตัวที่มาออกซิไดซ์ สารชีวมวล โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

#### 2.2.2.2.1 ออกซิเดชันเพียงบางส่วน

ในระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล ปริมาณตัวออกซิไดซ์ ที่เข้าทำปฏิกิริยานั้น จะส่งผลต่อ แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยที่ในกระบวนการเผาไหม้ของสารชีวมวลเพื่อให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการนั้น ต้องเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะใช้ออกซิเจนน้อยกว่ากระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.4 ก และ ข เพราะฉะนั้นจึงได้กำหนด ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยเทียบจากปริมาณโดยมวลของสารชีวมวลที่เข้าสู่ระบบ แสดงเป็นค่าสัดส่วนสมมูล (Equivalence ratio) คือ สัดส่วนของมวลของตัวออกซิไดซ์ต่อมวลสารชีวมวลที่ใส่เข้าไปสู่ระบบคูณกับสัดส่วนนั้นตามมวลสารสัมพันธ์ โดยที่มีผู้วิจัยแล้วพบว่า ค่า ER ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอยู่ในช่วงระหว่าง 0.26 – 0.28 ซึ่ง ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ [17]

#### 2.2.2.2.2 ออกซิเดชันระหว่างแก๊สผลิตภัณฑ์

ถ้าปริมาณออกซิเจนเกินปริมาณที่พอเหมาะสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสาร โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ออกซิเจนที่เกินมานั้นจะไปออกซิไดซ์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ดังรูปที่ 2.4 ค

#### 2.2.2.2.3 Boudouard equation

เป็นปฏิกิริยาที่ แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ถ่าน ที่เหลืออยู่ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และมีสมมูลเข้ามาเกี่ยวข้องกับดังรูปที่ 2.4 ง

$\text{C} + 0.5\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}$ <p>(ก) Partial oxidation</p>	$\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$ <p>(ข) Total oxidation</p>
$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$ $\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$ <p>(ค) Product oxidation</p>	$\text{C} + \text{CO}_2 \longleftrightarrow 2\text{CO}$ <p>(ง) Boudouard reaction</p>

รูปที่ 2.4 ระบบปฏิกิริยาออกซิเดชัน

### 2.2.2.3 รีดักชัน

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากปฏิกิริยาข้างต้นนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากันเองได้ โดยมีผลให้สารตั้งต้นหลักมีเลขออกซิเดชันนั้นลดลง ดังปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.5

$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \longleftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ <p>Steam gasification</p>	$\text{C} + \text{H}_2 \longleftrightarrow \text{CH}_4$ <p>Hydro gasification</p>
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \longleftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ <p>Water gas shift reaction</p>	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \longleftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ <p>Methanation</p>

รูปที่ 2.5 ระบบปฏิกิริยารีดักชัน

แต่อย่างไรก็ตามถ้าดูจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน จะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์ทั้งสองเป็นผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการนี้ จึงได้มีบางกระบวนการใช้น้ำเป็นตัว ออกซิไดซ์แทนอากาศ ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้น้ำเป็นตัว ออกซิไดซ์ นั่นเอง แต่ปริมาณไอน้ำต้องทำให้พอเหมาะ เนื่องจากไอน้ำที่เติมเข้าไปนั้นอาจจะไปมี ผลต่อปฏิกิริยาอื่น เนื่องด้วยปฏิกิริยาอื่นนั้นมีสมดุลเคมีเกี่ยวข้อง

### 2.2.3 การกำจัดกากของแข็งที่ปนอยู่ในแก๊สผลิตภัณฑ์

กากของแข็ง ฝุ่น และขี้เถ้าที่เหลืออยู่ รวมทั้งทาร์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันจะถูกกำจัด โดยกากของแข็ง ฝุ่น และขี้เฝ้านั้นจะถูกกำจัดโดยใช้ไซโคลน ส่วนทาร์ นั้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นจะมีอยู่น้อย และชนิดของทาร์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของ สารชีวมวล ซึ่งการกำจัดก็ขึ้นกับชนิดของทาร์นั้น ๆ

## 2.3 เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์

นอกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล จะต่างกันตามตัว ออกซิไดซ์ และชนิดของชีวมวลที่ใช้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังแตกต่างกันตาม ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์ โดยสามารถจำแนกได้ 4 ประเภท ตามทิศทางการไหลของ ตัวออกซิไดซ์หลัก คือ เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง (Downdraft gasifier) เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขึ้น (Updraft gasifier) เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบ ฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed gasifier) และเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบไหลตามขวาง (Cross-draft gasifier) โดยคุณลักษณะเด่นและด้อยของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณลักษณะเด่นและด้อยของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด [20]

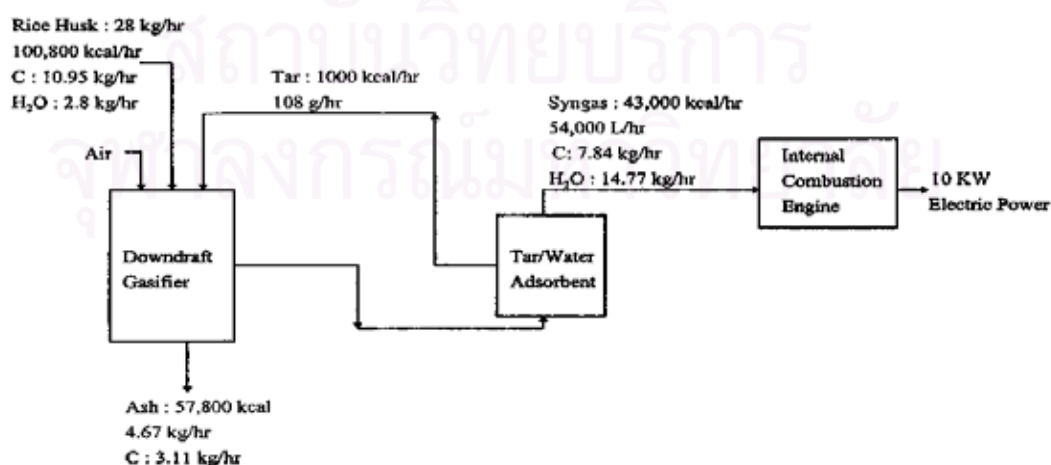
ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	จุดเด่น	จุดด้อย
updraft	เป็นระบบที่ง่ายและไม่แพง	เกิดทาร์เป็นปริมาณมากในระบบ
	อุณหภูมิของสายแก๊สออกมีค่าต่ำ	
downdraft	เป็นระบบที่ปฏิบัติการได้ง่าย	ข้อจำกัดในการเพิ่มกำลังการผลิต
	เกิดทาร์ในระบบน้อย	ไม่สามารถรับชีวมวลที่มีขี้เถ้าสูงได้
Fluidised bed	สามารถเปลี่ยนกำลังการผลิตได้	ระบบมีข้อจำกัดทางอุณหภูมิ
	สามารถรับชีวมวลที่มีขี้เถ้าสูงได้	อุณหภูมิของสายแก๊สออกมีค่าสูง



โดยทั่วไปแล้วเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์ที่นิยมใช้ คือ เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลง และเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบด ทั้งนี้เพราะเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลงนั้นปริมาณทาร์ที่เจือปนจะมีปริมาณต่ำ จึงไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในกำจัด ส่วนแบบฟลูอิดไคซ์เบดนั้นอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีความสม่ำเสมอ ทำให้สามารถปฏิบัติการแบบอุณหภูมิคงที่ได้ โดยมีผู้ที่ได้วิจัยเกี่ยวกับกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวลไว้ดังนี้

- XiuLi Yin และผู้ร่วมงาน [21] ได้ศึกษากระบวนการเกิดเป็นแก๊สโดยใช้ แกลบเป็นวัตถุดิบในกระบวนการ โดยใช้เครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดเป็นเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งได้นำแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ผลิตไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีผลอย่างมากกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ ถ้าอุณหภูมิเกินกว่า 1100 K สารประกอบซัลฟอนที่เป็นองค์ประกอบหลักในจีเอ็มในแกลบนั้นจะกลายเป็นของเหลว ไปรวมตัวยังอยู่ที่ผิวของ ถ่าน ทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้ และถ้าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์นั้นต่ำกว่า 800 K จะส่งผลให้สารชีวมวลเปลี่ยนสภาพไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้น้อย อีกทั้งยังมีปริมาณทาร์สะสมอยู่มาก นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ที่จะสร้างโรงงานผลิตไฟฟ้าโดยมีกำลังไฟฟ้า 1 เมกะวัตต์ โดยใช้แกลบ 150 ตันต่อวัน โดยพบว่าจะมีระยะเวลาคืนทุน ประมาณ 2 ปี

- Kuen Song Lin และผู้ร่วมงาน [23] ได้ศึกษากระบวนการเกิดเป็นแก๊สโดยใช้ แกลบเป็นวัตถุดิบในกระบวนการ โดยใช้เตาแบบอากาศไหลลงเป็นเครื่องปฏิกรณ์ควบคุมไว้ที่อุณหภูมิ 1000 K เพื่อให้สารประกอบซัลฟอนในจีเอ็มไม่แปรสภาพ พบว่าถ้าใช้แกลบ 28 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะผลิตไฟฟ้าได้ 10 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า [28]

- Anuradha และผู้ร่วมงาน [24] ได้ทดลองโดยใช้เกลบเป็นวัตถุดิบ และใช้เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซีฟเฮอร์แบบอากาศไหลลง โดยเครื่องปฏิกรณ์ควบคุมไว้ที่อุณหภูมิ 1173 K ซึ่งใช้อากาศและไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ จากการทดลองพบว่า ถ้าจะให้สารชีวมวลที่ใช่เปลี่ยนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีค่าการเผาไหม้ปานกลางทั้งหมดนั้น จะต้องใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ร่วมด้วย และจะต้องเติมไอน้ำไปในขั้นตอนหลังจากเกิด ปฏิกิริยาไพโรไลซิส และ ออกซิเดชันเป็นบางส่วน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ของสารชีวมวล

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับระบบปฏิกิริยาต่าง ๆ มากมายดังที่กล่าวมาในบทก่อนหน้า ซึ่งการหาคำตอบของผลลัพธ์จากระบบปฏิกิริยาเหล่านี้โดยใช้ระบบสมการทางคณิตศาสตร์ กฎการอนุรักษ์พลังงานและมวล รวมเรียกว่า การสร้างหรือพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีมีด้วยกันสองแบบคือ แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic model) และแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Model) ซึ่งแบบจำลองทั้งสองนี้สามารถอธิบายถึงสมรรถนะของกระบวนการต่างๆ ได้แตกต่างกันไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ง่าย ไม่ต้องการข้อมูลมากมาย เพียงแค่รู้จุดเริ่มต้นและสถานะก็สามารถพยากรณ์ถึงคำตอบที่จะเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังรองรับระบบปฏิกิริยาที่ปฏิกิริยามากมายได้โดยไม่ยุ่งยากซับซ้อนเท่ากับการใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

การศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ ซึ่งเป็นการบ่งบอกกลไกและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลจะมีอยู่ด้วยกันมากมาย แต่การศึกษาแบบนี้ นักวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาเพียงปฏิกิริยาไม่กี่ปฏิกิริยา เนื่องจากว่ายิ่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้มีมากขึ้นแบบจำลองยิ่งยากขึ้นตาม ตัวอย่างผู้ที่ทำวิจัยเรื่องนี้มีดังนี้

- Babu และผู้ร่วมงาน [25] ศึกษาปฏิกิริยาที่ขึ้นในส่วนรีดักชัน โชนินในเตาผลิตแก๊สแบบอากาศไหลลง โดยใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ เพื่อหารูปแบบของอุณหภูมิ และสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากส่วนนี้ โดยปฏิกิริยาที่สนใจ คือ Methanation Hydrogasification Boudouard และ Steam gasification โดยเปลี่ยนค่าความไวในการทำปฏิกิริยาของ ถ่าน เป็นแบบเส้นตรงและแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจาก 1 – 1000 วินาที โดยเปรียบเทียบผลของรูปแบบของอุณหภูมิและผลิตภัณฑ์กับงานวิจัยที่ได้ทดลอง พบว่าถ้าให้ค่าความไวในการทำปฏิกิริยาของถ่าน เปลี่ยนจาก 1 ถึง 1000 วินาที เป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะให้ผลของรูปแบบของอุณหภูมิและสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกว่าแบบเส้นตรง

- Capucine และ ผู้ร่วมงาน [26] ได้สร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเปลือกอัลมอนต์โดยใช้ ไอ้มน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ เพื่อหาอัตราเร็วของปฏิกิริยาและ

สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยแบ่งระบบปฏิกิริยาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการแยกสลายด้วยความร้อน และรีดักชัน ซึ่งในส่วนรีดักชันประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยา คือ Steam reforming และ Water gas shift reaction พบว่าแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเปลือกอัลมอนต์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์นั้น อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของเปลือกอัลมอนต์ในส่วนการแยกสลายด้วยความร้อนมีค่ามากกว่าในส่วนรีดักชัน 1000 เท่า และในส่วนรีดักชันที่สนใจปฏิกิริยา steam reforming และ water gas shift reaction เพียง 2 ปฏิกิริยานั้น ถูกจำกัดทางจลนพลศาสตร์

### 3.1 การคำนวณทางอุณหพลศาสตร์

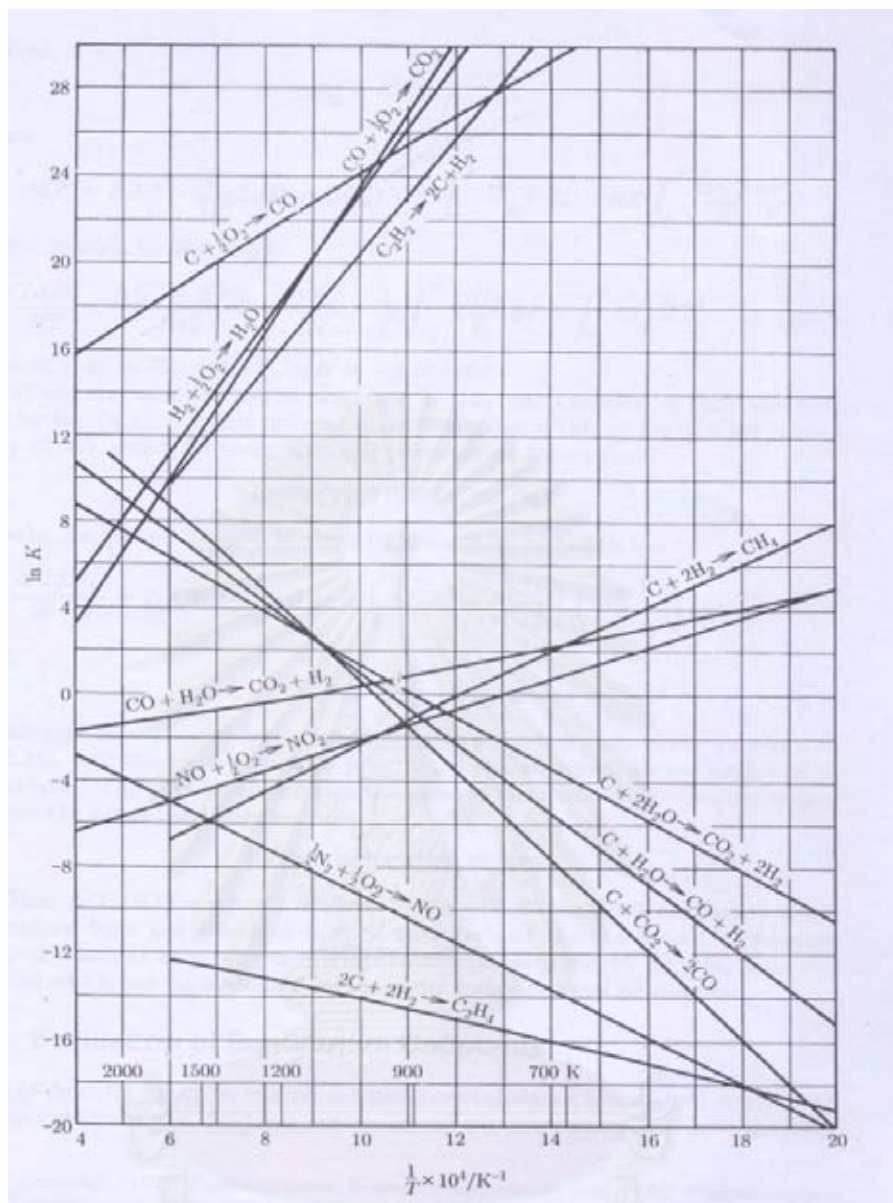
สำหรับการแก้ระบบสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสมดุลเคมีทำได้ 2 วิธี [27] ได้แก่ การแก้ระบบสมการโดยใช้ค่าคงที่สมดุลเคมี และการแก้ระบบสมการโดยใช้การคำนวณพลังงานอิสระของกิบส์ต่ำที่สุด

#### 3.1.1 การแก้ระบบสมการโดยใช้ค่าคงที่สมดุลเคมี

เมื่อระบบปฏิกิริยาหนึ่งเข้าสู่ภาวะสมดุลเคมี สัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมดุลเคมีสำหรับแต่ละปฏิกิริยาเคมีดังนี้

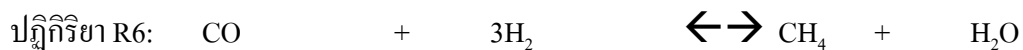
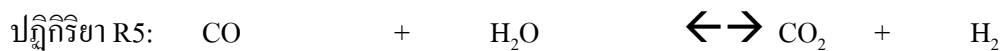
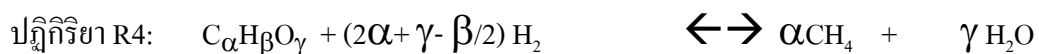
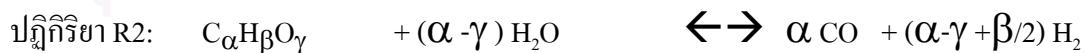
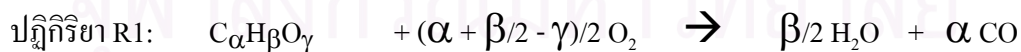
$$K_r(T) = \prod_{i=1}^C \left( \frac{y_i P}{RT} \right)^{\pm \nu_i} \quad (1)$$

โดยที่ค่าคงที่ของสมดุลเคมี  $K_r$  สำหรับปฏิกิริยาเคมี  $r$  ขึ้นกับอุณหภูมิของระบบปฏิกิริยาเคมีเท่านั้น [28] ในขณะที่สัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แต่ละชนิดนั้น ยังคงได้รับอิทธิพลของทั้งอุณหภูมิ โดยรูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุลและอุณหภูมิ โดยสำหรับปฏิกิริยาที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่สมดุลจะมีค่าสูงขึ้น โดยเส้นกราฟในรูปที่ 3.1 จะทำมุมแหลมกับแกน  $x$  เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และในทางกลับสำหรับปฏิกิริยาที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่สมดุลจะมีค่าต่ำลง และเส้นกราฟในรูปที่ 3.1 จะทำมุมป้านกับกับแกน  $x$  เช่น ปฏิกิริยา steam gasification



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของค่า K กับสวณกลับอุณหภูมิ [27]

สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล ระบบปฏิกิริยาประกอบด้วย





เมื่อกำหนดให้  $m_{R1}$   $m_{R2}$   $m_{R3}$  และ  $m_{R4}$  เป็นปริมาณของสารชีวมวล ( $C_\alpha H_\beta O_\gamma$ ) ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา R1 R2 R3 และ R4 ตามลำดับ  $m_{R5}$  และ  $m_{R6}$  เป็นปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา R5 และ R6 ตามลำดับ โดยที่ปฏิกิริยาเคมี R2 ถึง R6 เกิดสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดัน ปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ สามารถคำนวณได้ตามสมการข้างต้นดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ณ สมดุลเคมีของระบบปฏิกิริยา

	$C_\alpha H_\beta O_\gamma$	$O_2$	$H_2O$	$CO$	$CO_2$	$H_2$	$CH_4$
เริ่มต้น	$F_{in,biomass}$	$F_{in,O_2}$	-	-	-	-	-
ปฏิกิริยา R1	$-m_{R1}$	$-(\alpha + \beta/2 - \gamma)/2m_{R1}$	$\beta/2m_{R1}$	$\alpha m_{R1}$	-	-	-
ปฏิกิริยา R2	$-m_{R2}$	-	$-(\alpha - \gamma) m_{R2}$	$\alpha m_{R2}$	-	$(\alpha - \gamma + \beta/2) m_{R2}$	-
ปฏิกิริยา R3	$-m_{R3}$	-	$\gamma m_{R3}$	$2\alpha m_{R3}$	$-\alpha m_{R3}$	$(\beta/2 - \gamma) m_{R3}$	-
ปฏิกิริยา R4	$-m_{R4}$	-	$\gamma m_{R4}$	-	-	$-(2\alpha + \gamma - \beta/2) m_{R4}$	$\alpha m_{R4}$
ปฏิกิริยา R5	-	-	$-m_{R5}$	$-m_{R5}$	$m_{R5}$	$m_{R5}$	-
ปฏิกิริยา R6	-	-	$m_{R6}$	$-m_{R6}$	-	$-3m_{R6}$	$m_{R6}$

เนื่องจากการปฏิกิริยาทำให้จำนวนโมลรวมของระบบอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นจึงต้องคำนวณสัดส่วนโมลของสารประกอบแต่ละชนิด ณ สภาวะสมดุลเคมี โดยสัดส่วนของสารประกอบแต่ละชนิดต้องสัมพันธ์กับปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$y_{C_\alpha H_\beta O_\gamma} = \frac{F_{in,biomass} - m_{R1} - m_{R2} - m_{R3} - m_{R4}}{F_T} \quad (2)$$

$$y_{O_2} = \frac{F_{in,O_2} - \left( (\alpha + \beta/2 - \gamma) / 2 \right) m_{R1}}{F_T} \quad (3)$$

$$y_{H_2O} = \frac{(\beta/2 m_{R1} - (\alpha - \gamma) m_{R2} + \gamma m_{R3} + \gamma m_{R4} - m_{R5} + m_{R6})}{F_T} \quad (4)$$

$$y_{CO} = \frac{(\alpha m_{R1} + \alpha m_{R2} + 2\alpha m_{R3} - m_{R5} - m_{R6})}{F_T} \quad (5)$$

$$y_{CO_2} = \frac{(-\alpha m_{R3} + m_{R5})}{F_T} \quad (6)$$



$$y_{H_2} = \frac{\left( \left( \frac{(\alpha - \gamma + \beta)}{2} \right) m_{R2} + (\beta/2 - \gamma) m_{R3} - (2\alpha + \gamma - \beta/2) m_{R4} + m_{R5} - 3m_{R6} \right)}{F_T} \quad (7)$$

$$y_{CH_4} = \frac{(\alpha m_{R4} + m_{R6})}{F_T} \quad (8)$$

โดยที่

$$F_T = Fin, biomass + Fin, O_2 + (-1 + \alpha/2 + \beta/4 + \gamma) m_{R1} + (-1 + \alpha + \beta/2) m_{R2} + (-1 + \alpha + \beta/2) m_{R3} + (-1 - \alpha + \beta/2) m_{R4} - 2m_{R6} \quad (9)$$

สัดส่วนที่คำนวณในข้างต้นของสารประกอบมีความสัมพันธ์กันตามสมการสมดุลเคมีดังนี้

$$K_{R2} = \left[ \frac{y_{CO}^\alpha y_{H_2}^{\alpha+\beta/2-\gamma}}{y_{C_\alpha H_\beta O_\alpha} y_{H_2O}^{\alpha-\gamma}} \right] \left[ \frac{P}{RT} \right]^{(-1+\alpha/2+\beta/4+\gamma)} \quad (10)$$

$$K_{R3} = \left[ \frac{y_{CO}^{2\alpha} y_{H_2O}^\gamma y_{H_2}^{\beta/2-\gamma}}{y_{C_\alpha H_\beta O_\alpha} y_{CO_2}^\alpha} \right] \left[ \frac{P}{RT} \right]^{(-1+\alpha+\beta/2)} \quad (11)$$

$$K_{R4} = \left[ \frac{y_{CH_4}^{2\alpha} y_{H_2O}^\gamma}{y_{C_\alpha H_\beta O_\alpha} y_{H_2}^{2\alpha+\gamma-\beta/2}} \right] \left[ \frac{P}{RT} \right]^{(-1-\alpha+\beta/2)} \quad (12)$$

$$K_{R4} = \left[ \frac{y_{CO_2} y_{H_2O}}{y_{CO} y_{H_2O}} \right] \quad (13)$$

$$K_{R4} = \left[ \frac{y_{CH_4} y_{H_2O}}{y_{CO} y_{H_2}^3} \right] \left[ \frac{P}{RT} \right]^{-2} \quad (14)$$

และเนื่องจากปฏิกิริยา R1 ไม่ได้เกี่ยวข้องกับสมดุลเลย นั่นคือ  $m_{R1}$  สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนตามมวลสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยา R1 ได้โดยตรง ดังนั้นระบบสมการทางคณิตศาสตร์จึงประกอบไปด้วย สมการสัดส่วนโดยโมลของสารประกอบแต่ละชนิด (7 สมการ) สมการสมดุลเคมี (5 สมการ) และสมการมวลสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยา R1 ในขณะที่ตัวแปรของระบบสมการ

ประกอบด้วย ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปของสารประกอบในแต่ละปฏิกิริยา ( $m_R$ ) 6 ตัวแปร สัดส่วนโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ ( $y_i$ ) 7 อัตราการป้อนของสารชีวมวล อัตราการไหลของออกซิเจน ตัวแปร อุณหภูมิ และความดันของระบบปฏิกิริยา ดังนั้นระบบสมการนี้มีจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการอยู่ 4 ตัวแปร จึงต้องกำหนดค่าตัวแปรเพิ่มอีก 4 ตัวแปร นั่น คือ กำหนด อุณหภูมิ ความดัน อัตราการป้อนสารชีวมวล และอัตราไหลของออกซิเจน เพื่อให้เพียงพอสำหรับการหาคำตอบ

แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ การแก้สมการจะต้องทราบปฏิกิริยาที่แน่นอนแต่ในระบบปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีบางปฏิกิริยาไม่ทราบปฏิกิริยาที่แน่นอน เช่นปฏิกิริยาไพโรไลซิส ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และในการแก้ระบบสมการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยานั้น ระบบสมการที่ต้องแก้มีความยุ่งยากและซับซ้อนจึงเป็นวิธีที่ยากและใช้เวลานาน

### 3.1.2 การแก้ระบบสมการ โดยใช้การคำนวณพลังงานอิสระของกิบส์ต่ำที่สุด

การแก้ระบบสมการ โดยใช้การคำนวณพลังงานอิสระของกิบส์ต่ำที่สุดนั้นมีขั้นตอนในการแก้ดังนี้

#### 3.1.2.1 การดุลอะตอมมวลสาร

จากกฎการอนุรักษ์มวลสาร การดุลมวลสารของระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันเขียนได้ดังนี้

$$\sum_i (y_i a_{ik}) = \frac{A_k}{\sum_i n_i} \quad (15)$$

$i$  แทนสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับระบบการแก๊สซิฟิเคชัน

สมการที่ นี้จะแก้ได้ต้องอาศัยสมการเพิ่มเติมอีก สมการซึ่งมาจาก กฎของดาวตัน (Dalton's law) ซึ่งกล่าวว่าผลรวมของสัดส่วนโดยโมลของสารประกอบแก๊สในสายออกของเครื่องแก๊สซิฟิเคชันต้องเท่ากับ 1 ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

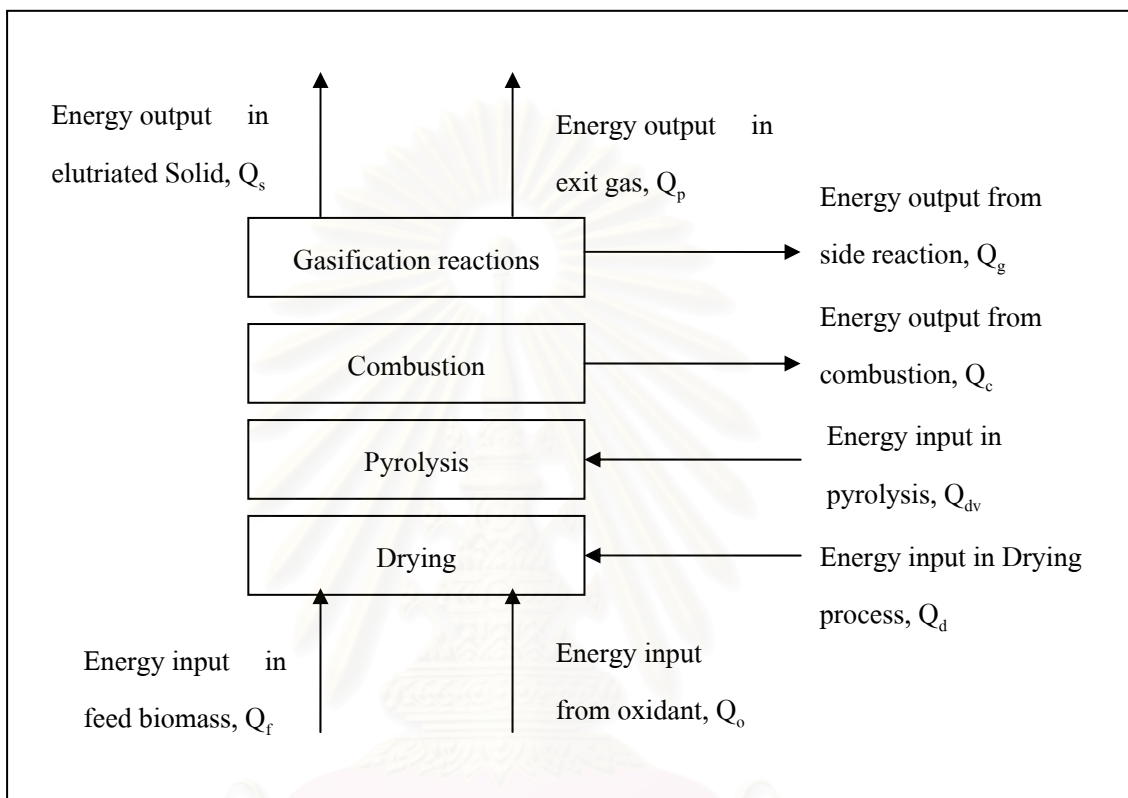
$$\sum_i y_i = 1 \quad (16)$$

#### 3.1.2.1 การดุลพลังงาน

จากสมการการอนุรักษ์พลังงานในระบบเปิด

$$\Delta H = Q + W \quad (17)$$

เนื่องจากไม่มีงานเข้าออกจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี คือ ความร้อนที่ไหลเวียนอยู่ในระบบ ซึ่งมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา โดยแสดงให้เห็นในรูปที่ 6 และสมการอนุรักษ์พลังงานสามารถเขียนได้ใหม่เป็น



รูปที่ 3.2 การแลกเปลี่ยนเอนทาลปีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

$$\begin{aligned} \Delta H = & Q_f(T, P)|_{Biomass} + Q_o(T, P)|_{Oxidant} - Q_s(T, P)|_{Solid} - Q_p(T, P)|_{Pr\ oduct\ gas} \\ & + Q_d(T, P)|_{Drying} + Q_{dv}(T, P)|_{Devolatilization} - Q_c(T, P)|_{Combustion} - Q_g|_{Sidereactions} \end{aligned} \quad (18)$$

ถ้าเครื่องปฏิกรณ์ปฏิบัติการแบบแอดิเอแบติก นั่นคือ  $\Delta H$  มีค่าเป็น 0

$$\begin{aligned} 0 = & Q_f(T, P)|_{Biomass} + Q_o(T, P)|_{Oxidant} - Q_s(T, P)|_{Solid} - Q_p(T, P)|_{Pr\ oduct\ gas} \\ & + Q_d(T, P)|_{Drying} + Q_{dv}(T, P)|_{Devolatilization} - Q_c(T, P)|_{Combustion} - Q_g|_{Sidereactions} \end{aligned} \quad (19)$$

### 3.1.2.2 การคำนวณ องค์ประกอบของแก๊สที่สมดุล

พิจารณาพลังงานอิสระของกิบส์ในระบบที่เป็นแก๊สผสม

$$G_T = nG(T, P, n_i) \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, C$$

สมการนี้สามารถเขียนได้อีกรูปหนึ่งนั่นคือ

$$d(G_T) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{P, n} dT + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T, n} dP + \sum_{i=1}^C \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_j} dn_i \quad (20)$$

จากคำจำกัดความสำหรับสมบัติของสารเมื่ออยู่ในสารผสม (Partial property,  $\overline{M}_i$ )

$\overline{M}_i = \left[ \frac{\partial M}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_j}$  เมื่อ M เป็นสมบัติที่ขึ้นกับปริมาณ (Extensive property) ดังนั้น สมการข้างบนจึงเปลี่ยนเป็น

$$d(G_T) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{P, n} dT + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T, n} dP + \sum_{i=1}^C \overline{G}_i dn_i \quad (21)$$

จากทฤษฎีของกิบส์และดูแฮม (Gibbs & duhem's theorem) [29]

$$\sum \overline{M}_i dn_i = 0 \quad (22)$$

สมการข้างบนจึงเปลี่ยนเป็น

$$d(G_T) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{P, n} dT + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T, n} dP \quad (23)$$

