


แกซีพีเคชั่นของไม้ยูคาลิปตัสบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/ไดโลไมต์



นายอนรรตน์ เกตุคง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6792-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GASIFICATION OF EUCALYPTUS WOOD BY  
NICKEL/DOLOMITE CATALYST



Mr. Anawat Ketcong

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6792-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์      แกซีพีเคชั่นของไม้ยูคาลิปตัสบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/ไดโลไมต์  
โดย                              นายอนวรรตน์ เกตุคง  
สาขาวิชา                      เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขญา นิติวัดมานนท์)

สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนวรรตน์ เกตุคง : แกซีฟิเคชันของไม้ยูคาลิปตัสบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์.  
(GASIFICATION OF EUCALYPTUS WOOD BY NICKEL/DOLOMITE  
CATALYST) อ. ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ , 91 หน้า.  
ISBN 974-17-6792-7

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลคือไม้ยูคาลิปตัส เพื่อเป็น  
สารตั้งต้นในการผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือผลิตภัณฑ์แก๊ส ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยศึกษา  
หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนโดโลไมต์เพื่อช่วยการ  
แตกตัวน้ำมันทาร์และรีฟอร์มมีเทน โดยจะศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส อัตรา  
การป้อนไอน้ำและต่อชีวมวล 0.01-0.07 กรัม/นาที่/กรัมของชีวมวล, เปอร์เซนต์ของนิกเกิลบนโดโล  
ไมต์ , ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล โดยปริมาณไม้ยูคาลิปตัสที่ป้อนคือ 15 กรัม

จากการวิจัย พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/  
โดโลไมต์ คือที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล 0.01กรัม/นาที่ต่อชีวมวล, อุณหภูมิ 700 องศา  
เซลเซียส, ร้อยละของนิกเกิล/โดโลไมต์ คือ 9.32 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม โดยแก๊สผลิตภัณฑ์  
มีองค์ประกอบ เมื่อทำการแกซีฟิเคชันเปรียบเทียบระหว่างไม้ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโล  
ไมต์ พบว่า หลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์พบองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มี  
ค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.75 เป็น ร้อยละ 56.45และไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 41.23 เป็น  
ร้อยละ 45.26 อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่า 0.58

ภาควิชา เคมีเทคนิค .....ลายมือชื่อ.....  
สาขาวิชา เคมีเทคนิค .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา 2547

# # 4572323123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: GASIFICATION, EUCALYPTUS, SYNTHESIS GAS, NICKEL/DOLOMITE

ANAWAT KETCONG: GASIFICATION OF EUCALYPTUS WOOD BY

NICKEL/DOLOMITE CATALYST. THESIS ADVISOR

ASSOCIATE.PROF.Dr.THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.91pp.ISBN 974-17-6792-7.

The purpose of this study is to characterize the influence of operating parameters. These are steam/biomass ratio, temperature of the reactor, composition of catalysts, weight of catalysts, on the catalytic gasification of a eucalyptus biomass into CO and H<sub>2</sub> in presence of steam. Steam gasification studies were carried out in an atmospheric fixed bed. The gasifier was operated over a temperature in the range of 500 - 800 °C whilst, varying a catalyst composition from 0 to 10% of nickel loading on dolomite in steam flow rate of 0.01-0.07 g/min/g of biomass and 0 to 1.5g of nickel/dolomite weight.

The results obtained showed that the optimum condition is at temperature 700 °C, percentage of nickel loading on dolomite 9.32% and a steam flow rate of 0.01 g/min/g of biomass. At this condition, comparing the gasification with and without catalyst, it was found that the percentage of hydrogen increased from 41.23 % to 45.26 % and carbon monoxide increase from 42.75 % to 56.45% . In addition, the proportion of hydrogen and carbon monoxide is 0.58.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology      Student's signature.....

Field of study Chemical Technology      Advisor's signature.....

Academic year 2004

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐราพงษ์ วิทิตตานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา คุณป้า และน้องๆ ที่ให้กำลังใจ, ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่สอนตั้งแต่ประถมศึกษา มัธยมศึกษา อุดมศึกษา ทุกท่านที่ให้ความรู้และสั่งสอนจนเป็น อนุวรรตน์ เกตุคง ในวันนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ศรีสมัย, อาจารย์ปรมาภรณ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและอาชีพครูแก่ลูกศิษย์คนนี้

ขอขอบคุณคุณจ้ำลักษณ์ ศรีนาคเรือง ที่ให้คำแนะนำและอธิบายในเชิงทฤษฎีแกซีพีเคชั่น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคน สำหรับมิตรภาพและกำลังใจที่ดีและคอยช่วยเหลือในเรื่องการเรียนตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                           | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                        | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                           | ฉ    |
| สารบัญ.....                                    | ช    |
| สารบัญตาราง.....                               | ญ    |
| สารบัญภาพ.....                                 | ฎ    |
| บทที่  |      |
| 1 บทนำ.....                                    | 1    |
| 2 วารสารปริทัศน์.....                          | 4    |
| 2.1 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) .....         | 4    |
| 2.1.1 วิวัฒนาการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน..... | 4    |
| 2.1.2 แก๊สซิฟิเคชัน.....                       | 6    |
| 2.1.3 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....     | 12   |
| 2.2 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....   | 18   |
| 2.2.1 ถ่านหิน .....                            | 18   |
| 2.2.2 ชีวมวล.....                              | 19   |
| 2.3 ยูคาลิปตัส.....                            | 21   |
| 2.3.1 ลักษณะทั่วไปของยูคาลิปตัส .....          | 21   |
| 2.3.2 ประโยชน์ของไม้ยูคาลิปตัส.....            | 22   |
| 2.4 แก๊สสังเคราะห์.....                        | 23   |
| 2.4.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์.....         | 24   |
| 2.4.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์.....    | 25   |
| 2.5 ทาร์.....                                  | 29   |
| 2.5.1 คำจำกัดความของทาร์.....                  | 29   |
| 2.5.2 สมบัติทางเคมีของทาร์.....                | 29   |
| 2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี.....                  | 30   |
| 2.6.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา.....              | 31   |
| 2.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ.....      | 32   |

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.7 โดโลไมต์.....  | 34   |
| 2.7.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโดโลไมต์.....                                      | 34   |
| 2.7.2 สมบัติของแร่โดโลไมต์.....  | 35   |
| 2.7.3 การกำเนิดของแร่โดโลไมต์.....   | 35   |
| 2.7.4 องค์ประกอบที่ควบคุมหรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับการ<br>ทำให้เกิดโดโลไมต์.....  | 36   |
| 2.7.5 สมบัติทางกายภาพของโดโลไมต์.....  | 36   |
| 2.7.6 สมบัติทางเคมีของโดโลไมต์.....  | 36   |
| 2.8 แก๊สโครมาโทกราฟี.....  | 37   |
| 2.8.1 แก๊ส-ของแข็งโครมาโทกราฟี.....  | 37   |
| 2.8.2 แก๊ส-ของเหลวโครมาโทกราฟี.....  | 37   |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 39   |
| 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....  | 42   |
| 3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....   | 42   |
| 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....  | 50   |
| 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....   | 51   |
| 3.5 วิธีการทดลอง.....  | 51   |
| 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....  | 54   |
| 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส.....                                     | 54   |
| 4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์.....    | 55   |
| 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....                            | 59   |
| 4.4 ผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....                     | 63   |
| 4.5 ผลของร้อยละของนิกเกิล/โดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....           | 66   |
| 4.6 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์.....                        | 68   |
| 4.7 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อ<br>คาร์บอนมอนอกไซด์..... | 70   |
| 4.8 ผลของปริมาณน้ำมันทาร์หลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์.....         | 71   |
| 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....  | 73   |



|   | หน้า |
|---|------|
| รายการอ้างอิง.....  | 75   |
| ภาคผนวก.....  | 77   |
| ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เชื้อเพลิงไหม้..... | 79   |
| ภาคผนวก ข แก๊สโครมาโทกราฟี.....                             | 83   |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง.....                               | 85   |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....                             | 90   |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

| ตาราง   | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ปฏิกริยาการเผาไหม้พื้นฐาน.....  | 9    |
| 2.2 แสดง Major Independent & Dependent Gasifier Characteristics.....  | 12   |
| 2.3 แสดงลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers โดยใช้ Bituminous coals มีการป้อนไอน้ำและออกซิเจน หรืออากาศ.....   | 15   |
| 2.4 แสดงชนิดขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของ bituminous coals ใน moving bed gasifier กับไอน้ำและออกซิเจนหรืออากาศ.....                         | 16   |
| 2.5 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล.....   | 22   |
| 2.6 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ.....  | 24   |
| 2.7 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่างๆ.....  | 26   |
| 2.8 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars.....  | 28   |
| 3.1 รายการทดลองและวิธีวิเคราะห์.....  | 54   |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ.....   | 56   |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบแยกธาตุ.....  | 57   |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของนิกเกิลที่ได้จากการฝังตัว(Impregnation).....  | 58   |
| 4.4 ผลการวิเคราะห์ BET ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer .....  | 60   |
| 4.5 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างๆ ที่อัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวล 0.01 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวลระหว่างก่อนและหลังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 73   |
| 4.6 เปรียบเทียบทาร์ก่อนใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและหลังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวลอุณหภูมิ 650-750 องศาเซลเซียส.....  | 74   |
| 4.7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ.....   | 75   |
| ข1 แสดงภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส.....  | 86   |
| ค1 วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น.....   | 88   |
| ค2 วิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย.....   | 88   |
| ค3 วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า.....   | 89   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

| บทที่  | หน้า |
|--|------|
| ค4 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ อัตราการป้อนน้ำที่ 0.01กรัม/ นาที/กรัมของชีวมวลร้อยละ 9.32ของนิกเกิล/โดโลไมต์.....  | 89   |
| ค5 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของเปอร์เซ็นต์นิกเกิล/โดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนน้ำที่ 0.01กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล.....                    | 90   |
| ค6 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนน้ำที่ 0.01กรัม/ นาที/กรัมของชีวมวลร้อยละ 9.32ของนิกเกิล/โดโลไมต์..... | 90   |
| ค7 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยากับเวลาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนน้ำที่ 0.01กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล 9.32%นิกเกิล/โดโลไมต์.....                               | 90   |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่รวมการไฟโรไลซีในขั้นต้น<br>และการปรับปรุงคุณภาพแก๊สในขั้นถัดไป .....  | 7    |
| 2.2 moving bed gasifier .....  | 8    |
| 2.3 แสดงตัวอย่างของ Lurgi Dry Ash Gasifier .....   | 17   |
| 2.4 การเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล.....   | 22   |
| 2.5 ผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ.....   | 27   |
| 2.6 แผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับ<br>ปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....  | 32   |
| 2.7 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธุ์มาเกี่ยวข้อง.....  | 33   |
| 3.1 แผนผังกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยรวม.....  | 45   |
| 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบเบดนิ่ง.....  | 46   |
| 3.3 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง .....  | 47   |
| 3.4 เครื่องบันทึกผลอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ .....   | 48   |
| 3.5 เครื่องผลิตไอน้ำ.....  | 48   |
| 3.6 เครื่องสูบน้ำ.....   | 49   |
| 3.7 เครื่องแยกไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้.....  | 49   |
| 3.8 เครื่องควบแน่นของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์แก๊ส.....  | 50   |
| 3.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....   | 51   |
| 4.1 การวิเคราะห์หาค่าประกอบของร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โคโลไมต์<br>หลังจากทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....  | 58   |
| 4.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูการกระจายของนิกเกิลของ ร้อยละ4.43<br>ของนิกเกิล/โคโลไมต์, ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล/โคโลไมต์, ร้อยละ 9.32 ของ<br>นิกเกิล/โคโลไมต์ และ ร้อยละ13.71 ของนิกเกิล/โคโลไมต์หลังจากทำการฝังตัว<br>(Impregnation)..... | 59   |
| 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/<br>นาที/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม).....  | 61   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ฐ

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัสสำหรับร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ โดโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม).....  | 63   |
| 4.5 เปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสอัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัสสำหรับ ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ โดโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการป้อน ยูคาลิปตัส 15 กรัม).....                              | 64   |
| 4.6 ผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม).....   | 65   |
| 4.7 ผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการ ป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม).....   | 66   |
| 4.8 เปรียบเทียบผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตรา การป้อนน้ำ 0.01-0.07กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม) ระหว่างกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 67   |
| 4.9 ผลของร้อยละของนิกเกิล/โดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/ กรัมของไม้ยูคาลิปตัส (ปริมาณการป้อน ยูคาลิปตัส 15 กรัม) อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....  | 69   |
| 4.10 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์กับ ไฮโดรคาร์บอน.....   | 70   |
| 4.11 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของซีวมวล, ร้อยละ 9.32ของนิกเกิล/โดโลไมต์.....  | 71   |
| 4.12 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ต่อแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของซีวมวล, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์.....  | 71   |

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอน<br>มอนอกไซด์ที่อัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวลต่างๆ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส<br>(ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)..... | 72   |
| 4.14 การเปรียบเทียบน้ำมันทาร์ก่อนใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาและหลังใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา.....   | 74   |
| ข1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD.....   | 86   |
| ข2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID.....   | 87   |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้เชื้อเพลิงในอัตราที่สูงขึ้นเนื่องจากสภาพเศรษฐกิจและสังคมความเจริญก้าวหน้ามากขึ้นส่งผลให้ราคาน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้มากขึ้นจากการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ประเทศไทยยังเป็นประเทศที่ต้องพึ่งพาน้ำมันจากต่างประเทศเป็นหลักส่งผลให้ราคาน้ำมันปรับตัวสูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาหาแหล่งพลังงานรูปอื่นมาใช้ทดแทน แหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจมากที่สุด คือ แหล่งพลังงานภายในประเทศในลักษณะของพลังงานคืนรูป (Renewable Source) แหล่งพลังงานคืนรูปที่สำคัญก็คือ แหล่งพลังงานจากชีวมวล(Biomass) โดยที่ส่วนใหญ่ จะอยู่ในรูปของแข็ง ไม่สะดวกในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาในการนำมาใช้งานจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้สะดวกขึ้น

แกซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสภาพแก๊สเชื้อเพลิง และมีการนำมาใช้ในการผลิตแก๊สได้ในระดับหนึ่ง มีกลไกการทำงานไม่ยุ่งยาก โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัดภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิในช่วงประมาณ 700-1,200 องศาเซลเซียส แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้ โดยหากเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (เครื่องเบนซิน) สามารถที่จะใช้แก๊สดังกล่าวเป็นเชื้อเพลิงโดยไม่ต้องผสมกับเชื้อเพลิงอื่น

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแกซิฟิเคชัน ถ้านำมาผลิตให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้ก็จะนำไปผลิตพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้าได้เป็นปริมาณมากเนื่องจากประเทศของเราส่วนใหญ่มีแต่เครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังนั้นเครื่องยนต์ที่มีอยู่แล้วอาจใช้ได้เลยโดยสร้างเพียงระบบผลิตแก๊สเท่านั้น แก๊สชีวมวลสามารถที่จะนำไปใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์จากน้ำมัน ในโครงการต่างๆทางการเกษตรและอุตสาหกรรมได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องวัตถุดิบในการผลิตแก๊สเลย



ประเทศไทยนับว่าเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรมมีความอุดมสมบูรณ์สูง จึงไม่แปลกเลยที่ประเทศไทยจะมีชีวมวลอยู่มาก ซึ่งสามารถนำมาเปลี่ยนให้เป็นโปรตีนเคอร์แกสได้ เช่น ไม้ยูคาลิปตัส มีการปลูกมากแต่การนำไปใช้ประโยชน์นั้นยังมีไม่มาก โดยเนื้อไม้ลำต้นจะถูกนำไปทำเยื่อกระดาษ ส่วนเศษของลำต้นประมาณ 30% จะถูกเผาเป็นถ่าน หรือ เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงได้มีการถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มประโยชน์จากไม้ยูคาลิปตัส และเป็นการเอื้อประโยชน์แก่เกษตรกรที่จะปลูกต้นยูคาลิปตัส ซึ่งปัจจุบันกำลังประสบปัญหาราคาคากต่ำ เนื่องจากปริมาณการปลูกมากเกินไปจนก่อให้เกิดงานที่ผลิตเยื่อในปัจจุบัน และข้อสำคัญเป็นการใช้วัสดุที่เหลือทิ้งที่มีเป็นจำนวนมากมาผลิตซึ่งจะเป็นการใช้วัสดุที่เหลือทิ้งที่มีเป็นจำนวนมากมาผลิตซึ่งจะเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีคุณค่าและเป็นประโยชน์แก่สังคมไทยในอนาคต

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากสารชีวมวล คือ ไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ ภายใต้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed Bed เพื่อดูผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นและศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์หลังจากที่เพิ่มร้อยละของนิกเกิล

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์และศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์หลังจากที่เพิ่มเปอร์เซ็นต์นิกเกิล