ที่สภาวะสมดุลเคมี อุนท์ภูมิและความดันของระบบมีค่าคงที่ ค่าอนุพันธ์ที่เทียบกับอุนท์ภูมิ และความดันจึงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$(dG_{system})_{T, P} = 0 \quad (24)$$

ซึ่งค่าพลังงานรวมอิสระของกิบส์นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$nG = \sum (n_i \Delta G_{fi}^0) + (\sum n_i) RT \ln P + RT \sum (n_i \ln y_i) + RT \sum (n_i \ln \hat{\phi}_i) \quad (25)$$

ซึ่งพลังงานรวมอิสระของกิบส์นั้นกล่าวอีกในหนึ่งคือมีค่าต่ำที่สุดที่สภาวะที่เกิดสมดุลเคมีที่ อุณหภูมิ และความดันที่กำหนด การคำนวณเพื่อแก้คำตอบเพื่อให้สมการที่ 25 โดยปกติแล้วจะใช้ วิธีการคำนวณของลากรานจ์ (Lagrange) ซึ่งเป็นการสร้างฟังก์ชันผูกความสัมพันธ์พลังงานอิสระ ของระบบรวม กับสมการอนุรักษ์อะตอมมวลสารไว้ด้วยกัน โดยวิธีการดังนี้

1. จัดรูปสมการอนุรักษ์มวลสารของแต่ละ อะตอม (สมการที่ 15) ใหม่

$$\sum_i (n_i a_{ik}) - A_k = 0 \quad (26)$$

2. คูณค่าคงที่ของลากรานจ์  $\lambda_k$  ทั้งสองข้างของสมการอนุรักษ์มวลสารของแต่ละอะตอม ของธาตุ แล้วทำการทำรวมทุกสมการอะตอมของธาตุ ได้เป็น สมการเดียวดังนี้

$$\sum_k \left[ \lambda_k \left( \sum_i (n_i a_{ik}) - A_k \right) \right] = 0 \quad (27)$$

3. นำสมการนี้ไปรวมกับสมการพลังงานรวมของกิบส์ในระบบ (สมการที่ 25) ที่ทางฝั่ง

ขวาของสมการ และแทนที่  $y_i$  ด้วย  $\frac{n_i}{\sum_i n_i}$  จะได้

$$\begin{aligned} nG = & \sum_i (n_i \Delta G_{fi}^0) + \left( \sum_i n_i \right) RT \ln P + RT \sum_i \left( n_i \ln \frac{n_i}{\sum_i n_i} \right) + RT \sum_i (n_i \ln \hat{\phi}_i) \\ & + \sum_k \left[ \lambda_k \left( \sum_i (n_i a_{ik}) - A_k \right) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

4. ทำการอนุพันธ์สมการที่ 28 ซึ่งเป็นฟังก์ชันต่ำสุด เทียบกับสารประกอบแต่ละชนิดที่

สภาวะ อุณหภูมิ ความดันที่สภาวะสมดุล หรือค่า  $\left[ \frac{\partial (nG)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_j}$  ซึ่งจะได้ค่าของแต่ละสมการมีค่า เป็นศูนย์ โดยสมการที่ 28 จึงเปลี่ยนใหม่เป็น

$$\Delta G_{fi}^0 + RT (\ln P + \ln y_i + \ln \hat{\phi}_i) + \sum_k [\lambda_k a_{ik}] = 0 \quad (29)$$

สำหรับแก๊สในอุดมคติ ค่า  $\hat{\phi}_i$  มีค่าเป็น 0 แต่ถ้าในกรณีที่ค่า  $\hat{\phi}_i$  ไม่เท่ากับศูนย์หรือแก๊สจริงนั้น สมการของ เพง-โรบินสัน (Peng-Robinson equation) เหมาะสำหรับใช้อธิบายระบบปฏิกิริยานี้ สำหรับสมการที่ 29 นั้นสามารถเขียนออกมาได้ตามจำนวนสารประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สมดุลเคมี ที่พิจารณา นั้น คือ  $i$  สมการ รวมกับสมการที่ 15 ที่สามารถเขียนออกมาได้ 3 สมการตามจำนวน

อะตอมที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยานั้นคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน โดยสามารถสรุปสมการได้ดังนี้

จากสมการที่ (19) สามารถเขียนปฏิกิริยาได้ 6 สมการ ตามสารประกอบที่สมดุลดังนี้ [30]

$$C : \Delta G_{f,C}^0 + RT(\ln P + \ln y_C + \ln \hat{\phi}_C) + \lambda_C = 0 \quad (30)$$

$$H_2 : \Delta G_{f,H_2}^0 + RT(\ln P + \ln y_{H_2} + \ln \hat{\phi}_{H_2}) + 2\lambda_H = 0 \quad (31)$$

$$CO : \Delta G_{f,CO}^0 + RT(\ln P + \ln y_{CO} + \ln \hat{\phi}_{CO}) + \lambda_C + \lambda_O = 0 \quad (32)$$

$$CO_2 : \Delta G_{f,CO_2}^0 + RT(\ln P + \ln y_{CO_2} + \ln \hat{\phi}_{CO_2}) + \lambda_C + 2\lambda_O = 0 \quad (33)$$

$$CH_4 : \Delta G_{f,CH_4}^0 + RT(\ln P + \ln y_{CH_4} + \ln \hat{\phi}_{CH_4}) + \lambda_C + 4\lambda_H = 0 \quad (34)$$

$$H_2O : \Delta G_{f,H_2O}^0 + RT(\ln P + \ln y_{H_2O} + \ln \hat{\phi}_{H_2O}) + 2\lambda_H + \lambda_O = 0 \quad (35)$$

จากสมการที่ (15) สามารถเขียนได้ 3 สมการตามอะตอมที่เกี่ยวข้อง

$$C : y_C + y_{CO} + y_{CO_2} + y_{CH_4} = (\alpha F_{C_{\alpha H \beta O \gamma, in}}) / \sum n_i \quad (37)$$

$$H : 2y_{H_2} + 4y_{CH_4} + 2y_{H_2O} = (\beta F_{C_{\alpha H \beta O \gamma, in}}) / \sum n_i \quad (38)$$

$$O : y_{CO} + 2y_{CO_2} + y_{H_2O} = (\gamma F_{C_{\alpha H \beta O \gamma, in}} + 2F_{O_2, in}) / \sum n_i \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad \sum n_i &= n_C + n_{CO} + n_{H_2} + n_{CO_2} + n_{CH_4} + n_{H_2O} \\ \sum y_i &= y_C + y_{CO} + y_{H_2} + y_{CO_2} + y_{CH_4} + y_{H_2O} = 1 \end{aligned} \quad (40)$$

โดยหลักการเราต้องแก้ระบบสมการพีชคณิตเหล่านี้ไปพร้อมๆกัน โดยอนุกรมกับความดันนั้น จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ 19 ในกรณีนี้ที่เครื่องปฏิกรณ์ปฏิบัติการแบบแอเดียแบติก ทำให้ระบบสมการมีความยุ่งยากในการแก้สมการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้สร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อลดเวลาและความยุ่งยากในการแก้สมการ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้คือโปรแกรม Provision 2



## บทที่ 4

### วิธีการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

วิธีการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักๆ คือ

- ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสารชีวมวลสำหรับใช้ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
- ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้ทำนายแก๊สผลิตภัณฑ์
- ขั้นตอนการตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวลและแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล
- ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น

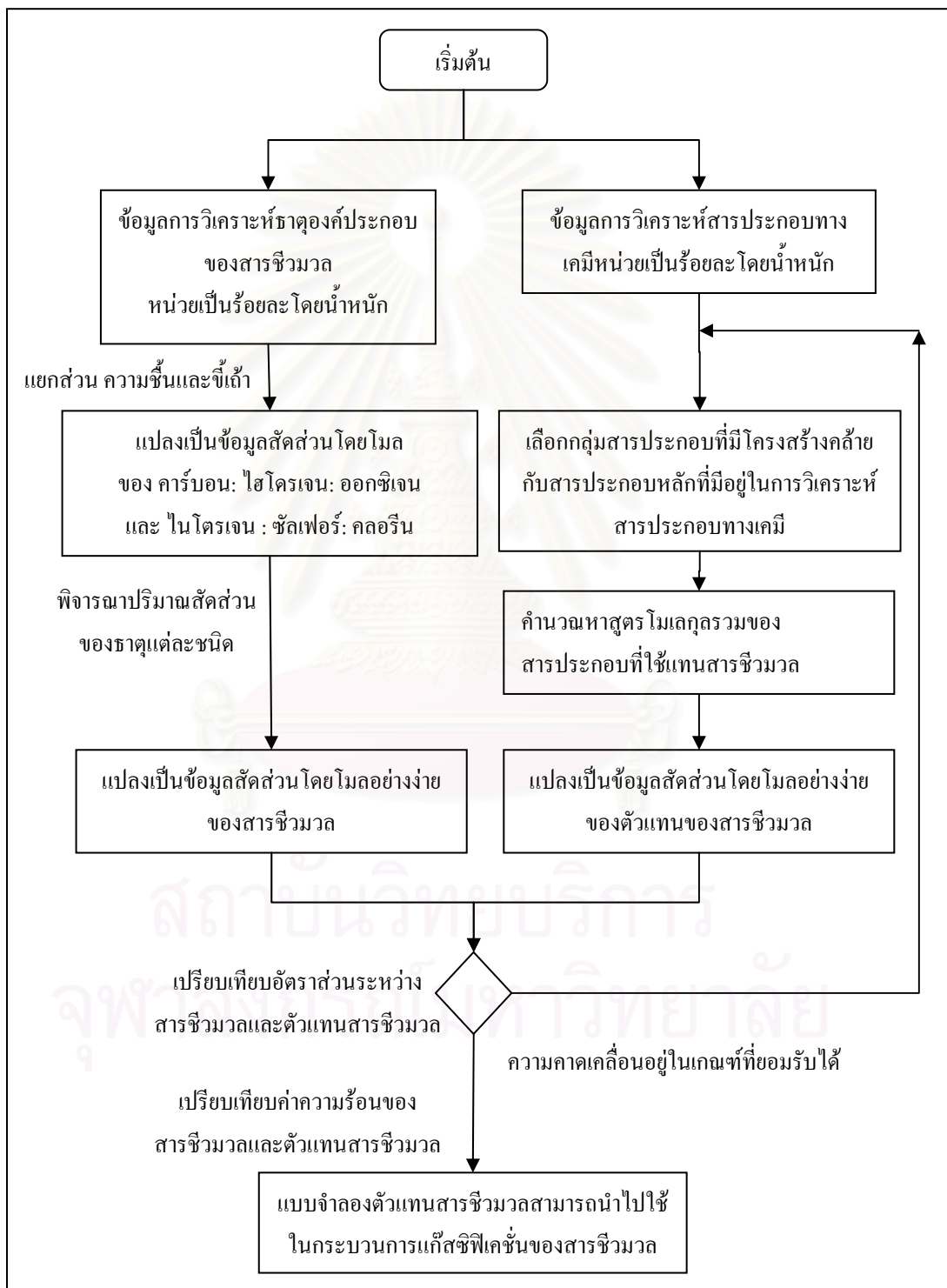
สำหรับในขั้นตอนของการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบ่ง ออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามชนิดของตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ คือ การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้อากาศและการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

#### 4.1 การสร้างแบบจำลองสารชีวมวลเพื่อใช้แทนสารชีวมวล (Biomass model)

การสร้างกลุ่มสารประกอบเพื่อใช้แทนสารชีวมวลจะใช้ข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของสารชีวมวลและข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเปลี่ยนร้อยละโดยมวลที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของสารชีวมวลเป็นอัตราส่วนโดยโมลของธาตุ คาร์บอน ต่อ ไฮโดรเจน ต่อ ออกซิเจน ต่อ ไนโตรเจน ต่อ ซัลเฟอร์ ต่อ คลอรีน และอัตราส่วนโดยโมลของธาตุองค์ประกอบที่เหลือ โดยแยกความชื้นกับขี้เถ้าออกไปเป็น สารประกอบอื่น
2. เปลี่ยนอัตราส่วนที่ได้จากข้อแรกเป็นอัตราส่วนอย่างง่าย
3. เลือกกลุ่มสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายกับสารประกอบที่มีอยู่ในข้อมูลวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีและเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในฐานข้อมูลในโปรแกรมสำเร็จรูปโดยโปรแกรมสำเร็จที่ใช้ คือ Provision โดยองค์ประกอบหลักและสารประกอบที่ใช้จำลองอยู่ในตารางที่ 4.1

4. คำนวณสูตรโมเลกุลรวมของกลุ่มสารประกอบที่ใช้แทนสารชีวมวลแปลงเป็นข้อมูลสัดส่วนโดยโมลอย่างง่ายของตัวแทนของชีวมวล
5. เปรียบเทียบอัตราส่วนที่ได้จากข้อ 2 และ 4 และค่าความร้อนจากการเผาไหม้ (Heating value) ของสารชีวมวลและตัวแทนสารชีวมวล



รูปที่ 4.1 แผนผังการสร้างกลุ่มสารประกอบเพื่อใช้แทนสารชีวมวล

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบหลักและสารประกอบที่ใช้ในการจำลองแต่ละส่วนของสารชีวมวล

องค์ประกอบทางเคมี	องค์ประกอบหลักที่พบ	กลุ่มสารประกอบที่ใช้จำลอง
ลิกนิน	Polymer of P-hydroxyphenylpropane	Phenyl propane
เซลลูโลส	Polymer of derivative of glucose	glucose
เฮมิเซลลูโลส	Polymer of derivative of xylose	Aldehyde of pentane sugar
ส่วนที่สกัดได้ <sup>n</sup>	Ester of fatty acid	Ester of fatty acid <sup>n</sup>
	Wax	High molecular weight alcohol
	Fatty acid	Oleic, linoleic, or palmitic acid <sup>n</sup>

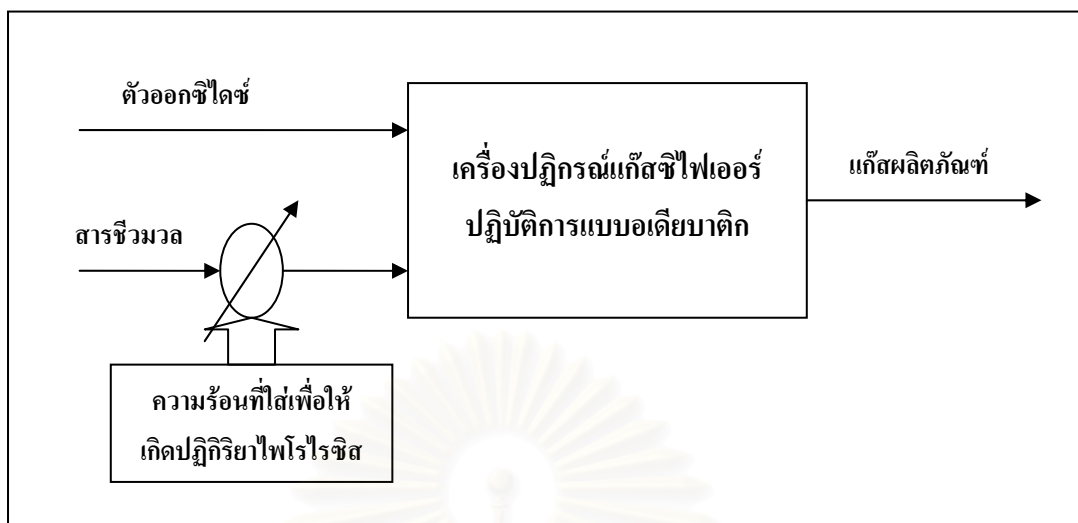
<sup>n</sup> ขึ้นอยู่กับสารชีวมวลที่ใช้

#### 4.2 การสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification model)

การจำลองของระบบปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล สำหรับงานวิจัยนี้ สนใจถึงลำดับการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาซึ่งโดยปกติแล้วไม่ทราบแน่ชัดว่าในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องหนึ่งนั้นจะมีปฏิกิริยาใดเกิดขึ้นอะไรบ้าง ปฏิกิริยาไหนเกิดก่อนหรือเกิดหลัง เกิดพร้อมกันหรือเกิดเป็นลำดับ นอกจากนี้ระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันเป็นระบบปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสมดุล ลำดับปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไปนั้น ส่งผลต่อสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ณ สมดุลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในบทที่ 3 ฉะนั้นการจัดลำดับปฏิกิริยาเพื่อทำนายแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเหมาะกับกระบวนการนี้

##### 4.2.1 ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล มีด้วยกันดังนี้คือ

1. ระบบปฏิกิริยาที่สนใจ เข้าสู่สมดุล ณ อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก่อนคือ ปฏิกิริยาไพโรไลซิส
2. เครื่องปฏิกรณ์ปฏิบัติการแบบแอเดียติก แต่ในความเป็นจริงในการทดลองนั้นมีการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ดังนั้นการจำลองจึงเป็นดังรูปที่ 4.2 โดยนำความร้อนไปใส่ในอุปกรณ์เพิ่มความร้อนใต้อ่างชีวมวลก่อนเข้า



รูปที่ 4.2 การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ปฏิบัติการแบบอเดียบาติก

3. ถ่านในแบบจำลองนั้นใช้เป็นคาร์บอนอะตอม
4. แก๊สผลิตภัณฑ์ที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือแก๊ส  $\text{CO}$   $\text{CO}_2$   $\text{H}_2$   $\text{CH}_4$   $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{N}_2$
5. ความชื้นเริ่มต้นที่สนใจของสารชีวมวลจะกำหนดจากความชื้นสูงสุดที่ยอมให้มีในสารชีวมวลก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน คือ ร้อยละ 20 ของ โดยพิจารณาจากการเก็บรักษาชีวมวลก่อนขนถ่ายเข้าสู่กระบวนการผลิต
6. สมการที่ใช้คำนวณ ตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองที่เลือกใช้ในที่นี่ คือ Peng Robinson เนื่องจากเป็นสมการสถานะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต ซึ่งการคัดเลือกสมการอุณหพลศาสตร์ใช้ตารางแบ่งกลุ่มสมการทางอุณหพลศาสตร์ตามชนิดอุตสาหกรรมต่างๆที่อยู่ในคู่มือ Aspen plus โดยบางส่วนของตารางแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมการสถานะที่สามารถใช้ได้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ชนิดอุตสาหกรรม	สมการที่เหมาะสม
การผลิตแก๊สสังเคราะห์	BWR-Lee-Strling
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	Lee-Kesler-Plocker
กระบวนการเผาไหม้	Peng Robinson
	Redlich-Kwong-Soave

4.2.2 การหาสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จากแบบจำลอง  
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้วิธีการจัดลำดับของปฏิกิริยา

ระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลนั้นเกี่ยวข้องกับสมดุลเคมี ซึ่งการเปลี่ยนลำดับ  
ของแต่ละปฏิกิริยา ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลต่อสมดุลของปฏิกิริยานั้น ๆ ทำให้สัดส่วนของ  
แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์มีค่าแตกต่างกัน โดยสามารถใช้เกณฑ์นี้ในการพิจารณา  
เปรียบเทียบกับสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะเครื่อง  
ปฏิกรณ์อากาศไหลลงและเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด เนื่องจากเป็นเครื่องที่นิยมใช้กันมาก ซึ่ง  
วิธีการจัดลำดับของปฏิกิริยานั้นทำได้โดยแยกแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็นแบบจำลองเครื่อง  
ปฏิกรณ์ของตามปฏิกิริยาโดยให้สารประกอบที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเป็นสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยา  
โดยระบบปฏิกิริยาที่ใช้ในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลดังแสดงไว้ใน  
ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ระบบปฏิกิริยาที่ใช้ในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ชนิดปฏิกิริยา	ปฏิกิริยา	ชื่อย่อปฏิกิริยา
Pyrolysis <sup>n</sup>	$C_\alpha H_\beta O_\gamma \rightarrow y_1 C + y_2 H_2 + y_3 H_2O + y_4 CO + y_5 CO_2 + y_6 CH_4$	P1
Oxidation <sup>n</sup>	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	O1
	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	O2
	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	O3
	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	O4
Boudouard reaction	$C + CO_2 = 2CO$	G1
Hydrogasification	$C + 2H_2 = CH_4$	G2
Steam gasification	$C + 2H_2O = CO + H_2$	G3
Water-gas shift reaction	$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	G4
Methanation	$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$	G5

<sup>n</sup> ไม่ทราบปฏิกิริยาที่แน่นอน

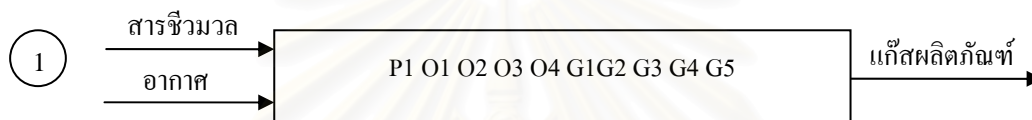
<sup>n</sup> ไม่เกิดขึ้นสำหรับระบบปฏิกิริยาที่ใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

โดยจากตารางพบว่าระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลประกอบด้วยปฏิกิริยา  
ต่าง ๆ มากมายโดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรก คือ ปฏิกิริยา  
ไพโรไลซิสซึ่งไม่ทราบปฏิกิริยาที่แน่นอนขึ้นอยู่กับสารชีวมวลที่นำมาใช้ กลุ่มที่สอง คือ กลุ่ม  
ปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นกลุ่มปฏิกิริยาที่ไม่มีสมดุลเคมีมาเกี่ยวข้อง และจะไม่เกิดขึ้นถ้าใช้ไอน้ำ  
เป็นตัวออกซิไดซ์ และกลุ่มสุดท้าย คือ กลุ่มปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นกลุ่มปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง

กับสมดุลเคมี จากการทำปฏิกิริยามากมาย ทำให้สามารถจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้หลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ 2 แบบตามชนิดของตัวออกซิไดซ์ที่ คือ การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ และการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

4.2.2.1 แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์แบ่งได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

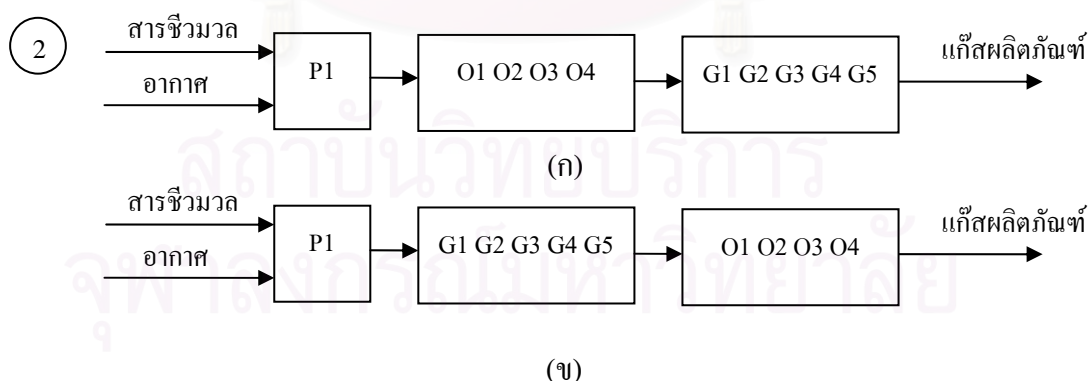
- รูปแบบที่ 1 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว

- รูปแบบที่ 2 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกิริยา

โดยในรูปแบบการจัดลำดับแบบที่ 2 นั้น สามารถจัดลำดับปฏิกิริยาโดยแบ่งระบบปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาไพโรไลซิส ออกซิเดชันและแก๊สซิฟิเคชัน โดยในรูปแบบนี้สามารถสลับลำดับปฏิกิริยาออกซิเดชัน และแก๊สซิฟิเคชันได้ ดังรูปที่ 4.4



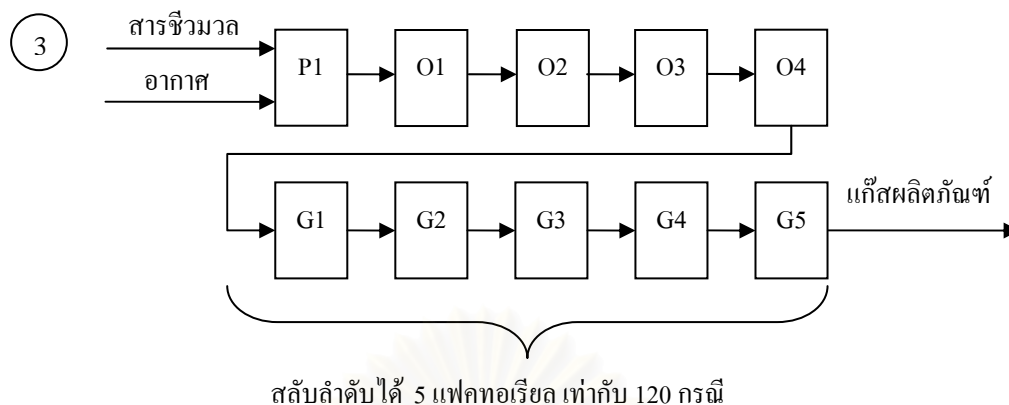
รูปที่ 4.4 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกิริยา

(ก) ลำดับปฏิกิริยาเป็น ไพโรไลซิส --> ออกซิเดชัน --> แก๊สซิฟิเคชัน

(ข) ลำดับปฏิกิริยาเป็น ไพโรไลซิส --> แก๊สซิฟิเคชัน --> ออกซิเดชัน



- รูปแบบที่ 3 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกิริยา



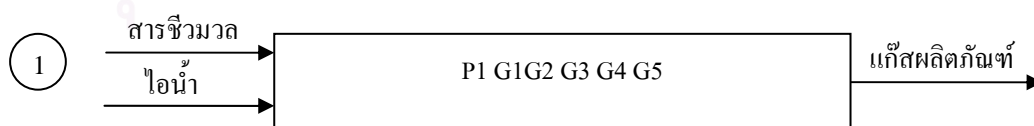
**รูปที่ 4.5** แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์  
แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกิริยา

โดยในแบบการจัดลำดับแบบที่ 3 นั้น สามารถจัดลำดับปฏิกิริยา การแก๊สซิฟิเคชันโดยสลับลำดับย่อย G1 G2 G3 G4 G5 เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสมดุลเคมี ซึ่งการสลับลำดับนี้มีผลทำให้สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะเกิดรูปแบบทั้งหมด 5 แพลทอเรียล หรือ 120 กรัม นั่นเอง ดังรูปที่ 4.5

4.2.2.2 แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

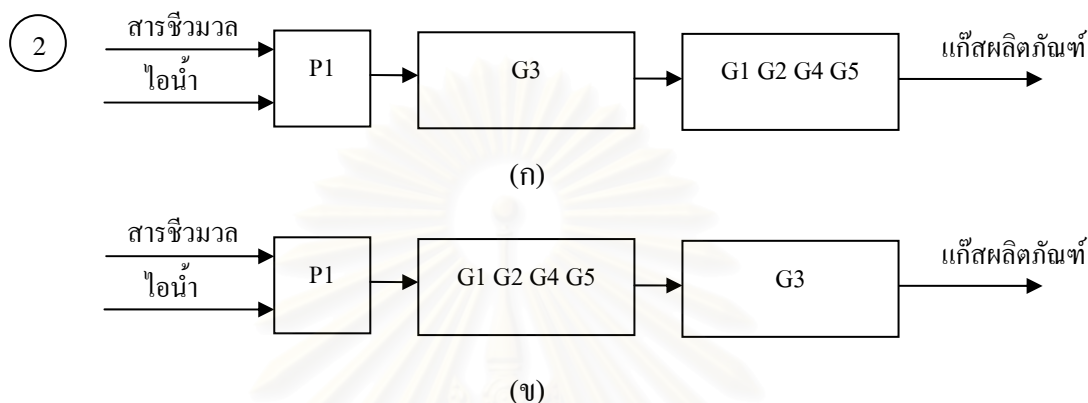
ระบบปฏิกิริยาการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์แตกต่างกับระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ตรงที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ดังนั้นรูปแบบการจัดเรียงปฏิกิริยาเพื่อทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์จึงมีดังนี้

- รูปแบบที่ 1 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว



**รูปที่ 4.6** แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันโดยใช้อิน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์  
แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว

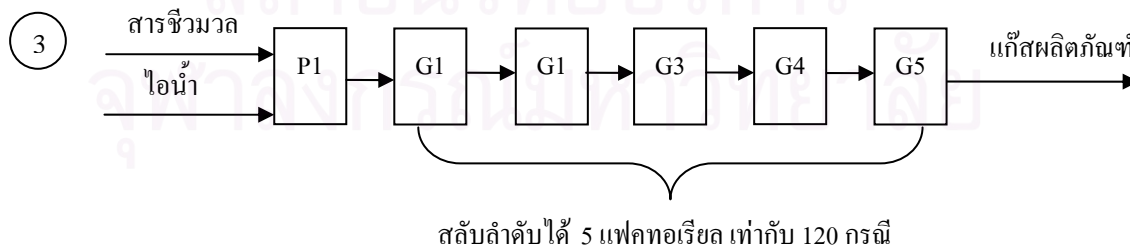
- รูปแบบที่ 2 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกิริยา เนื่องจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ไม่มีกลุ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันมาเกี่ยวข้อง จึงทำให้กลุ่มปฏิกิริยามีแค่ ปฏิกิริยาไพโรไลซิส และแก๊สซิฟิเคชัน แต่เนื่องจาก ปฏิกิริยา G3 เป็นปฏิกิริยาหลักของกระบวนการนี้ดังนั้นจึงแยก G3 ออกจากกลุ่มออกซิเดชัน ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกิริยา

- (ก) ลำดับปฏิกิริยาเป็น ไพโรไลซิส --> Steam gasification -->แก๊สซิฟิเคชัน
- (ข) ลำดับปฏิกิริยาเป็น ไพโรไลซิส -->แก๊สซิฟิเคชัน --> Steam gasification

- รูปแบบที่ 3 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกิริยา ในทำนองเดียวกันกับรูปแบบการจัดลำดับแบบที่ 3 ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ กลุ่มปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสมดุลซึ่ง คือ ปฏิกิริยา G1 G2 G3 G4 และ G5 ซึ่ง สามารถนำมาจัดลำดับเพื่อให้ได้สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกิริยา

### 4.3 การตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวลและแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

#### 4.3.1 การตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวล

การตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวลจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนอะตอมที่ได้จากข้อมูลการวิเคราะห์สัดส่วนอะตอมของสารชีวมวลกับสัดส่วนอะตอมที่คำนวณได้จากแบบจำลองสารชีวมวล โดยผลการเปรียบเทียบที่ทำให้ค่า RSS (Residue Sum of Square) มีค่าต่ำสุดซึ่งค่า RSS สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 41

$$RSS = \sum_i^N \left( \frac{C_{ie} - C_{ic}}{C_{ie}} \right)^2 \quad (41)$$

โดย  $C_{ie}$  เป็นสัดส่วนอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในสารชีวมวล ธาตุ  $i$  และ  $C_{ic}$  เป็นสัดส่วนอะตอมธาตุ  $i$  ที่ได้จากการคำนวณสัดส่วนอะตอมของแบบจำลองสารชีวมวล ซึ่งการตรวจสอบที่กล่าวมานี้เป็นการตรวจสอบเชิงมวล นอกจากนี้ต้องพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ระหว่างตัวแทนสารชีวมวลกับเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นการตรวจสอบเชิงความร้อน จึงจะสามารถนำแบบจำลองสารชีวมวลไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้

#### 4.3.2 การตรวจสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

ในทำนองเดียวกันกับการตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวล การตรวจสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศและใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ จะพิจารณาจากค่า RSS เช่นกัน โดยรูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยาของแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลที่ให้ค่า RSS ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองและสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะเดียวกัน จะเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล สำหรับค่า RSS นั้น คำนวณได้จากสมการที่ 30 ได้เช่นกัน โดยกรณีนี้ ตัวแปร  $C_{ie}$  จะแทนสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์  $i$  ที่ได้จากการทดลอง และ  $C_{ic}$  จะแทนสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์  $i$  ที่ทำนายได้จากแบบจำลอง นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันที่ได้รายงานไว้ในผลการทดลองกับอุณหภูมิที่ได้ในแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าคงที่สมดุล

#### 4.4 การทดสอบแบบจำลองที่พัฒนา

การทดสอบแบบจำลองที่พัฒนา จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ถูกระบุให้คงที่ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล เพื่อดูแนวโน้มของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งตัวแปรที่พิจารณาประกอบด้วยปริมาณมวลตัวออกซิไดซ์ต่อปริมาณมวลสารชีวมวล ปริมาณความชื้นภายในสารชีวมวล และปริมาณความร้อนที่ให้แก่ระบบ

#### 4.5 การประเมินพลังงานสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

พลังงานสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งได้ 2 ส่วน คือ พลังงานที่ต้องให้แก่ระบบ เช่น พลังงานที่ต้องใช้สำหรับการระเหยน้ำ พลังงานความร้อนที่ต้องให้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส อีกส่วนหนึ่ง คือ พลังงานที่ต้องเอาออกจากระบบ เช่น ความร้อนที่ต้องเอาออกจากสายผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปใช้ โดยพิจารณาแยกกันเป็นพลังงานสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์และโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ ในกรณีที่ปริมาณความร้อนที่ต้องเอาออกมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความร้อนที่ต้องให้แก่ระบบและอุณหภูมิของสายที่ต้องเอาความร้อนออกมีค่ามากกว่าสายที่ต้องให้ความร้อนจะสามารถนำความร้อนส่วนนี้มาใช้ร่วมกันได้โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และความร้อนส่วนที่เหลือหลังจากการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

การทำนายสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล ภายใต้เงื่อนไขสมดุลเคมีที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งปฏิกิริยาจากพลังงานอิสระของกิบส์ เป็นวิธีการที่สะดวกกว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ค่าคงที่สมดุลเคมี ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยในบทนี้การตรวจสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล ทำได้โดยเปรียบเทียบสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้กับผลการทดลองซึ่งมีผู้วิจัยต่างได้ทดลองเอาไว้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลสถานะและสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองจากสารชีวมวล  
บางชนิด

สารชีวมวล	ซังข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ฟางข้าว	เปลือก อัลมอนต์
เครื่องปฏิกรณ์	ฟลูอิดไคซ์ เบด	อากาศไหลลง	อากาศไหลลง	ฟลูอิดไคซ์เบด
ตัวออกซิไดซ์	อากาศ	อากาศ	อากาศ	ไอน้ำ
ปริมาณมวลตัวออกซิไดซ์ต่อมวลสารชีวมวล	0.28-0.30	0.28-0.30	0.31	0.63
อุณหภูมิในสายตัวออกซิไดซ์(K)	303	303	303	403
อุณหภูมิในสายชีวมวล (K)	303	303	303	303
ปริมาณความร้อนที่ต้องให้ (kJ/kg biomass)	ไม่ได้รายงาน	795	750	ไม่ได้รายงาน
ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ (atm)	1	1	1	1
อุณหภูมิในสารแก๊สผลิตภัณฑ์ (K)	973-1173	923-1057	913-1073	1073-1273
ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์				
CO	22	18	14	25
H <sub>2</sub>	17	16.5	19	38
CO <sub>2</sub>	10	9	11	12
CH <sub>4</sub>	3	4	5	5
H <sub>2</sub> O	10	8	7	20
N <sub>2</sub>	36	39.5	40	0
ปริมาณของแข็งที่เหลือ	2	5	4	0
หลักฐานอ้างอิง	[11]	[12]	[13]	[14]

จากตารางที่ 5.1 พบว่า สัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้สารชีวมวลต่างชนิดกันในเครื่องปฏิกรณ์และตัวออกซิไดซ์ชนิดเดียวกันมีค่าไม่เท่ากัน และสารชีวมวลชนิดเดียวกันแต่เกิดในสภาวะต่างกันคือตัวออกซิไดซ์หรือเครื่องปฏิกรณ์ต่างชนิดกัน สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็แตกต่างกันเช่นกัน ดังนั้นการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลชนิดต่างๆ จึงต้องสนใจถึงการจำลองสารชีวมวลและการจำลองระบบปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์

## 5.1 ผลการสร้างแบบจำลองสารชีวมวลเพื่อใช้แทนสารชีวมวล

เนื่องจากสารชีวมวลนั้นเป็นสารประกอบอินทรีย์มีสูตรโมเลกุลไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสัดส่วนธาตุองค์ประกอบภายในชีวมวลแต่ละชนิด ในขั้นตอนการจำลองสารชีวมวลจึงได้ใช้ข้อมูลวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 มาใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกในสารประกอบที่ใช้เป็นแบบจำลองสารชีวมวล ซึ่งจากข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ เมื่อคำนวณแยกส่วนที่เป็นความชื้นและส่วนที่ได้ออกเหลือแต่ส่วนที่เผาไหม้ได้ พบว่าสัดส่วนธาตุอะตอมของส่วนที่เผาไหม้ได้ในสารชีวมวลจะเหลือองค์ประกอบของอะตอมที่เป็นธาตุ C H และ O รวมกันอยู่ร้อยละ 99 โดยมวลของสัดส่วนทั้งหมด ที่เหลือเป็นธาตุ N S และ Cl ดังในตารางที่ 5.2 ดังนั้นสารประกอบที่ใช้เป็นแบบจำลองสารชีวมวลจึงเลือกเฉพาะสารประกอบที่มีอะตอมธาตุ C H และ O เป็นองค์ประกอบเท่านั้น

ตารางที่ 5.2 ร้อยละโดยมวลแห้งขององค์ประกอบของธาตุ เฉพาะส่วนที่เผาไหม้ได้และค่าความร้อนจากการเผาไหม้

สารชีวมวล ธาตุองค์ประกอบ	ฟางข้าว	ซังข้าวโพด	เปลือกอัลมอนต์	แกลบ	เศษไม้ยางพารา	ชานอ้อย
คาร์บอน	48.23	47.65	52.61	49.68	47.89	44.60
ไฮโดรเจน	6.34	5.68	5.93	5.83	5.97	6.40
ออกซิเจน	44.58	46.34	41.08	44.09	45.83	48.69
ไนโตรเจน	0.73	0.21	0.33	0.23	0.26	0.25
ซัลเฟอร์	0.11	0.04	0.02	0.05	0.04	0.06
คลอรีน	0.00	0.09	0.02	0.11	0.01	0.00
ค่าความร้อน <sup>1</sup> (kJ/kg biomass)	18,424	18,827	20,757	17,995	18,845	18,759

<sup>1</sup> ผลการทดลองที่คิดค่าความร้อนจากการเผาไหม้สารชีวมวลได้แก่สคาร์บอน ไดออกไซด์และน้ำ



หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนร้อยละโดยน้ำหนักแห่งเฉพาะธาตุ C H และ O ที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 เป็นอัตราส่วนโดยโมลอย่างง่ายของธาตุคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่อออกซิเจนเพื่อหาสูตรโมเลกุลของสารประกอบที่ใช้เป็นแบบจำลองสารชีวมวล ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลอย่างง่ายของสารชีวมวลบางชนิด แสดงอยู่ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 อัตราส่วนโดยโมลอย่างง่ายของธาตุคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่อออกซิเจนของสารชีวมวลบางชนิด

สารชีวมวล	อัตราส่วนโดยโมลอย่างง่ายของ C : H : O
ฟางข้าว	1 : 1.6 : 0.7
ซังข้าวโพด	1 : 1.4 : 0.7
เปลือกอัลมอนต์	1 : 1.4 : 0.6
แกลบ	1 : 1.4 : 0.7
เศษไม้ยางพารา	1 : 1.5 : 0.7
ชานอ้อย	1 : 1.7 : 0.8

จากตารางที่ 5.3 พบว่าอัตราส่วนโดยโมลอย่างง่ายของธาตุคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่อออกซิเจน มีค่าโดยเฉลี่ยเป็น 1: 1.4: 0.7 ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกสารประกอบที่ใช้เป็นแบบจำลองสารชีวมวล แต่อย่างไรก็ตามถ้าอาศัยเกณฑ์ดังกล่าวเพียงอย่างเดียวจะมีสารประกอบที่เข้าข่ายการเป็นแบบจำลองสารชีวมวลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจเพิ่มเติมดังนี้

1. สารประกอบต้องมีสูตรโมเลกุลเท่ากับหรือใกล้เคียงกับจำนวนเท่าของอัตราส่วนโดยโมลอย่างง่ายของสารชีวมวล โดยใช้ค่า RSS วัดความแตกต่างของสัดส่วนทั้งสอง
2. สารประกอบต้องเสถียรและมีอยู่จริงในธรรมชาติ โดยไม่ได้เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นมา
3. สารประกอบต้องมีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงองค์ประกอบหลักภายในสารชีวมวลซึ่งพิจารณาจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของสารชีวมวลดังตารางที่ 2.4
4. สารประกอบต้องมีค่าความร้อนจากการเผาไหม้ใกล้เคียงกับสารชีวมวลซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการนำไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

โดยสารประกอบที่เลือกใช้เป็นแบบจำลองสารชีวมวลในงานวิจัยนี้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 1 ถึง 12 และมีอะตอมธาตุ C H และ O เป็นองค์ประกอบเท่านั้น ซึ่งผลการพิจารณาการเลือกสารประกอบที่ใช้เป็นแบบจำลองสารชีวมวลแสดงอยู่ในตาราง 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการพิจารณาสารประกอบสำหรับแบบจำลองสารชีวมวลโดยใช้เกณฑ์ต่างๆ

สารประกอบ	สูตรโมเลกุล	อัตราส่วนอย่างง่าย (C : H : O)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	เกณฑ์ที่ใช้พิจารณา (✓ ผ่าน X ไม่ผ่าน)					
				สูตรโมเลกุล <sup>ก</sup> (ค่า RSS)	มีอยู่จริง	โครงสร้างใกล้เคียง	ผลต่างค่าความร้อน (%error) <sup>ข</sup>		
Formaldehyde	CH <sub>2</sub> O	1 : 2 : 1	7,833	0.367	✓	✓	X	-43	X
Glyoxal	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1 : 1 : 1	15,911	0.265	✓	✓	X	-12	✓
Acetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1 : 2 : 1	16,223	0.367	✓	✓	X	-10	✓
Acrylic acid	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1 : 1.33 : 0.67	18,730	0.004	✓	✓	X	-4	✓
Ethylene carbonate	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	1 : 1.33 : 1	15,401	0.186	✓	✓	X	-14	✓
Acetic anhydride	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	1 : 1.33 : 0.67	18,994	0.004	✓	X	X	+5	✓
Glutalic acid	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	1 : 1.6 : 0.8	18,137	0.041	✓	✓	X	+1	X
Pentose	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	1 : 2 : 1	17,714	0.367	✓	✓	✓	-2	✓
Derivative of pentose	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	1 : 1.6 : 0.8	-	0.041	✓	X	✓	-	X
Ascorbic acid	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub>	1 : 1.67 : 1	15,758	0.221	✓	✓	X	-12	✓
Glucose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	1 : 2 : 1	16,356	0.367	✓	✓	✓	-9	✓
Ethylene glycol diacetate	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	1 : 1.67 : 0.67	21,169	0.039	✓	✓	X	+17	✓
Derivative of glucose	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	1 : 1.67 : 0.87	-	0.096	✓	X	✓	-	✓
Pimelic acid	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	1 : 1.71 : 0.58	22,993	0.078	✓	✓	X	+27	✓
Tetraethylene glycol	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O <sub>5</sub>	1 : 2.25 : 0.63	24,615	0.379	✓	✓	X	+37	X
Glyceryl triacetate	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O <sub>6</sub>	1 : 1.56 : 0.67	20,507	0.015	✓	✓	X	+14	✓
Diallyl Maleate	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	1 : 1.2 : 0.4	24,531	0.204	✓	✓	X	+36	X
Buthyl Benzoate	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	1 : 1.27 : 0.18	23,228	0.560	X	✓	X	+29	✓
Sucrose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	1 : 1.83 : 0.91	17,337	0.176	✓	✓	✓	-4	✓

ก ได้ ✓ กรณีที่ค่า RSS น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5

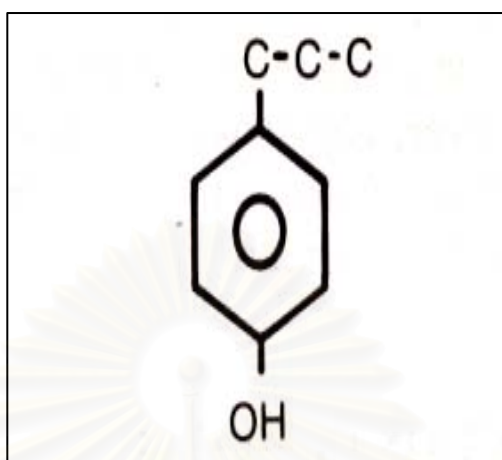
ข ได้ ✓ กรณีที่ค่า % error ต่ำกว่า 30 % และค่าความร้อนเฉลี่ยของสารชีวมวลคือ 18,000 kJ/kg

จากตารางที่ 5.4 พบว่าสารประกอบที่นำมาใช้เกือบทั้งหมดมีอัตราส่วน C: H: O ใกล้เคียงกับอัตราส่วนเฉลี่ยของชีวมวลแต่โครงสร้างของสารประกอบจำพวกนี้แตกต่างกับสารชีวมวลมาก จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ และบางกลุ่มเช่น d-glucose และ d-pentose ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีชีวมวล แต่สารประกอบทั้งสองไม่เสถียร จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน โดยสารประกอบที่ผ่านเกณฑ์การเลือกทุกประการ ได้แก่ น้ำตาลเพนโตส กลูโคสและซูโครส ถึงแม้ว่าค่า RSS ของ ซูโครส มีค่าต่ำสุดในสารประกอบทั้งสาม แต่ซูโครสมีโครงสร้างแตกต่างจากองค์ประกอบหลักภายในสารชีวมวลนั่นก็คือเซลลูโลส ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวแต่ซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ดังนั้นซูโครสจึงไม่เหมาะสมที่จะเป็นแบบจำลองสารชีวมวล ดังนั้นสารประกอบที่เหมาะสมที่จะเป็นแบบจำลองสารชีวมวลจึงเหลือเพียงกลูโคสและเพนโตส

แต่ข้อเสียของการใช้ข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุขององค์ประกอบในการสร้างแบบจำลองสารชีวมวลเพียงอย่างเดียวคือ สารประกอบที่สร้างขึ้นไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนสารชีวมวลได้ทั้งหมดทุกตัว เนื่องจากการสร้างสารประกอบแบบนี้ เมื่อเปลี่ยนสารชีวมวลตัวใหม่ที่มีสัดส่วนธาตุองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมาก อัตราส่วนอย่างง่ายจะเปลี่ยนไป ทำให้ไม่สามารถใช้สารประกอบตัวนั้นได้เหมือนเดิม และค่า RSS ของสารประกอบที่ใช้ได้นั้นยังมีค่าสูง ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีอื่นสำหรับสร้างแบบจำลองสารชีวมวลที่สามารถใช้แทนชีวมวลได้หลายตัวและวิธีนี้ยังต้องทำให้ค่า RSS น้อยลงกว่าวิธีเดิมที่สร้างสารประกอบขึ้นโดยใช้เฉพาะข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ โดยวิธีใหม่ก็คือวิธีการจำลองสารชีวมวลโดยใช้กลุ่มสารประกอบแทนการใช้สารประกอบเพียงตัวเดียว โดยยังคงใช้ข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุขององค์ประกอบเหมือนเดิม แต่การเลือกสารประกอบสำหรับแบบจำลองสารชีวมวลจะเลือกสารประกอบโดยใช้ข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีโดยข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในสารชีวมวลนั้น สามารถบ่งบอกถึงโครงสร้างของแต่ละองค์ประกอบของสารประกอบเคมีที่มีอยู่ในสารชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และส่วนที่สกัดได้ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งการทราบถึงโครงสร้างของแต่ละองค์ประกอบของสารประกอบเคมี สามารถบ่งบอกสูตรโมเลกุลที่แน่นอนของแต่ละส่วนที่กล่าวมานี้ได้ และสารชีวมวลแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนองค์ประกอบของสารประกอบเคมีนี้ต่างกัน ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองสารชีวมวลที่สามารถแทนชีวมวลได้ทุกตัวโดยไม่ต้องเปลี่ยนสารประกอบเช่นเดียวกับในกรณีแรก ซึ่งการเลือกสารประกอบที่ใช้แทนสารชีวมวลในแต่ละส่วนนั้นได้ใช้เกณฑ์เดียวกันกับวิธีแรก โดยขอแยกกล่าวเป็นแต่ละส่วนดังนี้

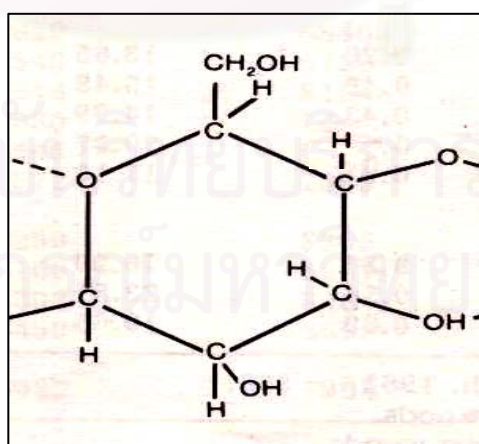
- ลิกนินเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของพืชโดยทั่วไป ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วย หน่วยโมโนเมอร์ของ ฟีนิลโพรเพนต่อกันซึ่งโครงสร้างของลิกนินนั้นแสดงอยู่ใน

ภาคผนวก ก. สำหรับโมโนเมอร์ที่พบแสดงในรูปที่ 5.1 ดังนั้นสารประกอบสำหรับแบบจำลองสารชีวมวลในส่วนนี้ จึงใช้ ฟีนิลโพรเพน สูตรโมเลกุลคือ  $C_9H_8O$



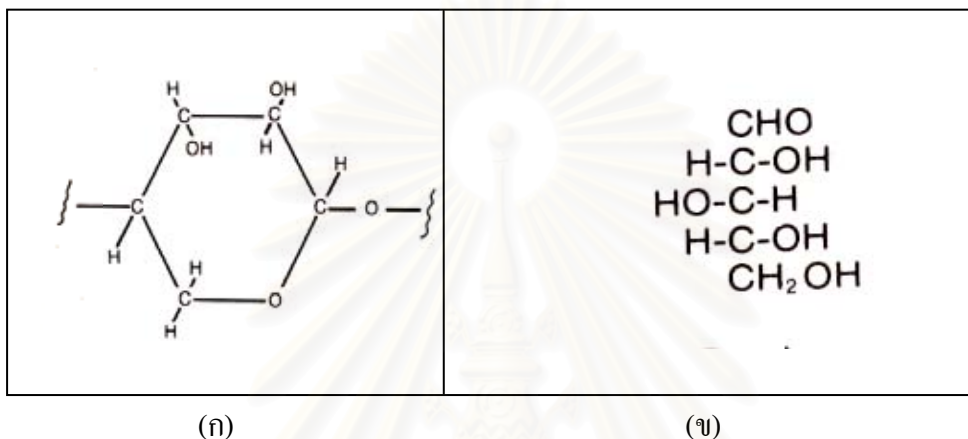
รูปที่ 5.1 โมโนเมอร์ที่พบในลิกนิน

- เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบในเนื้อเยื่อของพืชโดยทั่วไป โดยเซลลูโลสนั้นเป็นโพลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ของอนุพันธ์ของกลูโคส ( $C_6H_{10}O_5$ ) สำหรับโครงสร้างนั้นแสดงในภาคผนวก ก. เช่นกัน โดยสารประกอบสำหรับแทน เซลลูโลส จะใช้ สารประกอบกลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ) แทนเนื่องจาก อนุพันธ์ของกลูโคสนั้นเป็นสารที่ไม่เสถียรดังตารางที่ 5.4 และไม่มีในฐานข้อมูลในโปรแกรมสำเร็จรูปอีกด้วย ซึ่งโครงสร้างของกลูโคสนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของอนุพันธ์น้ำตาลกลูโคส

- เฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อเซลล์ของพืชเช่นเดียวกับกลูโคส แต่แตกต่างกันที่เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของอนุพันธ์น้ำตาลเพนโตส( $C_5H_8O_4$ ) ที่มีโครงสร้างคั้งในรูป 5.3 ก และสารประกอบที่ใช้แทนเฮมิเซลลูโลสนี้ไม่สามารถใช้น้ำตาลเพนโตส ( $C_5H_{10}O_5$ ) เช่นเดียวกับการใช้น้ำตาลกลูโคสแทนในส่วนของเซลลูโลส ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีน้ำตาลตัวนี้อยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมสำเร็จรูป และไม่สามารถสร้างขึ้นมาได้เนื่องจากไม่มีหมู่ฟังก์ชันอีเทอร์ซึ่งอยู่ในวง\* จึงต้องเลียง ไปใช้แอลดีไอดีของน้ำตาลตัวนี้แทนซึ่งเป็นไอโซเมอร์ของน้ำตาลนี้ดังรูปที่ 5.3 ข



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของ (ก) อนุพันธ์น้ำตาลเพนโตส (ข) แอลดีไอดีของน้ำตาลเพนโตส

-ส่วนที่สกัดได้ เป็นส่วนที่มีความหลากหลายและแตกต่างกันมากในชีวมวลแต่ละชนิด โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกสารประกอบแอลกอฮอล์โซ่ตรงสูตร โมเลกุลคือ  $C_{28}H_{58}O$  ซึ่งไม่มีในฐานข้อมูลเช่นเดียวกับเฮมิเซลลูโลส แต่สามารถสร้างขึ้นได้

หลักจากเลือกได้เลือกสารประกอบในแต่ละส่วนของสารชีวมวลแล้ว จึงคิดร้อยละ โดยน้ำหนักของธาตุ C H และ O ของกลุ่มสารประกอบนี้จากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี ซึ่งแสดงร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบทางเคมีแต่ละส่วนในชีวมวล แล้วเปลี่ยนร้อยละโดยน้ำหนักดังกล่าวเป็นอัตราส่วนอย่างง่ายของ C: H: O เพื่อใช้เปรียบเทียบกับอัตราส่วนอย่างง่ายที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ซึ่งคำนวณจากข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ ซึ่งผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนที่คิดจากข้อมูลทั้งสองแสดงอยู่ในตารางที่ 5.5 โดยในขั้นแรกจะเปรียบเทียบเฉพาะ ฟางข้าว ชังข้าวโพด และเปลือกอัลมอนด์ ซึ่งนำไปใช้ต่อในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



ตารางที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบร้อยละโดยมวลและอัตราส่วนอย่างง่ายของธาตุ C: H: O ใน ฟาง ข้าว ชังข้าวโพด และเปลือกอัลมอนต์ และแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้นจากกลุ่มสารประกอบจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี

ธาตุองค์ประกอบ						
	ฟางข้าว	แบบจำลอง สารชีวมวล	ชัง ข้าวโพด	แบบจำลอง สารชีวมวล	เปลือก อัลมอนต์	แบบจำลอง สารชีวมวล
<i>ร้อยละ โดยมวล</i>						
คาร์บอน	48.23	52.1	47.65	48.2	52.61	52.0
ไฮโดรเจน	6.34	8.2	5.68	7.8	5.93	7.8
ออกซิเจน	44.58	39.7	46.34	43.9	41.08	40.2
<i>อัตราส่วนโดยโมลอย่างง่าย</i>						
คาร์บอน	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ไฮโดรเจน	1.58	1.88	1.43	1.95	1.35	1.81
ออกซิเจน	0.69	0.57	0.73	0.68	0.59	0.58
ค่า RSS	0.07		0.14		0.12	
<i>หมายเหตุ</i> อัตราส่วนโดยโมลอย่างง่ายเมื่อคิดโดยใช้ข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียว ของธาตุอะตอม C : H : O มีค่าคือ 1 : 2 : 1 คิดจากกลูโคส หรือเพนโตส						

จากตารางที่ 5.5 พบว่าการคำนวณค่าอัตราส่วนอย่างง่ายของธาตุ C: H: O ในแบบจำลองสารชีวมวลโดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีให้ค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนอย่างง่ายของธาตุ C: H: O ในสารชีวมวลมากกว่าการคำนวณค่าอัตราส่วนอย่างง่ายของแบบจำลองสารชีวมวลที่คิดจากข้อมูลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบเพียงอย่างเดียว และสามารถคำนวณแยกเป็นแบบจำลองสารชีวมวลของแต่ละชนิดสารชีวมวลโดยไม่ต้องเปลี่ยนสารประกอบอีกด้วย นอกจากนี้ค่า RSS ที่คำนวณได้จากสารชีวมวลทั้งสามชนิดมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ใช้วิธีแรกซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.367 เช่นกัน ดังนั้นแบบจำลองสารชีวมวลที่คิดด้วยวิธีนี้ให้ความถูกต้องมากกว่า และสามารถนำไปใช้ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้

สำหรับผลการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการเผาไหม้แสดงอยู่ตารางที่ 5.6 ซึ่งจากตารางพบว่าแบบจำลองสารชีวมวลจะให้ค่าการเผาไหม้ที่มากกว่าสารชีวมวล ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าแบบจำลองสารชีวมวลมีส่วนของไฮโดรเจนมากกว่าและออกซิเจนน้อยกว่า โดยอธิบายได้จาก



สมการของ IGT [31] สำหรับประมาณค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของสารชีวมวลที่มีความเม่นยำสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนจากผลกาดทดลองร้อยละ 1.7

$$\text{Gross Heating value (kJ/kg biomass)} = 339.88C + 1,318.88H + 68.28866 - 119.49O \quad (42)$$

โดยที่ C H และ O ในสมการแทนร้อยละโดยมวลของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนในสารชีวมวล จากสมการพบว่าถ้าสัดส่วนไฮโดรเจนมากขึ้น ค่าความร้อนก็จะมีค่ามากขึ้น แต่ถ้าสัดส่วนออกซิเจนมากขึ้น ค่าความร้อนจะน้อยลง ดังนั้นหากหักสัดส่วนไฮโดรเจนที่เกินออกจากแบบจำลองสารชีวมวล ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เกินจากสารชีวมวลมากที่สุด ค่าความร้อนของแบบจำลองจะลดลง โดยพบว่าค่าความร้อนจากการเผาไหม้จะลดลงเมื่อหักเฉพาะสัดส่วนไฮโดรเจนที่เกินมา จึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลง ดังตารางที่ 5.6 ดังนั้นหากจะนำแบบจำลองสารชีวมวลที่สร้างขึ้นโดยวิธีนี้ไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ต้องหักสัดส่วนไฮโดรเจนที่เกินออกเพื่อให้ได้การจำลองกระบวนการที่มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของฟางข้าว ชังข้าวโพด และเปลือกอัลมอนต์ และแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้นจากกลุ่มสารประกอบจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี

การเปรียบเทียบ	ฟางข้าว		ชังข้าวโพด		เปลือกอัลมอนต์	
	สารชีวมวล	แบบจำลองสารชีวมวล	สารชีวมวล	แบบจำลองสารชีวมวล	สารชีวมวล	แบบจำลองสารชีวมวล
ค่าความร้อนของสารชีวมวลจากผลการทดลอง และค่าความร้อนของแบบจำลองสารชีวมวลจาก โปรแกรมสำเร็จรูป						
ค่าความร้อน (kJ/kgbiomass)	18,424	23,688	18,827	22,034	20,757	23,740
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	28.6		17.0		14.4	
ใช้สมการของ IGTคำนวณค่าความร้อนของสารชีวมวลและแบบจำลองสารชีวมวล						
ค่าความร้อน (kJ/kgbiomass)	19,897	23,665	18,829	21,812	20,845	23,104
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	18.9		15.87		10.8	
ใช้สมการของ IGTคำนวณค่าความร้อนของแบบจำลองสารชีวมวลแต่หักอะตอมไฮโดรเจนที่เกินมา						
ค่าความร้อน (kJ/kgbiomass)	19,897	22,290	18,829	19,678	20,390	21,033
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	12.0		4.5		3.1	

จากผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนอย่างง่ายของธาตุ C: H: O ในแบบจำลองสารชีวมวลกับสารชีวมวลได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพดในตารางที่ 5.5 พบว่าแบบจำลองสารชีวมวลสามารถแทนกลุ่มสารชีวมวลเหล่านี้ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนในระดับหนึ่ง ดังนั้นการตรวจสอบแบบจำลองสารชีวมวลซึ่งจำลองโดยใช้กลุ่มสารประกอบที่คิดจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบเคมีของสารชีวมวลสามารถเป็นตัวแทนชีวมวลได้หรือไม่นั้น จึงต้องทดสอบแบบจำลองสารชีวมวลกับสารชีวมวลชนิดนอกเหนือจากชีวมวลที่นำไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งมีข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบเคมี ซึ่งได้แก่ แกลบ เศษไม้ และขานอ้อย โดยผลการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบร้อยละ โดยมวลและอัตราส่วนอย่างง่ายของธาตุ C: H: O ในแกลบ เศษไม้ และขานอ้อยและแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้นจากกลุ่มสารประกอบจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี

ธาตุองค์ประกอบ						
	แกลบ	แบบจำลองสารชีวมวล	เศษไม้	แบบจำลองสารชีวมวล	ขานอ้อย	แบบจำลองสารชีวมวล
<i>ร้อยละ โดยมวล</i>						
คาร์บอน	49.88	50.1	47.89	48.2	44.77	46.9
ไฮโดรเจน	5.86	7.8	5.97	7.8	6.42	7.5
ออกซิเจน	44.27	42.1	45.83	43.9	48.89	45.6
<i>อัตราส่วน โดยโมลอย่างง่าย</i>						
คาร์บอน	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ไฮโดรเจน	1.41	1.87	1.81	1.95	1.72	1.91
ออกซิเจน	0.67	0.63	0.64	0.68	0.82	0.73
ค่า RSS	0.11		0.01		0.02	

จากตารางที่ 5.7 พบว่าแบบจำลองสารชีวมวลสามารถใช้แทนสารชีวมวลตัวอื่นโดยมีความคลาดเคลื่อนในระดับเดียวกันกับในกรณีที่สารชีวมวลเป็นฟางข้าว ชังข้าวโพด และเปลือกอัลมอนต์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความร้อนของสารชีวมวลกลุ่มนี้กับแบบจำลองสารชีวมวล พบว่าค่าความร้อนของแบบจำลองสารชีวมวลมีค่ามากกว่าสารชีวมวลเช่นกัน โดยพบว่าผลของค่าความร้อนที่เกินมาเป็นผลมาจากสัดส่วนไฮโดรเจนที่เกินมาในแบบจำลองสารชีวมวลซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 5.8 ดังนั้นแบบจำลองสารชีวมวลที่สร้างโดยวิธีนี้สามารถเป็นตัวแทนสารชีวมวลได้

ตารางที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของในแกลบเศษไม้ และ ชานอ้อย และแบบจำลองชีวมวลที่สร้างขึ้นจากกลุ่มสารประกอบจากข้อมูลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี

การเปรียบเทียบ	แกลบ		เศษไม้		ชานอ้อย	
	สารชีวมวล	แบบจำลองสารชีวมวล	สารชีวมวล	แบบจำลองสารชีวมวล	สารชีวมวล	แบบจำลองสารชีวมวล
ค่าความร้อนของสารชีวมวลจากผลการทดลอง และค่าความร้อนของแบบจำลองสารชีวมวลจากโปรแกรมสำเร็จรูป						
ค่าความร้อน (kJ/kgbiomass)	17,995	23,667	18,845	22,468	18,759	20,997
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	31.5		19.2		11.9	
ใช้สมการของ IGT คำนวณค่าความร้อนของสารชีวมวลและแบบจำลองสารชีวมวล						
ค่าความร้อน (kJ/kgbiomass)	19,460	22,353	18,742	21,492	17,910	20,451
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	14.8		14.7		14.2	
ใช้สมการของ IGT คำนวณค่าความร้อนของแบบจำลองสารชีวมวลแต่หักอะตอมไฮโดรเจนที่เกินมา						
ค่าความร้อน (kJ/kgbiomass)	19,460	20,220	18,742	20,990	17,910	19,561
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	3.9		11.9		9.2	

## 5.2 ผลการสร้างแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

หลังจากสร้างแบบจำลองสารชีวมวลเสร็จเรียบร้อยแล้ว แบบจำลองสารชีวมวลที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาใช้ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยแบบจำลองสารชีวมวลที่นำมาใช้ได้แก่แบบจำลองของฟางข้าว ชังข้าวโพด และเปลือกอัลมอนด์เนื่องจากมีข้อมูลการทดลองของชีวมวลเหล่านี้ โดยการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ การจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

### 5.2.1 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

ก่อนที่จะเข้าสู่การจำลองการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ต้องพิจารณาความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่เลือกใช้ก่อน เนื่องจากระบบปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ประกอบด้วยปฏิกิริยา P1 O1 O2 O3 O4 G1 G2 G3

G4 และ G5 ดังที่เสนอมาในบทที่ 4 แต่ เนื่องจาก ปฏิบัติการ O1 O2 O3 และ O4 นั้นเป็นปฏิบัติการที่ไม่มีสมมูลกล่าวคือ ปฏิบัติการเหล่านี้ไม่สามารถเกิดขึ้นเป็นลำดับได้ เพราะจะทำให้สารตั้งต้นหมดไป เมื่อสารตั้งต้นหมดไป ปฏิบัติการที่ดำเนินต่อมาจะเกิดไม่ได้เนื่องจากทั้ง 4 ปฏิบัติการไม่ใช่ปฏิบัติการผันกลับ จึงต้องเลือกว่าหนึ่งในสี่ปฏิบัติการนี้ ปฏิบัติการใดจะเป็นปฏิบัติการที่จะเกิดขึ้นเพียงปฏิบัติการเดียว โดยพิจารณาจากความไวของปฏิบัติการ ณ อุณหภูมิของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล ซึ่งพบว่าปฏิบัติการ O3 และ O4 นั้นมีความไวต่ำกว่ามาก เมื่อเทียบกับปฏิบัติการอื่นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นปฏิบัติการทั้งสองนี้จึงมีโอกาสนในการเกิดปฏิบัติการต่ำกว่า จึงไม่ต้องรวมปฏิบัติการนี้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ระบบปฏิบัติการภายในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ เป็นดังนี้

- แบบจำลองของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์เมื่อระบบปฏิบัติการประกอบด้วย P1 O1 G1 G2 G3 G4 และ G5
- แบบจำลองของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์เมื่อระบบปฏิบัติการประกอบด้วย P1 O2 G1 G2 G3 G4 และ G5