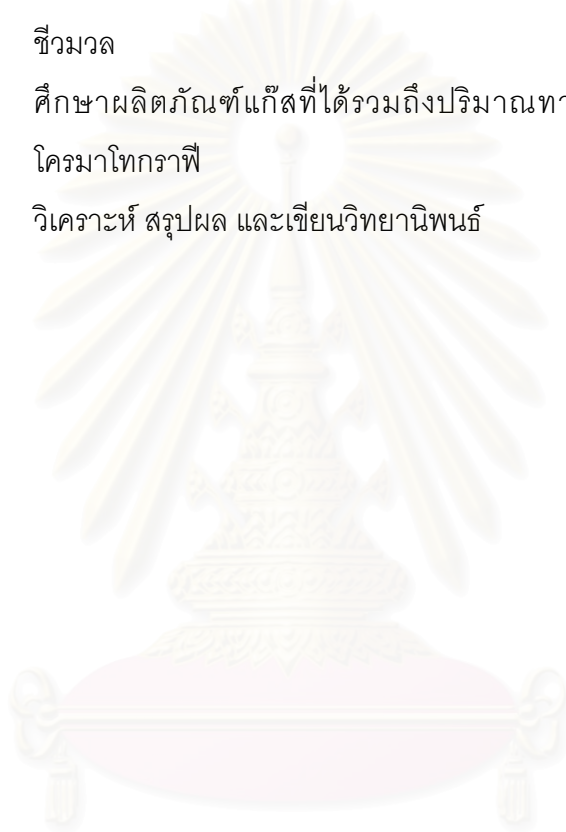
## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้แก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต
- 1.3.2 เพิ่มคุณค่าไม้ยูคาลิปตัสและเป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้ประโยชน์ไม้ยูคาลิปตัส
- 1.3.3 ปริมาณแก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์และสามารถกำจัดน้ำมันนํ้าได้เกือบ 100%



## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้ารวบรวมทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำแกซีฟิเคชัน
- 1.4.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคบอลต์โดยวิธีฝังตัว (Impregnation)
- 1.4.3 หาภาวะที่เหมาะสมของการทำแกซีฟิเคชันโดยมีตัวแปรคือ อุณหภูมิ (500-800<sup>0</sup>C) เวลาของการทำปฏิกิริยา ปริมาณไอน้ำต่อสารชีวมวล ร้อยละของนิกเกิลที่ทำการฝังตัวบนโคบอลต์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารชีวมวล
- 1.4.4 ศึกษาผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้รวมถึงปริมาณคาร์บอนที่ได้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
- 1.4.5 วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

### 2.1 แก๊สซิฟิเคชัน(Gasification)<sup>[1,2,3,5,9,12,13,14.]</sup>

#### 2.1.1 วิวัฒนาการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การค้นพบแก๊สชีวมวลเริ่มมีบันทึกไว้เมื่อ Clayton (พ.ศ. 2242)<sup>[1]</sup> ทดลองกลั่นสลายถ่านหินแล้วพบว่าแก๊สที่ปล่อยออกจากเตาผลิตแก๊สสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ต่อมา Garder และBarker (พ.ศ.2334) ค้นพบว่าแก๊สร้อนที่ปล่อยออกจากปล่องควันของหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้สำหรับหม้อไอน้ำได้อีกครั้งหนึ่งในระยะแรกนั้นประมาณปี พ.ศ. 2343 มีการนำเอาแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเชื้อเพลิงแข็ง ต่อมาจึงมีการใช้แก๊สซิฟิเคชันจากวัตถุดิบอย่างอื่นจำพวกชีวมวลมาใช้งาน เช่นไม้ Labon (พ.ศ. 2341), ถ่านไม้ Lampadius (พ.ศ. 2344) เป็นต้น กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงก็คือ การไพโรไลซิส (Pyrolysis) เชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ในระหว่างปี พ.ศ. 2358-2382 เป็นช่วงที่พัฒนาเกี่ยวกับแก๊สซิฟิเคชันเน้นไปที่การออกแบบเตาปฏิกรณ์ เช่น J.Taylor (พ.ศ. 2358) และ Bischof (พ.ศ. 2383) เป็นต้น เตาผลิตแก๊สในระยะนี้เป็นแบบใช้อากาศ (Air Blown Type) โดยการใส่ถ่านโค้ก ถ่านหิน หรือถ่านไม้ ลงไปในท่อทรงกระบอกเหนือแผ่นรองรับที่มีรูพรุน (Perforated Grate) และเป่าอากาศเข้าไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกนั้นจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทนอีกเล็กน้อย เครื่องมือนี้มีปัญหาสำคัญในการใช้งานคือน้ำมันทาร์ (Tar) จำนวนมากปะปนอยู่กับแก๊สผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่สามารถนำแก๊สผลิตภัณฑ์ไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ จึงมีการพัฒนารูปแบบเตาผลิตแก๊สเป็น Down-Draught กล่าวคือ การดึงแก๊สผลิตภัณฑ์ออกทางด้านล่างของเตา โดยผ่านเบดของคาร์บอน(Bed of Carbon) หรือ ถ่านที่เป็นเชื้อเพลิงเพื่อกำจัดน้ำมันทาร์ ทำให้แก๊สที่ได้สะอาดขึ้น

ในช่วงปี พ.ศ. 2423-2463 ที่ประเทศเยอรมนีมีการปรับปรุงเครื่องมือให้สามารถใช้งานกับถ่านหินเกรดต่ำได้โดยการออกแบบเตาผลิตแก๊สที่พิจารณาถึงการนำเอาแก๊สออก ด้วยการพัฒนาครั้งนี้ทำให้เกิดรูปแบบเตาที่มีชื่อเสียงคือ Rotating Grid type ออกแบบโดย Kerpely ในปี พ.ศ. 2477

ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เกิดการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงทำให้มีการค้นคว้ารูปแบบของเตาผลิตแก๊สให้ดีขึ้น ในช่วงนั้นแก๊สเชื้อเพลิงถูกนำไปใช้แทนที่น้ำมันในรถยนต์ รถบรรทุก รถแทรกเตอร์ เรือยนต์ รถมอเตอร์ไซด์ และเครื่องสับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า เตาผลิตแก๊ส

ได้รับการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์ Otto โดยมาผลิตแก๊สที่นำไปใช้กับเครื่องยนต์มีขนาดเล็กและส่วนใหญ่จะใช้ Fisher Tropsch Process เป็นขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหิน

หลังสงครามโลก ในช่วงปี พ.ศ. 2493-2503 ผลิตภัณฑ์ทางด้านปิโตรเลียมหลายชนิดที่ขึ้นอีกทั้งมีราคาถูกการใช้งานก็สะดวกเป็นเหตุให้การใช้แก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแกซิฟิเคชันลดลงจนแทบจะหมดไป ที่ยังเหลือใช้อยู่ก็ไม่มีการพัฒนากระบวนการให้ดีขึ้นแต่อย่างใด

Tao Von Fredersdoff (พ.ศ. 2498)<sup>[1]</sup> ได้ศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการผลิตแก๊สชีวมวลจากถ่านหิน ต่อมา May et al. ได้ศึกษาการศึกษาการเกิดแก๊สชีวมวลจากการที่เผาถ่านโค้กในเตาผลิตแก๊สทั้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด และแบบเบดนิ่ง ในปี พ.ศ.2504 Squires นำผลการศึกษาของ May และคณะ มาศึกษาเพิ่มเติมแล้วสรุปว่า ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดอยู่หนึ่งคาร์บอนจะว่องไวต่อปฏิกิริยาเฉพาะตรงบริเวณทางเข้าของไอน้ำร้อน แต่ในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์เบดคาร์บอนจะว่องไวต่อปฏิกิริยาเหมือนกันตลอดเตา ปี พ.ศ. 2516-2517 เกิดวิกฤติการณ์การขาดแคลนน้ำมันอีก เนื่องจากการไม่ส่งออกน้ำมันของกลุ่มประเทศผู้ผลิต ประเทศที่พัฒนาแล้ว และกำลังพัฒนา จึงเริ่มหันมาฟื้นฟูกระบวนการแกซิฟิเคชัน สำหรับประเทศที่พัฒนาแล้ววัตถุประสงค์หลัก คือการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ใช้ ออกซิเจนหรืออากาศเท่านั้น เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขนส่งและเครื่องทำความร้อน จึงเป็นเหตุให้ความสนใจทั้งหมดมุ่งไปสู่ Air Blown Gasifier ที่มีขนาดเล็ก โดย Johnson (พ.ศ. 2517) ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดแก๊สชีวมวลในอุดมคติ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- ก. การระเหยของสารระเหยได้
- ข. ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สมีเทนอย่างรวดเร็ว
- ค. ปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันอย่างช้าๆ

Jensen (พ.ศ. 2518)<sup>[1]</sup> ศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของถ่านหินด้วยไอน้ำเครื่องกำเนิดแก๊สแบบฟลูอิดไธซ์เบดที่อุณหภูมิ 1,000-1,300 องศาเซลเซียส โดยพบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินกับไอน้ำในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่ง ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลมากต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

Georgakis และคณะ (พ.ศ. 2522)<sup>[1]</sup> ได้ศึกษาและเสนอกลไกของการเกิดการเผาไหม้ของถ่านโดยอาศัยทฤษฎีฟิล์มชั้นเดียวและฟิล์มสองชั้น ในปี พ.ศ. 2524 Kasaoka ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดแก๊สสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดแก๊สสังเคราะห์เกิดเร็วขึ้น และในปีเดียวกัน Purdy ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินและแก๊สผสมของไอน้ำ และออกซิเจนในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดเบด โดยการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ และอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน เป็นฟังก์ชันต่ออัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ถ้าเพิ่มอัตราดังกล่าวจะทำให้อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลเพิ่มขึ้น

Anuradha Genesh และคณะ (พ.ศ.2534) เกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของแคลบ ในการเกิดไพโรไลซิส และแกซิฟิเคชันโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Paul T. Williams and Serpil Besler (พ.ศ. 2534) ได้ทำการศึกษาโดยใช้เครื่องมือ Thermogravimetry Analysis (TGA)

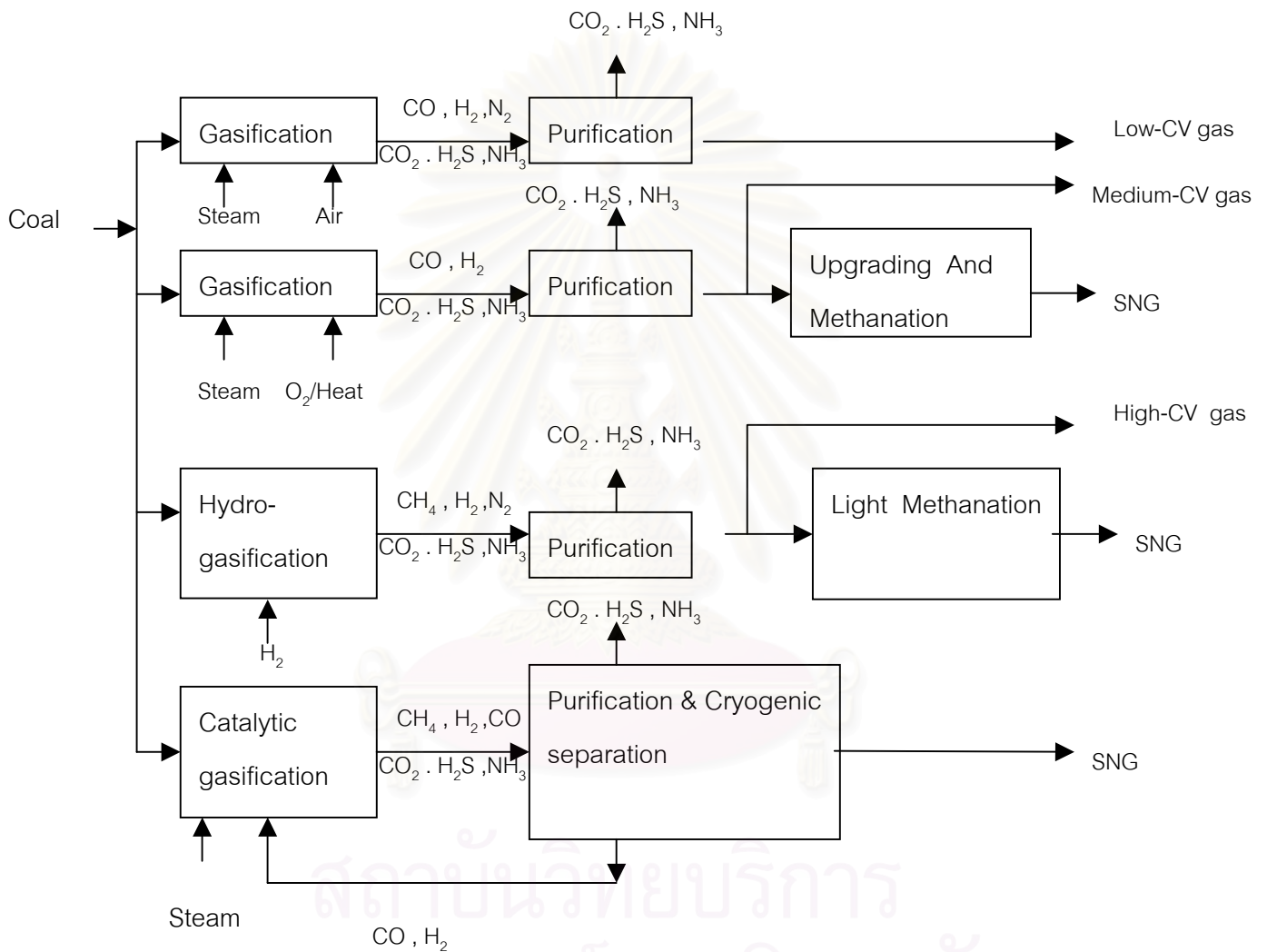
เมื่อศึกษาข้อมูลจากสิทธิบัตรของประเทศสหรัฐอเมริกา จะพบว่าสิ่งประดิษฐ์เตา Gasifier และระบบต่างๆของแกซิฟิเคชัน โดยสามารถหารายการอ้างอิงได้ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ (US PATENT, 1932, 1950, 1973, 1976, 1978)

สำหรับประเทศไทยแม้ว่าความรู้ทางด้านแก๊สชีวมวลยังมีเหลืออยู่บ้างจากสงครามโลกครั้งที่สอง และได้มีการทดลองเกี่ยวกับการใช้แก๊สชีวมวลในเครื่องยนต์มาบ้างแล้ว แต่ก็ยังไม่ได้มีการวิจัย และพัฒนากันอย่างจริงจังเป็นระบบ

### 2.1.2 ทฤษฎีแกซิฟิเคชัน

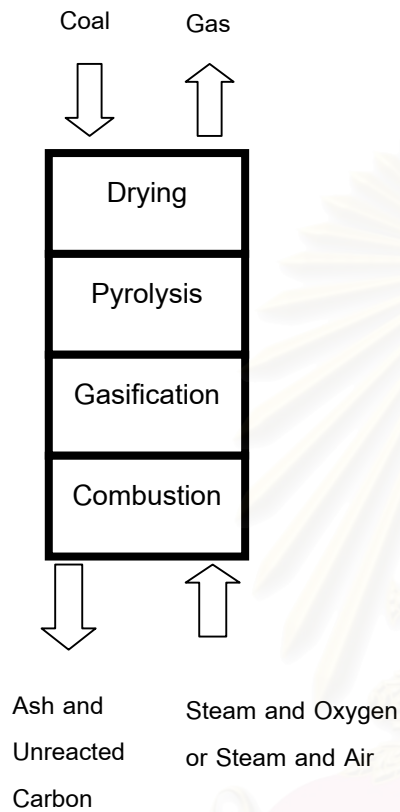
แกซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สดังเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มีเทน ( $CH_4$ ) ในแง่ของกระบวนการหมายถึง ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่รวมการไพโรไลซิสในขั้นต้นและการปรับปรุงคุณภาพแก๊สในขั้นถัดไปกระบวนการแกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical Conversion Process) ได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจน และ/หรือไอน้ำที่อุณหภูมิตั้งแต่ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาคูดความร้อน และปฏิกิริยาคายความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วยแก๊สผสมระหว่าง CO และ  $H_2$  เรียกว่า โปรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas)

โปรตีนเซอร์แก๊ส เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) ของคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่รวมการไพโรไลซิสในขั้นต้นและการปรับปรุงคุณภาพแก๊สในขั้นถัดไป<sup>[5]</sup>

ลำดับการเปลี่ยนแปลงอาจแสดงได้โดยตัวอย่างของ Moving bed gasifier ดังแสดงในรูปที่ 2.2



ถ่านหินเคลื่อนที่ลงมา

1. ถูกทำให้แห้งด้วยแก๊สร้อนที่สวนทางขึ้นมา เมื่อ
2. เคลื่อนต่อลงมาจะร้อนขึ้นจนเกิด devolatilization and pyrolysis ในขั้นถัดไป อุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิด
3. การแก๊สฟาย (gasify) ถือได้ว่าเป็นการแก๊สฟายซาร์จากการ pyrolyse คือ solid carbon

รูปที่ 2.2 Moving bed gasifier<sup>[5]</sup>

### ปฏิกิริยาเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental Combustion Reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและ/หรือน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาเหล่านี้มีการศึกษามานานแล้ว นับว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆได้