โดยแต่ละแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ยังคงจัดรูปแบบได้ 3 รูปแบบตามที่เสนอมาในบทที่ 4 คือ

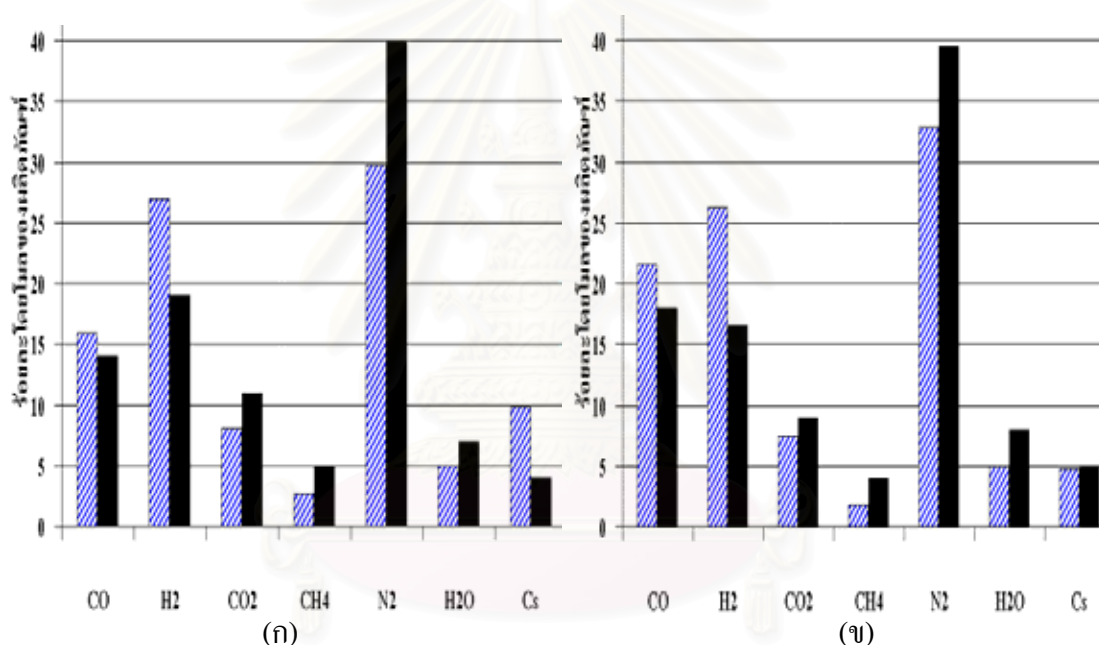
- รูปแบบที่ 1 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว
- รูปแบบที่ 2 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิบัติการ
- รูปแบบที่ 3 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิบัติการ

ซึ่งผลการเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ทำนายได้จากแต่ละรูปแบบของแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและจากผลทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ค โดยจะขอแยกกล่าวไปที่เครื่องปฏิกรณ์ดังนี้

5.2.1.1 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลง โดยแบ่งพิจารณาเป็นรูปแบบที่กล่าวไว้ข้างต้นได้ดังนี้

### รูปแบบที่ 1 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว

รูปแบบที่ 1 ซึ่งทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว การจำลองรูปแบบนี้เป็นการจำลองที่ไม่สนใจว่าปฏิกิริยาจะเป็นอย่างไร แต่สนใจว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอะไรบ้าง และไม่คิดลำดับการเกิดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ถูกคิดสมดุล ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการแก้ระบบสมการโดยใช้พลังอิสระของกิบส์ โดยจากการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้แบบจำลองแบบที่ 1 กับผลการทดลองของเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลลงโดยใช้สารชีวมวลคือฟางข้าวและซังข้าว พบว่าสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองมากดังรูปที่ 5.4



■ รูปแบบที่ 1 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว

■ ข้อมูลการทดลองในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลง

รูปที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 และจากผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ซังข้าวโพด

โดยที่ค่าRSS เปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลงกับแบบจำลองรูปแบบที่ 1 โดยใช้ฟางข้าวและซังข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 2.274 และ 0.889 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองมีค่ามาก แสดงว่าสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์นั้นแตกต่างจากการทดลองมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 นี้คิดค่าคงที่สมดุลของแต่ละปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิเดียวกัน แต่ในความเป็นจริงแล้ว แต่ละปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง

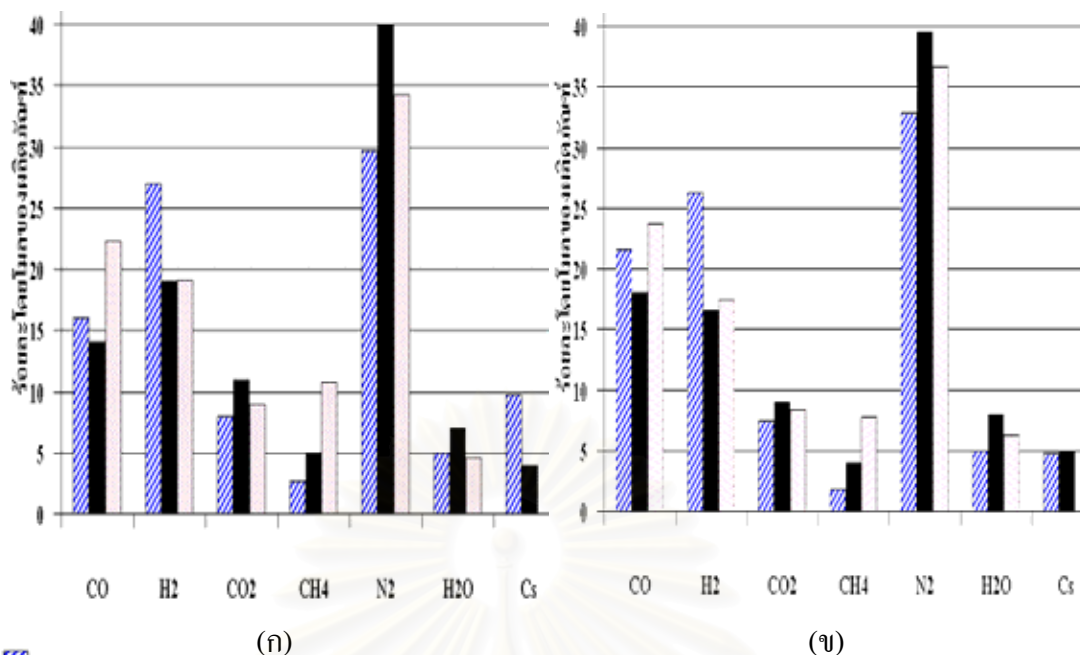


ปฏิกรณ์นั้นเกิดสมดุลไม่พร้อมกัน โดยขึ้นอยู่กับความเร็วของปฏิกริยานั้นๆในการเข้าสู่สมดุล ดังนั้นแบบจำลองรูปแบบนี้จึงไม่เหมาะสำหรับทำนายแก๊สผลิตภัณฑ์

## รูปแบบที่ 2 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกริยา

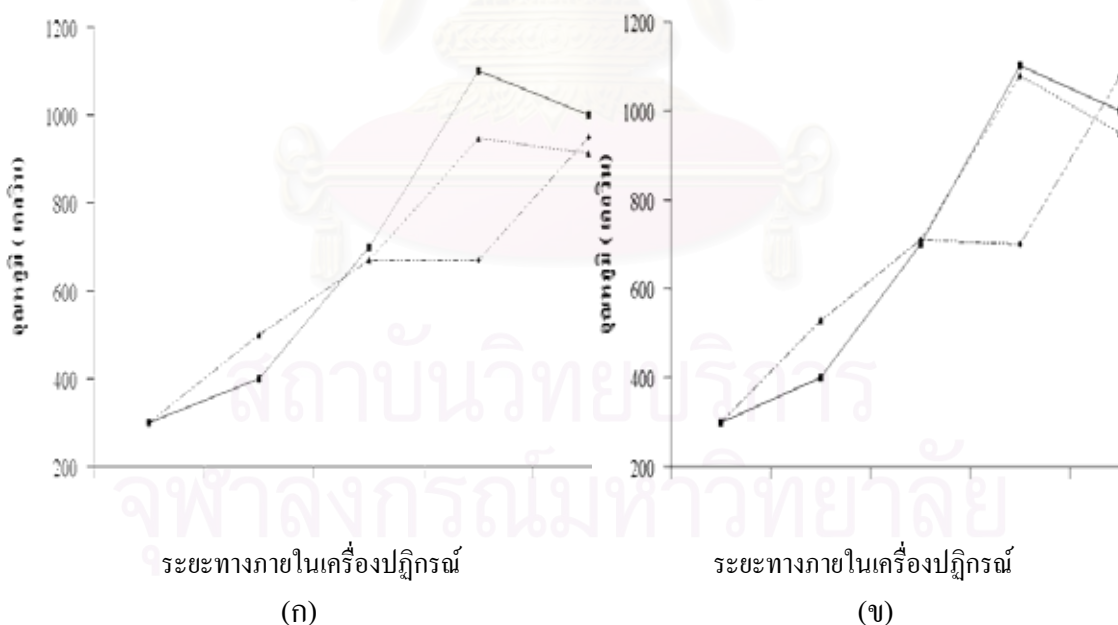
สำหรับรูปแบบที่ 2 ซึ่งทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์สัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกริยา โดยกลุ่มปฏิกริยาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลจัดได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มปฏิกริยาไพโรไลซิส ออกซิเดชัน และแก๊สซิฟิเคชัน การแบ่งปฏิกริยาในลักษณะนี้เป็นการแยกกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเกิดได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันและเป็นการแยกปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องต่อสมดุลซึ่งได้แก่กลุ่มปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งประกอบไปด้วยปฏิกริยา G1 G2 G3 G4 และ G5 ออกจากปฏิกริยาที่ไม่มีสมดุลได้แก่ ปฏิกริยาไพโรไลซิสและกลุ่มปฏิกริยาออกซิเดชัน โดยจากสมมติฐานของงานวิจัยที่ให้ปฏิกริยาไพโรไลซิสเกิดขึ้นเป็นอันดับแรก ทำให้จัดเรียงลำดับได้ 2 แบบ คือรูปแบบไพโรไลซิส--> ออกซิเดชัน--> แก๊สซิฟิเคชัน และรูปแบบไพโรไลซิส-->แก๊สซิฟิเคชัน-->ออกซิเดชัน ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าไม่ว่าจะใช้ ฟางข้าวหรือ ชังข้าวโพด การจัดรูปแบบปฏิกริยาทั้งสองรูปแบบ ให้ผลของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์แตกต่างจากการทดลอง ดังรูปที่ 5.5 ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า หลังจากผ่านปฏิกริยาไพโรไลซิสแล้วอุณหภูมิของแก๊สที่ค่าประมาณ 670-700 เคลวิน ซึ่งตรงจุดนี้ ถ้าลำดับปฏิกริยาต่อมาเป็นกลุ่มปฏิกริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่ไม่มีสมดุลและเป็นปฏิกริยาคายความร้อนสูง จึงส่งผลทำให้อุณหภูมิของสายแก๊สที่ออกจากกลุ่มปฏิกริยานี้มีค่าสูงขึ้นจนถึง 900 เคลวิน และผ่านเข้าสู่กลุ่มปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิประมาณ 940-970 เคลวิน ปฏิกริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกริยาคายความร้อนแต่ไม่สูงมาก อุณหภูมิจึงตกลงเหลือ 910 เคลวิน และจากที่มีเฉพาะกลุ่มปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกริยาที่มีสมดุล โดยการคำนวณค่าคงที่สมดุลในกรณีนี้ คำนวณ ณ อุณหภูมิเดียวกับรูปแบบที่ 1 ซึ่งในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว แต่ในกรณีรูปแบบการจัดเรียงเป็นไพโรไลซิส--> แก๊สซิฟิเคชัน--> ออกซิเดชัน ซึ่งหลังจากผ่านปฏิกริยาไพโรไลซิสไปแล้วอุณหภูมิมิค่าประมาณ 700 เคลวินเช่นกัน แต่ในกรณีนี้กลุ่มปฏิกริยาที่มีสมดุลคือกลุ่มปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันถูกนำมาคิดสมดุล ณ อุณหภูมิ 700 เคลวิน แต่ค่าคงที่สมดุล ณ อุณหภูมินี้ ต่ำมากดังกราฟที่ 3.1 จึงทำให้สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกลุ่มปฏิกริยานี้ไม่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้อุณหภูมิออกมาเท่าเดิมคือ 700 เคลวินและเมื่อผ่านเข้าสู่กลุ่มปฏิกริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นปฏิกริยาคายความร้อนอุณหภูมิจึงสูงขึ้นเป็น 940 เคลวิน ดังรูปที่ 5.6





▨ Pyrolysis --> Oxidation --> Gasification  
■ ข้อมูลการทดลองในเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลง  
▨ Pyrolysis --> Gasification --> Oxidation

รูปที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 2 และจากผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ช้างข้าวโพด



-▲- Pyrolysis --> Oxidation --> Gasification  
-■- Pyrolysis --> Gasification --> Oxidation  
-●- ผลการทดลองภายในเครื่องแก๊สซีไฟเออร์อากาศไหลลง

รูปที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 2 และจากผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ช้างข้าวโพด

การจัดลำดับในรูปแบบที่ 2 นี้ถึงแม้ว่าจะแยกปฏิกริยาออกเป็น 3 ส่วนตามช่วงอุณหภูมิที่ปฏิกริยาเหล่านี้เกิด แต่ในกลุ่มปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นกลุ่มปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับสมดุล ซึ่งการจัดลำดับในรูปแบบนี้ การคำนวณค่าคงที่สมดุลของแต่ละปฏิกริยาในกลุ่มปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชัน ยังคงคำนวณ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ทำให้ค่าสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์แตกต่างจากผลการทดลอง ส่งผลทำให้ค่าRSS ยังคงมีค่ามากเช่นเดียวกับในรูปแบบที่ 1 ดังตารางที่ 5.9 แต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 5.6 พบว่า รูปแบบการจัดลำดับปฏิกริยาแบบไพโรไลซิส--> ออกซิเดชัน --> แก๊สซิฟิเคชัน ให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองรูปแบบที่ 2 นี้ให้ผลที่ดีกว่าแบบจำลองรูปแบบที่ 1

**ตารางที่ 5.9** ค่า RSS ของรูปแบบการจัดลำดับปฏิกริยาเมื่อเทียบกับผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงของฟางข้าวและซังข้าวโพด

รูปแบบลำดับปฏิกริยา	ฟางข้าว	ซังข้าวโพด
ใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว	2.747	0.889
ไพโรไลซิส--> ออกซิเดชัน --> แก๊สซิฟิเคชัน	2.705	0.889
ไพโรไลซิส --> แก๊สซิฟิเคชัน--> ออกซิเดชัน	2.865	2.049

### รูปแบบที่ 3 การทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์แบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกริยา

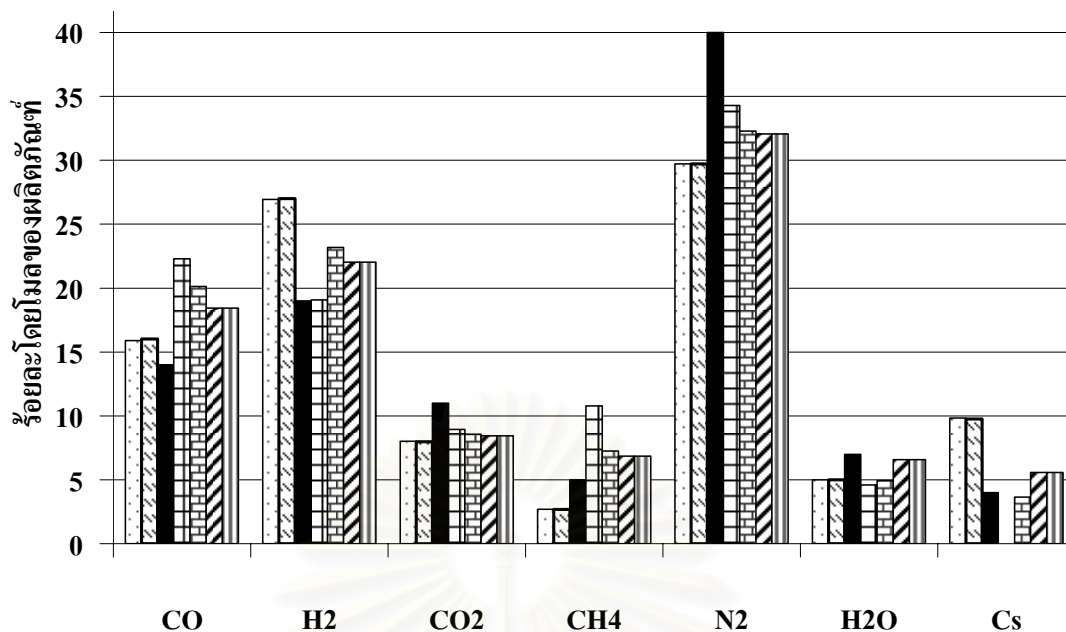
สำหรับการจัดลำดับแบบสุดท้ายนั้นคือการจัดลำดับปฏิกริยาแบบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกริยาโดยการจัดลำดับรูปแบบนี้ คือการทำให้แต่ละปฏิกริยาภายในกลุ่มปฏิกริยาออกซิเดชันมีอิสระต่อกันมากขึ้น ซึ่งทำได้โดยการจัดลำดับสลับลำดับการเกิดปฏิกริยา ทำให้สามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลของแต่ละปฏิกริยาเคมีได้ที่อุณหภูมิต่างกันตามลำดับการเกิดปฏิกริยา ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงที่แต่ละปฏิกริยามีความไวแตกต่างกัน ส่งผลทำให้แต่ละปฏิกริยามีโอกาสที่จะเข้าสู่สมดุลไม่พร้อมกัน โดยระบบปฏิกริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ประกอบด้วยปฏิกริยา P1 O1 (เปลี่ยนเป็น O2 ได้) G1 G2 G3 G4 และG5 โดยการสลับ G1 G2 G3 G4 และG5 ทำให้มีรูปแบบได้ถึง 120 รูปแบบ (5 แฟกทอเรียล) และเปลี่ยนจาก O1 เป็น O2 ทำให้รูปแบบรวมทั้งหมดมีด้วยกัน 240 รูปแบบ โดยสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละรูปแบบ แสดงอยู่ในภาคผนวก ค ซึ่งแต่ละรูปแบบให้ผลสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน แต่มีบางรูปแบบที่ไม่สามารถจัดลำดับได้ เนื่องจากเป็นการจัดรูปแบบที่ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สมดุล

หมดยหรือเกือบเป็นศูนย์ทำให้ตัวโปรแกรมสำเร็จรูปไม่สามารถหาคำตอบได้ โดยในงานวิจัยนี้จะแสดงเป็นแถบสีดำในกรณีที่มีรูปแบบนั้นหาคำตอบของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ไม่ได้  
ค่า RSS ในกรณีของรูปแบบที่ 3 นั้นมีค่าแตกต่างกันมาก โดยตารางที่ 5.10 จะแสดงเฉพาะค่า RSS ของรูปแบบการจัดลำดับที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองในแต่ละกรณี

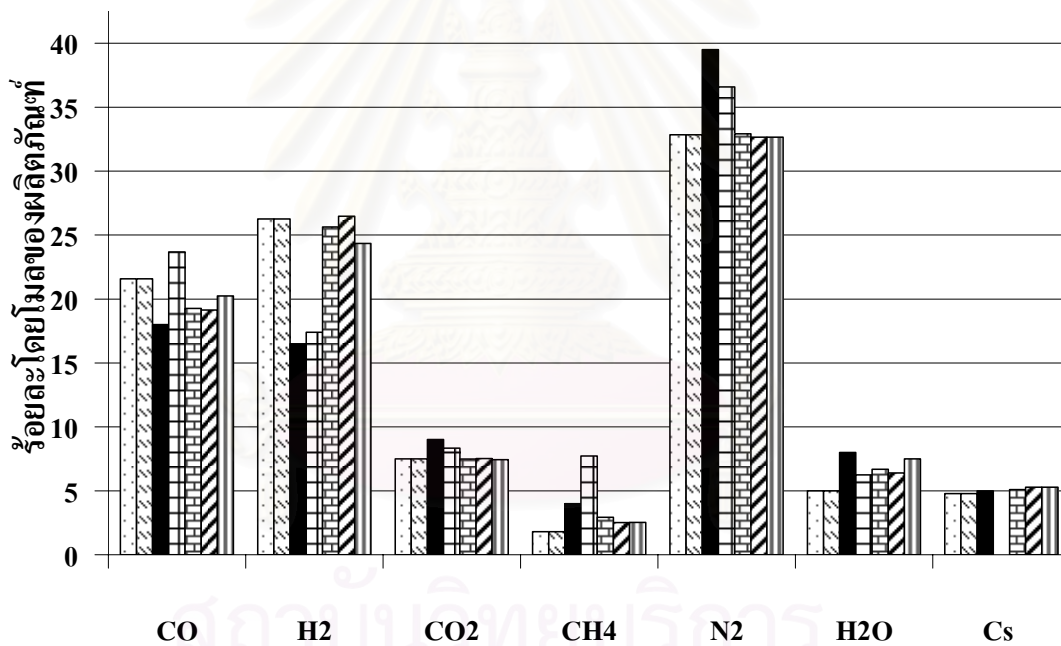
ตารางที่ 5.10 ค่า RSS และร้อยละความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสายผลิตภัณฑ์ของรูปแบบการจัดลำดับปฏิบัติการแบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองภายในเครื่องแก๊สซีไฟเออร์อากาศไหลลง

รูปแบบการจัดเรียง	ค่า RSS		ร้อยละความคลาดเคลื่อนไปอุณหภูมิสายแก๊สผลิตภัณฑ์	
	ฟางข้าว	ซังข้าวโพด	ฟางข้าว	ซังข้าวโพด
แบบที่ 1 ใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว	2.747	0.889	+0.1	+1.7
แบบที่ 2 ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิบัติการ				
ไพโรโรซิส--> ออกซิเดชัน --> แก๊สซีพีเคชัน	2.705	0.889	+0.1	+1.7
ไพโรโรซิส --> แก๊สซีพีเคชัน--> ออกซิเดชัน	2.865	2.049	+3.8	+16.7
แบบที่ 3 ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิบัติการ				
กรณีใช้ O1 เป็นปฏิบัติการ ออกซิเดชัน				
P1-->O1-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4	0.625	0.452	-0.2	+3.8
P1-->O1-->G1-->G4-->G3-->G2-->G5	0.532	0.632	-2.2	+2.3
P1-->O1-->G3-->G2-->G5-->G1-->G4	0.517	0.434	-2.3	+2.3
กรณีใช้ O2 เป็นปฏิบัติการ ออกซิเดชัน				
P1-->O2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4	0.625	0.467	-0.2	+3.8
P1-->O2-->G1-->G4-->G3-->G2-->G5	0.532	0.632	-2.2	+2.3
P1-->O2-->G3-->G2-->G5-->G1-->G4	0.517	0.434	+5.6	+2.3

จากตารางที่ 5.10 พบว่าไม่ว่าจะใช้สารชีวมวลเป็นฟางข้าวหรือซังข้าวโพด รูปแบบการจัดเรียงปฏิบัติการ ที่ให้ค่า RSS ในอยู่ในเกณฑ์ต่ำคือมีค่าประมาณคือรูปแบบการจัดลำดับปฏิบัติการแบบ P1--> O1หรือO2 -->G1-->G3-->G2-->G5-->G4 แบบ P1-->O1หรือO2 -->G1-->G4-->G3-->G2-->G5 และแบบ P1-->O1หรือO2 -->G3-->G2-->G5-->G1-->G4 และไม่ว่าจะใช้ O1 หรือ O2 เป็นปฏิบัติการออกซิเดชัน และสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเหมือนกันและมีความใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการใช้จัดเรียงรูปแบบที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 5.7 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่ามีความใกล้เคียงกับผลการทดลองดังรูปที่ 5.7



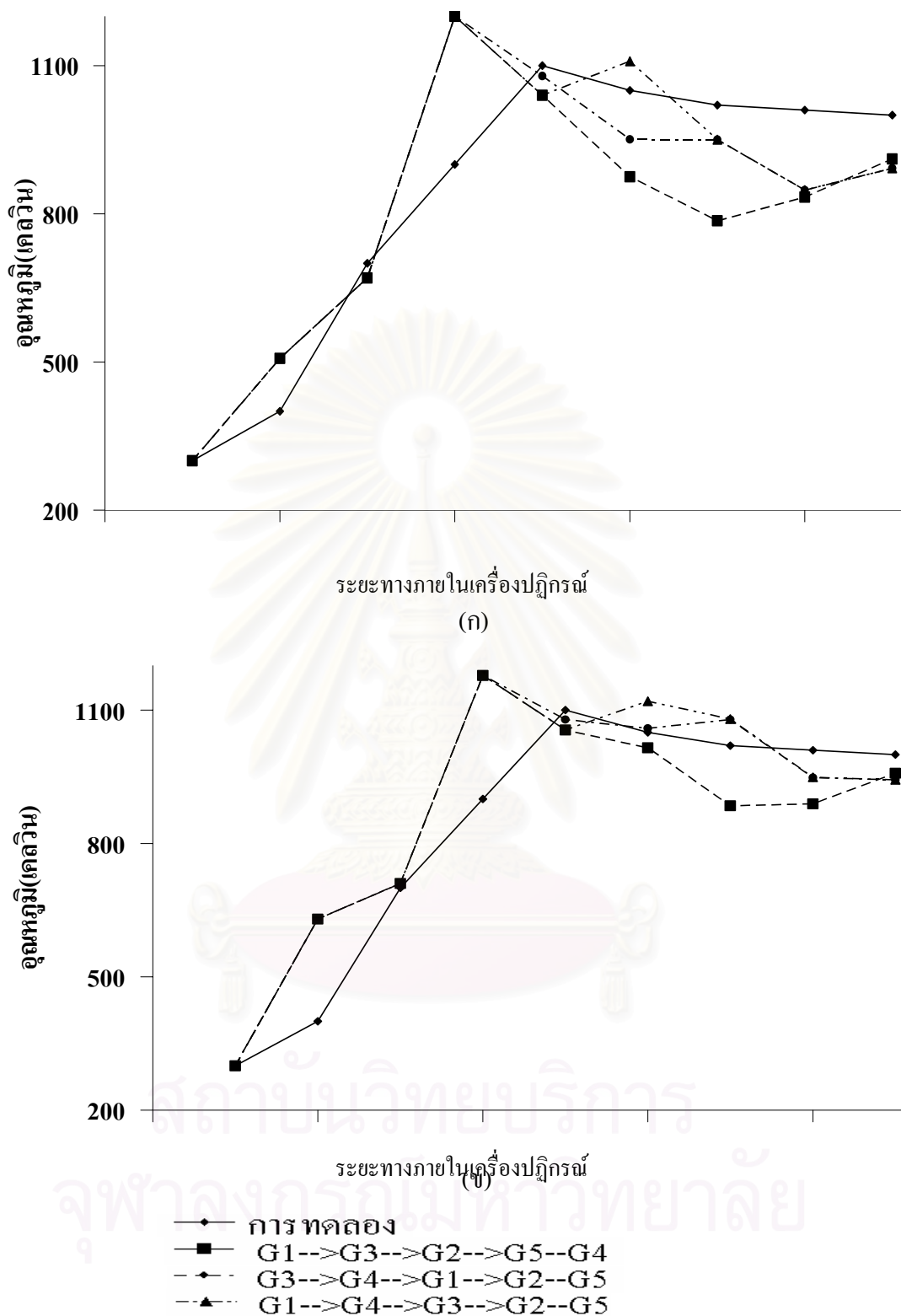
(ก)



(ข)

- All reaction take place simultaneous
- Pyrolysis -> Oxidation -> Gasification
- Experiment data
- P1->G1->G3->G2->G5->G4
- P1->G1->G4->G3->G2->G5
- P1->G3->G4->G1->G2->G5
- Pyrolysis -> Gasification -> Oxidation

รูปที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 2 และ 3 กับผลกาทดลองจากเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลง โดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ชังข้าวโพด



รูปที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างแบบจำลองรูปแบบที่ 3 กับผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบอากาศไหลลงโดยใช้ (ก) ฟางข้าว (ข) ช้างข้าวโพด

โดยเหตุผลที่การจัดลำดับรูปแบบที่ 3 นั้นให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการจัดรูปแบบอื่นๆ นั้น อธิบายได้จากการกำหนดให้ปฏิกิริยาต่างๆ เกิดขึ้นเป็นลำดับในการจัดลำดับรูปแบบที่ 3 นั้น เปรียบเสมือนการกำหนดให้แต่ละปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลไม่พร้อมกัน โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเข้าสู่สมดุล โดยปฏิกิริยาที่มีอัตราเร็วมากกว่าจะดำเนินไปสู่สมดุลได้ก่อน ซึ่งปฏิกิริยาที่เข้าสู่สมดุลก่อน จะไปเปลี่ยนองค์ประกอบของสารประกอบที่เกี่ยวข้องต่อปฏิกิริยานั้น ทำให้สมดุลของปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นต่อมาเปลี่ยนไปเป็นขั้นๆ ไป โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของแต่ละปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 5.11 เพื่อหาอัตราเร็วของปฏิกิริยาต่างๆ ในระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

ตารางที่ 5.11 ข้อมูลจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาต่างๆ ในระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

ปฏิกิริยา	$k_0 * 10^{-6}$	$E_a * 10^4$	A	m	B	N	C	o	หลักฐานอ้างอิง
O2	0.208	13	O <sub>2</sub>	1	-	-	-	-	[32]
G1	0.208	18	CO <sub>2</sub>	1	-	-	-	-	[32]
G2	0.000015	0.73	H <sub>2</sub>	2	-	-	-	-	[32]
G3	0.083	18	H <sub>2</sub> O	1	-	-	-	-	[32]
G4	0.000013	0.21	CO	1	H <sub>2</sub> O	0.5	CO <sub>2</sub>	0.25	[32]
อัตราเร็วของปฏิกิริยา = $k_0 \exp(-E_a/RT)[A]^m[B]^n[C]^o$									

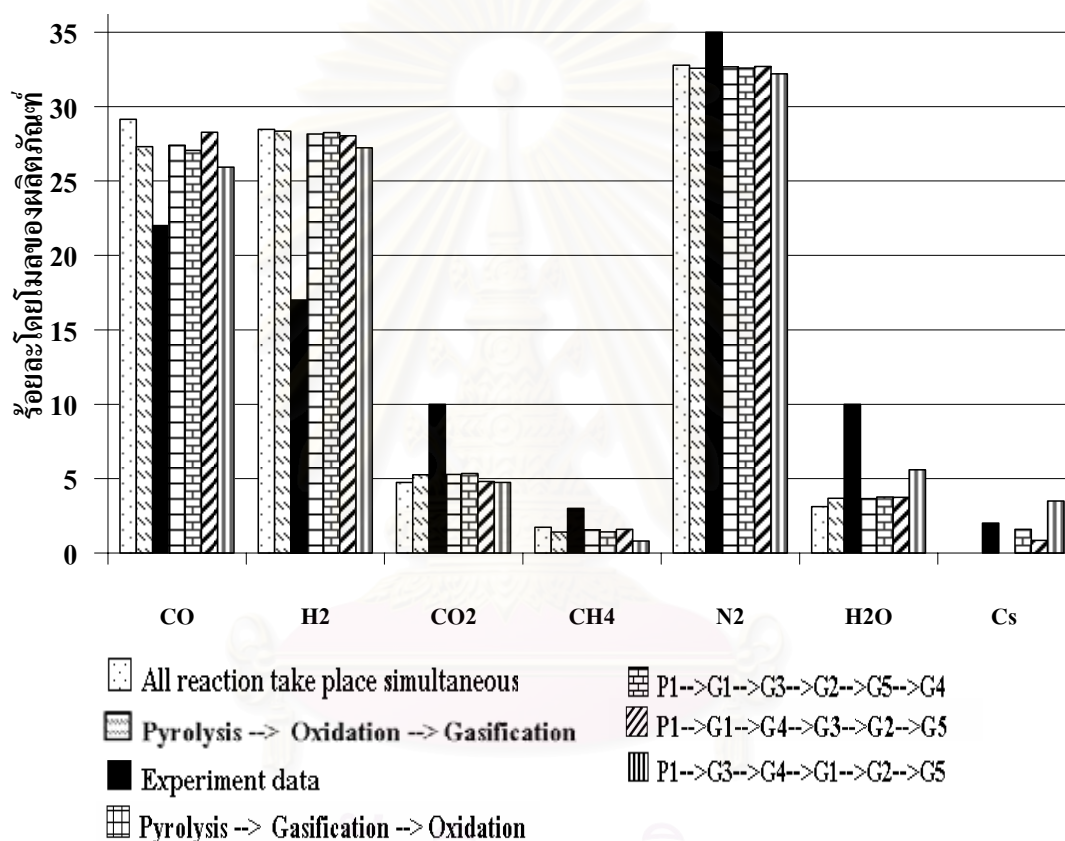
จากข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ในตารางที่ 5.11 พบว่าเมื่อนำมาคิดอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยคิด ณ จุดที่ผ่านจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสเพื่อให้แต่ละปฏิกิริยาเกิดการแข่งขันกัน พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ O<sub>2</sub> --> G1 = G4 --> G3--> G2 ซึ่งอัตราเร็วของปฏิกิริยานี้สอดคล้องกับลำดับๆ หนึ่งในที่ให้ผลของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับการทดลองคือการจัดลำดับปฏิกิริยาแบบที่ 3 ซึ่งมีการจัดลำดับคือ P1-->O1 หรือ O2-->G1-->G4-->G3-->G2-->G5 ดังนั้นลำดับปฏิกิริยาแบบที่ 3 นี้เหมาะสมกับการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลง

5.2.1.2 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบด

ในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ไม่สามารถใช้รูปแบบเดียวกับการจำลองภายในเครื่อง



แก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงได้ เนื่องจากข้อสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองที่ผ่านมาได้สมมติให้แบบจำลองเครื่องแก๊สซิฟิเคชันที่สร้างขึ้นปฏิบัติการแบบแอเดียบาติก ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันซึ่งแตกต่างจากลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องปรับเปลี่ยนระบบปฏิบัติการของแบบจำลองเครื่องแก๊สซิฟิเคชันจากแอเดียบาติกเป็นไอโซเทอร์มัล โดยยังคงแบ่งการจัดรูปแบบการจำลองเช่นเดียวกับในกรณีที่ใช้เครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลง ซึ่งผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองแต่ละรูปแบบกับผลการทดลองของแสดงอยู่ในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบที่ 1 2 และ 3 กับผลการทดลองจากเครื่องแก๊สซิฟิเคชันฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ของซังข้าวโพด

จากรูปที่ 5.9 พบว่าสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองทั้งสามมีความแตกต่างจากผลการทดลอง แต่ทั้งนี้สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจัดรูปทั้งสามรูปแบบมีค่าไม่ต่างกันมากเหมือนอย่างในกรณีการจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบอากาศไหลลง เพราะอุณหภูมิภายในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดมีค่าคงที่ การคำนวณค่าที่สมดุลของแบบจำลองทั้งสามรูปแบบจึงคำนวณ ณ จุดเดียวกัน ทำให้การจัดเรียงลำดับปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อพิจารณาค่า RSS ของทั้งสามรูปแบบ จึงมีค่าไม่ต่างกันมากเช่นกัน

ดังในตารางที่ 5.13 ดังนั้นการจัดเรียงปฏิกิริยาจึงไม่สามารถใช้ได้กับกรณีที่มีระบบปฏิกิริยามี อุณหภูมิคงที่ ดังนั้นรูปแบบปฏิกิริยาแบบที่ 3 ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียวจึงเหมาะสมกับ แบบจำลองนี้

**ตารางที่ 5.12** ค่า RSS ของรูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยาแบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการ ทดลองภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบคของซังข้าวโพดโดยใช้ อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

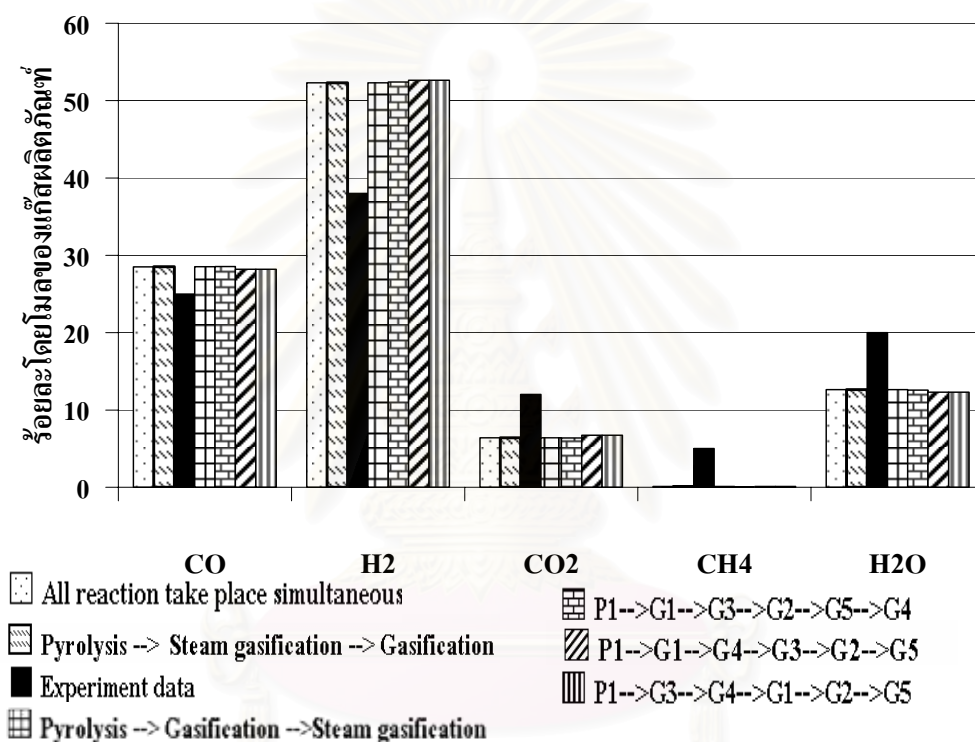
รูปแบบการจัดเรียง	ค่า RSS
แบบที่ 1 ใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว	2.4
แบบที่ 2 ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งตามชนิดปฏิกิริยา	
ไพโรไลซิส--> ออกซิเดชัน --> แก๊สซิฟิเคชัน	2.4
ไพโรไลซิส --> แก๊สซิฟิเคชัน--> ออกซิเดชัน	2.3
รูปแบบที่ 3 ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบ่งแต่ละปฏิกิริยา	
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4	1.6
P1--> O1หรือ O2-->G1-->G4-->G3-->G2-->G5	1.7
P1-->O1 หรือO2-->G4-->G3-->G1-->G2-->G5	1.9

5.2.2 ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล โดยใช้ไอน้ำเป็น ตัวออกซิไดซ์

สำหรับการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นเป็นตัวออกซิไดซ์นั้น แตกต่างจากการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ที่ระบบปฏิกิริยา ของกระบวนการที่ใช้ไอน้ำไม่มีกลุ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นกลุ่มที่คายพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นผลเสียเนื่องจากกลุ่มปฏิกิริยานี้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่ระบบ และเมื่อพิจารณาจาก ปฏิกิริยา Steam gasification หรือปฏิกิริยา G3 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของกระบวนการนี้ โดยปฏิกิริยานี้ จะผันกลับ ณ อุณหภูมิต่ำกว่า 900 เคลวิน โดยพิจารณาจากค่าคงที่สมดุลในรูปที่ 3.1 ทำให้ไม่ สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความร้อนจากภายนอกเพื่อให้ปฏิกิริยานี้เกิดได้ โดยทำได้ 2 วิธีคือ การเพิ่มอุณหภูมิให้ไอน้ำจนมีพลังงานมากพอที่จะไปออกซิไดซ์สารชีวมวลได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็ต้องเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 900 เคลวิน โดยที่ระบบยังคงปฏิบัติการแบบแอเดียติก โดยพบว่าต้องใช้ไอน้ำอุณหภูมิสูงมาก เมื่อ พิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วจึงไม่คุ้มค่าที่จะทำ อีกวิธีหนึ่งคือการใช้ความร้อนจากการเผา ไหม้สารชีวมวลในเตาปฏิกรณ์แล้วนำความร้อนมาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยผ่าน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและระบบนี้จึงต้องปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีหลังนี้ในการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ไอน้ำเป็นเป็นตัวออกซิไดซ์

สำหรับระบบปฏิกิริยาสำหรับการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ ประกอบไปด้วยปฏิกิริยา P1 G1 G2 G3 G4 และ G5 ซึ่งนำมาจัดเรียงรูปแบบได้ 3 รูปแบบ เช่นเดียวกับการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ โดยการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละรูปแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างที่ได้จากแบบจำลองรูปแบบต่างๆ กับผลทดลองจากเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไอดีซ์เบดโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์โดยสารชีวมวลที่ใช้คือเปลือกอัลมอนต์

จากรูปพบว่าร้อยละโดยโมลของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่จำลองได้ในแต่ละรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอดีซ์เบด ทั้งนี้เนื่องมาจากแบบจำลองเครื่องแก๊สซิฟิเคชันปฏิบัติการแบบปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัล จึงทำให้ค่าคงที่สมดุล ถูกคำนวณที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่งผลให้ไม่มีความแตกต่างของสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละรูปแบบ ดังนั้นแบบจำลองสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้ไอน้ำเป็นออกซิไดซ์จึงใช้แบบจำลองแบบที่ 1 เช่นกัน

จากผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ระหว่างผลการทดลองในกรณีต่างๆ กับแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้รูปแบบการจำลองแบบที่ 1 2 และ 3 พบว่ารูปแบบการจำลองแบบที่ 3 ซึ่งมีลำดับปฏิกิริยาเป็น P1 -->O1 หรือ O2 --> G4 --> G1--> G3 --> G5 ให้ผลการทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองที่ได้จากเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงทั้งในกรณีที่ใช้ฟางข้าวและซังข้าวโพดเป็นสารตั้งต้น และรูปแบบการจำลองแบบที่ 1 ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียวเหมาะสมที่จะใช้ทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศหรือไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ โดยการทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองโดยส่วนใหญ่แล้วจะทำนายสัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนได้มากกว่าผลการทดลองมาก ทั้งนี้เพราะเนื่องจากแบบจำลองสารชีวมวลที่นำมาใช้ในการจำลองมีสัดส่วนอะตอมไฮโดรเจนเกินความเป็นจริง ดังนั้นการตรวจสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลจึงต้องตัดหักของไฮโดรเจนที่เกินมา โดยนำไปหักลบแก๊สไฮโดรเจนที่เกินมา เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองกระบวนการนั้นสามารถทำนายแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ถูกต้องแม่นยำเพียงใด เมื่อตัดผลของความผิดพลาดในแบบจำลองสารชีวมวล โดยหลังจากที่หักสัดส่วนไฮโดรเจนที่เกินจากแบบจำลองสารชีวมวลแล้วพบว่า แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในแต่ละกรณีให้ผลใกล้เคียงกันทางการทดลองมากโดยมีค่า RSS ลดลงดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ผลการหักสัดส่วนอะตอมไฮโดรเจนที่เกินมาในแบบจำลองสารชีวมวลต่อค่า RSS ของกระบวนการต่างๆ

สารชีวมวล	โมลไฮโดรเจนที่เกินต่อโมลคาร์บอน	การทดลอง	ค่าRSS	
			ก่อนหัก H	หลังหัก H
ฟางข้าว	0.3	เครื่องแก๊สซิฟิเคชันอากาศไหลลง	0.517	0.440
ซังข้าวโพด	0.52	เครื่องแก๊สซิฟิเคชันอากาศไหลลง	0.434	0.215
		เครื่องแก๊สซิฟิเคชันฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์	2.40	2.0
เปลือกอัลมอนต์	0.46	เครื่องแก๊สซิฟิเคชันฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์	1.36	0.94

### 5.3 ผลการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนา

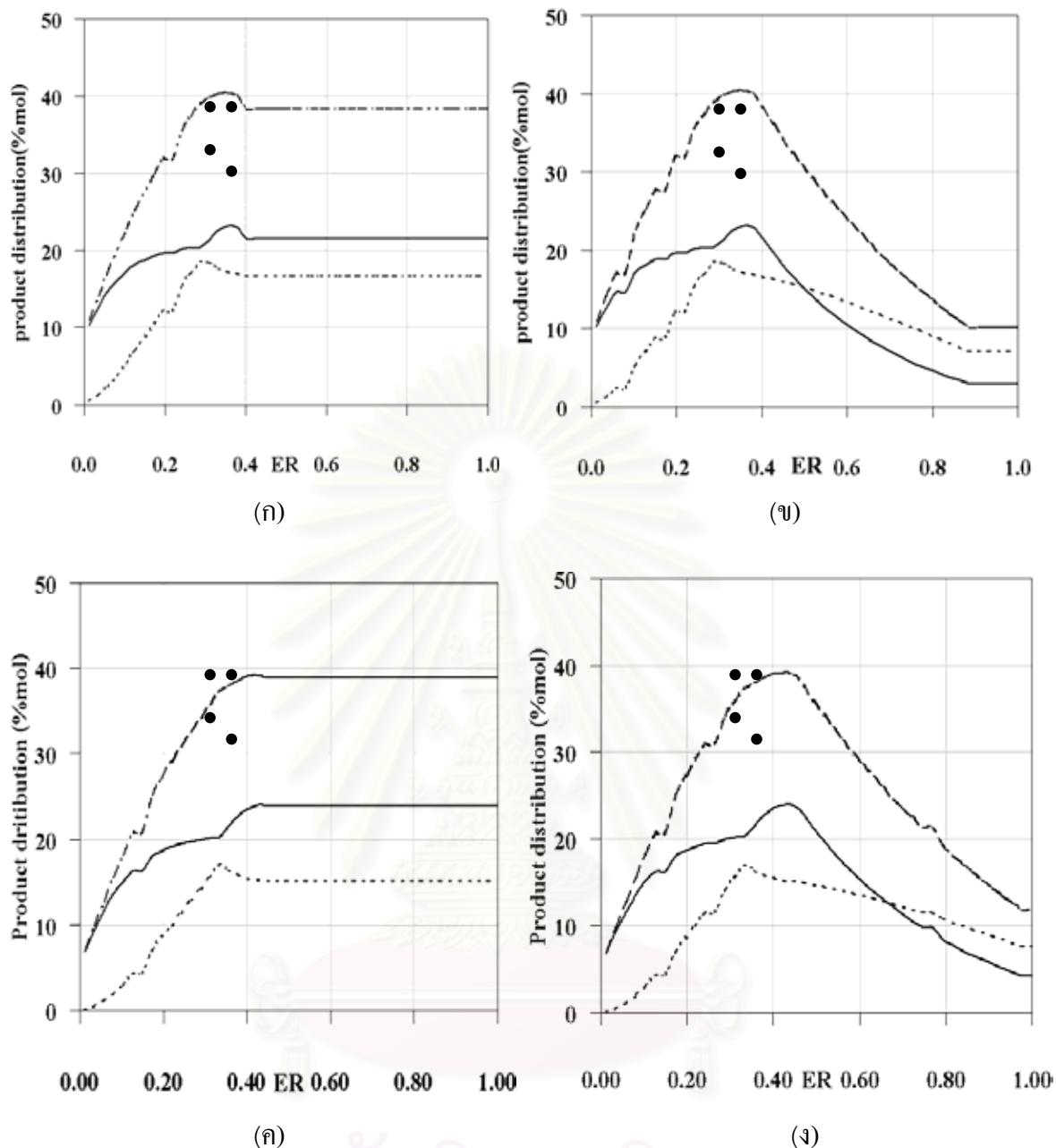
การทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาคือการเปลี่ยนตัวแปรที่ได้กำหนดไว้คงเพื่อทดสอบแบบจำลองว่าสามารถใช้ทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอื่นได้หรือไม่ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ทดสอบแบบจำลองคือตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณตัวออกซิไดซ์ต่อสารชีวมวล โดยมวล ความชื้นในชีวมวล อุณหภูมิที่เข้าเครื่องแก๊สซิไฟเออร์สำหรับแบบจำลองเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลง และความร้อนที่ต้องให้แก่ระบบในกรณีที่ใช้เครื่องแก๊สซิไฟเออร์ฟลูอิดไคซ์เบด โดยแบบจำลองที่นำมาทดสอบนั้นจะมีลำดับปฏิกิริยาเป็น P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4 สำหรับในกรณีที่ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ และรูปแบบการใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียวสำหรับในกรณีที่ใช้น้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

5.3.1 ผลการทดสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์  
ในการทดสอบแบบจำลองโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์นั้นจะทำการทดสอบในแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์อากาศไหลลงซึ่งมีลำดับปฏิกิริยาเป็น P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4 ในสารชีวมวลคือฟางข้าวและขี้ข้าวโพด โดยทำการทดสอบแบบจำลองด้วยตัวแปรคือปริมาณตัวออกซิไดซ์ต่อสารชีวมวล โดยมวล ปริมาณความชื้นในสารชีวมวลและอุณหภูมิสายตัวออกซิไดซ์

5.3.1.1 ผลการเปลี่ยนสัดส่วนโดยมวลระหว่างปริมาณตัวออกซิไดซ์และปริมาณสารชีวมวลต่อสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

จากที่มีผู้วิจัยบางคนได้กล่าวไว้ว่าปริมาณมวลตัวออกซิไดซ์ต่อมวลสารชีวมวลสำหรับกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ คือ 0.28 ถึง 0.31 โดยที่จุดนี้จะให้สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์สูงสุด และหลังจากจุดนี้ไป สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์จะลดลงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งผลการเปลี่ยนปริมาณตัวออกซิไดซ์ต่อสารชีวมวลต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแบบจำลองแต่ละรูปแบบแสดงอยู่รูปที่ 5.11 โดยจุดบนกราฟเป็นข้อมูลการทดลองที่ได้สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์สูงสุด





รูปที่ 5.11 ปริมาณ ออกาสต่อสารชีวมวล โดยมวล(ER) ของแบบจำลองในแต่ละกระบวนการต่างๆ ต่อร้อยละโดยโมลของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้

- (ก) ลำดับปฏิกิริยาเป็น  $P1 \rightarrow O1 \rightarrow G1 \rightarrow G3 \rightarrow G2 \rightarrow G5 \rightarrow G4$  สารชีวมวลที่ใช้ ฟางข้าว
- (ข) ลำดับปฏิกิริยาเป็น  $P1 \rightarrow O2 \rightarrow G1 \rightarrow G3 \rightarrow G2 \rightarrow G5 \rightarrow G4$  สารชีวมวลที่ใช้ ฟางข้าว
- (ค) ลำดับปฏิกิริยาเป็น  $P1 \rightarrow O1 \rightarrow G1 \rightarrow G3 \rightarrow G2 \rightarrow G5 \rightarrow G4$  สารชีวมวลที่ใช้ ช้างข้าวโพด
- (ง) ลำดับปฏิกิริยาเป็น  $P1 \rightarrow O2 \rightarrow G1 \rightarrow G3 \rightarrow G2 \rightarrow G5 \rightarrow G4$  สารชีวมวลที่ใช้ ช้างข้าวโพด
- - - - CO  
 ——— H<sub>2</sub>  
 - · - · Synthesis Gas

โดยจากรูปที่ 5.11 พบว่าค่า ER ที่ให้สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์สูงสุดในแบบจำลองนั้นมีค่าประมาณ 0.37 ซึ่งมีค่ามากกว่า ค่า ER ที่ได้จากการทดลอง และสัดส่วนแก๊สสังเคราะห์ที่จุดนี้มีค่าสูงกว่าที่ผลทดลอง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าแบบจำลองสารชีวมวลที่สร้างขึ้นมีส่วนคาร์บอนต่อ

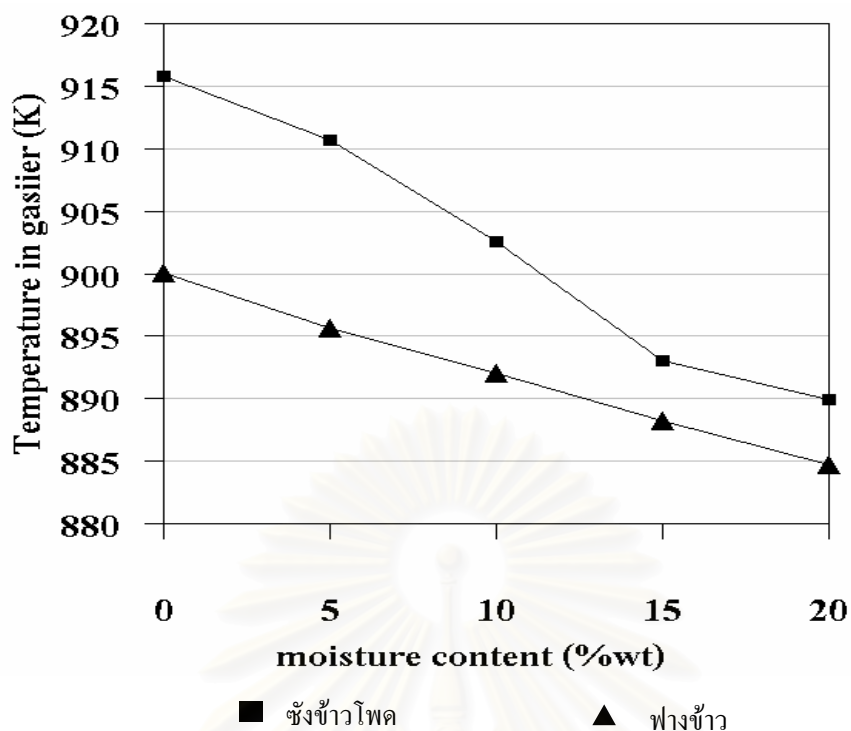


ไฮโดรเจนมากกว่าการทดลอง ดังนั้นจึงต้องใช้ไฮออกซิเจนในการออกซิไดซ์มากกว่าปกติ จึงทำให้ค่า ER ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณออกซิเจนมีค่ามากกว่าการทดลอง นอกจากนี้การที่สัดส่วนไฮโดรเจนที่มีมากกว่าความเป็นจริงในแบบจำลองสารชีวมวล ยังส่งผลต่อแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยทำให้สัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้นด้วย ดังนั้นสัดส่วนก๊าซสังเคราะห์จึงมีค่ามากกว่าการทดลอง

เมื่อพิจารณาที่ค่า ER มากกว่า 0.4 ในกรณีที่ลำดับปฏิกิริยาเป็น P1-->O1-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4 ในรูปที่ 5.10 ก และ ค พบว่าสัดส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนมีค่าคงที่ ซึ่งต่างจากความเป็นจริงที่เมื่อค่า ER เพิ่มขึ้น การเผาไหม้จะเกิดสมบูรณ์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเพิ่มขึ้น และทำให้สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการจัดลำดับปฏิกิริยาแบบนี้ เมื่อเพิ่มออกซิเจนมากเกินไปจะทำให้ถ่านถูกใช้หมดไปในปฏิกิริยา O1 เมื่อถ่านหมดแล้วไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ เนื่องจากแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์กิบส์นั้น จะไม่สามารถหาคำตอบได้ ถ้าปริมาณสารที่เกี่ยวข้องต่อปฏิกิริยานั้นมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นแบบจำลองลำดับปฏิกิริยาที่ใช้ O1 เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถทำนายสัดส่วนผลิตภัณฑ์ได้ทุกค่า ER และในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาลำดับปฏิกิริยาที่ใช้ O2 เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวในรูปที่ 5.10 ข และ ง ถึงแม้ว่าสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์จะลดลงเมื่อค่า ER มากกว่า 0.4 แต่เมื่อเพิ่ม ER ไปจนถึงค่า 0.9 จะไม่สามารถทำนายแก๊สผลิตภัณฑ์ต่อไปได้ เนื่องจากปฏิกิริยา O2 ใช้ออกซิเจนมากกว่า O1 จึงทำให้เหลือถ่านมากกว่าที่ ER เท่ากัน การจำลองระบบปฏิกิริยาที่ใช้ O2 เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงใช้ได้ในช่วง ER ที่กว้างกว่า

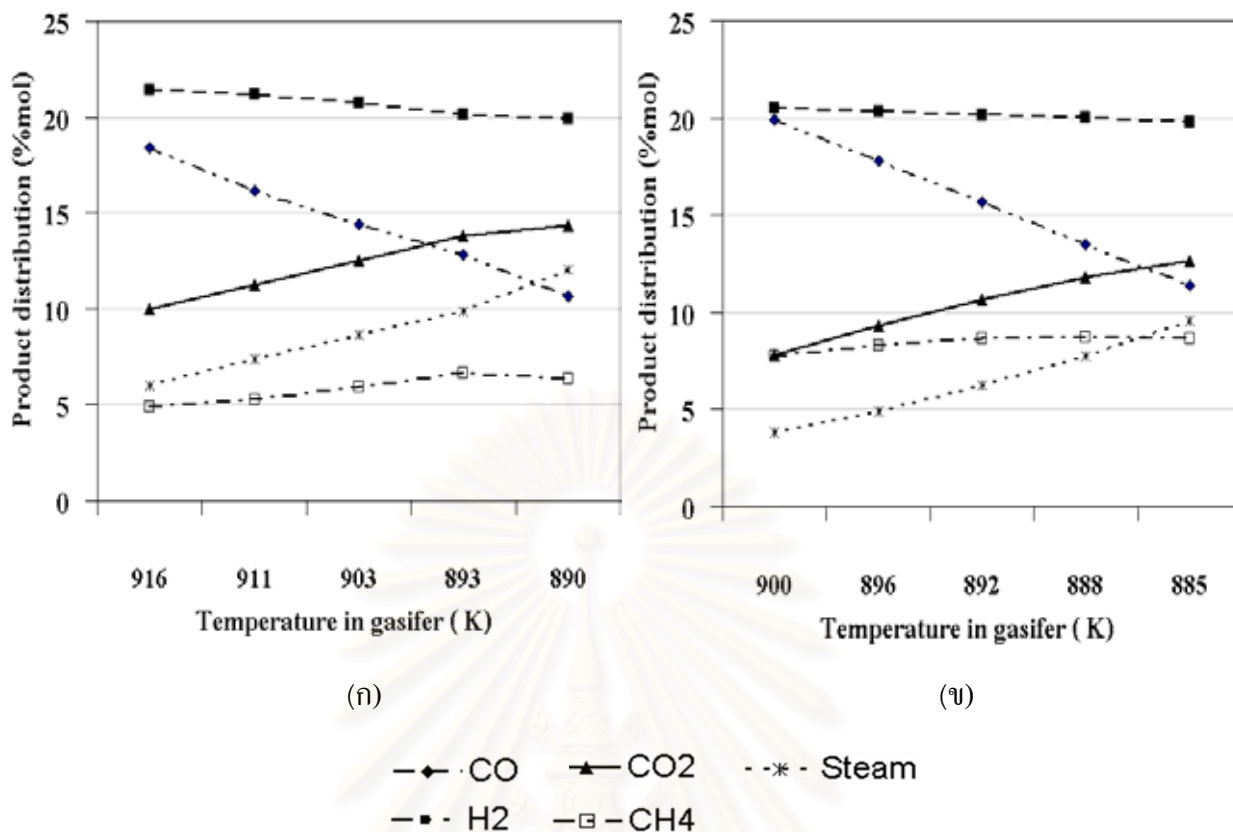
5.3.1.2 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในสารชีวมวลต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

ความชื้นภายในสารชีวมวลนั้นมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศในขณะให้นำชีวมวลตัวนั้นมาใช้ สำหรับปริมาณความชื้นภายในชีวมวลสูงสุดที่ยินยอมที่ให้เข้ามาได้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลอยู่ที่ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งถูกกำหนดตามข้อกำหนดในการเก็บรักษาสารชีวมวล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นภายในสารชีวมวลตั้งแต่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักเพื่อดูสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยเริ่มต้นนั้นซังข้าวโพดที่ใช้ในแบบจำลองไม่มีความชื้นในและในฟางข้าวมีความชื้นอยู่ร้อยละ 10



รูปที่ 5.12 ปริมาณความชื้นในสารชีวมวลของแบบจำลองในแต่ละกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลต่างๆ ต่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน

จากรูปที่ 5.12 พบว่า ความชื้นที่เพิ่มเข้าไปมีผลทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงลดลง เนื่องจากความร้อนส่วนหนึ่งต้องใช้ไปในการระเหยน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ และอุณหภูมิที่ลดลงนี้ส่งผลต่อค่าคงที่สมดุลของแต่ละปฏิกิริยา ทำให้ได้สัดส่วนส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกไซด์เพิ่มขึ้น แก๊สไฮโดรเจนมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น และไอน้ำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.13 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องสมดุลปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดอุณหภูมิที่ต่ำลงนั้น ทำให้สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ค่าต่างๆ ไปจากเดิมสามารถอธิบายได้ดังนี้ ปฏิกิริยา water gas shift reaction หรือปฏิกิริยา G4 จากรูปที่ 3.1 อุณหภูมิที่ลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง และได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ลดลงยังส่งผลต่อปฏิกิริยา Methanation หรือปฏิกิริยา G5 ให้ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกใช้เปลี่ยนไปเป็นแก๊สมีเทนกับไอน้ำมากขึ้น โดยปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยา G5 มีค่าไม่ต่างจากปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา G4 มากนัก สัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงจากเดิม



**รูปที่ 5.13** ผลของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลงต่อร้อยละโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้

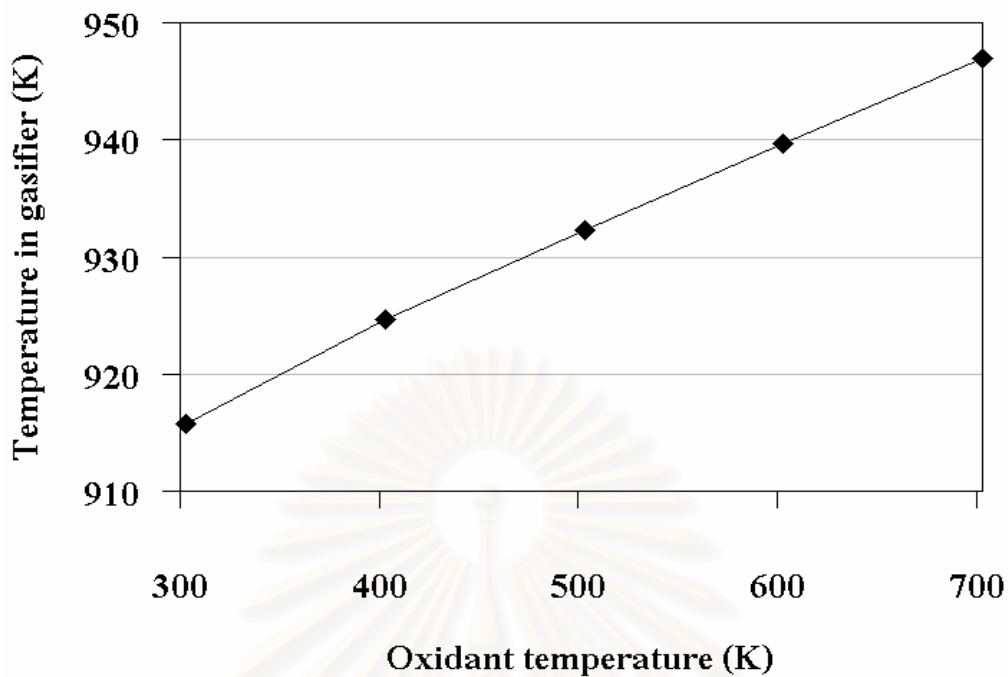
(ก) ลำดับปฏิกิริยาเป็น P1-->O1หรือO2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4 สารชีวมวลที่ใช้คือ ฟางข้าว

(ข) ลำดับปฏิกิริยาเป็น P1-->O1หรือO2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4 สารชีวมวลที่ใช้คือ ชังข้าวโพด

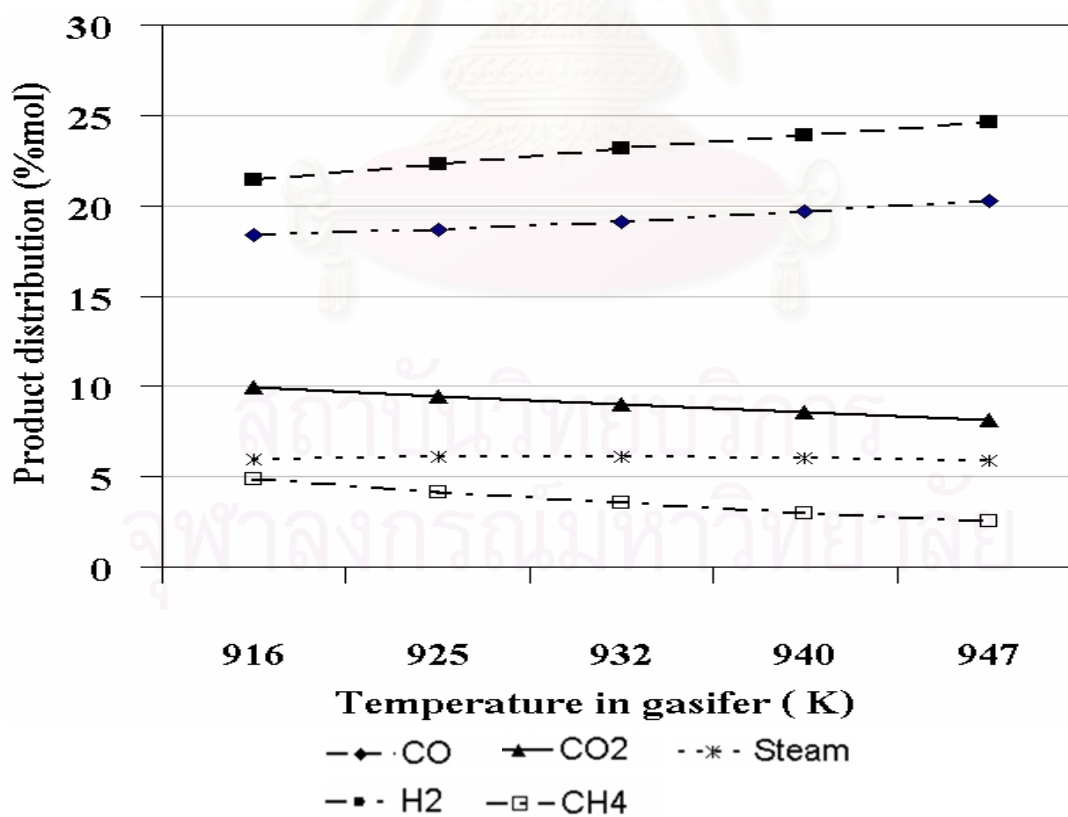
### 5.3.1.3 ผลการเปลี่ยนอุณหภูมิตัวออกซิไดซ์ต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ใน

แบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

สำหรับความร้อนที่ให้แก่ระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงที่ปฏิบัติการแบบแอเดียติก เป็นความร้อนที่ให้เป็นทางอ้อมคือให้ไปกับตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจากการเพิ่มอุณหภูมิจาก 303 ถึง 703 เคลวิน พบว่าทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์สูงขึ้นดังรูปที่ 5.14 แต่สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ต่างจากเดิมมากนัก (ดังรูปที่ 5.15) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลเพิ่มขึ้น แต่ค่าคงที่สมดุล ที่อุณหภูมิประมาณ 900 ถึง 950 เคลวิน ของทุกๆปฏิกิริยาในกระบวนการนี้ มีค่าใกล้เคียงกัน จึงส่งผลทำให้สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ในช่วงอุณหภูมินี้ไม่ต่างจากเดิม



รูปที่ 5.14 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิของสายตัวออกซิไดซ์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ต่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์

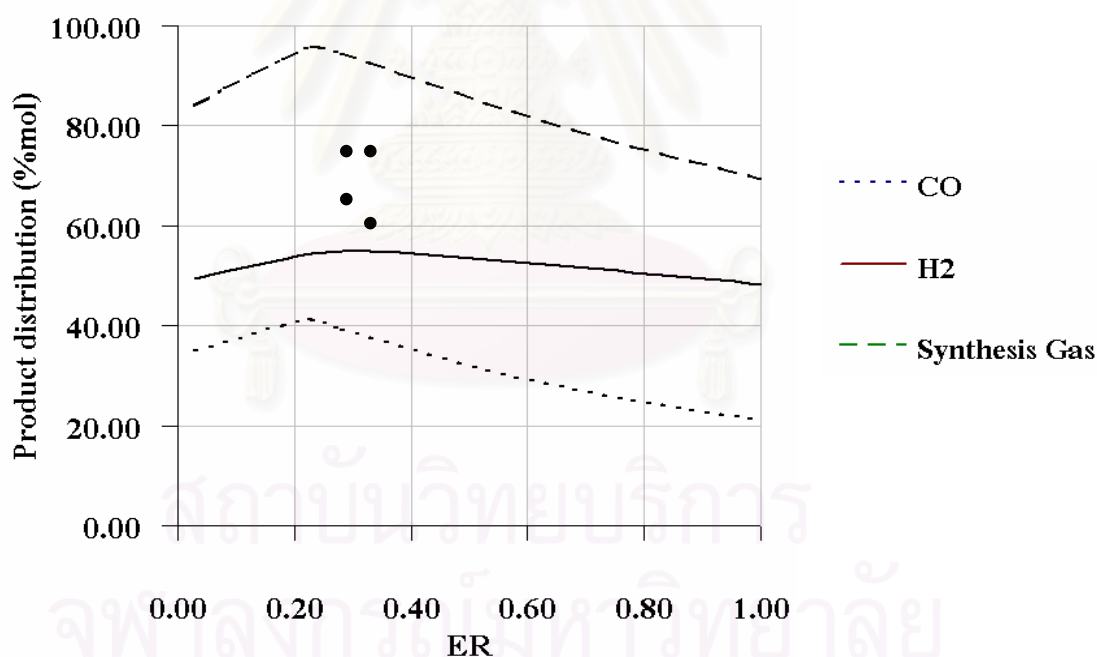


รูปที่ 5.15 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิของสายตัวออกซิไดซ์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ต่อร้อยละโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้

5.3.2 ผลการทดสอบแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ ในการทดสอบแบบจำลองโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์นั้น จะทำการทดสอบในแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์เบด จะใช้รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียวโดยสารชีวมวลที่ใช้คือเปลือกอัลมอนต์ ซึ่งตัวแปรที่ทำการทดสอบประกอบด้วย ปริมาณตัวออกซิไดซ์ต่อสารชีวมวล โดยมวล และปริมาณความร้อนที่ต้องให้แก่ระบบซึ่งในที่นี้คือการเปลี่ยนอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์นั่นเอง

5.3.2.1 ผลการเปลี่ยนสัดส่วน โดยมวลระหว่างปริมาณตัวออกซิไดซ์และปริมาณสารชีวมวลต่อสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

สำหรับแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชัน โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์นั้น จะให้ค่า ER ที่ต่ำกว่าที่ผู้รายงานไว้ และได้ สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์สูงกว่าความเป็นจริง ซึ่งเป็นเพราะว่าแบบจำลองสารชีวมวลมีสัดส่วนไฮโดรเจนเกินมาจากสารชีวมวล จึงทำให้ใช้ไอน้ำน้อยกว่าปกติในการเปลี่ยนสารชีวมวลเป็นแก๊สสังเคราะห์ จึงทำให้ค่า ER มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ผลการเปลี่ยนปริมาณไอน้ำต่อสารชีวมวลโดยมวล (ER) ในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

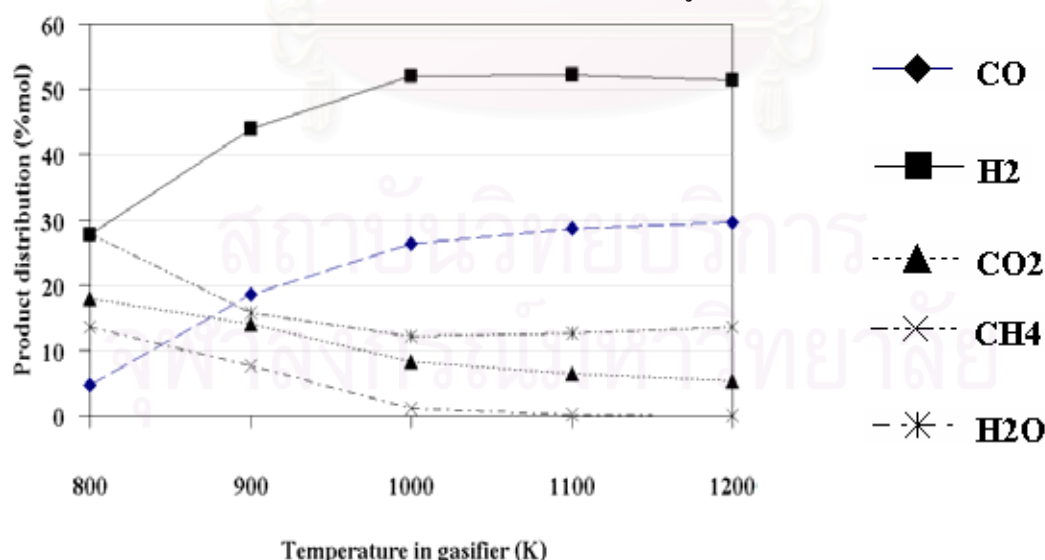
ซึ่งจากรูปที่ 5.16 เมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นสัดส่วนแก๊สสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไอน้ำนั้นจะไปเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยา G3 หรือปฏิกิริยา steam gasification ให้ดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น จึงทำได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้นเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้



ทั้งนี้การใช้ไอน้ำที่มากเกินไปนั้นเกินจุด ER จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยา G4 หรือปฏิกิริยา water gas shift reaction มากขึ้นหรือก็คือ ไปเลื่อนสมดุลทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ปริมาณแก๊สสังเคราะห์จึงลดลงตาม

5.3.2.2 ผลการเปลี่ยนปริมาณความร้อนที่ให้แก่ระบบต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์  
ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

สำหรับในกระบวนการแก๊สซิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไอดีซ์เบด ไม่สามารถปฏิบัติการแบบแอเดียบติกได้เนื่องจากไม่มีกลุ่มปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งคายความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ ดังนั้นในกระบวนการนี้ จึงต้องรับความร้อนจากแหล่งภายนอก ดังนั้นการทดสอบแบบจำลองสำหรับกระบวนการนี้จึงเปลี่ยนอุณหภูมิอยู่ในช่วง 800 ถึง 1200 เคลวินซึ่งเปรียบเสมือนการรับความร้อนจากภายนอก ซึ่งจาก รูปที่ 5.17 พบว่าการเปลี่ยนอุณหภูมิดังกล่าวส่งผลอย่างมากต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลเคมีของแต่ละปฏิกิริยาแก๊สซิเคชันเปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.1 นอกจากนี้ยังพบว่า การที่จะให้ได้สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์สูงนั้น ต้องเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาหลักในกระบวนการแก๊สซิเคชันโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งก็คือปฏิกิริยา Steam gasification ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ทำให้ค่าคงที่สมดุลจะสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นจึงได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนปริมาณมากขึ้น แต่ทั้งนี้ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สูงนั้นหมายถึงต้องใช้พลังงานความร้อนมากขึ้นและต้องระวังไม่ให้ความร้อนสูงมากจนทำให้ซีดีเปลี่ยนสภาพ

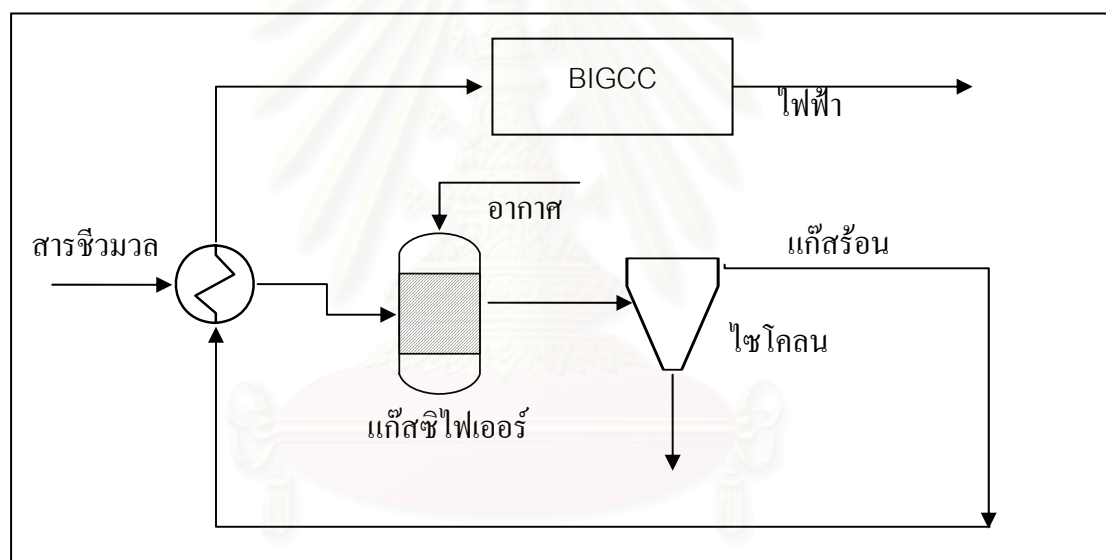


รูปที่ 5.17 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในแบบจำลองกระบวนการแก๊สซิเคชันของเปลือกอัลมอนต์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์โดยใช้รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียวต่อร้อยละโดยโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์



#### 5.4 ผลการประเมินพลังงานความร้อนของระบบปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวล

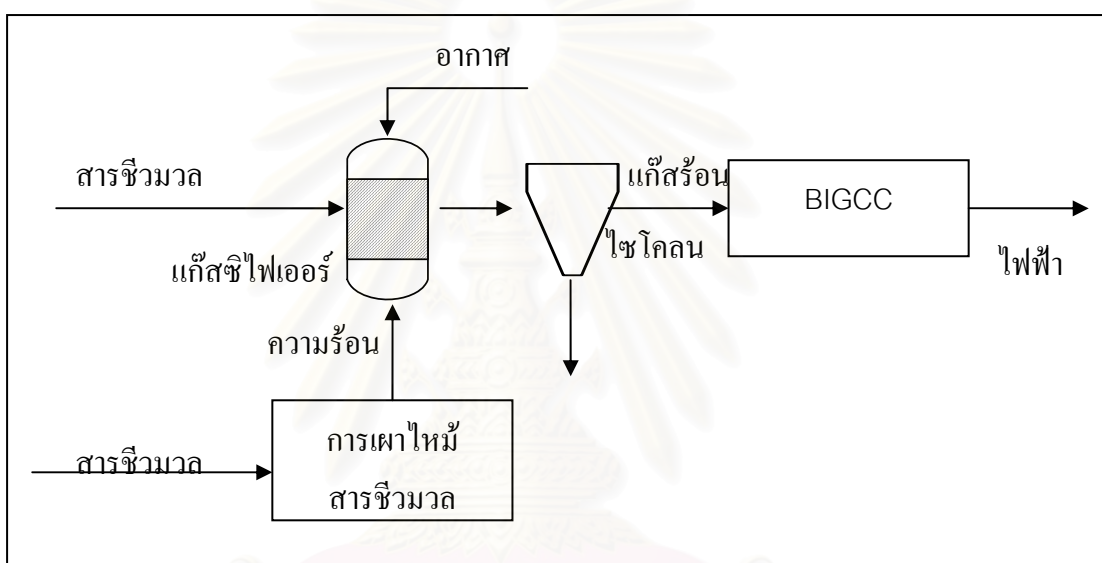
จากผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศและไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าสำหรับกระบวนการการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคอร์แบบอากาศไหลลงนั้น พลังงานที่ต้องให้แก่ระบบได้แก่ พลังงานงานความร้อนเริ่มต้นที่ต้องให้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส โดยพลังงานส่วนนี้สามารถนำพลังงานความร้อนที่ต้องเอาจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเดียวกันนี้มาใช้ได้เนื่องจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้มีอุณหภูมิสูง โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยความร้อนที่เหลือจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์สามารถนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปที่ 5.18 แต่ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองสารชีวมวลมีค่าความร้อนมากกว่าสารชีวมวลจึงต้องหักค่าความร้อนส่วนที่เกินมาก่อน



รูปที่ 5.18 การนำความร้อนไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคอร์แบบอากาศไหลลง

พิจารณา กรณีที่ใช้ฟางข้าวเป็นสารชีวมวล พบว่าเมื่อใช้ฟางข้าว 1 กิโลกรัมจะผลิตแก๊สซึ่งมีพลังงานความร้อนได้ 2,650 กิโลจูล นำไปใช้สำหรับปฏิกิริยาไพโรไลซิส 750 กิโลจูล เหลือพลังงาน 1,900 กิโลจูล แต่เนื่องจากแบบจำลองสารชีวมวลประมาณค่าความร้อนเกินจากความเป็นจริงไปร้อยละ 27 ดังนั้นจึงเหลือพลังงานความร้อน 1,197 กิโลจูล เมื่อนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าในระบบ BIGCC ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ร้อยละ 30 เพราะฉะนั้นจะได้พลังงานไฟฟ้า 0.36 เมกะจูลต่อฟางข้าว 1 กิโลกรัม และเมื่อพิจารณากรณีในทำนองเดียวกันแต่เปลี่ยนสารชีวมวลที่ใช้เป็นชังข้าวโพด พบว่าชังข้าวโพด 1 กิโลกรัม จะผลิตไฟฟ้า ได้ 0.46 เมกะจูล

สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ พลังงานความร้อนที่ต้องให้แก่ระบบคือพลังงานความร้อนเพื่อให้เครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์ปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัลได้ ดังนั้นกระบวนการนี้จึงใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบอากาศไหลลงที่ต้องการพลังเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฟโรโรซิสได้ และกระบวนการนี้ไม่สามารถนำความร้อนจากแก๊สร้อนมาใช้ได้เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สร้อนไม่สูงพอที่จะให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์นี้ได้ ดังนั้นจึงต้องให้พลังงานโดยตรงโดยการนำชีวมวลมาเผาไหม้ในเตาเผาเพื่อนำความร้อนมาใช้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปที่ 5.19

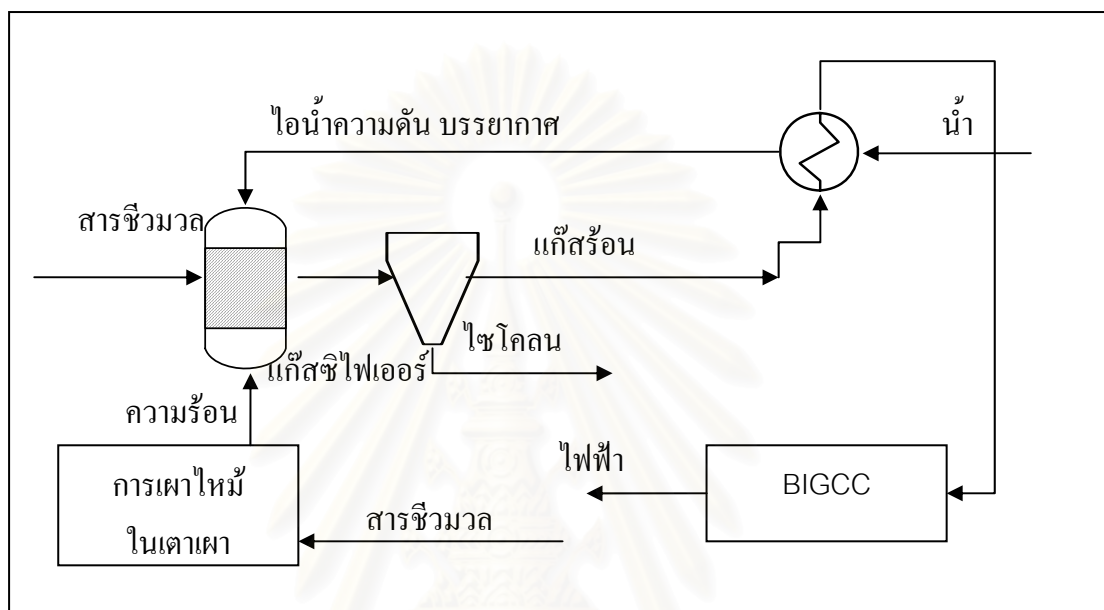


รูปที่ 5.19 การนำความร้อนไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

โดยการเผาไหม้ซังข้าวโพด 1 กิโลกรัมในเตาเผาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์จะได้พลังงานความร้อน 18,827 กิโลจูล ซึ่งความร้อนที่ต้องให้แก่เครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 976 เคลวิน ต้องใช้พลังงาน 1,826 กิโลจูล ดังนั้นต้องเผาไหม้ซังข้าวโพดทิ้งในอากาศ 0.1 กิโลกรัม ต่อ 1 กิโลกรัมที่นำซังข้าวโพดไปเผาในเครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์ โดยแก๊สร้อนที่ได้จากกระบวนการนี้ให้ให้ความร้อน 2,678 กิโลจูลซึ่งเมื่อหักลบค่าความร้อนส่วนที่เกินมาในแบบจำลองสารชีวมวล จะเหลือความร้อน 2249 กิโลจูลโดยสามารถนำไปผลิตไฟฟ้าได้ 0.67 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมซังข้าวโพด

สำหรับกระบวนการสุดท้ายคือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ในเครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยพลังงานความร้อนที่ต้องให้แก่ระบบ

นี้ ได้แก่ พลังงานความร้อนสำหรับให้ปฏิกิริยาต่างๆเกิดได้ ในเครื่องปฏิกรณ์ต้องปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัล และพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในการผลิตไอน้ำจากน้ำที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งพลังงานส่วนหลังนี้สามารถนำพลังงานจากแก๊สร้อนมาใช้สำหรับผลิตไอน้ำได้ แต่สำหรับพลังงานส่วนแรกนั้นต้องอาศัยการเผาไหม้ตัวสารชีวมวลในเตาปฏิกรณ์เช่นเดียวกับในกรณีที่ผ่านมา สำหรับรูปแบบการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 5.20



**รูปที่ 5.20** การนำความร้อนไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันของสารชีวมวลภายในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

โดยสารชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการนี้คือเปลือกอัลมอนต์ โดยเปลือกอัลมอนต์ 1 กิโลกรัมเผาไหม้สมบูรณ์จะให้พลังงาน 20,757 กิโลจูล ซึ่งความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเองได้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดคือ 5,800 กิโลจูลซึ่งเทียบเท่ากับต้องนำชีวมวลมาเผาทิ้งในอากาศ 0.27 กิโลกรัม การใช้เปลือกอัลมอนต์ 1 กิโลกรัมใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้จะได้แก๊สร้อนที่มีพลังงานเหลือ 4,041 กิโลจูล โดยพลังงานส่วนนี้แบ่งนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำ 0.63 กิโลกรัมที่ความดัน 1 บรรยากาศจากน้ำที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องการพลังงาน 1,606 กิโลจูล ดังนั้นจึงเหลือพลังงานเพื่อมันไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า 2435 กิโลจูล เมื่อหักค่าความร้อนที่กินมาในแบบจำลองแล้วจึงเหลือ พลังงาน 2,091 กิโลจูล เมื่อนำไปผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบ BIGCC จะผลิตไฟฟ้าได้ 0.6 เมกกะจูล

โดยจากกระบวนการนำความร้อนไปใช้ทั้งหมดสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 5.14 สรุปการนำพลังงานความร้อนไปใช้ในแต่ละกรณี

สารชีวมวล	ฟางข้าว	ซังข้าวโพด	ซังข้าวโพด	เปลือกอัลมอนต์
เครื่องปฏิกรณ์	แบบไหลลง	แบบไหลลง	ฟลูอิด ไคซ์เบด	ฟลูอิด ไคซ์เบด
ตัวออกซิไดซ์	อากาศ	อากาศ	อากาศ	ไอน้ำ
ปริมาณตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ (kg/kgbiomass)	0.3	0.3	0.3	0.63
ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ทั้งหมด (kJ/kg)	2,650	2,686	2,678	4,041
สามารถใช้พลังงานความร้อนในระบบมาใช้ ในกระบวนการได้หรือไม่	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้เฉพาะ การผลิตไอน้ำ
ต้องใช้พลังงานจากภายนอกหรือไม่	ไม่ต้อง	ไม่ต้อง	ต้องใช้	ต้องใช้
ความร้อนที่ต้องให้แก่ระบบ (kJ/kgbiomass)				
พลังงานความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฟโร ไรซิส	750	795	รวมในส่วนอื่น	รวมในส่วนอื่น
พลังงานความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบไอ เซอร์เทอร์มัล	-	-	1,826	5,800
พลังงานความร้อนสำหรับการผลิตไอน้ำ	-	-	-	1,608
พลังงานความร้อนที่ต้องการจากภายนอก				
พลังงานความร้อนที่ต้องการจากภายนอก (kg/kgbiomass)	-	-	1,826	5,800
ปริมาณชีวมวลที่เสียไปในการนำไปเผาทั้ง เพื่อพลังงาน (kg)	-	-	0.1	0.27
การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กระบวนการ BIGCC				
พลังงานชีวมวลส่วนที่เหลือก่อนนำไป ผลิตไฟฟ้า (kJ/kg)	1,900	1,891	2,678	2,433
ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการคำนวณ ค่าความร้อนแบบจำลองสารชีวมวล	27	17	17	14.4
ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อน เป็นพลังงานไฟฟ้า	30 %	30%	30 %	30%
ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (MJ/kg)	0.36	0.46	0.67	0.6

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

1. กลุ่มสารประกอบสำหรับแบบจำลองสารชีวมวลที่คำนวณจากการถ่วงน้ำหนักองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีในชีวมวลสามารถใช้แทนชีวมวลได้ โดยกลุ่มสารประกอบที่ใช้มีดังนี้

ส่วนลิกนิน	สารประกอบที่ใช้แทนคือ ฟีนิล โพนเพน(C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> O)
ส่วนเซลลูโลส	สารประกอบที่ใช้แทนคือ กลูโคส (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )
ส่วนเฮมิเซลลูโลส	สารประกอบที่ใช้แทนคือ เพนโตส(C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> )
ส่วนที่สกัดได้	สารประกอบที่ใช้แทนคือ แอลกอฮอล์โมเลกุลใหญ่(C <sub>28</sub> H <sub>58</sub> O)

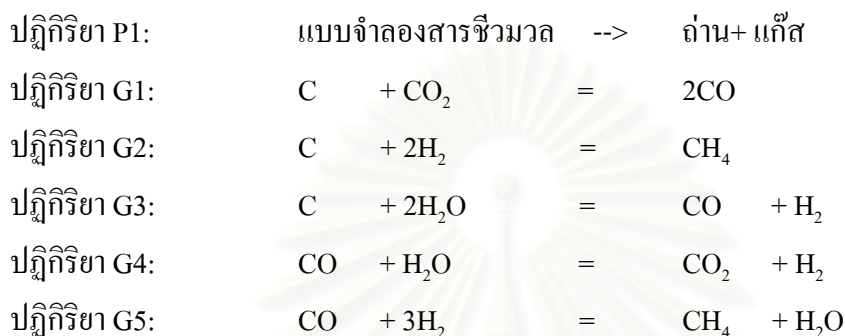
2. ระบบปฏิกิริยาสำหรับการพยากรณ์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ประกอบด้วยปฏิกิริยาดังนี้

ปฏิกิริยา P1:	แบบจำลองสารชีวมวล	-->	ถ่าน+ แก๊ส
ปฏิกิริยา O1:	C	+ 0.5O <sub>2</sub>	--> CO
ปฏิกิริยา O2:	C	+ O <sub>2</sub>	--> CO <sub>2</sub>
ปฏิกิริยา O3:	CO	+ 0.5O <sub>2</sub>	--> CO <sub>2</sub>
ปฏิกิริยา G1:	C	+ CO <sub>2</sub>	= 2CO
ปฏิกิริยา G2:	C	+ 2H <sub>2</sub>	= CH <sub>4</sub>
ปฏิกิริยา G3:	C	+ H <sub>2</sub> O	= CO + H <sub>2</sub>
ปฏิกิริยา G4:	CO	+ H <sub>2</sub> O	= CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>
ปฏิกิริยา G5:	CO	+ 3H <sub>2</sub>	= CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O

โดยในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลง มีลำดับปฏิกิริยาที่ใช้ทำนายสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์คือ P1-->O1 หรือ O2 --> G4-->G1-->G3-->G2-->G5

3. ลำดับปฏิกิริยาไม่มีผลต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์ในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ปฏิบัติการแบบไอโซเทอร์มัลไม่ว่าจะใช้อากาศหรือไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์

4. ระบบปฏิกิริยาสำหรับการพยากรณ์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ประกอบด้วยปฏิกิริยาดังนี้



สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับพยากรณ์สัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์คือแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบใช้เครื่องปฏิกรณ์เครื่องเดียว

5. ค่า ER ที่ให้ค่าสัดส่วนแก๊สสังเคราะห์สูงสุดที่ได้จากแบบจำลองมีค่ามากกว่าการทดลองและแบบจำลองที่มีลำดับปฏิกิริยาที่ใช้ O1 เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงปฏิกิริยาเดียวสามารถพยากรณ์สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์ได้ถึง ER เท่ากับ 0.4 และลำดับปฏิกิริยาที่ใช้ O2 เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงปฏิกิริยาเดียวสามารถพยากรณ์สัดส่วนแก๊สสังเคราะห์ได้ถึง ER เท่ากับ 0.9

6. ความชื้นในสารชีวมวลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันลดลงและอุณหภูมิของตัวออกซิไดซ์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันเพิ่มขึ้น

7. ปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนแก๊สผลิตภัณฑ์คืออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์

8. แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์จะมีความร้อนที่เหลือที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประมาณ 1,900 กิโลจูลต่อชีวมวล 1 กิโลกรัมที่อุณหภูมิ 940 เคลวิน และสำหรับแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์จะมีความร้อนที่เหลือที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประมาณ 2,500 กิโลจูลต่อชีวมวล 1 กิโลกรัมที่อุณหภูมิ 1,100 เคลวิน



## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสร้างแบบจำลองสารชีวมวลอาจจะใช้สารประกอบที่มีโครงสร้างโพลีเมอร์ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้นแต่จะให้ผลความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า
2. ในการศึกษาเพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเคมีสามารถเพิ่มความสามารถในการพยากรณ์แก่สผลิตภัณฑ์ได้ โดยการเพิ่มสารประกอบที่เกิดในระบบที่ละหนึ่ง
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของปฏิกิริยาของการเกิดทาร์ ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของไพโรไลซิส เพื่อลดปัจจัยการเกิดทาร์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Leach, G. Energy and food production. International Institute of Environment and Development. New York, 1968.
- [2] ชื่นชม สงาราตี. ทิศทางการใช้พลังงานสวนทางกับแผนยุทธศาสตร์พลังงานชาติ [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.efe.co.th> [พฤศจิกายน 2549]
- [3] Boonrod Sajjakulnukit, and Prasert Verapong. Sustainable biomass production for energy in Thailand. Journal of Biomass and Bioenergy 31 (2006): 599–610.
- [4] Cheremisoff, N. P., Paul N. cheremisinoff, and Fred Ellerbush. Biomass applications technology and production. Marcel Dekker, 1981.
- [5] Leslie, P. W. Biomass As Fuel. Academic. New York, 1982.
- [6] Solar Energy Research Institute. Generator gas: The swedish experience from 1939-1945. Colorado: SERI, 1979.
- [7] Goswami, Y., Ed. D. Alternative energy in agriculture. 2 vol. CRC Press, 1986.
- [8] มุณิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. Biomass Potential: ปริมาณชีวมวลคงเหลือ [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.efe.co.th> [ตุลาคม 2549]
- [9] Samir, S. S., and Oskar R. Zaborsky. Biomass conversion process for energy and fuel: Basis principles of direct combustion. Springer, 1981.
- [10] Brown, R.C. The potential for biomass production and conversion in Iowa. Department of Mechanical and Chemical engineering. Ames, 1994.
- [11] Hoglund, C. Agricultural residues as fuel for producer gas generation. Royal Institute of Technology. Sweden, 1981.
- [12] Skov, N. A., and Paperworth M. L. The Pegasus Unit. Washington: Pegasus, 1974.
- [13] California Energy Commission. An investigation of the downdraft gasification characteristics of agricultural and forestry residues. America, 1979.
- [14] Rapagna, S., Jand N., Kiennemann A., and Foscolo PU. Steam gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles. Journal of Biomass and Bioenergy 19 (2000): 187-197.
- [15] Jorapur, R., and Anil K. Rajvanshi. Sugarcane leaf-bagasse gasifiers for industrial heating application. Journal of Biomass and Bioenergy 13(1997) 141-146.
- [16] Dong, Y., and Meyer Steinberg. Hynol-an economical process for methanol production from biomass and nature gas with reduced CO<sub>2</sub> emission. Journal of Hydrogen Energy (1997):

991-997.

- [17] Graboski, M. Properties of biomass relevant to gasification. In A survey of biomass gasification volume II: Principle of gasification, pp. 23-66. Colorado: SERI, 1979.
- [18] มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. Characteristics of Biomass Fuel: ค่าการวิเคราะห์ชีวมวล [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.efe.co.th> [เมษายน 2549]
- [19] Kirk, R. E., and Othmer. Encyclopedia of chemical technology. John Wiley & Sons. America, 1963.
- [20] Brain, M. Beneficiation of biomass for gasification and combustion. In A survey of biomass gasification volume II: Principle of gasification, pp. 69-94. Colorado: SERI, 1979.
- [21] Reed, T. B. Effect of moisture content on heat recovery and combustion efficiency. In A survey of biomass gasification volume II: Principle of gasification, p. 75. Colorado: SERI, 1979.
- [22] Chen, G., J. Andries, Z. Luo b, and H. Spliethoff. Biomass pyrolysis/gasification for product gas production: The overall investigation of parametric effects. Journal of Energy Conversion and Management 44 (2003): 1875-1884.
- [23] Yin, X., Chuang Zhi Wu, Shun Peng Zheng, and Yong Chen. Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. Journal of Biomass and Bioenergy 23 (2002):181-187.
- [24] Lin, K. S., H. Paul Wang, C.-J. Lin, and Ching-I Juch. A process development for gasification of rice husk. Journal of Fuel Processing Technology 55 (1998):185-192.
- [25] Ganesh, A., Prem Dutt Grover, and P.V. Ramachandra. A process development for gasification of rice husk. India, 1992.
- [26] Babu, B.V., and Pratik N. Sheth. Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor. Journal of Energy Conversion and Management 47 (2006): 2602-2611.
- [27] Smith, J. M., H.C. Van Ness, and M.M. Abbott. Introduction to chemical engineering thermodynamics. 5 th ed. McGraw-Hill Science,1996.
- [28] Mohammad, A., and others. Gasification of different biomasses in a dual-bed gasifier system combined with novel catalysts with high energy efficiency. Journal of Applied Catalysis 267 (2004): 95-102.
- [29] Wisniak, J. Thermodynamic of solution. Ben-gurion university of the NEGEV. Israel, 2006.