ตารางที่ 2.1 ปฏิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน

| ปฏิริยา                                      | ลักษณะ<br>ของ<br>ปฏิริยา | $\Delta H$ |           |            |
|--|--------------------------|------------|-----------|------------|
|  |                          | Cal/gmole  | Kj/kgmole | Btu/lbmole |
| 2.1. $C + O_2 \longrightarrow CO_2$          | -                        | 94,410     | 408,632   | 169,938    |
| 2.2. $C + 1/2 O_2 \longrightarrow CO$        | -                        | 27,056     | 123,092   | 48,701     |
| 2.3. $C + CO_2 \longrightarrow 2CO$          | +                        | 40,298     | 162,448   | 72,536     |
| 2.4. $CO + 1/2 O_2 \longrightarrow CO_2$     | -                        | 67,355     | 285,540   | 121,239    |
| 2.5. $C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$     | +                        | 32,454     | 118,905   | 58,917     |
| 2.6. $C + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 2H_2$ | +                        | 24,610     | 75,362    | 44,298     |
| 2.7. $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$  | -                        | 7,844      | 43,543    | 14,119     |

- หมายเหตุ
1. ปฏิริยาทดลองที่ภาวะ 1,200 องศาเซลวิน (1,700 องศาฟาเรนไฮต์ 927 องศาเซลเซียส) ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์
  2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction)  
เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

ปฏิริยาที่ 2.1 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีคาร์บอนมากเกินไป เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนปฏิริยาที่ 2.2 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

ปฏิริยาที่ 2.3 เรียกว่า “Boudouard Reaction” เป็นปฏิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (Excess Carbon)

ในอนุภาคของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิริยา (Reactivity) ของเชื้อเพลิงต่างๆพบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิริยา ขึ้นกับธรรมชาติของเชื้อเพลิงและลักษณะเฉพาะของผิว (Surface Characteristic) ของเชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิริยาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

ปฏิกิริยาที่ 2.4 จะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนเหลืออยู่ คาร์บอนมอนอกไซด์ จะรวมตัวกับออกซิเจนได้คาร์บอนไดออกไซด์

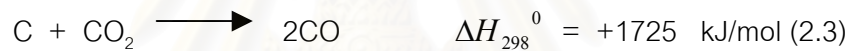
ส่วนในกรณีที่ 2.5 และ 2.6 เป็นกรณีที่ป้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ปฏิกิริยาที่ 2.5 เราเรียกว่า Water Gasification และปฏิกิริยาที่ 2.7 เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Gas หรือ Shift Reaction ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible)

### ปฏิกิริยาในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

ในขั้นการแกซีฟาย (Gasification zone) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ การแกซีฟายคาร์บอนซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ

1. Oxygenolysis หรือ การทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เพื่อเกิด

คาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนจำกัดเพราะอากาศที่ป้อนเข้าจากด้านล่างถูกใช้ในชั้นการเผาไหม้ (Combustion zone) ไปส่วนมาก ปฏิกิริยาในขั้นนี้ คือ



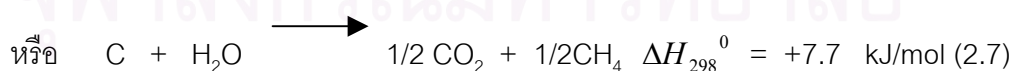
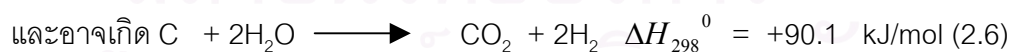
2. Hydrogenolysis คือ ปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเพื่อเกิดมีเทนหรือปฏิกิริยาการเติม

ไฮโดรเจน



$\text{H}_2$  จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{N}_2$  และ S ในถ่านหินด้วย เกิดแก๊ส  $\text{NH}_3$  และ  $\text{H}_2\text{S}$  การเติมไฮโดรเจนในรูปของไอน้ำเพื่อเพิ่มอัตราส่วน H/C ในแก๊สผลิตภัณฑ์

3. Hydrolysis





ในปัจจุบันกระบวนการแกซีฟิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

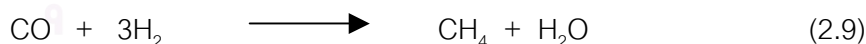
ก. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value Gas or Low Btu Gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ  $3.3-5.6 \text{ MJ/m}^3$  ( $90-150 \text{ Btu/SCF}$ ) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านหินกับอากาศโดยมากมักมีไอน้ำอยู่ด้วยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้



องค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Component) ของแก๊สผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งเจือจางอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนแก๊สจะมีอุณหภูมิเปลวไฟ (Flame Temperature) ต่ำ ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้าสำหรับความต้องการของอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

ข. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value Gas หรือ Medium Btu Gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนประมาณ  $9.3-20.5 \text{ MJ/m}^3$  ( $250-550 \text{ Btu/SCF}$ ) กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) การไม่มีแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

ค. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value Gas หรือ High Btu Gas) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบกับ Synthesis Gas (SNG) ส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจากแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนเป็น SNG ได้โดยกระบวนการ Methanation ที่อุณหภูมิต่ำ Catalytic Process เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนและน้ำดังสมการ (2.9)



เมื่อผ่านการทำให้แห้งก็จะได้แก๊สซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สบริสุทธิ์

### 2.1.3 ประเภทของกระบวนการแก๊สฟิเคชัน (Classification of Gasification)

ประเภทของกระบวนการแก๊สฟิเคชันอาจแยกออกไปตามลักษณะการให้ความร้อนหรือชนิดของ gasifying medium เช่นไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถือเป็น independent characteristic หรือแยกออกไปตามปฏิกิริยา อุณหภูมิ คุณสมบัติแก๊ส หรือกากของแข็งที่เหลือซึ่งถือเป็น dependent characteristic แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดง Major Independent & Dependent Gasifier Characteristics<sup>[5]</sup>

| Independent   | Dependent  |
|---|--|
| 1. Method of Supplying heat <ul style="list-style-type: none"> <li>- direct</li> <li>- indirect</li> </ul>  | 1. Reaction temperature <ul style="list-style-type: none"> <li>- high</li> <li>- medium</li> <li>- low</li> </ul>  |
| 2. Gasifying medium & amount <ul style="list-style-type: none"> <li>- steam with air or O<sub>2</sub></li> <li>- Air</li> <li>- H<sub>2</sub> with or without steam</li> <li>- Steam with catalyst</li> </ul> | 2. Raw gas properties <ul style="list-style-type: none"> <li>- composition</li> <li>- H<sub>2</sub>/CO ratio</li> <li>- Tar &amp; oil content</li> <li>- CV</li> </ul> |
| 3. Reactor type <ul style="list-style-type: none"> <li>- moving packed bed</li> <li>- fluidized bed</li> <li>- entrained flow</li> <li>- molten media</li> </ul>  | 3. Solid residue <ul style="list-style-type: none"> <li>- ash</li> <li>- slag</li> <li>- unconverted carbon</li> </ul>   |

เนื่องจากแบบของ gasifier (reactor) ถือเป็น characteristics ที่สำคัญของกระบวนการซึ่งมีอยู่ 3 แบบใหญ่ๆ คือ

- moving packed bed
- fluidized bed
- entrained flow ส่วนแบบ molten media อาจจัดอยู่ในพวก entrained flow

กากที่เหลือต่างกันด้วยช่วงอุณหภูมิที่ดำเนินการคือประมาณ 815-1925 องศาเซลเซียส และ gasifier แต่ละแบบจะทำงานที่ช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ สำหรับ gasifier ที่เผาไม่หลอมละลาย เรียกว่า dry bottom gasifier และแบบที่เผาหลอมละลายเรียกว่า slagging gasifier (ช่วงอุณหภูมิ 1200-1800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของถ่าน)

### Moving bed gasifiers

หลักการทั่วไปเป็นลักษณะ gasifier ที่ป้อนถ่านหินจะเคลื่อนลงด้านล่างด้วยแรงดึงดูดของโลกซึ่งจะถูกแก๊สไฟและเผาไหม้หมดไปกลายเป็นถ่านในช่วงล่างสุด แต่เนื่องจากกระยะบนและล่างของเบดอยู่กับที่ จึงอาจเรียกว่า fixed bed gasifier ก็ได้ ขณะที่วัตถุเคลื่อนตัวลงมา สิ่งที่จะเกิดขึ้น คือ

- i. การ drying เมื่อสัมผัสกับแก๊สร้อนที่ลอยตัวขึ้น
- ii. การ devolatilization สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมาแตกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่นๆลอยปะปนไปกับผลิตภัณฑ์แก๊ส
- iii. เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือก็จะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด

การดำเนินการใช้ถ่านหินขนาด 3-50 มิลลิเมตร ถ้านขนาดเล็กเกินไปอาจแตกออกและออกไปกับแก๊สขาออก หรือเมื่อเคลื่อนที่ลงมาจะทำให้เบดอุดตัน และทำให้ไหลขึ้นมาไม่สะดวก

การเคลื่อนที่ของเบดค่อนข้างช้าเพียง 0.5 เมตรต่อชั่วโมง ในไอน้ำ/air gasifier ที่ความดันบรรยากาศ และ 5 m/hr. ในไอน้ำ/oxygen gasifier ที่ความดันบรรยากาศ

อุณหภูมิภายใน gasifier ขึ้นอยู่กับระดับของ oxidant ใน atmospheric gasifier อุณหภูมิจะไม่สูงกว่า ash fusion point สำหรับ steam/O<sub>2</sub> gasifier อาจเป็นแบบ dry bottom หรือ slagging ขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำเทียบกับออกซิเจน ถ้าพ่นไอน้ำมากทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ 2.5 ซึ่งปฏิกิริยาคูดความร้อนมีผลให้อุณหภูมิของเบดลดลง



เพื่อลดปริมาณการใช้ไอน้ำอาจยอมให้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ 2.5 มากขึ้นด้วย(โดยไม่ต้องใช้ไอน้ำมากเกินไป)

ข้อดีของ moving bed คือ การมีการสัมผัสโดยตรงกับแก๊สร้อน ทำให้ได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนสูงสุด และมีการสูญเสียความร้อนน้อย

ปัญหาที่พบคือการเိ้มและการเกาะติดกันเป็นก้อนของถ่านหิน ทำให้เกิดการอุดตันในเบดจำเป็นต้องมี preoxidative treatment และภายใน gasifier อาจต้องมีไบทัดกวนเพื่อให้ถ่านหินแตกเป็นก้อนไม่ติดกัน นอกจากนี้ยังเป็นปัญหาที่ไม่สามารถใช้ถ่านหินละเอียดได้

ลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers และ ชนิดขององค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยใช้ Bituminous coals โดยมีการป้อนไอน้ำ และออกซิเจนหรืออากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.3 แสดงสภาวะการทำแกซิฟิเคชันที่เครื่องปฏิกรณ์และ gasifying medium ต่างๆ และตารางที่ 2.4 เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากสภาวะของตาราง ที่ 2.3 จะเห็นว่าที่เครื่องปฏิกรณ์และ gasifying medium ต่างๆ สามารถให้ปริมาณแก๊สแตกต่างกัน ฉะนั้น ถ้าต้องการปริมาณแก๊สอะไรมากกว่ากันก็สามารถใช้สภาวะตามตารางที่ 2.3 ได้

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers โดยใช้ Bituminous coals มีการป้อนไอน้ำและออกซิเจน หรืออากาศ<sup>[5]</sup>

| Characteristic                            | Steam/oxygen   |               | Steam/air                       |                   |
|---|----------------|---------------|---------------------------------|-------------------|
|   | Lurgi Slagging | Lurgi Dry Ash | Woodhall Duckham/ Gas Integrale | Wellman - Galusha |
| Pressure, MPa                             | 2.1            | 2.5           | 0.1                             | 0.1               |
| Temperature, °C                           |                |               |                                 |                   |
| Combustion zone (max.)                    | ~2000          | 980-1370      | N/A                             | ~1300             |
| Gasifier zone                             | ~1475          | 650-815       | 1200                            | N/A               |
| Gas exit                                  | 350-450        | 370-540       | 650                             | 590-650           |
| Steam/Oxidant,kg/kg                       | 1              | 4             | 0.11                            | 0.12              |
| Oxidant, kg/GJ gas                        | 20             | 17            | 110                             | 130               |
| Raw coal throughput,t/(m <sup>2</sup> .h) | 5.9            | 2.9           | 0.37                            | 0.44              |
| Bed velocity, <sup>#</sup> m/h            | 8.2            | 4.0           | 0.51                            | 0.61              |
| Coal residence time, <sup>+</sup> h       | 0.4            | 1             | 23                              | 3                 |
| Coal gas efficiency,%                     | 90             | 80            | 77                              | 75                |

\* Dependent on coal

<sup>#</sup> Assuming coal bed density of 720 kg/m<sup>3</sup>

<sup>+</sup> Based on estimated coal bed heights N/A Not available

ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส\*เป็นร้อยละโดยโมล<sup>+</sup> จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของ bituminous coals ใน moving bed gasifier กับไอน้ำและออกซิเจนหรืออากาศ

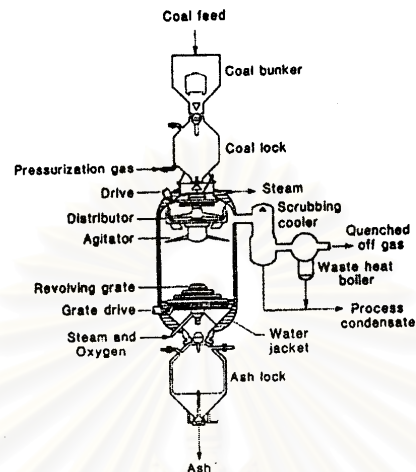
| Constituent           | steam/oxygen   |               | steam/air                       |                 |
|-----------------------|----------------|---------------|---------------------------------|-----------------|
|                       | Lurgi Slagging | Lurgi Dry ash | Woodhall Duckham/ Gas Integrale | Wellman-Galusha |
| CO                    | 60             | 18            | 28                              | 29              |
| CO <sub>2</sub>       | 3              | 30            | 5                               | 3               |
| H <sub>2</sub>        | 28             | 40            | 17                              | 15              |
| CH <sub>4</sub>       | 7              | 9             | 3                               | 3               |
| N <sub>2</sub>        | 1              | 1             | 47                              | 50              |
| Other                 | -              | 2             | -                               | -               |
| Total                 | 100            | 100           | 100                             | 100             |
| GCV,MJ/m <sup>3</sup> | 13.8           | 11.3          | 6.5                             | 6.3             |

\* Dry basis after scrubbing and cooling

<sup>+</sup> Identical with volume percent

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการทำงานของ moving bed gasifier คือ Lurgi Dry Ash Gasifier ซึ่งเป็น gasifier ที่ความดันสูงตัวแรกและยังคงใช้อยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของ Lurgi Dry Ash Gasifier<sup>[5]</sup>

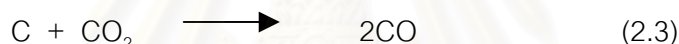
Gasifier นี้ใช้ได้กับถ่านหินที่มีความชื้นได้ถึงร้อยละ 35 และเข้าสูงถึงร้อยละ 35 มีความดันภายในเบด 3.2 เมกะปาสคาล และมี coal residence time ประมาณหนึ่งชั่วโมง อุณหภูมิที่เริ่มแก๊สไฟประมาณ 650-815 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแก๊สอาจอยู่ในช่วง 980-1370 องศาเซลเซียส โดยไม่หลอมละลาย ซึ่งจะถูกทำให้เย็นลงถึง 400-500 องศาเซลเซียส โดยพ่นไอน้ำและอากาศเข้ามา ส่วนแก๊สขาออกทำให้เย็นลงถึง 200-540 องศาเซลเซียส โดย waste heat boiler ใน gasifier แบบนี้ให้ไอน้ำสูงถึงร้อยละ 50 มากเกินพอ ซึ่งมีประโยชน์ในแง่ทำให้ อุณหภูมิใน combustion zone ลดลง และทำให้สมดุลของคาร์บอน-ไอน้ำ และ gas-shift reaction เลื่อนออกไป เกิดไฮโดรเจนมากขึ้น gasification zone temperature ในช่วงกลางๆ ทำให้เกิดมีเทนน้อยแต่มีเทนส่วนใหญ่ได้จากการ devolatilization นอกจากแก๊สแล้วยังได้ทาร์ และ น้ำมันซึ่งถูกแยกออกโดยการล้างใน Scrubber หรือ cooler ด้วยน้ำ



ใน dry ash gasifier ต้องป้องกันไม่ให้อุณหภูมิใน combustion zone สูงเกินไปจึงทำให้ต้องใช้ไอน้ำปริมาณมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพต่ำ จึงต้องพัฒนา slagging gasifier ขึ้นเพื่อลดการใช้ไอน้ำ และต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อลดการเกิดมีเทนและเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ 2.5 มากขึ้นด้วย