- [30] ปิยะศักดิ์ บุญนคร. การจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชนิดผสมเคมีสำหรับการผลิตเอทิลีนและโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [31] Reed, T. B., Markson M. The SERI high pressure gasifier. Proceedings of Biomass to Methanol Specialist Workshop, pp. 217-1330. USA: SERI, 1982.
- [32] Energy research and development cooperation. Development of a biomass fuelled entrained flow gasifier. Biomass Energy Services and Technology, 1994.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

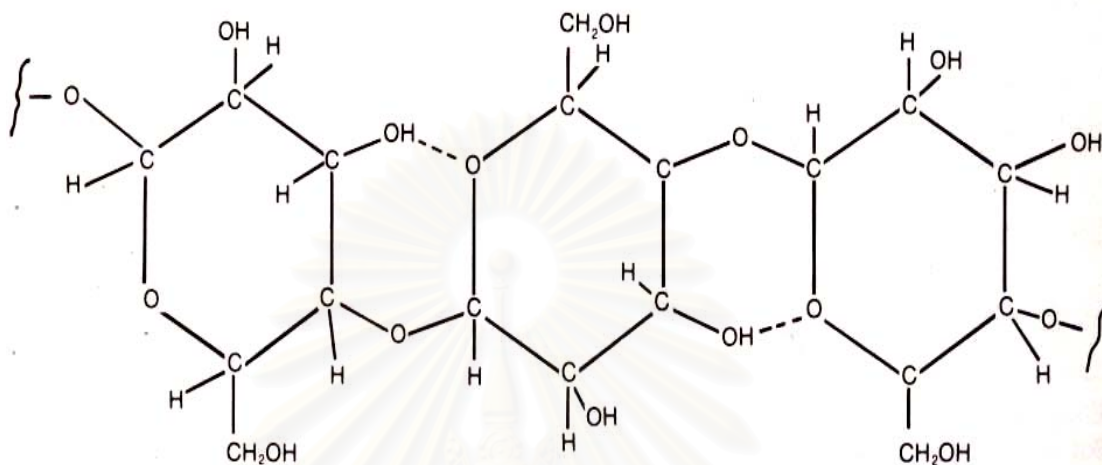


ภาคผนวก

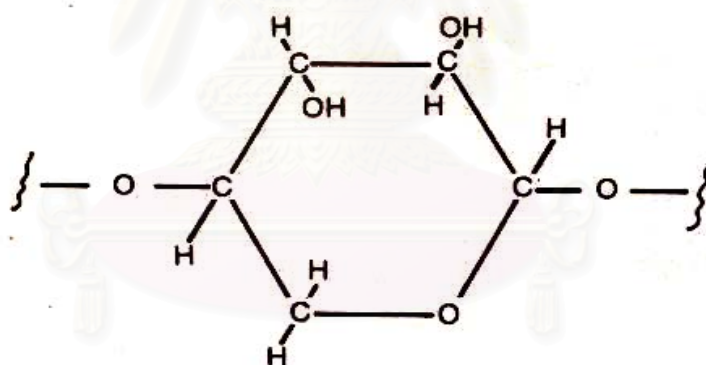
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

แสดงโครงสร้างขององค์ประกอบของสารประกอบทางเคมีในชีวโมเลกุลนี้



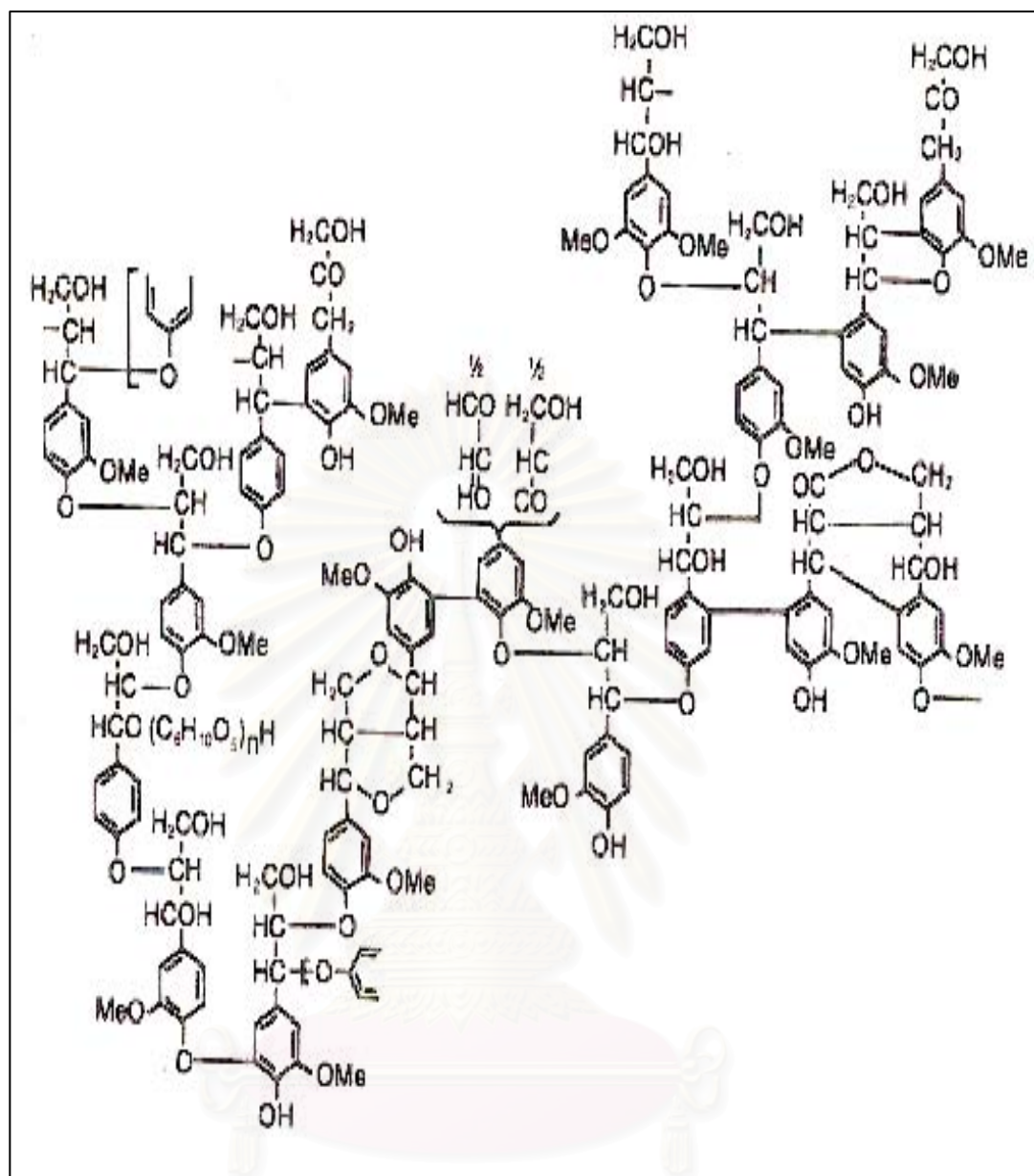
รูป ก.1 โครงสร้างของเซลลูโลส



รูป ก.2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูป ก.3 โครงสร้างของลิกนิน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข การผลการจำลองแบบจำลองสารชีวมวลต่างๆ

ตารางที่ ข1 ข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีของฟางข้าว

Lignin	Carbohydrates		Extractives	Total
	Cellulose	Hemicellulose		
14.1	35.7	29	21.2	100

ตารางที่ ข2 ผลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีตามสารประกอบที่เลือกในฟางข้าว

Composition	Component	biomass model	C	H	O	N	S	Total
Lignin	Polymer of phenylpropane	phenylpropane	11.197	1.244	1.659	0.000	0.000	14.100
	$C_9H_{12}O$	$C_9H_{12}O$	0.108	0.012	0.016	0.000	0.000	0.136
Cellulose	Polymer d-gucose	Glucose	14.280	2.380	19.040	0.000	0.000	35.700
	$C_6H_{10}O_5$	$C_6H_{12}O_6$	0.072	0.012	0.096	0.000	0.000	0.180
Hemicellulose	Polymer of d-xylose (pentane sugar)	xylose(aldehyde form)	11.600	1.933	15.467	0.000	0.000	29.000
	$C_5H_{10}O$	$C_5H_{10}O_2$	0.060	0.010	0.080	0.000	0.000	0.150
Extractives	Various	wax	17.374	2.999	0.827	0.000	0.000	21.20
	waxes	$C_{28}H_{58}O$	0.336	0.058	0.016	0.000	0.000	0.410

ตารางที่ ข3 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยนำหน้าระหว่างฟางข้าวและแบบจำลอง				
Rice straw	Ultimate analysis ,%WT	Combustible,%WT	Cal. From biomass model	RSS
C	38.17	48.23	54.5	0.80
H	5.02	6.34	8.6	0.77
O	35.28	44.58	37.0	1.29
N	0.58	0.73	0	0.73
S	0.09	0.11	0	0.11
Cl	0	0.00	0	0.00
Ash	10.39			
Moisture	10			RSS
<b>Total</b>	Total	100.00	100.0	2.98

ตารางที่ ข4 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยนำหน้าระหว่างฟางข้าวและแบบจำลอง

Rice straw	Combustible,%mol	Cal. From biomass model	mole	error mol	RSS
C	1.00	4.5	1.00	0.00	0.00
H	1.58	8.6	1.89	0.31	0.06
O	0.69	2.3	0.51	-0.18	0.05
Total	3.27	15.4	3.4	0.12	0.11

ตารางที่ ข5 ข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีของซังข้าวโพด

Lignin	Carbohydrates		Extractives	Total
6	Cellulose	Hemicellulose	14	100
	44	36		

ตารางที่ ข6 ผลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีตามสารประกอบที่เลือกในซังข้าวโพด

Composition	Component	biomass model	C	H	O	N	S	Total
Lignin	Polymer of phenylpropane	phenylpropane	4.765	0.529	0.706	0.000	0.000	6.000
	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	0.108	0.012	0.016	0.000	0.000	0.136
Cellulose	Polymer d-glucose	Glucose	17.600	2.933	23.467	0.000	0.000	44.000
	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	0.072	0.012	0.096	0.000	0.000	0.180
Hemicellulose	Polymer of d-xylose (pentane sugar)	xylose(aldehyde form)	14.400	2.400	19.200	0.000	0.000	36.000
	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.060	0.010	0.080	0.000	0.000	0.150
Extractives	Various	wax	11.473	1.980	0.546	0.000	0.000	14.00
	waxes	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub> O	0.336	0.058	0.016	0.000	0.000	0.410

ตารางที่ ข7 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนักระหว่างซังข้าวโพดและแบบจำลอง

Rice straw	Ultimate analysis, %WT	Combustible, %WT	Cal. From biomass model	RSS
C	43.7	47.65	48.2	0.01
H	5.21	5.68	7.8	0.82
O	42.5	46.34	43.9	0.13
N	0.19	0.21	0	0.21
S	0.04	0.04	0	0.04
Cl	0.08	0.09	0	0.00
Ash	1.4			
Moisture	7			RSS
<b>Total</b>	Total	100.00	100.0	1.00

ตารางที่ ข8 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโดยโมลอย่างง่ายของธาตุ C : H : O ระหว่างฟางข้าวและแบบจำลอง

Rice straw	Combustible, %mol	Cal. From biomass model	mole	error mol	RSS
C	1.00	4.0	1.00	0.00	0.00
H	1.43	7.8	1.95	0.52	0.19
O	0.73	2.7	0.68	-0.05	0.00
Total	3.16	14.6	3.63	0.47	0.19

ตารางที่ ข9 ข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีของเปลือกอัลมอนต์

Lignin	Carbohydrates		Extractives	Total
	Cellulose	Hemicellulose		
21	41	29	9	100

ตารางที่ ข10 ผลการถ่วงน้ำหนักข้อมูลองค์ประกอบสารประกอบทางเคมีตามสารประกอบที่เลือกในเปลือกอัลมอนต์

Composition	Component	biomass model	C	H	O	N	S	Total
Lignin	Polymer of phenylpropane	phenylpropane	16.676	1.853	2.471	0.000	0.000	21.000
	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	0.108	0.012	0.016	0.000	0.000	0.136
Cellulose	Polymer d-glocose	Glucose	16.400	2.733	21.867	0.000	0.000	41.000
	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	0.072	0.012	0.096	0.000	0.000	0.180
Hemicellulose	Polymer of d-xylose (pentane sugar)	xylose(aldehyde form)	11.600	1.933	15.467	0.000	0.000	29.000
	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.060	0.010	0.080	0.000	0.000	0.150
Extractives	Various	wax	7.340	1.311	0.350	0.000	0.000	9.00
	waxes	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub> O	0.336	0.060	0.016	0.000	0.000	0.412



ตารางที่ ข11 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนักระหว่างเปลือกอัลมอนต์และแบบจำลอง

Rice straw	Ultimate analysis ,%WT	Combustible,%WT	Cal. From biomass model	RSS
C	52.61	51.00	52.0	0.02
H	5.93	6.00	7.8	0.56
O	41.08	43.00	40.2	0.19
N	0.33		0	0.00
S	0.02		0	0.00
Cl	0.02		0	0.00
Ash	3			
Moisture	12			RSS
<b>Total</b>	100	100.00	100.0	0.77

ตารางที่ ข12 ผลการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโดยโมลอย่างง่ายของธาตุ C : H: Oระหว่างเปลือกอัลมอนต์และแบบจำลอง

Rice straw	Combustible,%mol	Cal. From biomass model	mole	error mol	RSS
C	1.00	4.3	1.00	0.00	0.00
H	1.43	7.8	1.81	0.37	0.10
O	0.62	2.5	0.58	-0.04	0.00
Total				0.00	0.10

ภาคผนวก ค ผลการจำลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Provision 2

ตารางที่ ค.1 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยาแบบที่ 1 และ 2

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							อุณหภูมิ (K)	ความคลาดเคลื่อน	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
All reaction take place simultaneous	15.892	26.937	8.023	2.700	29.722	5.000	9.826	914	2.747	0.1%
Pyrolysis --> Oxidation --> Gasification	16.010	26.999	7.981	2.686	29.714	5.000	9.755	914	2.705	0.1%
Pyrolysis --> Gasification -->Oxidation	22.296	19.073	8.948	10.791	34.285	4.607	0.000	948	2.865	3.8%

ตารางที่ ค.2 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยาแบบที่ 1 และ 2

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							อุณหภูมิ (K)	ความคลาดเคลื่อน	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
All reaction take place simultaneous	21.585	26.250	7.495	1.803	32.836	5.000	4.787	939	0.889	1.7 %
Pyrolysis --> Oxidation --> Gasification	21.584	26.250	7.495	1.804	32.836	5.000	4.787	939	0.889	1.7 %
Pyrolysis --> Gasification -->Oxidation	23.687	17.402	8.333	7.732	36.594	6.252	0.000	1078	2.032	16.7%

ตารางที่ ค.3 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G1-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							อุณหภูมิ (K)	ความคลาดเคลื่อน	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G3-->G4-->G5	19.67	29.34	6.32	1.68	29.15	5.78	8.07	948	2.220	3.864
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G3-->G5-->G4	15.26	26.05	7.77	2.57	29.65	7.95	10.75	948	3.399	3.785
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G4-->G3-->G5										
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G4-->G5-->G3	15.82	27.18	7.77	2.28	29.49	7.18	10.29	912	3.125	-0.100
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G5-->G3-->G4	15.33	25.82	7.77	2.72	29.73	7.98	10.63	951	3.268	4.191
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G5-->G4-->G3	16.19	26.75	7.80	2.72	29.73	7.06	9.74	913	2.609	-0.003
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G2-->G4-->G5	20.25	24.07	8.58	6.88	32.08	4.51	3.62	891	0.636	-2.380
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4	20.13	23.17	8.56	7.26	32.29	4.94	3.64	911	0.625	-0.195
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G4-->G2-->G5	20.00	24.20	8.30	6.42	31.82	4.97	4.29	891	0.530	-2.411
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G4-->G5-->G2	21.87	25.44	8.36	6.78	32.03	3.27	2.26	830	1.130	-9.140
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G5-->G2-->G4	21.84	24.51	8.52	7.40	32.37	3.43	1.94	851	1.242	-6.809
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G5-->G4-->G2	21.67	25.44	8.24	6.57	31.91	3.53	2.63	832	0.982	-8.873

**ตารางที่ ค.3** ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G1-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G2-->G3-->G5	15.60	27.18	7.88	2.29	29.49	7.17	10.38	918	3.188	0.558
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G2-->G5-->G3	15.53	27.51	7.85	2.05	29.36	7.14	10.56	912	3.405	-0.087
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G3-->G2-->G5	19.79	24.42	8.50	6.40	31.81	4.77	4.31	893	0.532	-2.214
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G3-->G5-->G2	21.65	25.68	8.55	6.75	32.01	3.07	2.29	831	1.133	-8.963
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G5-->G2-->G3	16.13	30.28	7.95	4.81	29.75	0.00	11.08	1645	4.650	80.145
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G5-->G3-->G2	18.35	26.64	8.18	4.24	30.59	5.27	6.74	873	0.933	-4.332
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G2-->G3-->G4	17.58	23.66	8.24	5.41	31.25	6.77	7.08	951	0.836	4.184
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G2-->G4-->G3	18.15	24.61	8.44	5.41	31.25	5.82	6.32	922	0.649	1.010
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G3-->G2-->G4	17.90	25.97	8.30	4.48	30.72	5.64	6.99	898	0.933	-1.612
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G3-->G4-->G2	17.88	26.65	8.02	3.84	30.36	5.76	7.49	882	1.217	-3.434
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G4-->G3-->G2	17.70	25.12	8.19	4.69	30.84	6.22	7.24	919	0.963	0.675
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G4-->G2-->G3	20.81	25.28	8.25	2.60	33.34	5.16	4.56	902	0.755	-1.246

ตารางที่ ๑.๔ ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G2-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G3-->G4-->G5	18.63	26.54	8.15	4.40	30.68	5.16	6.44	870	0.843	-4.734
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G3-->G5-->G4	13.98	27.59	7.53	0.91	28.71	8.49	12.79	942	5.924	3.153
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G4-->G3-->G5	10.32	23.99	8.56	1.92	29.28	10.82	15.10	927	8.638	1.566
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G4-->G5-->G3										
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G5-->G3-->G4	14.71	28.27	6.96	0.37	28.41	8.49	12.79	904	6.197	-1.024
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G5-->G4-->G3	13.81	28.08	7.46	0.52	28.49	8.50	13.15	933	6.493	2.243
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G1-->G4-->G5	15.75	36.75	8.84	0.64	35.48	0.00	2.53	977	2.835	6.982
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G1-->G5-->G4	18.32	26.62	7.50	0.10	31.76	7.12	8.58	918	2.667	0.524
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G4-->G1-->G5	13.72	27.34	7.25	0.63	28.55	9.10	13.42	951	6.789	4.162
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G4-->G5-->G1	13.60	27.09	7.30	0.75	28.62	9.20	13.45	959	6.779	5.061
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G5-->G1-->G4	13.72	27.34	7.25	0.63	28.55	9.10	13.42	951	6.789	4.162
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G5-->G4-->G1	14.95	27.62	7.10	0.96	28.74	8.40	12.23	915	5.342	0.179

**ตารางที่ ๔.๔** ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G2-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G1-->G3-->G5	13.73	26.38	7.29	1.15	28.85	9.40	13.20	972	6.346	6.487
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G1-->G5-->G3	15.27	27.00	6.82	1.15	28.85	8.78	12.12	918	5.190	0.533
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G3-->G1-->G5	16.40	24.91	5.23	1.17	28.86	10.85	12.58	921	5.974	0.895
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G3-->G5-->G1	16.64	25.81	5.19	0.80	28.65	10.42	12.50	895	5.983	-1.946
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G5-->G1-->G3	14.68	26.99	7.04	1.08	28.81	8.89	12.52	934	5.616	2.324
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G5-->G3-->G1	15.40	26.73	6.66	1.18	28.87	9.01	12.15	920	5.230	0.712
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G1-->G3-->G4	14.82	26.99	6.19	0.28	27.21	10.40	14.11	893	7.993	-2.211
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G1-->G4-->G3										
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G3-->G1-->G4	10.25	24.58	8.57	1.60	29.10	10.64	15.26	917	8.940	0.478
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G3-->G4-->G1	14.63	28.42	6.99	0.28	28.36	8.45	12.87	904	6.318	-0.995
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G4-->G1-->G3	9.44	22.43	7.90	1.60	29.10	12.79	16.74	976	11.582	6.888
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G4-->G3-->G1	11.37	24.29	7.86	1.60	29.10	10.93	14.85	891	8.399	-2.430



ตารางที่ ๕.5 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2-->G3-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G2-->G4-->G5	15.62	27.06	5.81	0.28	28.36	9.82	13.06	898	6.678	-1.683
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G2-->G5-->G4	14.34	28.34	7.09	0.28	28.36	8.53	13.05	912	6.514	-0.134
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G4-->G2-->G5	18.68	25.28	8.48	5.39	31.24	5.18	5.75	898	0.586	-1.677
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G4-->G5-->G2	18.70	24.84	8.40	5.54	31.33	5.43	5.76	905	0.566	-0.827
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G5-->G2-->G4	18.74	25.14	8.21	5.22	31.14	5.53	6.01	896	0.631	-1.807
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G5-->G4-->G2	21.23	25.73	8.38	6.35	31.78	3.53	3.00	836	0.871	-8.410
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G1-->G4-->G5	21.22	25.36	8.50	6.65	31.95	3.52	2.80	846	0.914	-7.392
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G1-->G5-->G4	21.26	25.64	8.28	6.30	31.75	3.68	3.09	836	0.839	-8.400
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G4-->G1-->G5	18.66	25.21	8.21	5.14	31.10	5.55	6.11	897	0.654	-1.754
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G4-->G5-->G1	18.47	25.20	8.37	5.22	31.14	5.48	6.12	903	0.645	-1.130
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G5-->G1-->G4	18.19	25.96	9.58	5.91	31.53	3.85	4.97	905	0.581	-0.879
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G5-->G4-->G1	18.90	24.26	9.14	6.68	31.97	4.58	4.47	920	0.514	0.752

ตารางที่ ค.5 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G3-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G1-->G2-->G5	18.44	22.04	8.44	6.86	32.07	6.58	5.58	892	0.517	-2.300
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G1-->G5-->G2	19.17	23.79	8.95	6.86	32.07	4.83	4.34	922	0.515	0.966
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G2-->G1-->G5	20.20	24.40	8.17	6.28	31.74	4.94	4.27	893	0.542	-2.210
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G2-->G5-->G1	21.86	25.44	8.36	6.79	32.03	3.27	2.26	830	1.130	-9.144
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G5-->G1-->G2	19.86	25.31	7.55	5.04	32.42	2.53	7.29	925	1.505	1.293
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G5-->G2-->G1	18.81	24.20	8.90	6.42	31.82	4.97	4.88	921	0.485	0.847
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G1-->G2-->G4	19.80	26.81	9.04	5.74	31.44	3.21	3.97	850	0.734	-6.924
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G1-->G4-->G2	18.47	25.44	10.05	6.79	32.03	3.27	3.95	914	0.676	0.115
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G2-->G1-->G4	20.88	25.27	8.43	2.81	33.48	4.89	4.24	903	0.717	-1.144
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G2-->G4-->G1	21.01	25.25	8.24	2.70	33.41	5.05	4.34	898	0.744	-1.634
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G4-->G1-->G2	19.15	22.25	8.52	7.19	32.25	5.95	4.68	948	0.496	3.851
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G4-->G2-->G1	18.87	24.94	10.01	7.16	32.27	3.28	3.47	916	0.750	0.298



ตารางที่ ๑.๖ ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G4-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G1-->G2-->G5	15.06	27.78	6.34	0.17	28.30	9.23	13.12	900	6.713	-1.413
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G1-->G5-->G2	13.97	29.22	7.61	0.17	28.30	7.79	12.94	907	6.410	-0.660
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G2-->G1-->G5	19.74	24.46	8.56	6.40	31.81	4.72	4.31	893	0.533	-2.175
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G2-->G5-->G1	21.59	25.73	8.61	6.75	32.01	3.02	2.30	831	1.134	-8.929
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G5-->G1-->G2	17.68	26.38	9.68	5.54	31.33	3.89	5.50	908	0.632	-0.593
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G5-->G2-->G1	18.69	24.46	9.08	6.40	31.81	4.72	4.83	919	0.495	0.699
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G1-->G2-->G3	19.72	26.97	9.22	5.81	31.47	2.97	3.84	850	0.773	-6.925
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G1-->G3-->G2	18.33	25.73	10.24	6.75	32.01	3.02	3.93	913	0.712	-0.032
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G2-->G3-->G1	23.66	34.69	8.22	3.38	29.57	0.00	0.47	1039	3.172	13.771
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G2-->G1-->G3	16.77	27.21	8.37	3.35	30.09	5.81	8.41	896	1.696	-1.809
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G3-->G1-->G2	16.33	26.64	8.66	3.71	30.29	5.93	8.44	921	1.617	0.891
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G3-->G2-->G1	13.12	22.90	9.86	5.18	31.12	7.83	10.00	891	2.369	-2.408

ตารางที่ ๗.7 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G5-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G2-->G3-->G4	13.46	24.25	9.77	4.58	30.78	7.22	9.93	856	2.350	-6.208
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G2-->G4-->G3	12.39	24.23	10.31	4.60	30.79	7.23	10.45	885	2.755	-3.036
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G3-->G2-->G4	15.79	26.63	7.93	2.70	29.72	7.20	10.03	925	2.805	1.368
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G3-->G4-->G2	16.06	26.92	7.93	2.70	29.72	6.91	9.74	914	2.612	0.103
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G4-->G2-->G3	16.91	26.68	8.16	3.48	30.16	6.18	8.43	903	1.669	-1.103
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G4-->G3-->G2	16.96	26.85	8.01	3.27	30.04	6.28	8.60	897	1.803	-1.807
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G1-->G3-->G4	25.06	35.46	7.59	2.49	29.09	0.00	0.31	1037	3.649	13.531
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G1-->G4-->G3	17.40	26.65	7.87	3.45	30.14	6.25	8.24	891	1.596	-2.447
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G3-->G1-->G4	16.78	25.66	8.11	3.88	30.39	6.70	8.49	926	1.599	1.429
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G3-->G4-->G1	24.74	33.11	7.88	3.85	30.16	0.00	0.26	1029	3.209	12.663
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G4-->G1-->G3	15.89	24.30	7.88	3.88	30.39	8.06	9.61	972	2.273	6.419
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G4-->G3-->G1	17.15	25.44	7.82	3.88	30.39	6.92	8.41	920	1.573	0.771

ตารางที่ ๗.7 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของฟางข้าวโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1 -->G5-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	14	19	11	5	40	7	4	913-1073		
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G1-->G2-->G4	16.61	26.32	8.53	3.88	30.39	6.03	8.24	920	1.484	0.811
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G1-->G4-->G2	13.19	22.94	10.07	5.40	31.24	7.50	9.65	890	2.112	-2.471
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G2-->G1-->G4	15.69	26.66	7.89	2.61	29.67	7.30	10.19	927	2.946	1.584
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G2-->G4-->G1	15.81	26.73	7.69	2.43	29.57	7.45	10.32	921	3.106	0.929
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G4-->G1-->G2	15.73	24.91	7.84	3.45	30.15	7.98	9.94	962	2.573	5.403
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G4-->G2-->G1	16.52	26.54	8.26	3.45	30.15	6.35	8.73	915	1.813	0.222
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G1-->G2-->G3	17.34	26.55	7.76	3.36	30.09	6.46	8.44	892	1.706	-2.268
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G1-->G3-->G2	16.26	26.84	8.24	3.15	29.97	6.43	9.11	914	2.096	0.114
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G2-->G1-->G3	0.10	38.25	8.80	3.74	32.55	0.00	16.57	1022	13.028	11.984
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G2-->G3-->G1	13.75	24.18	9.83	4.82	30.92	7.00	9.51	852	2.037	-6.701
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G3-->G1-->G2	15.55	26.57	8.97	3.65	29.03	6.63	9.60	914	2.316	0.076
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G3-->G2-->G1	17.20	26.87	8.08	3.45	30.14	6.03	8.23	892	1.591	-2.296



ตารางที่ ๘.๘ ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2 -->G1-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G3-->G4-->G5	20.66	26.52	7.39	1.14	32.42	5.85	6.02	951	1.079	3.009
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G3-->G5-->G4	20.53	25.87	7.41	1.41	32.58	6.15	6.05	968	0.922	4.884
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G4-->G3-->G5										
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G4-->G5-->G3	20.85	27.00	7.31	0.93	32.28	5.65	5.98	935	1.211	1.344
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G5-->G3-->G4	20.42	26.21	7.40	1.18	32.44	6.10	6.24	963	1.042	4.291
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G2-->G5-->G4-->G3	21.05	26.79	7.37	1.18	32.44	5.52	5.63	936	1.090	1.460
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G2-->G4-->G5	21.41	26.30	7.45	1.65	32.74	5.39	5.06	941	0.898	1.943
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G2-->G5-->G4	19.26	25.64	7.48	3.93	32.92	5.69	5.08	959	0.452	3.865
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G4-->G2-->G5	21.23	26.36	7.43	1.53	32.66	5.50	5.29	943	0.933	2.171
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G4-->G5-->G2	24.41	26.23	7.69	3.32	33.80	3.25	1.29	885	1.449	4.076
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G5-->G2-->G4	24.61	25.37	7.54	3.68	34.03	3.64	1.13	898	1.370	2.668
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G3-->G5-->G4-->G2	24.48	25.94	7.39	3.21	33.72	3.70	1.57	887	1.311	3.936

ตารางที่ ๘.๘ ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G1-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G2-->G3-->G5										
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G2-->G5-->G3	20.65	27.20	7.43	0.86	32.24	5.54	6.08	936	1.263	1.439
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G3-->G2-->G5	20.13	26.46	7.53	2.52	32.66	6.40	4.29	944	0.632	2.271
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G3-->G5-->G2	24.31	26.35	7.79	3.31	33.79	3.15	1.30	886	1.462	3.976
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G5-->G2-->G3	22.57	25.22	7.74	2.98	33.58	4.72	3.18	944	0.751	2.259
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G4-->G5-->G3-->G2	22.86	26.43	7.67	2.48	33.27	4.17	3.12	911	0.996	1.262
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G2-->G3-->G4	22.58	24.30	7.60	3.29	33.78	5.23	3.22	961	0.612	4.160
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G2-->G4-->G3	23.08	24.71	7.56	3.29	33.78	4.82	2.77	943	0.763	2.116
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G3-->G2-->G4	22.86	25.73	7.56	2.70	33.41	4.57	3.17	925	0.859	0.220
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G3-->G4-->G2	22.80	26.15	7.40	2.33	33.17	4.64	3.50	915	0.911	0.844
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G4-->G3-->G2	22.76	25.05	7.42	2.85	33.50	5.06	3.36	940	0.717	1.871
P1-->O1หรือ O2-->G1-->G5-->G4-->G2-->G3	23.31	26.10	7.38	2.58	33.33	4.37	2.93	906	0.987	1.840

**ตารางที่ ๙.๑** ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G2-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G3-->G4-->G5	19.47	26.61	7.36	0.52	32.02	6.58	7.43	973	1.478	5.449
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G3-->G5-->G4	19.49	26.17	7.28	0.65	32.11	6.84	7.45	982	1.383	6.369
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G4-->G3-->G5	20.09	26.34	7.09	0.68	32.12	6.64	7.04	963	1.334	4.366
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G4-->G5-->G3	20.24	27.58	7.01	0.09	31.75	6.18	7.15	931	1.746	0.869
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G5-->G3-->G4	19.57	27.42	7.31	0.13	31.78	6.28	7.51	952	1.753	3.192
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G1-->G5-->G4-->G3	20.27	27.57	7.03	0.13	31.78	6.13	7.08	931	1.716	0.908
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G1-->G4-->G5	19.31	26.53	7.30	0.42	31.96	6.79	7.68	979	1.557	6.036
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G1-->G5-->G4	19.34	26.39	7.26	0.46	31.98	6.88	7.69	980	1.530	6.186
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G4-->G1-->G5	19.31	26.53	7.30	0.42	31.96	6.79	7.68	979	1.557	6.036
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G4-->G5-->G1	20.72	26.68	6.88	0.62	32.08	6.38	6.64	940	1.357	1.829
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G5-->G1-->G4	19.67	26.36	7.30	0.67	32.12	6.63	7.24	975	1.358	5.587
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G3-->G5-->G4-->G1	20.85	26.44	6.75	0.67	32.12	6.55	6.61	941	1.313	1.969

**ตารางที่ ค.9** ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G2-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G1-->G3-->G5	23.21	22.63	3.66	0.66	32.11	10.37	7.35	939	1.615	1.733
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G1-->G5-->G3	23.44	23.76	3.62	0.21	31.82	9.84	7.30	908	1.844	1.657
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G3-->G1-->G5	20.14	26.10	6.85	0.59	32.07	7.00	7.25	965	1.388	4.585
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G3-->G5-->G1	21.07	25.89	6.37	0.68	32.12	7.09	6.77	945	1.301	2.337
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G5-->G1-->G3	23.05	24.19	3.81	0.00	31.70	9.68	7.56	909	1.971	1.549
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G4-->G5-->G3-->G1	20.16	27.21	6.77	0.00	31.70	6.66	7.50	939	1.811	1.694
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G1-->G3-->G4	19.47	27.56	7.29	0.00	31.70	6.31	7.67	952	1.857	3.100
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G1-->G4-->G3	0.00	40.65	8.05	0.01	36.36	0.00	14.93	1026	9.104	11.144
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G3-->G1-->G4	19.23	27.24	7.25	0.00	31.70	6.63	7.94	964	1.878	4.418
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G3-->G4-->G1	19.90	27.86	7.23	0.00	31.70	6.01	7.30	935	1.834	1.277
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G4-->G1-->G3	23.03	24.21	3.84	0.00	31.70	9.66	7.56	909	1.967	1.537
P1-->O1หรือ O2-->G2-->G5-->G4-->G3-->G1	20.15	27.25	6.80	0.00	31.70	6.62	7.48	938	1.811	1.675