Lurgi slagging gasifier หรือ slagger ที่ใช้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์นั้นทางด้านบนเหมือนกับแบบ dry bottom (รูปที่ 2.2) ปรับเปลี่ยนแต่ด้านล่างเพื่อให้ทนอุณหภูมิในการดำเนินการที่ประมาณ 2000 องศาเซลเซียส slag ไหลลงสู่ quench vessel ซึ่งมีน้ำหล่อเย็นทำให้ slag กลายเป็นของแข็งทันที โดยมี coal residence time ประมาณ 20 นาที ซึ่งมีค่าเพียงหนึ่งในสามเท่าของ dry ash gasifier ส่วนการ decompose ของไอน้ำสูงมากเกือบ 100 % การดำเนินการที่อุณหภูมิ ทำให้ปฏิกิริยา Boudouard เกิดเพิ่มขึ้นคือ



แก๊สผลิตภัณฑ์ยังคงมีมีเทนอยู่แต่เกิดจากการ devolatilization ของถ่านหินในช่วงการไพโรไลซิสมากกว่า

### Fluidization Bed Gasifier

เป็นระบบที่มีการพัฒนาน้อยที่สุดในบรรดาระบบที่กล่าวมาข้างต้น ในสมัยก่อนสงครามโลกครั้งที่สอง เตาผลิตแก๊สนี้ใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและเดินเครื่องยนต์ Gas Engines ที่ใช้ในโรงงานสังเคราะห์แอมโมเนีย เตาผลิตแก๊สนี้ผงดำนเล็กๆจะถูกฟลูอิดซ์ โดยความเร็วของแก๊สแบบมีทิศทาง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ Entrained Flow Gasifier พบว่ามีความร้อนและฝุ่นเล็กๆสูญเสียบไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากตัวเตา ผลเสียอันนี้ถูกชดเชยด้วยความสามารถในการเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่องที่ปริมาณการป้อนสูง การใช้ถ่านต่อเวลาและปริมาณการป้อนของเตาสูงกว่า อีกทั้งการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนดี ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย



ระบบนี้สามารถทำงานได้ทั้งในภาวะที่แห้ง หรือเปียกก็ได้ การฟลูอิดิ-ไดซ์แบบแห้งสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของถ่าน อนุภาคของเศษถ่านและถ่าน จะถูกดึงออกทางด้านล่างโดยกรรมวิธีทางกล ในขณะที่บางส่วนถูกพัดติดมากับแก๊สเชื้อเพลิงทางด้านบน ทำให้ต้องมีการติดตั้งไซโคลน (Cyclone) เพื่อดักเก็บถ่านไว้ การผลิตแก๊สที่มีถ่านอยู่และอุณหภูมิสูงกว่า จุดอ่อนตัวของถ่าน ทำให้ถ่านรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นจะตกลงมายังส่วนล่างของเบดและดึงออก

#### Entrained Flow Gasifier

เป็นการใช้ส่วนผสมของวัตถุดิบกับแก๊ส(อากาศ/ไอน้ำ หรือ ออกซิเจน/ไอน้ำ) เพื่อนำเอาผงละเอียดเล็กๆของวัตถุดิบเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส โดยที่ขนาดของวัตถุดิบ และความเร็วของแก๊สที่เข้าจะต้องพอดีกันเพื่อรักษารักษาสภาพของการแขวนลอยไว้ การทดลองเรื่องนี้ได้รับการพัฒนามาจากกระบวนการเผาไหม้ของ Pulverized-Coal ถ่าน และถ่าน (Char) จะออกจากเตาพร้อมกับแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีการแยกออกอีกครั้งหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านและอุณหภูมิสูงมากเมื่อเทียบกับเบดนิ่ง และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินสภาวะเกิด slag แก๊สพีเคชั่นจะสำเร็จด้วยการผ่านเข้าเพียงครั้งเดียว ซึ่งในระบบแห้งมักจะมีการนำถ่านกลับ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณสูง

#### Molten Salt Gasifier

สารหลอมเหลวสามารถใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อที่จะถ่ายโอนความร้อนและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการ สารที่เป็นสารหลอมเหลวนอกจากเกลือแล้ว อาจจะเป็นเหล็ก หรือโลหะอื่นๆ รวมทั้งถ่านเอง การผลิตแก๊สที่ใช้ตัวกลางที่หลอมเหลวทำให้กรรมวิธีที่ใช้ในการทำความสะดวกแก๊สน้อยลง

ผลเสียที่สำคัญคือ เกิดการกัดกร่อน เนื่องจากการใช้สารหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง การผสมกระเบื้องอะลูมินา(Alumina) ที่มีความบริสุทธิ์ลงในเกลือที่ใช้เป็นเพียงการแก้ปัญหาอย่างชั่วคราว

## 2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน<sup>[5]</sup>

### 2.2.1 ถ่านหิน

จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์(Fossil Fuel) ชนิดหนึ่งเกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ซึ่งอาจสะสมกันอยู่ชายฝั่งทะเล บริเวณน้ำกร่อย น้ำจืด หรือแผ่นดินที่ขึ้นแฉะ ในขณะเดียวกันเกิดจากกักกร่อนของดินตะกอนลงทับถมกับซากพืชทำให้เกิดการเน่าเปื่อยผุพังกลายเป็น ถ่านพีต ถ่านพีตเป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน

การจำแนกถ่านหินอาจดูได้จากชนิดและศักดิ์ จากเชื้อเพลิงแข็งซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนสูงคือ ประมาณ 15 มาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือแก๊ส เชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำๆโดยการทำปฏิกิริยา Hydrogenation ในกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเหลว หรือ ปฏิกิริยา Partial Oxidation ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน หรือปฏิกิริยา Decomposition ในกระบวนการคาร์บอนเซชัน และจะมีการกำจัดหรือลดสารประกอบไนโตรเจนกับซัลเฟอร์จากถ่านหินในรูป  $H_2S$  และ  $NH_3$  ไปด้วยพร้อมๆกัน

### 2.2.2 ชีวมวล<sup>[5]</sup>

ชีวมวลมีความสำคัญมากในแง่ที่เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่หมด และสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable energy resources) สารชีวมวลมีความหมายรวมทั้ง energy crops, ฟาร์ม, ภาคทางการเกษตร และของเสียชุมชน รวมทั้งของเสียจากสัตว์ ในแง่ที่ใช้อาหารเป็นพืช การใช้ประโยชน์ของสารชีวมวลซึ่งอาจใช้เป็นทั้งแหล่งอาหาร และแหล่งพลังงาน สารชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานเนื่องจากเป็นสารประกอบของ H, C และ O โดยสร้างจาก  $CO_2$  และน้ำด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) เมื่อมีแสงแดด และคลอโรฟิลล์

#### 2.2.2.1 สมบัติของชีวมวล

สารชีวมวลมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต และลิกนิน

- ก. คาร์โบไฮเดรต คือสารพวก Saccharides , เซลลูโลส, แป้ง และ hemicellulose
- เซลลูโลส เป็นเส้นใย polysaccharide ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของพืช และมีอยู่มาก เซลลูโลสเป็นตัวที่ไม่ละลาย และไม่ค่อยทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะไฮโดรไลซิส

- แป้ง เป็นเม็ด polysaccharide ถูกเก็บไว้ในส่วนต่างๆของพืช ได้แก่พวกเมล็ด , ราก ,หัว และลำต้น ประกอบด้วย 10-20%  $\alpha$  - amylose ซึ่งละลายน้ำ และ 80-90% amylopectin ซึ่งไม่ละลายน้ำ
- Hemicellulose เป็น polysaccharide ที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลส แตกต่างกันที่เป็น amorphous และมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส
- ข. ลิกนิน เป็นกลุ่มสำคัญที่มีในชีวมวลไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบพิเศษของผนังของ woody cell ทำหน้าที่เป็นการเชื่อมเกาะให้เกิดความแข็งแรงเชิงกล เป็น amorphous และละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส สามารถแยกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้น้ำ ลิกนินต้านทานปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และไม่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียได้

### 2.2.2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานกระทำได้โดยใช้กระบวนการแปรรูป 2 หลักการด้วยกัน คือ

- กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางชีวมวล (Biochemical conversion) โดยวิธี Fermentation, Anaerobic digestion
- กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน (Thermal conversion) โดยวิธี Pyrolysis Gasification และ combustion

กระบวนการแกซีฟิเคชันใช้หลักการและวิธีการคล้ายกับของถ่านหินที่ได้กล่าวถึงในแง่ของเชื้อเพลิงจะสนใจองค์ประกอบของ C, H, O, N, S และค่าความร้อน รวมทั้งร้อยละของเถ้า (%ash) แสดงในตารางที่ 2.5 จะเห็นว่า ชีวมวลสามารถผลิตแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจากมี C, H และ O เป็นองค์ประกอบในเนื้อไม้สามารถ hydrolyse ส่วนที่เป็น hemicellulose ได้ทั้งหมด และส่วนที่เป็นเซลลูโลสได้เพียงหนึ่งในสี่ไปเป็นน้ำตาล แต่เซลลูโลสส่วนที่เหลือกับลิกนินจะไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งอาจใช้วิธีการสกัดลิกนินออกก่อนแล้วจึงย่อยส่วนของเซลลูโลส แต่วิธีนี้แพงและไม่นิยมใช้ ดังนั้นจึงไม่ค่อยใช้วิธีการแปรรูปชีวมวลทางชีวภาพกับไม้ แต่จะใช้วิธีทางความร้อนแทน

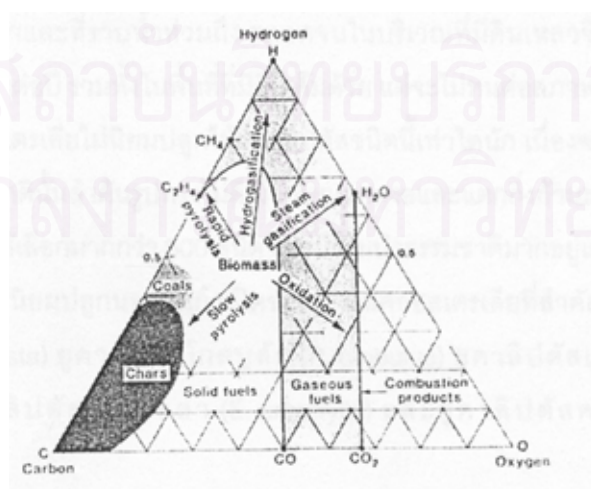
ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล

| Mass %,dry      | wood      | grain | multiple<br>Solid waste | animal waste<br>(manure) |
|-----------------|-----------|-------|-------------------------|--------------------------|
| Carbon          | 50-53     | 45.0  | 47.50                   | 3.51                     |
| Hydrogen        | 5.8-7.0   | 5.8   | 6.0                     | 5.3                      |
| Nitrogen        | 0-0.3     | 2.4   | 1.20                    | 2.52                     |
| Sulfur          | 0-0.1     | 0     | 0.3                     | 0.4                      |
| Oxygen          | 38-44     | 42    | 32.9                    | 38.7                     |
| Volatile matter | 77.87     | 80    | 77                      | 76.5                     |
| Fixed Carbon    | 13-21     | -     | 11                      | 0                        |
| Ash             | 0.1-2.0   | 4.0   | 12                      | 23.5                     |
| H/C atom ratio  | 1.4-1.6   | 1.5   | 1.5                     | 1.8                      |
| GCV,MJ/kg(dry)  | 19.8-21.0 | 16.8  | 19                      | 13.4                     |
| Moisture,%      | 25.60     | 16    | 20                      | 7-35                     |

กระบวนการแปรรูปทางความร้อน รวมถึงกระบวนการ

- Pyrolysis
- Gasification
- Combustion

สามารถแสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ในกราฟสามเหลี่ยม เปรียบเทียบกับรูปที่ 2.4 ของถ่านหิน



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล<sup>[5]</sup>

## 2.3 ยุคาลิปตัส<sup>[10]</sup>

สำหรับการปลูกไม้ยุคาลิปตัส คามาสดูเลนซิส ในประเทศไทยเริ่มปลูกครั้งแรกเมื่อปี 2508 ซึ่งสามารถปรากฏเป็นหลักฐานได้ ภายใต้โครงการสำรวจวัตถุดิบเพื่อผลิตเยื่อกระดาษ โดยนำเมล็ดมาจากประเทศออสเตรเลียและปลูกทดลองเพื่อคัดเลือกชนิด และถิ่นกำเนิด ในท้องที่จังหวัดเชียงใหม่ ศรีสะเกษ และกาญจนบุรี ปรากฏว่า ยุคาลิปตัสคามาสดูเลนซิส สามารถเติบโตได้ดีที่สุด

### 2.3.1 ลักษณะทั่วไปของยุคาลิปตัส

- ลำต้น เป็นไม้ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีความสูง 24-26 เมตร และอาจสูงถึง 50 เมตร ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 เมตร หรืออาจกว้างมากกว่านี้ รูปทรงสูง มีกิ่งก้านน้อย
- ใบ เป็นคู่ตรงข้ามเรียงสลับกัน ลักษณะใบเป็นรูปหอก มีขนาด 2.5-12 x 0.3-0.8 นิ้ว ก้านใบยาว ใบสีเขียวอ่อน บางครั้งมีสีเทาใบบาง ห้อยลง เส้นใบมองเห็นได้ชัด
- เปลือก มีลักษณะเรียบ เป็นมัน มีสีเทาสลับสีขาวและน้ำตาลแดงเป็นบางแห่ง เปลือกนอกจะแตกก่อนเป็นแผ่นหลุดออกจากผิวของลำต้น เมื่อแห้งและลอกออกได้ง่ายในขณะสดหลังจากการตัดฟัน เปลือกนอกหนา
- เมล็ด ขนาดเล็กกว่า 1 มม. สีเหลือง เมล็ด 1 ก.ก. มีเมล็ดประมาณ 1-200,000 เมล็ด
- ช่อดอก เกิดที่ข้อต่อระหว่างกิ่งกับใบ มีก้านดอกเรียวยาว และมีก้านย่อยแยกไปอีก ออกดอกเกือบตลอดปี ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของต้นไม้บางครั้งมีทั้งดอกตูม ดอกบาน ผลอ่อน และผลแก่ในกิ่งเดียวกัน ออกดอกปีละ 7-8 เดือน เหมาะกับการเลี้ยงผึ้ง
- ผล มีลักษณะครึ่งวงกลม หรือรูปถ้วย มรขนาด 0.2-0.3 x 0.2-0.3 นิ้ว ผิวนอกแข็ง เมื่อยังอ่อนอยู่จะมีสีเขียว และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเมื่อแก่ เมื่อผลแก่ปลายผลจะแยกออก ทำให้เมล็ดที่อยู่ภายในร่วงหล่นออกมา
- ลักษณะเนื้อไม้ มีแก่นสีน้ำตาล กระพี้สีน้ำตาลอ่อน กระพี้และแก่นสีแตกต่างกันได้ชัด ไม้ยุคาลิปตัส คามาสดูเลนซิส ที่มีอายุมากขึ้นจะมีสีน้ำตาลแดงเข้มกว่าไม้อายุน้อย เนื้อไม้มีลักษณะค่อนข้างละเอียด เส้นสน (Interlocked grain) บางครั้งบิดไปตามแนวลำต้นเนื้อไม้มีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 0.6-0.9 ในสภาพแห้งแล้ง



ซึ่งขึ้นอยู่กับอายุของไม้ เนื้อไม้แตกง่ายหลังจากตัดฟันตามแนวยาวขนานกับลำต้น แต่ถ้าทำให้ถูกหลักวิธีก็สามารถนำมาเลื่อยทำเครื่องเรือนและก่อสร้างได้

### 2.3.2 ประโยชน์ของไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัสสามารถนำมาปลูกเป็นสวนป่าเจริญเติบโตได้ดี ให้ผลผลิตสูงเมื่อเปรียบเทียบกับไม้โตเร็วชนิดอื่น ไม้ยูคาลิปตัสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการเหมือนกับพรรณไม้ชนิดอื่นๆ และสามารถจำแนกการใช้ประโยชน์ตามลักษณะต่างๆได้ดังต่อไปนี้

1. การใช้ประโยชน์ก่อสร้างทั่วไป ไม้ยูคาลิปตัสแม้ว่าจะมีข้อตำหนิ เนื้อไม้บิดงอแต่ก็มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างสำหรับเป็นโครงสร้างบ้านเรือนและเป็นไม้หมอนรถไฟได้เป็นอย่างดี ไม้ชนิดนี้มีความแข็งแรงทนทานปานกลาง ความหนาแน่นของเนื้อไม้ประมาณ 0.6 นอกจากนี้ยังนำมาใช้ภายในโดยทำเป็นเฟอร์นิเจอร์โต๊ะนั่งเล่นเป็นต้น

2. การใช้ประโยชน์ ด้านพลังงานเชื้อเพลิงในรูปฟืนและถ่าน ไม้ฟืนยูคาลิปตัส ความลาดชันขนาด 5x4x3 เซนติเมตร จำนวน 500 กรัม เมื่อนำไปเผาไฟในเตาอั้งโล่ขนาดกลางให้ปริมาณความร้อน 4,600 แคลอรีต่อกรัม สามารถทำให้น้ำในภาชนะขนาด 3 ลิตรเดือดในเวลา 6.6 นาที ในขณะที่ฟืนลูกนาคินาน 33 นาที และปริมาณเถ้าที่เหลืออยู่เพียง 0.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนับว่าเป็นไม้ฟืนที่มีคุณภาพดีกว่าไม้ฟืนของพรรณไม้หลายชนิด เช่น ไม้กระถินยักษ์ ไม้กระถินณรงค์ ไม้สนประติพัทธ์ ไม้เหล่านี้ทำให้น้ำในกาเดือดได้ 7-7.3 นาที ในขณะที่ฟืนลูกนาคินาน 28-30 นาที และมีปริมาณเถ้าเหลืออยู่ 0.24-0.90 เปอร์เซ็นต์

3. การใช้ประโยชน์ในด้านน้ำมัน น้ำมันจากต้นยูคาลิปตัสสามารถใช้ประโยชน์ในด้านการแพทย์ การอุตสาหกรรมและน้ำมันหอมระเหย

ในด้านการแพทย์น้ำมันยูคาลิปตัสสามารถเป็นวัตถุดิบและเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการผลิตยาอมแก้ไอ ยาคุมแก้หวัด ยาล้างปาก ยาสีฟัน น้ำมันทาถูและสบู่ นอกจากนี้ยังใช้ในน้ำยาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย น้ำมันยูคาลิปตัสใช้กำจัดรอยเปื้อน และใช้เป็นตัวทำลายได้ดี ยูคาลิปตัสสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสไดโอส ยูคาลิปตัสไกลบูลัส ยูคาลิปตัสโครวินก้า และยูคาลิปตัสยูมานิไอ

ในด้านอุตสาหกรรม การใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการผลิตเมทอล ซึ่งนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อและเป็นตัวทำลายอื่นๆ ยูคาลิปตัสที่นำมาใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสไกลบูลัส ยูคาลิปตัสโพลีแบกเทีย ยูคาลิปตัสราดิอาต้า ยูคาลิปตัสสมิททิโอ เป็นต้น

ด้านน้ำหอม การใช้ประโยชน์ด้านนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันระเหย เพราะยูคาลิปตัสเหล่านี้มีกลิ่นหอม โดยทั่วไปจะใช้ผสมลงไปในน้ำยาฆ่าเชื้ออื่น เพื่อปรับปรุงให้มีกลิ่นดีขึ้น ยูคาลิปตัสที่ใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสทริโอโดร่า และยูคาลิปตัสสตายเจอร์รานา เป็นต้น

การใช้ประโยชน์ในการย้อมสี สารที่อยู่ในเปลือก ใบ ดอก หรือตาของดอกของยูคาลิปตัสสามารถให้สีต่างๆกันตั้งแต่สีแดง สีส้ม สีเหลือง เป็นต้น การที่ทำให้เกิดสีต่างๆกันนั้นนอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของยูคาลิปตัสเองแล้วยังขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ทำให้สีติดด้วย

นอกจากนี้ยังสามารถนำไปในการทำฟืน เผาถ่าน ทำชิ้นไม้สับเพื่อส่งไปยังโรงงานเยื่อกระดาษทั้งในและต่างประเทศ ทำเยื่อไม้เพื่อนำไปทำเส้นใยเรยอนมาเป็นเส้นด้าย และทอเป็นผ้า ทำกระดาษที่ความฟูสูง ทึบแสงประกอบด้วยไฟเบอร์ที่แข็งแรงเหมาะต่อการใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียว

## 2.4 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas)

แก๊สสังเคราะห์ คือ แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน(Hydrogen) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายอย่าง หรือในกระบวนการถลุงเหล็ก แก๊สสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของแก๊สผสม หรือแยกไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน หรือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยการใช้ประโยชน์ในรูปของแก๊สผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) ไดเมทิลอีเธอร์ หรือใช้เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ในการถลุงเหล็ก ส่วนในการแยกใช้จะใช้อย่างมากในกระบวนการกลั่นแยกการผลิตแอมโมเนีย และใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสารเคมีหลายชนิด ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

### 2.4.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะผลิตจากไฮโดรคาร์บอน ดังเช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน และชีวมวลโดยวิธีการ

2.4.1.1 การรีฟอร์มแก๊สธรรมชาติ หรือไฮโดรคาร์บอนเบาด้วยไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือทั้งไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.4.1.2 การออกซิไดซ์บางส่วนของน้ำมันหนัก (Partial oxidation of heavy oil)

### 2.4.1.3 การแกสซิฟิเคชันถ่านหิน หรือถ่านโค้ก (Gasification of coal or coke)

วิธีการต่างๆข้างต้นจะให้สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันไปซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ

| Method of Manufacture | H <sub>2</sub> /CO Ratio |
|-----------------------|--------------------------|
| Oxygen-coke-steam     | 0.6                      |
| Air-coke-steam        | 0.9                      |
| Oxygen-coal-steam     | 1                        |
| Oxygen-fuel oil-steam | 1                        |
| Propane-steam         | 1.33                     |
| Methane-oxygen        | 1.7                      |
| Methane-oxygen-steam  | 2.3                      |
| Methane-steam         | 3.0-5.0                  |

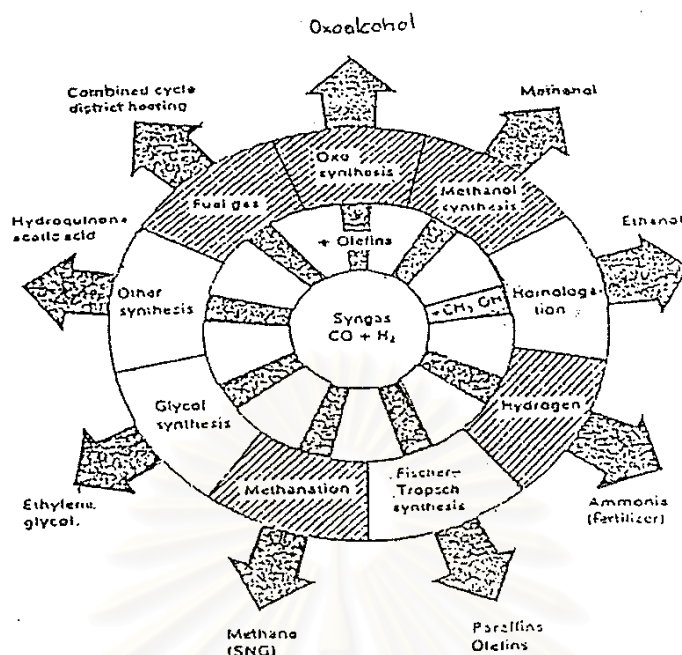
จากตารางที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นั้นจะมีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนในสัดส่วนต่างๆ ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์ ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยวิธี Methane - steam ได้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนสูงสุดเนื่องจากการรีฟอร์มมีเทนได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากกว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และวิธี Oxygen-coke-steam ได้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนต่ำสุดเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น

## 2.4.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

### 2.4.2.1 การใช้ประโยชน์ในรูปแก๊สสังเคราะห์

ผลิตภัณฑ์ขั้นต้น (Primary product) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5





รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ<sup>[6]</sup>

แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสารเคมีอินทรีย์อื่นๆ ได้อย่างมากมายซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกปิโตรเคมี ในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ค้นพบว่า แก๊สสังเคราะห์ สามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้เป็นอย่างดีโดยใช้ ซิงค์-โครเมียมออกไซด์ (Zinc-Chromium Oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปลี่ยนเป็นสารประกอบแอลเคน (Alkanes) ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์ ที่มีเหล็กเป็นโปรโมเตอร์และตัวรองรับปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นแอลเคนและแอลกอฮอล์ เป็นที่รู้จักกันทั่วโลกคือปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปส์ช (Fischer-Tropsch reaction) โดยจุดประสงค์ของปฏิกิริยานี้เพื่อที่จะผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ซึ่งเป็นสารแอลเคนที่มีโมเลกุลสูง

สำหรับการผลิตเมทานอลนั้นนอกจากจะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงแล้วยังนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปิโตรเคมีอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น ฟอर्मัลดีไฮด์ กรดแอสซิติค เมทิลคลอไรท์ เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ยังใช้เป็นตัวเติม (Additive) ในแก๊สโซลีนในรูปของ Methyl tertiary butyl ether (MTBE)

นอกจากนี้แก๊สสังเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า แร่เหล็กที่ขุดได้จากเหมืองในตอนแรกจะเป็นเหล็กออกไซด์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ซึ่งพร้อมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้าตามต้องการ

#### 2.4.2.2 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

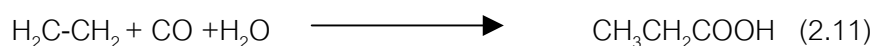
นอกจากการใช้ประโยชน์แก๊สสังเคราะห์ในลักษณะร่วมแล้วนั้น ยังสามารถแยกแต่ละแก๊สมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์สารเคมีตัวอื่นๆ ได้อีกจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของแก๊สแต่ละชนิด

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สพิษที่ติดไฟได้ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยสามารถที่จะแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้โดยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว โดยมากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะนำไปใช้ในปฏิกิริยาพื้นฐานที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ คาร์บอนิลเลชัน (Carbonylation) และไฮโดรฟอร์มมิเลชัน (Hydroformylation) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชันนั้น อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปฏิกิริยาออกโซ (Oxo Reaction)

ในกระบวนการโอเลฟิน คาร์บอนิลเลชัน โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ แอลกอฮอล์ เอมีน และกรดคาร์บอกซิลิก โดยใช้โลหะกลุ่ม VII เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารประกอบตัวใหม่ที่สามารนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เช่น การผลิตกรดอะคริลิก (Acrylic Acid) โดยใช้อะเซทิลีนทำปฏิกิริยากับน้ำและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 30 บาร์ จะได้ปริมาณของกรดอะคริลิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



ในการผลิตกรดโพรพิโอนิกจากเอทิลีน สามารถทำได้โดยกระบวนการไฮดรอกซีคาร์บอนิลเลชัน (Hydroxycarbonylation) โดยใช้นิกเกิลโพรพิเนต (Nickel propionate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 270 ถึง 320 องศาเซลเซียส ความดัน 200 ถึง 300 บาร์ จะได้กรดโพรพิโอนิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่นอุตสาหกรรมการผลิตกรดฟอร์มิก และกรดโพธิโนอิก ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิลेशन หรือในอุตสาหกรรมการผลิตอัลซีไฮด์ต่างๆ

#### 2.4.2.3 แก๊สไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีอยู่มากมาย โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นต่างๆกันซึ่งขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และปริมาณของแก๊สที่ต้องการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆด้วย เช่น ราคาและความเหมาะสม วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอย่างง่ายคือ การแยกสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Electrolysis of an aqueous solution) เช่น การแยกน้ำเกลือด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้โดยการผ่านไอน้ำไปบนเหล็กสปองจ์ ที่มีอุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ และในปัจจุบันพบว่าแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ส่วนในอุตสาหกรรมที่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นนั้นจะนิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมิง

ได้มีการคาดการณ์ว่าในปี 2000 ทั่วโลกจะมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการผลิตแอมโมเนีย และอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปริมาณการใช้แก๊สไฮโดรเจนทั่วโลกในปี 2000

| End use                                 | Demand in year 2000 |        |                   |        |
|---|---------------------|--------|-------------------|--------|
|   | United states       |        | Rest of the world |        |
|   | Low                 | High   | Low               | High   |
| Anhydrous Ammonia                       | 2,460               | 4,490  | 7,200             | 12,700 |
| Petroleum refining (e.g. Hydrocracking) | 2,340               | 32,640 | 8,000             | 36,000 |
| Other uses                              | 1,450               | 24,660 | 2,000             | 25,000 |
| Total                                   | 8,250               | 61,790 | 15,200            | 73,700 |

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนียนิยมใช้กระบวนการฮาเบอร์ (Haber Process) โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนโดยจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และจากหลักของ เลอ ชาเตอลิเยร์ (Le Chatelier's Principle) พบว่าควรทำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำๆ และยังมีการใช้โปรโมเตอร์เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_4$ ) ร่วมกับออกไซด์ของโลหะอื่นๆ ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนที่สูงขึ้น

การนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม จะใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีอื่นๆ โดยใช้กระบวนการไฮโดรซัลเฟอร์ไรซิง (Hydrosulfurizing) และกระบวนการไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และในปัจจุบันได้มีการนำแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงไปใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งต้องมีการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ให้มีปริมาณต่ำกว่า 10 ppm

## 2.5 ทาร์ (Tar)

### 2.5.1 คำจำกัดความของทาร์ (Definition of Tar)

ทาร์ (Tar) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เราไม่ต้องการที่เกิดจากแก๊สไพเคชันหรือเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของทาร์เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (High Viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากคำที่มีความหมายคล้ายๆกัน ได้แก่ Pyrolysis Oil, Pyrolytic Tar

### 2.5.2 สมบัติทางเคมีของทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง จากการวิเคราะห์ทาร์ดิบ (Crude Tar) ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแล้วคำนวณองค์ประกอบของทาร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในห้องกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C อะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของ Highly Oxygenate Pyrolyzate ไปเป็น Less Oxygenate Pyrolyzate และมีความคงที่ทางอุณหภูมิมากกว่า (Thermally Highly Aromatic Structure Stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีการออกซิเจน (Deoxygenate) และคงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก (Aromatic) ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของทาร์กับอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars

| Conventional<br>Flash Pyrolysis<br>(400 - 500 °C) | Hi-Temperature<br>Flash Pyrolysis<br>( 600 – 650°C ) | Conventional<br>Steam Gasification<br>(700 – 800°C ) | Hi – Temperature<br>Steam Gasification<br>( 900 – 1,000°C ) |
|---|--|--|---|
| Acids   | Benzenes   | Naphthalenes   | Naphthalene   |
| Aldehydes   | Phenols  | Acenaphthalenes                                      | Acenaphthalenc  |
| Ketones   | Catechols  | Fluorenes  | Phenanthrene  |
| Furans  | Naphthalenes   | Phenanthrenes  | Fluoranthene  |
| Alcohols  | Biphenyls  | Benzaldehydes  | Pyrene  |
| Complex-<br>Oxygenate                             | Phenanthrenes  | Phenols  | Acephenanthrylene   |
| Phenols   | Benzofurans  | Naphthofurans  | Benanthracenes  |
| Guaiacols   | Benzaldehydes  | Benanthracenes                                       | Benzopyrenes  |
| Syringols   |  |  | 226 MW PAHs   |
| Complex-Phenolics                                 |  |  | 276 MW PAHs   |

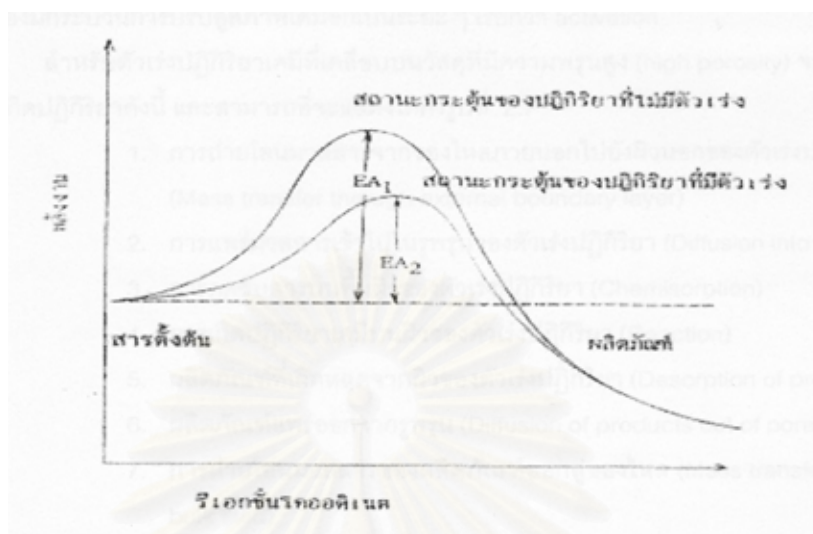
## 2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ( Catalyst )<sup>[7,8,9,11,14,15]</sup>

คำว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยา” มาจากภาษากรีก 2 คำได้แก่คำว่า คตะ (cata) หมายถึงหัก (down) และไลไซน์ (lysein) หมายถึงแยกหรือแตก (split or break) ดังนั้น “ตัวเร่งปฏิกิริยา” จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีภาวะแทรนสิชัน (Transition-State-Theory) อธิบายว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (Potential energy barrier) ซึ่ง



สารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ คือ ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาให้ต่ำลงนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา<sup>[8]</sup>

ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมดุลของปฏิกิริยาหรือเศษส่วนการเปลี่ยน ซึ่งถูกควบคุมโดยอุณหพลศาสตร์เพียงอย่างเดียว

### 2.5.3 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

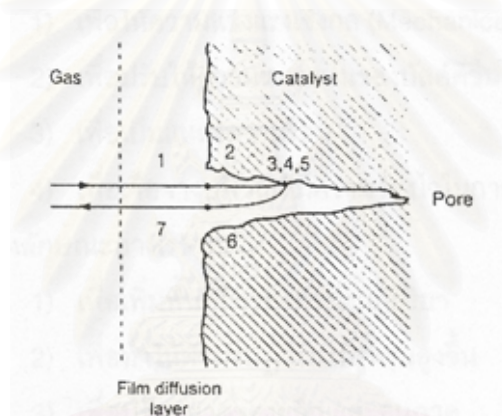
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นโดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปแก๊สหรือของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม

การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบเนื้อผสมนี้เนื่องจากความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรมีพื้นผิวต่อปริมาตรมาก โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนวัสดุ (Support) ที่มีรูพรุนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากที่ใช้ไปช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเสื่อมสภาพลงจะต้องมีกระบวนการปรับสู่สภาพเดิมอีกเป็นระยะๆ เรียกว่า activation

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เคลือบบนวัสดุที่มีความพรุนสูง(High Porosity) จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ และสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

1. การถ่ายโอนมวลสารจากของไหลภายนอกไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Mass transfer through external boundary layer)
2. การแพร่มวลสารเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Diffusion into pores)
3. การดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Chemisorption)
4. การเกิดปฏิกิริยาเคมีบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Reaction)
5. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลุดจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา(Desorption of products)
6. ผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากรูพรุน (Diffusion of products out of pores)
7. การถ่ายโอนมวลสารของผลิตภัณฑ์ออกสู่ของไหล (Mass transfer back to bulk fluid)



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มาเกี่ยวข้อง<sup>[7]</sup>

#### 2.5.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ (Supported metal catalysis)

ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พื้นที่ผิว ความมีรูพรุน ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นที่ผิว ความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฉพาโลหะอย่างเดียวอาจไม่สามารถทำหน้าที่ได้ดี และก็ไม่คุ้มกับการลงทุน จึงมีการเอาสารชนิดหนึ่งมาใช้ เรียกว่าตัวรองรับ (Support)



ข้อดี หรือข้อได้เปรียบของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะที่มีตัวรองรับ ได้แก่

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถจัดการ หรือเตรียมขึ้นได้ง่าย และปลอดภัย
2. สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้กับเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด และถ้าในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของเหลวแล้วตัวเร่งปฏิกิริยานี้ยังสามารถนำมาใช้ได้อีกโดยวิธีการกรอง
3. อนุภาคที่เป็นโลหะสามารถถูกแยกจากกันได้เป็นอย่างดีโดยการกรองแบบซินเทอริง (Sintering)

สำหรับข้อดีอื่น ๆ นั้นขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา อันได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ และสารที่ใช้เป็นตัวรองรับ

สมบัติที่สำคัญของตัวรองรับมีดังนี้

ก. เชิงเศรษฐศาสตร์

- 1) เพื่อลดต้นทุนโดยการขยายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง

ข. เชิงกล

- 1) เพื่อให้ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength)
- 2) เพื่อปรับให้ความหนาแน่นของบัลคดีขึ้น (Optimize bulk density)
- 3) เพื่อเป็นแหล่งความร้อน
- 4) เพื่อเจือจางบริเวณบริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากเกินไป

ค. เชิงลักษณะทางเรขาคณิต

- 1) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2) เพื่อทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนสูงขึ้น
- 3) เพื่อปรับขนาดของผลึก และอนุภาค
- 4) เพื่อทำให้อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีสภาพที่เหมาะสมที่สุดในปฏิกิริยา

ง. เชิงเคมี

- 1) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ทั้งนี้จะได้เพิ่มความว่องไวจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยา และลดกระบวนการซินเทอริง
- 2) เพื่อยอมรับความเป็นไปได้ทางเคมีในการเกิดปฏิกิริยา ตามกลไกของการหมุน

## จ. การเสื่อมสภาพ

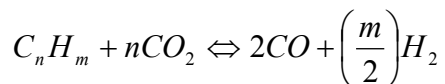
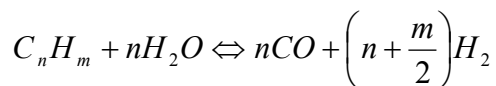
- 1) เพื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีเสถียรภาพต่อการขึ้นเทอรริง
- 2) เพื่อลดความเป็นกรด

เมื่อกลางปีค.ศ. 1980 มีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการแกซีฟิเคชันของสารชีวมวลเพื่อกำจัดน้ำมันนํ้าและลดปริมาณมีเทนซึ่งเป็นสารไม่บริสุทธิ์และมีผลเสียในการใช้ประโยชน์จากแก๊สสังเคราะห์โดยได้กำหนดนิยามของตัวเร่งปฏิกิริยาว่า<sup>[9]</sup>

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สาร (Substance) ที่เติมลงไปในปฏิกิริยาในจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นแล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) เร็วขึ้น โดยที่สารนั้นไม่ถูกใช้เลย ตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องไม่ไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ( $E_a$ )
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องเป็นสสารเสมอ
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันนํ้า
5. ถ้าผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้คือแก๊สสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องช่วยเร่งปฏิกิริยาฟอรัมมีเทน
6. ตัวเร่งปฏิกิริยาควรให้อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่เหมาะสมกับกระบวนการ
7. ตัวเร่งปฏิกิริยาควรจะต้านทานต่อการอุดตันที่เกิดจากการอุดตันของคาร์บอนและการรวมตัวเนื่องจากความร้อน
8. ตัวเร่งปฏิกิริยาควรหาใหม่ได้ง่าย
9. ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องแข็งแรงและทน
10. ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องไม่แพง

การกำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ต้องการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกกันว่า การทำความสะอาดแก๊สร้อน (Hot gas cleaning) ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้ในกระบวนการซึ่งผลที่ได้คือการทำให้บริสุทธิ์และเพิ่มผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ โดยนำแก๊สดิบผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดเบดหรือเบดนิ่งภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมในขณะที่แก๊สดิบผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนรูปบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากับไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น



สำหรับในกรณีนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือโดโลไมต์ (Dolomite) เป็นแร่แมกนีเซียมมีสูตรทั่วไป  $MgCO_3 \cdot CaCO_3$  (Calcium Magnesium Carbonate) มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันทาร์และเพิ่มผลิตภัณฑ์แก๊สในอัตราส่วนของสารป้อนที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังหาง่ายและราคาถูก โดโลไมต์จะไม่ไปกระตุ้นปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งมีเทน ปฏิกิริยาฟอรัมมิ่งของน้ำมันทาร์กับโดโลไมต์เกิดขึ้นกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราที่สูงกว่าไอน้ำ

## 2.7 โดโลไมต์ (Dolomite)

### 2.7.1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโดโลไมต์

ในอุตสาหกรรมทั่วไป Limestone และ dolomite ซึ่งพอจะเรียกรวมว่าหินคาร์บอเนต (Carbonate rock) จัดว่าเป็นหินที่ให้ประโยชน์อย่างที่สุด เมื่อเทียบกับหินและแร่อุตสาหกรรมอื่น ๆ ในอุตสาหกรรมก่อสร้างนำหินคาร์บอเนตมาใช้ทำเป็นหินย่อยเพื่อผสมกับซีเมนต์ทำคอนกรีตและใช้ในการทำถนน ใช้เป็นวัตถุดิบในการทำปูนซีเมนต์ (Portland cement), ปูนขาว และหินประดับในการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว กระจก, วัสดุทนไฟ, ผงขัด ตลอดจนนำมาใช้ในด้านเกษตร เช่น ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil conditioner) ในการกล่าวถึงประโยชน์ส่วนมากจะกล่าวรวมกันไประหว่าง Limestone และ Dolomite โดยจะมีข้อกำหนดมาตรฐานรายละเอียดเพิ่มเติมไปอีกต่างหาก สำหรับผู้ที่นำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ กัน

### 2.7.2 สมบัติของแร่โดโลไมต์

- rhombohedral ที่มีผิวหน้าโค้ง
- ความแข็งตามมาตรฐานของ Mohs scale ประมาณ 3.5-4
- รูปผลึกอยู่ในระบบ hexagonal ปกติพบอยู่ในรูปผลึกของ
- ความถ่วงจำเพาะ 2.82
- สีขาวหรือชมพู
- ธาตุเจือปนที่พบอยู่เสมอมี Fe, Mn, Co, Zn, Pb

### 2.7.3 การกำเนิดของแร่โดโลไมต์

แร่โดโลไมต์เป็นผลทางอนินทรีย์ (inorganic Product) ที่เกิดขึ้นในเขตระดับน้ำขึ้นน้ำลงของทะเลในโซนร้อน (Superheated intertidal localities) โดยมีการเกิดแบบ Diagenetic origin dolomite อาจเกิดเป็นผลึกเล็ก ๆ กระจุกกระจายอยู่ตามเขตน้ำลึกได้เช่นกันแต่พบน้อยมาก แร่โดโลไมต์เกิดร่วมกับตะกอนคาร์บอเนตใน โซนใกล้ ๆ กับระดับน้ำทะเลหรืออยู่ในช่วงระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดของน้ำทะเล (Intertidal & Supertidal environments) ตะกอนส่วนใหญ่ต้องเป็นพวก Calcium carbonate ซึ่งจะทำให้ Mg ในน้ำทะเลได้มีโอกาสเข้าไปแทนที่ Ca ใน lattice ของ calcite ได้มากและกลายเป็นแร่โดโลไมต์ขึ้น จากหลักฐานต่าง ๆ ในการค้นคว้าทางศาสตร์ (Petrography) พอจะบอกได้ว่า โดโลไมต์ เกิดขึ้นได้ 2 วิธีด้วยกัน

1. แร่โดโลไมต์เกิดจากผลึกเล็ก ๆ ของ Calcium Carbonate (Microcrystalline calcite) มีการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้าง โดย Ca ถูกแทนที่ด้วย Mg ในขณะที่ตะกอนคาร์บอเนตเหล่านี้ กำลังอยู่ในขบวนการที่จะกลายเป็นหิน (Diagenetic replacement) ทำให้ผลึกเล็ก ๆ เหล่านี้กลายเป็นผลึกของโดโลไมต์

2. โดโลไมต์เกิดในสภาพเป็นตัวเชื่อมระหว่างเม็ดตะกอน (Fringe cement) แหล่งที่มาของ Mg ที่จะ เข้าไปแทนที่ใน calcite การที่ high -Mg calcite เปลี่ยนสภาพเป็น Low-Mg calcite ทำให้ได้ Mg ออกมา และมันยังคงค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกและตะกอนเหล่านั้น ซึ่ง Mg จำนวนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Dolomitization ในเวลาต่อมา Mg ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลอยู่แล้ว และมันจะซึมผ่านหรือ diffuse ลงไปตามช่องว่างระหว่างตะกอนที่สะสมตัวอยู่ Mg ที่ค้างค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างตะกอนเหล่านี้ เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิประมาณ 34-35 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาแทนที่ Ca ในตะกอนของ  $\text{CaCO}_3$  และเกิดแร่โดโลไมต์ขึ้น

### 2.7.4. องค์ประกอบที่ควบคุมหรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดโดโลไมต์ได้หรือไม่ขึ้นกับ

- ความเข้มข้นของ Mg ในช่องว่างระหว่างตะกอน
- ความพรุนและความสามารถในการให้น้ำทะเลซึมผ่านได้ ของชั้นตะกอน
- ปริมาณของ Microcrystalline aragonite และ Calcite

### 2.7.5 สมบัติทางกายภาพของโดโลไมต์

- สี
- สมบัติการดูดซึม (Absorption)
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
- ความหนาแน่น (Density)
- Compressive strength

### 2.7.6 สมบัติทางเคมีของโดโลไมต์

การหาสมบัติทางเคมีของโดโลไมต์ จะเน้นหนักไปในทางใด ก็ขึ้นอยู่กับว่า ผู้ที่จะนำโดโลไมต์ ไปใช้ในการทราบองค์ประกอบทางเคมีตัวใดบ้าง ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภทจะมีการกำหนดมาตรฐานไว้ในสภาพทั่ว ๆ ไปว่าต้องการองค์ประกอบอย่างไรเท่าใด เช่น ระบุถึงปริมาณของ MgO, CaO เป็นหลักตลอดจนถึงมีการจำกัดปริมาณของพวก impurities อื่น ๆ เช่น  $Fe_2O_3$ , S

### 2.7.7 ประโยชน์ของโดโลไมต์

1. ใช้ในทางอุตสาหกรรมก่อสร้างและคอนกรีต
2. ใช้ทำหินประดับ (Dimension stone) หินที่ใช้ต้องเป็นหินที่ทนทานต่อการผุกร่อน (weathering) และไม่มีสารเจือปนที่จะเกิดปฏิกิริยากับภายนอก

## 2.8 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography,GC)<sup>[11]</sup>

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคอีกชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกสารที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นแก๊สเฟสได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง (ไม่เกิน  $450^{\circ}C$ ) เมื่อสารนั้นถูกเปลี่ยนให้อยู่ในแก๊สเฟสแล้ว ให้สารเหล่านั้นผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเฟสคงที่ (Stationary phase) โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) หรือ carrier gas สารผสมนั้นจะเกิดการแยกชั้น แก๊สโครมาโทกราฟีแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ

### 2.8.1 แก๊ส-ของแข็งโครมาโทกราฟี (Gas-Solid Chromatography หรือ GSC)

วิธีนี้ใช้เฟสคงที่เป็นของแข็งที่สามารถดูดซับ (Absorption) สารที่เป็นแก๊สซึ่งต้องการแยกได้และไม่มีสารใดเคลือบอยู่ ส่วนใหญ่แล้ววิธีนี้ค่อนข้างแคบ เพราะใช้แยกเฉพาะสารที่เป็นแก๊สหรือสารที่เป็นโมเลกุลเล็กๆเท่านั้น ดังนั้น คอลัมน์ที่ใช้มักบรรจุด้วย active solids เช่น Molecular sieves หรือ porous polymers, silica gel, alumina และ activated carbon เป็นต้น

### 2.8.2 แก๊ส-ของเหลวโครมาโทกราฟี (Gas-Liquid Chromatography)

สารที่เป็นแก๊สหรือไอของสารที่ผสมกันอยู่ เมื่อผ่านคอลัมน์จะสามารถแยกออกจากกันได้ด้วยการกระจายตัวที่แตกต่างกันของแก๊สหรือไอระหว่างเฟสเคลื่อนที่กับเฟสคงที่ที่มีของเหลว (Liquid phase) ฉาบอยู่บนของแข็งหรือมีค่า partition coefficient ต่างกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับแยกสารที่เป็นแก๊สหรือสารที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสได้ที่อุณหภูมิกำหนด องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) มีส่วนประกอบดังนี้

1. ถังแก๊สที่ใช้บรรจุตัวพา (carrier gas) เพื่อจะพาไอของสารตัวอย่างผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ ได้แก่ ไนโตรเจน ฮีเลียมและอาร์กอน เป็นต้น
2. ส่วนที่ใช้ควบคุมการไหลของแก๊สต่างๆ (flow controller) ได้แก่ ไฮโดรเจน อากาศ และไนโตรเจน เป็นต้น
3. ส่วนที่จะฉีดสารตัวอย่างเข้าไป (injection port)
4. คอลัมน์ (column) ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่ใช้สำหรับแยกสาร
5. ดีเทคเตอร์ (detector) เป็นส่วนที่สำหรับตรวจวัดสารแต่ละชนิดที่ถูกแยกออกมาจากคอลัมน์



6. ส่วนที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ให้กับคอลัมน์ดีเทคเตอร์ และ inject

7. ส่วนที่ใช้ประมวลผลและข้อมูลต่างๆ ได้แก่ อินทิเกรเตอร์ เครื่องบันทึกโครมาโทแกรม หรือ data process หรือคอมพิวเตอร์

ดังนั้น ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคทาง GC นั้น สามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายๆดังนี้ คือเมื่อเลือกสภาวะต่างๆของการวิเคราะห์ และจัดสภาวะของเครื่องให้เรียบร้อยแล้ว จึงนำสารตัวอย่างไปฉีดเข้าที่ sample injection port สารจะกลายเป็นไอแล้วถูกพาเข้าไปในคอลัมน์ด้วยแก๊สพา (carrier gas) อย่างช้าๆ สารผสมจะถูกแยกออกเป็นส่วนๆ ที่คอลัมน์นี้แล้วออกไปสู่ดีเทคเตอร์ (detector) จะทำให้ได้สัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งสามารถเขียนออกมาเป็นโครมาโทแกรมด้วยเครื่อง recorder หรือ integrator ก็จะทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถทราบองค์ประกอบของสารตัวอย่างได้

## 2.8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย<sup>[1]</sup> ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีววมวลจากกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยใช้เครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่งโดยใช้แกลบ มีตัวแปรที่พิจารณาคือ อุณหภูมิของกระบวนการแกซีฟิเคชัน และอัตราการไหลอากาศ ในการทดลองแกลบจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่อง เพื่อเผาไหม้แกลบให้เกิดเป็นแก๊สร้อน และผ่านคอลัมน์เข้าทางด้านล่างปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650-900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศและค่าอัตราการไหลของอากาศ 0.12 ถึง 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที องค์ประกอบของแก๊สชีววมวล จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีววมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิของการทดลอง 850 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของอากาศ 0.2 ลูกบาศก์เมตร/นาที อัตราการป้อนแกลบ 100-260 กรัม/นาที แก๊สชีววมวลที่ได้มีปริมาณร้อยละ โดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 8.46 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละโดยปริมาตร 5.12 แก๊สไฮโดรเจนร้อยละโดยปริมาตร 7.78 และแก๊สมีเทนร้อยละโดยปริมาตร 0.83 ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวล 671.79 กิโลแคลอรี/ลูกบาศก์เมตร

Rapagna S., Jand N., Foscolo P.U.<sup>[12]</sup> ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปทาร์ไปเป็น CO และ H<sub>2</sub> โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเบดนิ่งมี 2 ตัว คือนิกเกิลและโดโลไมต์ โดยแก๊สที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี(GC) เครื่องปฏิกรณ์ตัวแรกใช้เครื่อง Carbosieve S11 column ใช้ He เป็นแก๊สนำพาทำการวัด N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> และ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (ถ้ามี) และเครื่องปฏิกรณ์ตัวที่ 2 ใช้เครื่อง Molecular Sieve 5A column ใช้ Ar เป็นแก๊สนำพาทำการวัด H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ปริมาณทาร์ที่ได้ถูกแยกเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรก ทาร์ในเฟสอินทรีย์( organic phase ) ซึ่งจะทำการแยกและชั่งน้ำหนัก และส่วนที่ 2 ทาร์ที่ปนอยู่ในน้ำทำการวัดโดย TOC ( Total Organic Carbon ) จากผลการทดลองแสดงว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ยังไม่ได้ใช้มีการประสิทธิภาพในการกำจัด CH<sub>4</sub> และทาร์ได้สูงสุดประมาณ 2 ลูกบาศก์เมตรของแก๊สต่อกิโลกรัมของชีววมวล H<sub>2</sub> สูงขึ้นกว่า 60% โดยปริมาตร

C.Franco.,et al<sup>[13]</sup> ทำการศึกษากระบวนการ steam-gasification ที่ความดันบรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไบล์เบด ทำการทดลองที่อุณหภูมิช่วง 700-900 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีววมวลที่ 0.4-0.85 น้ำหนัก/น้ำหนัก โดยทำการศึกษาชีววมวล 3 ชนิด คือ pinuspinaster (ไม้เนื้ออ่อน), ยูคาลิปตัส และไม้โอ๊ก(ไม้เนื้อแข็ง) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ แก๊ส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันคือประมาณ 830 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนไอน้ำต่อชีววมวลคือ 0.6-0.7 น้ำหนัก/น้ำหนักที่อุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำนี้จะทำให้ได้แก๊สไฮโดรเจนมีค่ามากและ

ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและปริมาณทาร์ต่ำ จากงานวิจัยนี้ อุณหภูมิมีผลกระทบต่อองค์ประกอบแก๊สคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะให้ปริมาณแก๊สสูงขึ้นขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิ 730-850 องศาเซลเซียส แล้วควงที่ และอัตราการป้อนไอน้ำก็มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส อัตราส่วนของไอน้ำต่อชีวมวลที่เหมาะสมคือ 0.6-0.7 น้ำหนัก/น้ำหนัก เพราะจะให้พลังงานสูงและมีการเปลี่ยนคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมาก

สุพัตรา ชิวธนาคุปต์<sup>[14]</sup> ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิเคชันที่อุณหภูมิ 550-800 องศาเซลเซียส โดยใช้ไม้ยูคาลิปตัส โดยมีการป้อนไอน้ำที่อัตราการป้อน 0.15 – 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวลซึ่งไอน้ำทำหน้าที่เป็น gasifying medium เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน แก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์โดยประมาณ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ ปริมาณไอน้ำต่อชีวมวล และการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน แก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 โดยประมาณ คือ ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน แก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1.612 และเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปพบว่าได้อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0.96

S.T.Chaudhari., et al<sup>[17]</sup> ทำการศึกษาระบบ steam-gasification ของซาร์ที่ได้จากชีวมวลเพื่อทำการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 650-800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำที่ 2.5-15 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของซาร์ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.5-2 ชั่วโมง พบว่าที่อัตราการป้อนไอน้ำต่ำ (ประมาณ 2.5/ชั่วโมง/กรัมของซาร์) และอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 700 องศาเซลเซียส) จะผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ (ประมาณ 1.33) ในทางตรงข้ามที่อัตราการป้อนไอน้ำสูง (ประมาณ 10 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของซาร์) และอุณหภูมิสูง (ประมาณ 800 องศาเซลเซียส) จะให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงมาก (ประมาณ 5-6) ซึ่งที่ภาวะนี้เหมาะทำให้เกิดการเปลี่ยนสูงถึง 90 % ของซาร์ที่ได้จากชีวมวล ผลิตแก๊สได้ถึง 350 ลิตรต่อ 100 กรัมของซาร์ที่ได้จากชีวมวล

Di Blasi C., Signorelli G., Portoricco G.<sup>[18]</sup> ทำการศึกษาการแกซีฟิเคชันแบบไหลส่วนทางกันในเครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed-bed เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการแกซีฟิเคชันของชีวมวลต่างๆ เช่น เปลือกไม้ เปลือกผลไม้ เปลือกมะกอก และ กากองุ่น เป็นต้น องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊ส และทำการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ค่าความร้อนของแก๊สจะได้ค่ามากที่สุดซึ่งเป็นฟังก์ชันกับตัวแปรในการทำงานถ้าทำการลดอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง ภาวะการแกซีฟิเคชันที่ดีที่สุดของไม้ และกากทางการเกษตร ให้ค่าความร้อนของแก๊สอยู่ในช่วง 5-505 เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตร กับ CO 28-30%, CO<sub>2</sub> 5-7%, H<sub>2</sub> 6-8%, CH<sub>4</sub> 1-2% และ c-2 ไฮโดรคาร์บอนเล็กน้อย

Mohammad A., Kimio K., Keiichi T.<sup>[19]</sup> ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการแกซีฟิเคชันเซลลูโลส ทำการทดลองในฟลูอิดไธด์เบด ใช้อากาศเป็นตัวพา ทำการหาประสิทธิภาพของตัวเร่งรับชนิดต่างๆ และทำการเปรียบเทียบ เนื่องจากเชื้อเพลิงเช่น synthetic diesel และไดเมทิลอีเทอร์ สามารถผลิตจากแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ผลิตได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวล กระบวนการผลิตแก๊สจาก ชีวมวลมีข้อดีในมุมมองการปกป้องธรรมชาติ เชื้อเพลิงสะอาดจาก แก๊สสังเคราะห์ จะลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ จึงมีความสนใจที่จะศึกษาเพื่อค้นหากระบวนการที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับแกซีฟิเคชันของชีวมวล อย่างไรก็ตาม กระบวนการก็มีปัญหาการเกิดทาร์ ถ้าทำที่ภาวะอุณหภูมิสูง กระบวนการควรดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ แต่ การลดอุณหภูมิเป็นการลดลงของผลได้ของแก๊สสังเคราะห์ ปัญหานี้สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการจึงจะสามารถดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำ

Michael L., Jack P., William A.<sup>[20]</sup> ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis) ของไม้ โดยชั้นแรกใช้ (Packed bed) เล็กๆ ลึก 2 เซนติเมตร และชั้นที่สองเป็นชั้นการแตกตัวของแก๊สจากการสลายตัวทางความร้อนของทาร์ ที่ความเข้มข้นต่ำ อุณหภูมิ 773-1073 K ผลิตภัณฑ์จากชั้นแรกเป็น ทาร์ ชาร์ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ กับมีเทนเล็กน้อย ในชั้นที่สอง คาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นจากการแตกตัวกลายเป็นไอของทาร์ แต่ทาร์ส่วนมากจะถูกเปลี่ยนกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเกิดมีเทน และเอทิลีน เพียงร้อยละ 10 ของทาร์ที่ถูกเปลี่ยน ส่วนโค้กเกิดน้อย

จำลักษณะ ศรีนาคเรือง<sup>[23]</sup> ทำการศึกษาภาวะการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 700-850 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์มีโครงสร้างเป็น CaO, MgO, NiO, NiCaMgO

## บทที่ 3

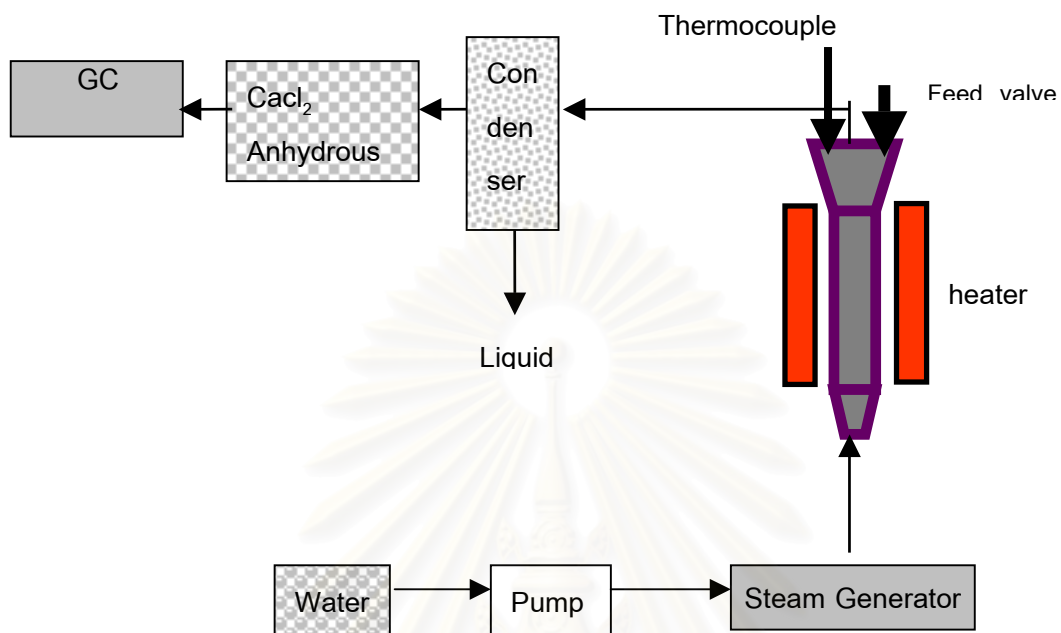
### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการแกซีฟิเคชันจากชีวมวล คือ ไม้ยูคาลิปตัส เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยอุปกรณ์การทดลองนั้นประกอบด้วย

1. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน แบบเบดนิ่ง
2. ชุดควบคุมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน ประกอบไปด้วย
  - เตาเผาให้ความร้อนแบบกอลวง(Turbular Furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น GSC 12/110/300
  - เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Thermocouple Type K) และชุดลวดให้ความร้อน
  - เครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงผล (Recorder) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น 4173
3. เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam Generator)
4. เครื่องสูบน้ำ (Peristaltic Pump) ยี่ห้อ Master flex รุ่น 77200-60
5. เครื่องดักความชื้นโดยใช้ CaCl<sub>2</sub> Anhydrous
6. เครื่องควบแน่นของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Condenser)
7. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี(Gas Chromatograph;GC) ยี่ห้อ Thermofinnigan รุ่น KA000023

แผนผังกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยรวมแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการแก๊สโครมาโทกราฟีโดยรวม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบเบดนิ่ง

เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบเบดนิ่งสร้างขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 (Stainless Steel TYPE 316) โดยเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร และมีความสูง 92.5 เซนติเมตร โดยมีการติดตั้งตระแกรงที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อรองรับสารชีวมวลไว้ในบริเวณส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งไอน้ำจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งไอน้ำจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างด้วยท่อส่ง และแก๊สผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบเบดนิ่ง

### 3.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน

ชุดควบคุมอุณหภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่โดยจะประกอบไปด้วย เตาเผาแบบท่อกลวง และเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิชนิด K

#### 3.1.2.1 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง

เตาเผาที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยเตาเผาให้ความร้อนจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ให้ได้ตามภาวะที่ต้องการ โดยจะแปรค่าจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนให้แก่เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.3 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง

#### 3.1.2.2 เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้รุ่น K แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 1300 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการทำงานของความต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างขั้วทั้งสอง เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิมากก็จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ส่งมาจากเทอร์โมคัปเปิลจะเข้าเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะขยายสัญญาณประมาณ 40 เท่า สัญญาณที่ถูกขยายจะถูกส่งเข้าไมโครคอมพิวเตอร์จากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะประมวลผลของสัญญาณที่ได้เป็นค่าของอุณหภูมิเบด ซึ่งจะปรากฏให้เห็นบนเครื่องบันทึกผล (Recorder) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องบันทึกผลอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์

### 3.1.3 เครื่องผลิตไอน้ำ

3.1.3.1 เครื่องผลิตไอน้ำที่ใช้เป็นรูปทรงกระบอกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งควบคุมการให้ความร้อนโดยใช้เครื่องให้ความร้อน(Heater) โดยภายนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนแบบใยแก้ว (Asbestos) รอบเครื่องผลิตไอน้ำเพื่อลดการสูญเสียความร้อน และทำให้เปลี่ยนสถานะของน้ำที่อุณหภูมิห้องให้กลายเป็นไอน้ำได้ทันที แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องผลิตไอน้ำ

### 3.1.3.2 เครื่องสูบน้ำ

ในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในการทดลองจะนำน้ำกลั่นมาป้อนเข้าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องสูบน้ำ (Peristaltic Pump) ดังรูปที่ 3.5 ทางด้านล่างของเครื่องผลิตไอน้ำด้วยอัตราคงที่ น้ำกลั่นจะกลายเป็นไอน้ำภายในเครื่องผลิตไอน้ำทันที จากนั้นไอน้ำจะออกสู่ด้านบนของเครื่องผลิตซึ่งเป็นช่องเปิดที่ต่อกับท่อทองแดงซึ่งรอบท่อจะมีการพันขดลวดให้ความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของไอน้ำไม่ให้กลั่นตัว จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ต่อไป



รูปที่ 3.5 เครื่องสูบน้ำ

### 3.1.4 เครื่องแยกไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

เครื่องแยกไอน้ำจากผลิตภัณฑ์แก๊สมีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่บรรจุแอนไฮไดรอสแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$  Anhydrous) เพื่อดูดซับความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส



รูปที่ 3.6 เครื่องแยกไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

### 3.1.5 เครื่องควบคุมแรงของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้



รูปที่ 3.7 เครื่องควบคุมแรงของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์แก๊ส

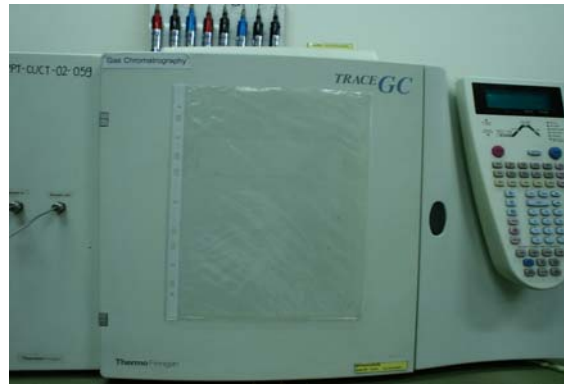
### 3.1.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี(Gas Chromatograph : GC )

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationnary Phase และมีแก๊สพา (Carrier Gas) เป็น Mobile Phase เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็น Chromatogram โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Thermofinnigan รุ่น KA000023 ดังรูปที่ 3.9 โดยแก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier Gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow Controller)
3. ระบบการฉีด (Injector Port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. ดีเทคเตอร์ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)





รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

รายละเอียดส่วนประกอบที่สำคัญ มีดังนี้

ก) แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอที่ Injector Port ให้เข้าสู่คอลัมน์ โดยจะต้องมีการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่เสมอ แก๊สพาโดยทั่วไปที่คุณสมบัติดังนี้ เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างมีความบริสุทธิ์ และง่ายต่อการซื้อหา และมีความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปแก๊สที่นิยมใช้คือ ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน และไฮโดรเจน แต่ในการทดลองนี้จะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา

ข) คอลัมน์

วัสดุที่ใช้ทำคอลัมน์มีหลายชนิด ในการวิเคราะห์นี้ใช้คอลัมน์บรรจุแบบพอร์พาทก เอ็น (Porapak N) เป็นตัวดูดซับสารต่างๆไว้ระหว่างการวิเคราะห์

ค) ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์ คือ เครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะสามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และอาจจะมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์ นั้นควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง ( High sensitivity )
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร ( Selectivity )
- มี Dynamic Range ที่กว้าง
- มีเสถียรภาพ (Stability)



สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ดีเทคเตอร์ 2 ชนิดคือ เทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID)

ดีเทคเตอร์แบบ TCD จะวัดสารที่ออกมาจากแก๊สพาโดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference Gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีสมบัติในการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่ง ขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram) ในการทดลองนี้จะใช้ TCD ในการหาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนภายในระบบ

ดีเทคเตอร์แบบ FID เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจสอบหาสารประกอบอินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกจุดให้ติดไปด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (Heater) ที่อยู่บริเวณใกล้ๆกับ Flame Jet ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าไปนั้นจะทำหน้าที่ 2 อย่างคือ ช่วยเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจน และช่วยพาแก๊สที่เผาไหม้ออกไป แก๊สพาและสารตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์ จะเข้าสู่เปลวไฟ จะทำให้สารเหล่านั้นเกิดไอออนไนเซชันได้เป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยัง Flame Jet ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรด สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังอิเล็กโทรมิเตอร์ และบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกได้เป็นโครมาโทแกรม ในการทดลองนี้จะใช้ FID ในการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ในรูปของแก๊สมีเทน

#### ง) เมทาไนเซอร์ (Methanizer)

เป็นเครื่องสำหรับการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปแก๊สมีเทนด้วยแก๊สไฮโดรเจน เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์แก๊สทั้งสองในระดับปริมาณ ppm ใน FID Detector ได้ โดยภายในจะเกิดปฏิกิริยาเมทาไนเซชัน มีโคบอลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

1. แก๊สไฮโดรเจน 99.999% จากบริษัทเอนไวโรเมต
2. แก๊สไนโตรเจน 99.99% จากบริษัทเอนไวโรเมต
3. น้ำกลั่น
4. แอนไฮดรัสแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$  Anhydrous)
5. ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์
6. นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต
7. ไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส

### 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

3.3.1 อัตราการป้อนน้ำ (Steam Flow Rate) เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน โดยในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนอัตราการป้อนน้ำที่ 0.01, 0.03 และ 0.07 กรัม /นาที่/กรัมของชีวมวล

3.3.2 อุณหภูมิภายในเตาเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน และศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิที่ 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียส

3.3.3 ร้อยละ ของนิกเกิล/ไดโลไมต์คือ 3, 5, 7 และ 10 พร้อมทั้งวิเคราะห์หาองค์ประกอบ

3.3.4 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/ไดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัมต่อการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

3.4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) นำไม้ยูคาลิปตัสมาวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายการทดลองและวิธีวิเคราะห์

| รายการทดลอง                   | วิธีวิเคราะห์ |
|-------------------------------|---------------|
| วิเคราะห์ความชื้น (Moisture)  | ASTM E871     |
| เถ้า (Ash)                    | ASTM D1102    |
| สารระเหยได้ (Volatile Matter) | ASTM E872     |

หมายเหตุ : รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

3.4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis ) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่องมือ CHNS/O Analyser ( Perkin Elmer PE2400 SeriesII)

### 3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส

3.4.2.2 เตรียมตัวอย่างปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ที่ร้อยละ 3, ร้อยละ 5, ร้อยละ 7 และ ร้อยละ 10 พร้อมวิเคราะห์องค์ประกอบ

3.4.2.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน อุณหภูมิที่ได้ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ 550, 650, 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส

3.4.2.4 ศึกษาหาความสัมพันธ์อัตราการไหลน้ำที่ 0.01, 0.03 และ 0.07 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล

3.4.2.5 เปรียบเทียบผลของการเติมตัวอย่างปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน โดยใช้นิกเกิล/โคโลไมต์เป็นตัวอย่างปฏิกิริยาปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัม

3.4.2.6 วัดปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้น

### 3.4.3 การปรับเทียบองค์ประกอบของแก๊สด้วยแก๊สผสมมาตรฐาน

เพื่อทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบแก๊สได้อย่างเที่ยงตรง โดยทำการฉีดแก๊สผสมมาตรฐานยี่ห้อ Supelco catalog no 501697 ซึ่งมีองค์ประกอบที่แน่นอนคือ คาร์บอนไดออกไซด์ 5.00% คาร์บอนมอนอกไซด์ 4.97% ไฮโดรเจน 4.04% มีเทน 3.99% เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากการทดลองว่ามีปริมาณเท่าใด

### 3.4.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.4.1 ตั้งอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส  
ณ ความดันบรรยากาศ

3.4.4.2 ตั้งอัตราการป้อนน้ำที่ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล

3.4.4.3 ป้อนน้ำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นจึงทำการป้อนไม้  
ยูคาลิปตัสเข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์เป็นปริมาณ 15 กรัม

3.4.4.4 ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์  
แก๊สจนกระทั่งปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เกิดขึ้นมีค่าคงที่

3.4.4.5 ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3  
ของนิกเกิล/โคบอลต์ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัม ตามลำดับ

3.4.4.6 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 650, 700, 750 และ  
800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.4.4.7 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 5,  
ร้อยละ 7 และร้อยละ 10 ของนิกเกิล/โคบอลต์ ปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัม ตามลำดับ

3.4.4.8 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวลเป็น  
0.05 และ 0.07 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล

### 3.4.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการฝังตัว (Impregnation)

3.4.5.1 เตรียมโคบอลต์จำนวน 30 กรัม นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศา-  
เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.5.2 เตรียมนิกเกิลจากนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel nitrate hexa-  
hydrate) ปริมาณ 4.46 กรัมสำหรับเตรียม ร้อยละ 3 ของนิกเกิล/โคบอลต์, 7.43 กรัมสำหรับเตรียม  
ร้อยละ 5 ของนิกเกิล/โคบอลต์, 10.40 กรัมสำหรับเตรียมร้อยละ 7 ของนิกเกิล/โคบอลต์ และ 14.86  
กรัมสำหรับเตรียมร้อยละ 10 ของนิกเกิล/โคบอลต์

3.4.5.3 นำนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรตละลายในน้ำบริสุทธิ์จนละลายเป็นเนื้อ  
เดียวกัน จากนั้นเทใส่ในบีกเกอร์ที่มีโคบอลต์ นำไปกวนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส  
จนแห้ง

3.4.5.4 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 1 คืน

3.4.5.5 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.4.5.6 นำไปรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันจากไม้ยูคาลิปตัสซึ่งเป็นชีวมวลที่หาได้ง่ายในประเทศไทย เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน แต่ในผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ยังมีแก๊สมีเทนและน้ำมันทาร์ปนอยู่จึงได้มีการศึกษาโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในการกำจัดแก๊สมีเทนและน้ำมันทาร์ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้คือนิกเกิล/โดโลไมต์ โดยนิกเกิลมีสมบัติในการรีฟอร์มมีเทนและโดโลไมต์มีสมบัติในการแตกตัวน้ำมันทาร์ ตัวแปรที่จะศึกษาคือร้อยละของนิกเกิล คุณสมบัติของการเกิดปฏิกิริยา อัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวล และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้วัตถุประสงค์เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ในปริมาณที่สูงขึ้น

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส โดยการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุตามวิธี ASTM E871, D1120, E872 ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ

| การวิเคราะห์แบบประมาณ<br>(Proximate Analysis) |        |
|---|--------|
| รายการวิเคราะห์                               | ร้อยละ |
| ความชื้น                                      | 8.00   |
| เถ้า  | 11.50  |
| สารระเหยได้                                   | 65.20  |
| คาร์บอนคงตัว                                  | 15.30  |

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบแยกธาตุ

| การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ<br>(Ultimate Analysis) |        |
|---|--------|
| รายการวิเคราะห์                               | ร้อยละ |
| C   | 38.96  |
| H   | 6.40   |
| N   | 0.23   |
| O   | 34.91  |
| ความชื้น                                      | 8.50   |
| เถ้า  | 11.50  |

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของไม้ยูคาลิปตัสพบค่าคาร์บอนคงตัวและสารระเหยได้ และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน แสดงว่าไม้ยูคาลิปตัสสามารถให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน เป็นองค์ประกอบ

#### 4.2. วิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์

เมื่อนำโดโลไมต์ที่มีสูตรทางเคมีคือ  $MgCO_3 \cdot CaCO_3$  (Calcium Magnesium Carbonate) ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบพบว่ามี CaO ร้อยละ 63.98 และ MgO ร้อยละ 35.48 โดยน้ำหนัก

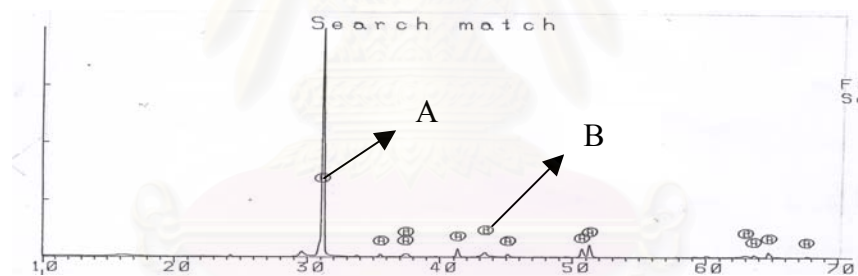
เมื่อนำไปทำการฝังตัว (Impregnation) กับนิกเกิลแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF พบว่าร้อยละของนิกเกิลที่คำนวณทางเคมีไม่เท่ากับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ดังตาราง 4.3



ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของนิกเกิลที่ได้จากการฝังตัว(Impregnation)

| คำนวณทางเคมี         | วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF |
|----------------------|--------------------------|
| ร้อยละ 3 ของนิกเกิล  | ร้อยละ 4.43 ของนิกเกิล   |
| ร้อยละ 5 ของนิกเกิล  | ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล   |
| ร้อยละ 7 ของนิกเกิล  | ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล   |
| ร้อยละ 10 ของนิกเกิล | ร้อยละ 13.71 ของนิกเกิล  |

เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เพื่อหาผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากทำการฝังตัว (Impregnation) หลังจากทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลึกเป็น NiO และ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  ดังรูปที่ 4.1



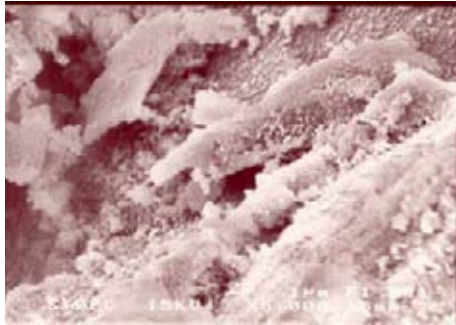
ร้อยละ 9.32ของนิกเกิล/โดโลไมต์

A คือ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$       B คือ NiO

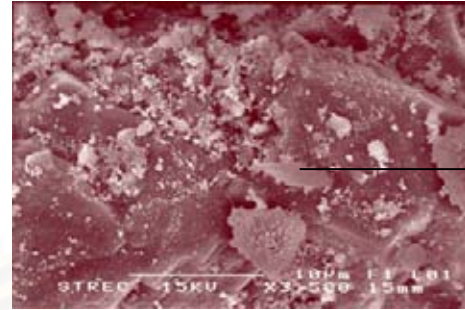
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ หลังจากทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละ 4.43 ของนิกเกิล/โดโลไมต์, ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล/โดโลไมต์, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ และ ร้อยละ 13.71 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ พบว่ามีผลึกของ NiO และโครงสร้างของ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  เหมือนกัน

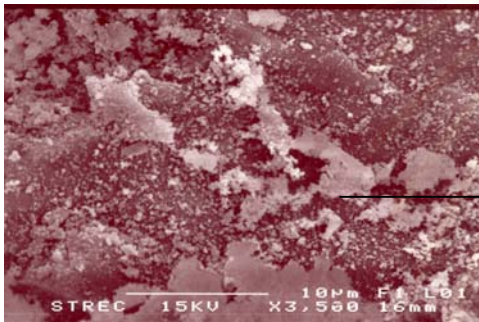
เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) จะพบว่านิกเกิลมีการกระจายมากขึ้นตามลำดับ ดังรูป 4.2



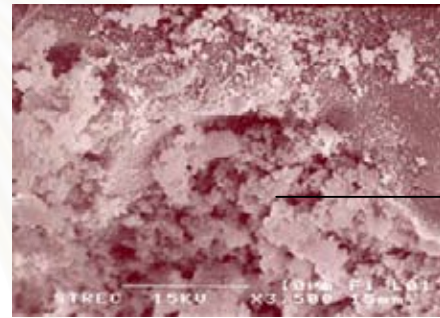
โดไลไมต์



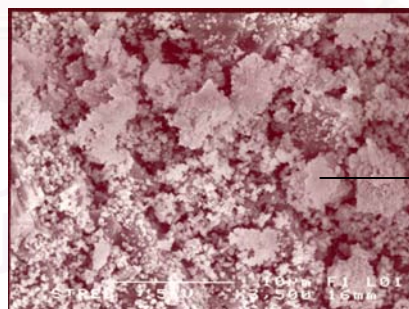
ร้อยละ 4.43 ของนิกเกิล/โดไลไมต์



ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล/โดไลไมต์



ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดไลไมต์



ร้อยละ 13.71 ของนิกเกิล/โดไลไมต์

รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูการกระจายของนิกเกิลของร้อยละ 4.43 ของนิกเกิล/โดไลไมต์, ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล/โดไลไมต์, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดไลไมต์ และ ร้อยละ 13.71 ของนิกเกิล/โดไลไมต์หลังจากทำการฝังตัว (Impregnation)

จากรูป 4.2 จะเห็นนิกเกิลเกาะที่ผิวของโดโลไมต์ได้อย่างชัดเจนและเมื่อเพิ่มร้อยละของนิกเกิล การกระจายตัวของนิกเกิลบนโดโลไมต์ปรากฏการกระจายอย่างที่ไม่มากขึ้น

ตารางที่ 4.4 แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ , ร้อยละ 4.43 ของนิกเกิล/โดโลไมต์, ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล/โดโลไมต์, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ และ ร้อยละ 13.71 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ ตามลำดับ โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี BET ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ BET ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer

| สารที่วิเคราะห์                  | BET (m <sup>2</sup> /g) |
|----------------------------------|-------------------------|
| โดโลไมต์                         | 1.35                    |
| ร้อยละ 4.43 ของนิกเกิล/โดโลไมต์  | 3.93                    |
| ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล/โดโลไมต์  | 2.93                    |
| ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์  | 3.64                    |
| ร้อยละ 13.71 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ | 3.95                    |

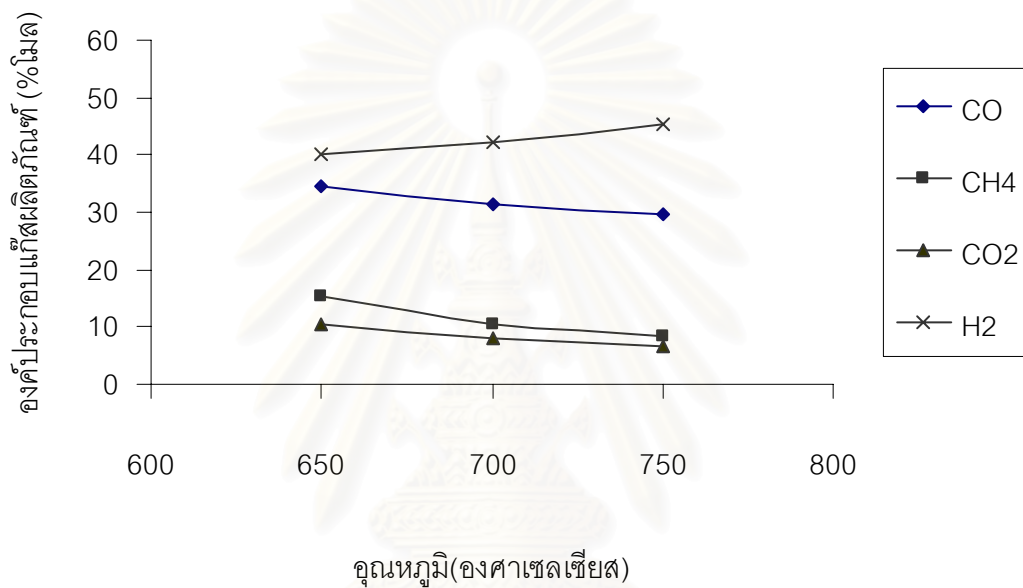
จากตารางที่ 4.4 พบว่านิกเกิล/โดโลไมต์มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกันและมีพื้นที่ผิวน้อยในระดับ 1-3 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งค่านี้เป็นพื้นที่ผิวภายนอกเป็นส่วนใหญ่ของโดโลไมต์

#### 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

การศึกษาผลของอุณหภูมิเริ่มต้นด้วยการป้อนไม้ยูคาลิปตัสเข้าเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณ 15 กรัม แล้วป้อนน้ำด้วยอัตราการป้อน 0.01, 0.03 และ 0.07 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล โดยทำการวัดปริมาณน้ำจากอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งจะวัดได้จาก peristaltic pump อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียส

4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

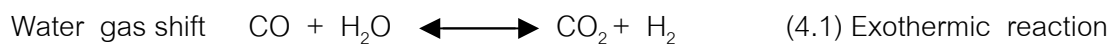
เมื่อทำการทดลองโดยการป้อนไม้ยูคาลิปตัสปริมาณ 15 กรัมที่อุณหภูมิ 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียสที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส จากรูป 4.3 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40.01 เป็น ร้อยละ 45.23 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 34.45 เป็น ร้อยละ 29.63 ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนมีค่าลดลง



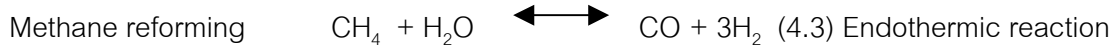
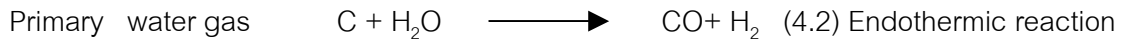
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม)

จากผลการทดลองสามารถอธิบายการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยา Water gas shift ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน แสดงดังต่อไปนี้



เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา Primary water gas, Steam reforming ซึ่งมีปฏิกิริยาดังนี้