**ตารางที่ ค.10** ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2-->G3-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G2-->G4-->G5	21.27	26.36	7.45	1.57	32.69	5.45	5.21	942	0.922	2.107
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G2-->G5-->G4	21.23	26.21	7.47	1.63	32.73	5.51	5.22	947	0.886	2.577
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G4-->G2-->G5	21.23	26.36	7.43	1.53	32.66	5.50	5.29	943	0.933	2.167
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G4-->G5-->G2	24.41	26.23	7.69	3.32	33.80	3.25	1.29	885	1.449	4.078
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G5-->G2-->G4	24.68	25.80	7.51	3.49	33.90	3.47	1.15	887	1.435	3.876
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G1-->G5-->G4-->G2	24.71	25.90	7.40	3.34	33.81	3.55	1.28	883	1.407	4.340
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G1-->G4-->G5	20.99	26.42	7.39	1.35	32.55	5.68	5.63	946	0.991	2.506
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G1-->G5-->G4	20.92	26.35	7.44	1.39	32.58	5.68	5.63	950	0.967	2.909
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G4-->G1-->G5	21.61	26.10	7.27	1.68	32.75	5.57	5.03	939	0.875	1.735
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G4-->G5-->G1	21.41	26.36	7.39	1.57	32.69	5.45	5.15	939	0.927	1.732
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G5-->G1-->G4	20.76	25.67	7.43	1.63	32.73	6.05	5.72	968	0.823	4.864
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G2-->G5-->G4-->G1	21.50	26.21	7.34	1.63	32.73	5.51	5.08	940	0.895	1.800

ตารางที่ ค.10 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G3-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G1-->G2-->G5	21.23	24.36	7.43	3.53	32.66	5.50	5.29	943	0.434	2.167
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G1-->G5-->G2	24.41	26.23	7.69	3.32	33.80	3.25	1.29	885	1.449	4.079
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G2-->G1-->G5	21.51	26.15	7.28	1.61	32.72	5.60	5.13	940	0.892	1.857
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G2-->G5-->G1	21.38	26.36	7.36	1.53	32.66	5.50	5.21	939	0.937	1.744
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G5-->G1-->G2	23.25	26.82	8.11	2.90	33.53	3.23	2.16	900	1.264	2.445
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G4-->G5-->G2-->G1	22.46	26.23	8.66	3.32	33.80	3.25	2.26	935	1.112	1.315
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G1-->G2-->G4	17.51	23.68	9.79	3.25	33.76	5.90	6.11	889	0.372	3.693
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G1-->G4-->G2	17.59	23.86	9.60	3.02	33.61	6.02	6.30	882	0.415	4.439
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G2-->G1-->G4	17.93	19.33	10.01	5.70	35.31	7.02	4.72	965	0.252	4.564
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G2-->G4-->G1	18.34	22.49	11.39	5.70	35.31	3.85	2.93	908	0.836	1.605
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G4-->G1-->G2	19.25	24.04	10.43	4.50	34.55	3.89	3.35	851	0.642	7.782
P1-->O1หรือ O2-->G3-->G5-->G4-->G2-->G1	17.87	23.09	11.37	5.18	34.98	3.94	3.58	907	0.667	1.787





**ตารางที่ ค.11** ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G4-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G1-->G2-->G5	20.77	26.83	7.88	1.51	32.65	5.05	5.30	947	0.988	2.628
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G1-->G5-->G2	23.91	26.75	8.15	3.28	33.77	2.80	1.35	890	1.512	3.621
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G2-->G1-->G5	21.27	26.46	7.61	1.67	32.75	5.22	5.03	942	0.911	2.067
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G2-->G5-->G1	21.18	26.83	7.68	1.51	32.65	5.05	5.10	936	0.999	1.461
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G5-->G1-->G2	23.12	27.15	8.44	2.98	33.59	2.78	1.94	900	1.387	2.510
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G3-->G5-->G2-->G1	22.22	26.75	9.00	3.28	33.77	2.80	2.19	933	1.233	1.047
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G1-->G2-->G3	21.32	26.52	7.70	1.75	32.80	5.05	4.86	941	0.905	1.929
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G1-->G3-->G2	21.17	26.45	7.70	1.71	32.77	5.18	5.03	945	0.898	2.420
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G2-->G3-->G1	21.26	26.58	7.63	1.62	32.72	5.15	5.03	940	0.938	1.823
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G2-->G1-->G3	16.60	23.78	9.91	2.89	33.52	6.28	7.02	908	0.521	1.675
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G3-->G1-->G2	16.79	24.26	9.87	2.72	33.42	6.02	6.92	894	0.570	3.189
P1-->O1หรือ O2-->G4-->G5-->G3-->G2-->G1	21.35	26.67	7.71	1.70	32.77	4.96	4.84	937	0.941	1.499

ตารางที่ ค.12 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1หรือ O2 -->G5-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G2-->G3-->G4	21.13	26.56	7.46	1.42	32.59	5.45	5.40	941	0.987	1.963
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G2-->G4-->G3	21.25	26.59	7.42	1.42	32.59	5.42	5.32	937	0.994	1.556
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G3-->G2-->G4	21.37	26.11	7.48	1.76	32.81	5.45	5.03	946	0.847	2.512
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G3-->G4-->G2	21.32	26.22	7.49	1.69	32.76	5.42	5.08	945	0.876	2.353
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G4-->G2-->G3	21.22	26.63	7.40	1.36	32.56	5.45	5.39	937	1.014	1.529
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G1-->G4-->G3-->G2	21.47	26.19	7.45	1.73	32.79	5.39	4.97	942	0.868	2.078
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G1-->G3-->G4	21.39	26.29	7.48	1.68	32.76	5.36	5.03	942	0.889	2.022
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G1-->G4-->G3	21.51	26.32	7.44	1.68	32.76	5.33	4.95	938	0.898	1.638
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G3-->G1-->G4	20.85	25.66	7.44	1.68	32.76	5.99	5.62	967	0.806	4.724
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G3-->G4-->G1	21.51	26.26	7.41	1.68	32.76	5.39	4.98	939	0.890	1.751
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G4-->G1-->G3	21.69	26.14	7.26	1.68	32.76	5.51	4.95	936	0.882	1.457
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G2-->G4-->G3-->G1	21.48	26.35	7.47	1.68	32.76	5.30	4.96	939	0.901	1.700

ตารางที่ ค.12 ผลการสร้างแบบจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ไหลลงของซังข้าวโพดโดยใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์โดยลำดับปฏิกิริยา  
เริ่มจาก P1-->O1 หรือ O2-->G5-->X-->X-->X-->X

รูปแบบการจัดลำดับปฏิกิริยา	ร้อยละโดยโมลของผลิตภัณฑ์							Temperature	Error	
	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Cs		RSS	Temperature
ผลการทดลอง	18	16.5	9	4	39.5	8	5	923-1057		
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G1-->G2-->G4	20.65	25.96	7.42	1.43	32.60	6.02	5.91	964	0.918	4.390
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G1-->G4-->G2	20.64	26.02	7.41	1.38	32.57	6.03	5.95	962	0.941	4.250
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G2-->G1-->G4	20.88	25.55	7.45	1.76	32.81	6.01	5.55	968	0.773	4.903
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G2-->G4-->G1	21.63	26.07	7.34	1.76	32.81	5.48	4.92	940	0.853	1.845
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G4-->G1-->G2	21.45	26.15	7.42	1.72	32.78	5.46	5.02	943	0.866	2.149
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G3-->G4-->G2-->G1	21.52	26.21	7.37	1.67	32.75	5.45	5.02	939	0.887	1.782
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G1-->G2-->G3	21.64	26.19	7.32	1.70	32.77	5.45	4.94	937	0.883	1.519
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G1-->G3-->G2	21.59	26.06	7.32	1.74	32.79	5.53	4.97	941	0.854	1.957
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G2-->G1-->G3	21.58	26.26	7.29	1.60	32.71	5.51	5.07	937	0.912	1.466
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G2-->G3-->G1	21.39	26.44	7.47	1.60	32.71	5.32	5.07	938	0.929	1.671
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G3-->G1-->G2	21.42	26.23	7.49	1.73	32.79	5.36	4.98	943	0.872	2.128
P1-->O1หรือ O2-->G5-->G4-->G3-->G2-->G1	21.55	26.23	7.43	1.73	32.79	5.36	4.91	939	0.877	1.757

ภาคผนวก ง รายงานการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

**International Conference on modeling in Chemical and Biological engineering Sciences.**

เรื่อง Mathematical Models of Biomass Gasification Processes with Chemical Equilibria

สถานที่ The Rama Gardens hotel Bangkok, Thailand.

วันที่จัดประชุม October 25-27 2006

A-CBES165 โดยบทความนี้มีใจความดังนี้

### **Mathematical Models of Biomass Gasification**

#### **Processes with Chemical Equilibria**

**Supasak Kaewwichit<sup>1</sup> and Deacha Chatsiriwech<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Process System Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

\*Corresponding author: Tel. 662- 218- 6863, Fax 662- 218- 6877, E-mail: cdeacha@chula.ac.th

#### **ABSTRACT**

A large number of biomass from agricultural wastes has been produced each year. Besides the utilization as fuel for generating heat and electricity, respectively, it can be used as raw materials containing carbon and hydrogen as major elements for manufacturing other chemicals. In common practice, the biomass has to be converted to synthesis gas by air oxidation or steam gasification. In the circumstances, other reactions, such as combustion, pyrolysis, and water - gas shift, might occur simultaneously. Afterwards, the gas can be converted further to hydrocarbons, alcohols, or their derivatives or can be used to synthesize certain plasticizers alcohols or lubricating oil additives Various biomass has been modeled with certain compounds with similar elemental compositions. At the gasification conditions, oxidation, Boudouard reaction, steam gasification, hydrogasification, water-gas shift reaction and methanation have occurred simultaneously. The reactions of simulated biomass have been simulated by chemical equilibria. It has been found that the distribution of both desired and undesired products, corresponding to the experimental results, can be achieved by proper sequential reactions. Consequently, the distribution of all products can be predetermined according to the variation of operating conditions, such as temperature, air or steam to biomass ratio. In addition, process heat integration can be estimated and pre-designed.

*Keyword:* Biomass, Gasification, Agricultural waste, Pyrolysis, Chemical equilibrium, Mathematic model

## Introduction

Modern agriculture is an extremely energy intensive process. However high agricultural productivities and subsequently the growth of green revolution has been made possible only by large amount of energy inputs, especially those from fossil fuels [1]. With recent price rise and scarcity of these fuels there has been a trend towards use of alternative energy sources like solar, wind, and geothermal etc [2]. However these energy resources have not been able to provide an economically viable solution for agricultural applications [3]. One biomass energy based system, which has been proven reliable and had been extensively used for transportation and on farm systems during World War II is wood or biomass gasification [4]. Biomass gasification means incomplete combustion of biomass resulting in production of combustible gases consisting of Carbon monoxide (CO), Hydrogen (H<sub>2</sub>) and traces of Methane (CH<sub>4</sub>). This mixture is called synthesis gas [5]. This gas can be used to run internal combustion engines (both compression and spark ignition), can be used as substitute for furnace oil in direct heat applications and can be used to produce, in an economically viable way, methanol – an extremely attractive chemical which is useful both as fuel for heat engines as well as chemical feedstock for industries [6,7]. Since any biomass material can undergo gasification, this process is much more attractive than ethanol production or biogas where only selected biomass materials can produce the fuel.

The efficient operation for gasification is dependent on a number of complex chemical reactions, including pyrolysis of the biomass, partial oxidation of pyrolysis products, gasification of the resulting char, conversion of tar and lower hydrocarbons, the water-gas shift reaction, and etc [8]. These complicated processes, coupled with the sensitivity of the product distribution to the rate of heating and residence time in the reactor, called for the development of a mathematical model capable of predicting the effects of process variables on the performance and dimensions of the gasifier. As a result, various models with widely differing complexity have been proposed to describe biomass gasification. These models range from complex kinetic models incorporating bed hydrodynamics and particle distributions [9, 10] to simple thermodynamic models based on reaction stoichiometry, chemical equilibrium, and mass and energy balances [11].

Although kinetic models have the capability of predicting both the overall gasifier performance and the behavior inside the gasifier, there are many problems involved in making use of kinetic data. First, the kinetics of biomass pyrolysis is mainly based on measurements of weight loss, which is of no help in estimating product distribution [12]. Second, the experimental conditions under which the kinetic data are obtained are usually different from those expected in any gasifier [13]. Third, the intensive char circulation between the oxidizing and reducing zones present within the gasifier might affect the reactivity of the fuel char surface. Thus, the direct application of the thermogravimetrically obtained kinetic parameters to the analysis of gasification may not always be justified [14].



There is evident reported that at operating temperatures above 600 °C, the gaseous mixtures leaving many types of gasifiers were found to approach equilibrium [15]. Consequently, thermodynamic studies can be used to provide data for designing and assessing the performance of gasifiers.

## 2.1 Selection and characteristic of biomass

Typical biomass is agricultural plants and wood. But also matters such as chicken litter, cow dung, pig manure and organic waste from food processing industries can be considered as biomass fuels. Household waste is also considered as biomass In Europe there is an on-going debate whether peat should be considered as biomass.

Table 1 summarizes the relevant parameters of the some type biomass waste found in Thailand. Representative values serve as input for the system calculations as well as for gas composition calculations and the gasification tests. The composition of the synthesis gas produced by the gasification varies according to the biomass used. The gas compositions are derived from lab-scale experiments and from subsequent separate gasifier model calculations. The results of this exercise are given in Table 2.

**Table 1:** Characteristic of some biomass residue in Thailand ( derived from [www. efe.co.th](http://www.efc.co.th))

Proximate analysis (wt %)	Rice husk	Bagasse	Oil palm residues	wood residues
Moisture	8.2	50.73	58.6	45
Ash	13.2	1.43	2.92	1.59
Volatile Matter	58.9	41.98	30.44	45.7
Fixed Carbon	19.7	5.86	8.04	7.71
Ultimate Analysis (wt %)				
C	39.1	21.33	15.11	25.575
H	4.59	3.06	1.51	3.19
O	34.7	23.29	19.13	24.475
N	0.18	0.12	2.57	0.138
S	0.04	0.03	0.04	0.022
Cl	0.09	n.a.	0.13	0.0055
Ash	13.2	1.43	2.92	1.595
Moisture	8.2	50.73	58.6	45

**Table 2:** Some gas composition data derived from lab-scale Experiments and from subsequent separate gasifier model calculations.

Fuel	Gasification method	Oxidizing agent	volume percentage of exit gas composition					Reference
			CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
Rice husk	Downdraft	Air	14-17	17-19	-	11-14	Diff <sup>a</sup>	16
Bagasse	Fluidize bed	O <sub>2</sub>	36.97	40.69	2.56	19.79	-	17
Sawdust	Fluidize bed	O <sub>2</sub> /steam	25.1	21.2	8.2	12.5	33.7	18
Wood residue	Fluidize bed	steam	22.7	31.5	11-13	27.4	-	19
Wood residue	Fluidize bed	Air	15-17	9-11	5-7	18	Diff <sup>a</sup>	19
Wood residue	Updraft	Air	21.5	16	3.3	14.4	Diff <sup>a</sup>	19
Wood residue	Downdraft	Air	17-22	16-20	1-2	1-2	55-60	19

<sup>a</sup> Dependant on air flow rate

## 2.2 Gasification model

Although various attempts have been made to develop thermodynamic models to predict the performance of biomass gasification systems, calculation of the equilibrium composition encountered in this systems is a difficult and time-consuming task because of the need to simultaneously solve the mass and energy balances as well as the many chemical equations involved in equilibrium calculations through minimization of free energy approach.

In this study, the modelling is done in the Provision Simulation package (ProII) to take advantage of the extensive thermal and property database and built-in convergence algorithms. The ease of application is greatly enhanced, and the computing time is drastically reduced, as compared to prior approaches.

The models developed in this study are based on the use of mass and energy balances and chemical equilibrium relationships to predict the product gas composition from gasification process. In developing the models, it is assumed that the biomass fuel fed into a gasifier undergoes physical and chemical changes (which cannot be entirely dissociated from each other). These are pyrolysis (leading to gas and char formation), the partial combustion of the resulting char with O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and H<sub>2</sub> and reaction between product gas. In the equilibrium calculations, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> were considered as possible products. The reactions considered in the model development are shown in Table 3

**Table 3:** Reaction & Reaction name take place in gasification process

Reaction name	Reaction Chemistry	Type of reaction
Pyrolysis	Biomass model + heat $\rightarrow$ char <sup>a</sup> + volatile compounds <sup>b</sup>	Endothermic
Oxidation	C + 0.5O <sub>2</sub> $\rightarrow$ CO	Exothermic
	C + O <sub>2</sub> $\rightarrow$ CO <sub>2</sub>	Endothermic
	CO + 0.5O <sub>2</sub> $\rightarrow$ CO <sub>2</sub>	Exothermic
	H <sub>2</sub> + 0.5O <sub>2</sub> $\rightarrow$ H <sub>2</sub> O	Exothermic
Boudouard reaction	C + CO <sub>2</sub> = 2CO	Exothermic
Hydrogasification	C + 2H <sub>2</sub> = CH <sub>4</sub>	Endothermic
Steam gasification	C + 2H <sub>2</sub> O = CO + H <sub>2</sub>	Endothermic
Water-gas shift reaction	CO + H <sub>2</sub> O = CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	Endothermic
Methanation	CO + 3H <sub>2</sub> = CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	Exothermic

<sup>a</sup> Char is a unconverted biomass, at gasification condition around 1100 K, slow heating late and long residence time, char is reduced to a carbon atom of biomass [5]

<sup>b</sup> Volatile compounds are H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, and tars

### 2.3 Thermodynamic calculation

Each of the chemical components involved in this study is included in the Provision database. For each component this database contains the following transport and thermodynamic data as a function of temperature [21]: viscosity, diffusivity, thermal conductivity, Gibbs free energy of formation, standard enthalpy of formation, and heat capacity. This information is required to calculate energy balances and to determine equilibrium compositions by minimizing the total Gibbs free energy of the system [22].

#### Material Balance

Using the principle of conservation of mass, the mass balance s can be generally written as follows:

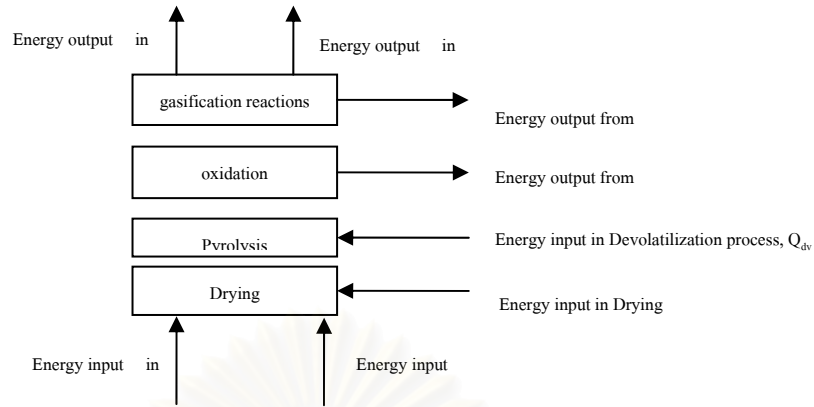
$$\sum_i (y_i a_{ik}) = \frac{A_k}{\sum_i n_i} \quad (1)$$

In addition, one more equation is required. This is provided by Dalton's law, which states that the sum of the mole fractions of all gaseous species that exit the gasifier is unity:

$$\sum_i y_i = 1 \quad (2)$$

#### Energy Balance

The enthalpy exchanged as heat among the different processes taking place in the gasifier and the surroundings is given in Figure 1. The corresponding energy balance equation is given as follows:



**Figure 1.** Entropy exchange in gasification process

$$\Delta H = Q_f(T, P)|_{Biomass} + Q_o(T, P)|_{Oxidant} - Q_s(T, P)|_{Solid} - Q_p(T, P)|_{Productgas} \quad (3)$$

$$+ Q_d(T, P)|_{Drying} + Q_{dv}(T, P)|_{Devolatilization} - Q_c(T, P)|_{Combustion} - Q_g(T, P)|_{Sidereactions}$$

### Calculating Equilibrium Gas Compositions

Consider the Total Gibbs free energy in the gas mixture [23]

$$G_T = nG(T, P, n_i); i = 1, 2, 3, \dots, C \quad (4)$$

or another form is 
$$d(G_T) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{p,n} dT + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T,n} dP + \sum_{i=1}^c \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{T,p,n_j} dn_i \quad (5)$$

From definition of the partial property

$$\bar{M}_i = \left[ \frac{\partial M}{\partial n_i} \right]_{T,p,n_j} \quad (6)$$

Where M is extensive property, therefore the above equation becomes

$$d(G_T) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{p,n} dT + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T,n} dP + \sum_{i=1}^c \bar{G}_i dn_i \quad (7)$$

From Gibbs-Duhem's theorem:

$$\sum \bar{M}_i dn_i = 0 \quad (8)$$

Applying to eq.7 to get

$$d(G_T) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{p,n} dT + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T,n} dP \quad (9)$$

When the system approaches equilibrium, temperature and pressure P are constant so eq.9 becomes

$$(dG_{system})_{T,P} = 0 \quad (10)$$

This equation has a minimum point at  $G_{min}$  and that is

$$nG = \sum(n_i \Delta G_i^0) + (\sum n_i) RT \ln P + RT \sum(n_i \ln y_i) + RT \sum(n_i \ln \hat{\phi}_i) \quad (11)$$

It is the total Gibbs function ( $nG$ ) that is to be minimized with respect to the composition of the individual species at the specified temperature and pressure. This is subject to the restraints imposed by atomic balances

written for a closed system. The standard solution to this type of problem is through the method of Langrangian undetermined multipliers. This requires that the restraints imposed by the atomic balance be incorporated in the expression for  $nG$ . For each element  $k$ , the atomic balance is given as

$$\sum_i (n_i a_{ik}) - A_k = 0 \quad (12)$$

This is multiplied by the Langrangian undetermined multiplier, and the expression is then summed overall  $k$ , giving

$$\sum_k \left[ \lambda_k \left( \sum_i (n_i a_{ik}) - A_k \right) \right] = 0 \quad (13)$$

Adding this equation to the right-hand side of eq. (13) for  $nG$  yields

$$nG = \sum_i (n_i \Delta G_{fi}^0) + (\sum_i n_i) RT \ln P + RT \sum_i \left( n_i \ln \frac{n_i}{\sum_i n_i} \right) + RT \sum_i (n_i \ln \hat{\phi}_i) + \sum_k \left[ \lambda_k \left( \sum_i (n_i a_{ik}) - A_k \right) \right] \quad (14)$$

where  $y_i$  has been replaced by  $\frac{n_i}{\sum_i n_i}$ . Differentiating eq. 14 partially with respect to  $n_i$  to form the derivatives

$$\left[ \frac{\partial (nG)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_j} \text{ and set each derivative equally to zero leads to}$$

$$\Delta G_{fi}^0 + RT (\ln P + \ln y_i + \ln \hat{\phi}_i) + \sum_k [\lambda_k a_{ik}] = 0 \quad (15)$$

For an ideal gas  $\hat{\phi}_i = 0$ . When the gas is nonideal, the Peng-Robinson equation is used to describe the system. The five chemical compounds considered ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ , and  $\text{CH}_4$ ) lead to five equations of the form Eq. (15). These compounds, in turn, are composed of three elements (C,H, and O), which add three further equations of the form Eq. (1). In principle, the composition under equilibrium conditions can be determined by simultaneously solving this set of eight algebraic equations. However, when multiple reaction equilibria and/or phase equilibria are involved, it is easier to solve for the equilibrium composition of the system by using mathematical techniques that minimize the total Gibbs free energy of the system, subject to the constraints of the elemental balances. The equilibrium compositions in this study were calculated using the Gibbs free energy minimization module entitled gibb reactor in the Provision for chemical process flow sheet simulation [24].

### 3. Simulation result

In the case of gasification under adiabatic conditions, the equilibrium product composition predicted by gibbs reactor depends on the flow rates, composition, temperatures of the feed materials (biomass model and air) fed to the gasifier, and the extent to which the carbon oxidized with  $\text{O}_2$  was converted into gaseous products

as well as the sequences of reaction. The latter was used as an adjustable parameter to fit the predicted dry gas compositions to those experimentally obtained shown in Table 2. The components of the gas considered are the combustible gases CO, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub>. The contents of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, and tar are accepted as non-equilibrium products [12], so that, for equilibrium calculations at atmospheric pressure, their presence can be ignored. Exit gas compositions, obtained from any sequencing reactions were computed. And the sequential reaction that minimizes the residual sum of squares (RSS) criterion (based on dry solid-free mole fractions) was identified [25]:

$$RSS = \sum_i^N \left( \frac{C_{ie} - C_{ic}}{C_{ie}} \right)^2 \quad (16)$$

The mean residual sum of squares (MRSS) and the mean error between predicted and experimental product gas compositions were calculated as follows:

$$MRSS = \frac{RSS}{N} \quad (17)$$

$$Mean\ error = \sqrt{MRSS} \quad (18)$$

## 4. Result & Discussion

### 4.1 Biomass model

The Biomass models (dry basis) used in this study are D-glucose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) and Sucrose (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>) due to the two criteria claimed above. The biomass agriculture can be separated into three fractions: extractable, cell wall components, and ash. The major fraction of biomass agriculture is the cell wall part. This part comprises lignin fraction and carbohydrate fraction which is called cellulose minimization module entitled gibb reactor in the Provision for chemical process flow sheet simulation [24].

### 3. Simulation result

In the case of gasification under adiabatic conditions, the equilibrium product composition predicted by gibbs reactor depends on the flow rates, composition, temperatures of the feed materials (biomass model and air) fed to the gasifier, and the extent to which the carbon oxidized with O<sub>2</sub> was converted into gaseous products as well as the sequences of reaction. The latter was used as an adjustable parameter to fit the predicted dry gas compositions to those experimentally obtained shown in Table 2. The components of the gas considered are the combustible gases CO, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub>. The contents of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, and tar are accepted as non-equilibrium products [12], so that, for equilibrium calculations at atmospheric pressure, their presence can be ignored. Exit gas compositions, obtained from any sequencing reactions were computed. And the sequential reaction that minimizes the residual sum of squares (RSS) criterion (based on dry solid-free mole fractions) was identified [25]:

$$RSS = \sum_i^N \left( \frac{C_{ie} - C_{ic}}{C_{ie}} \right)^2 \quad (16)$$



The mean residual sum of squares (MRSS) and the mean error between predicted and experimental product gas compositions were calculated as follows:

$$MRSS = \frac{RSS}{N} \quad (17)$$

$$Mean\ error = \sqrt{MRSS} \quad (18)$$

## 4. Result & Discussion

### 4.1 Biomass model

The Biomass models (dry basis) used in this study are D-glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ) and Sucrose ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) due to the two criteria claimed above. The biomass agriculture can be separated into three fractions: extractable, cell wall components, and ash. The major fraction of biomass agriculture is the cell wall part. This part comprises lignin fraction and carbohydrate fraction which is called cellulose energy for undergoing reaction and then they can early occur. Besides, these reactions provide energy for other reactions that are endothermic reaction such as steam gasification and hydrogasification that can occur later.

It is quite reasonable for using sequential reaction as an adjust parameter to fit the predicted dry gas compositions to those experimentally obtained because of the fact that the sequence of reaction is varying in each of mode of operate for gasifier [27]. For example same biomass residue which is fed into gasifier differing mode of operate has different exit gas so this case will has the different sequence of reaction

## 5. Conclusions

The mathematical model based on a thermodynamic approach was developed for biomass gasification process using the Provision process simulator. The resulting models are capable of predicting the reactor temperature, gas composition, and overall carbon conversion under various operating conditions without dealing with complex reaction kinetics. The thermodynamic approach provides all of the relevant information on the gasification process and products with reasonable precision and computational effort. The sensitivity analyses and verification of the models can be further study. The models could be used to predict the performance of the gasifier when operating on other biomass materials by use other biomass model.

### Nomenclature

- $a_{ik}$  number of atoms of the  $k^{\text{th}}$  element present in each molecule of the chemical species  $i$
- $A_k$  total number of atomic weights of the  $k^{\text{th}}$  element present in the  $k$  system, as determined by its initial constituents.
- $C_{ic}$  concentration of component  $i$  obtained from experiment
- $C_{ie}$  predicted concentration of component  $i$  obtained though simulator program
- $k=1-3$  represents the three equations for carbon, hydrogen, and oxygen atomic balance
- $n$  number of gaseous components
- $n_i$  number of moles of  $i^{\text{th}}$  species in the system

N	number of data points
P	pressure of the system (atm)
R	gas constant (kJ / (mol K))
T	temperature of the process (K)
$y_i$	number of moles of the species produced
$\Delta G_{fi}^0$	standard Gibbs free energy of formation of compound i from its constituent elements at temperature T (kJ / kmol)
$\lambda_k$	Langrangian multiplier corresponding to the $k^{\text{th}}$ atomic balance constraints
$\hat{\phi}_i$	fugacity coefficient

### Reference

- [1] Leach, G., Energy and Food Production. International Institute of Environment and Development, London, 1976.
- [2] Nicolus P. cheremisoff, Paul N. cheremisinoff, Fred Ellerbusch; Biomass Applications Technology and Production, chapter 2.
- [3] Dutta R., and Dutt, G. S., Producer Gas Engines in villages of loss developed countries, Science, 213, 731, 1981.
- [4] Solar Energy Research Institute (SERI), Generator Gas – The Swedish Experience from 1939-1945, SERI, Golden, Colorado, 1979, Chap 1.
- [5] Solar Energy Research Institute (SERI), A Survey of biomass gasification Volume II – Principle of gasification, SERI, Golden, Colorado, 1979, Chap 1.
- [6] Nicolus P. cheremisoff, Paul N. cheremisinoff, Fred Ellerbusch; Biomass Applications Technology and Production, chapter 2.
- [7] Samir S. Sofer and Oskar R. Zaborsky, Biomass Conversion process for Energy and Fuel, Chapter 6, Fred Shafizadeh, Basis Principles of Direct Combustion.
- [8] Solar Energy Research Institute (SERI), A Survey of biomass gasification Volume II – Principle of gasification, SERI, Golden, Colorado, 1979, Chap 5.
- [10] Wang, W., and C. M. Konishita. 1993. Kinetic model of biomass gasification. *Solar Energy* 51(1):19- 25.
- [9] Tiejun Wang, Jie Chang, Xiaoqin Cui, Qi Zhang, Yan Fu Fuel Processing Technology 87 (2006) 421 – 428
- [11] Solar Energy Research Institute (SERI), Generator Gas – The Swedish Experience from 1939-1945. SERI, Golden, Colorado, 1979, Chap. 2.
- [12] Solar Energy Research Institute (SERI), A Survey of biomass gasification Volume II – Principle of gasification, SERI, Golden, Colorado, 1979, Chap 6.
- [13] Solar Energy Research Institute (SERI), A Survey of biomass gasification Volume II – Principle of gasification, SERI, Golden, Colorado, 1979, Chap 7.
- [14] Cozzani, V., A. Lucchesi, G. Stoppato, and G. Maschio. 1977. A new method to determine the composition of biomass by thermogravimetric analysis. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 75(1):127] 133.

- [15] Chern, S. M., and W. P. Walawender. 1989. Analytical calculation of equilibrium gas composition in a C-H-O-inert system. *Journal of the American Institute of Chemical Engineers* 35(4):673] 675.
- [16] Hoglund, C., *Agricultural Residues as Fuel for Producer Gas Generation*, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, 1981.
- [17] Mohammad Asadullah, Tomohisa Miyazawa, Shin-ichi Ito, Kimio Kunimori, Muneoyoshi Yamada, Keiichi Tomishige, *Applied Catalysis A: General* 267 (2004) 95–102
- [18] Gururajan, V. S., P. K. Agarwal, and J. B. Agnew. 1992. Mathematical modeling of fluidized bed coal gasifiers. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 70 (1):211- 237.
- [19] Richard L. Bain January : *National Renewable Energy Laboratory*, the U.S. Department of Energy by Midwest Research Institute.
- [20] Filomena Pinto\*, Carlos Franco, Rui Neto Andre', C. Tavares, M. Dias, I. Gulyurtlu, I. Cabrita *Fuel* 82 (2003) 1967–1976
- [21] Lin, K. H., H. C. van Ness, and M. M. Abbott. 1984. Reaction kinetics, reactor design and thermodynamics. In *Chemical engineers' handbook*, R. H. Perry and D.W. Green (eds.). New York: McGraw-Hill.
- [22] J.M Smith, H.C. Van Ness, M.M. Abbott, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*.
- [23] Jain Wisniak, *Thermodynamic of solution*, Ben-gurion university of the NEGEV, BEER-SHEVA, Israel.
- [24] Simulation Sciences Inc., *Pro II keyword input manual* October 1992 version 3.3
- [25] *Static book*
- [26] *Encyclopedia of Chemical Technology*. Kirk, R.E. and Othmer, O.F. , editors. 1963
- [27] *Solar Energy Research Institute (SERI), A Survey of biomass gasification Volume III – Current Technology and research*, SERI, Golden, Colorado, 1979, Chap 8.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศุภศักดิ์ แก้ววิชิต เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย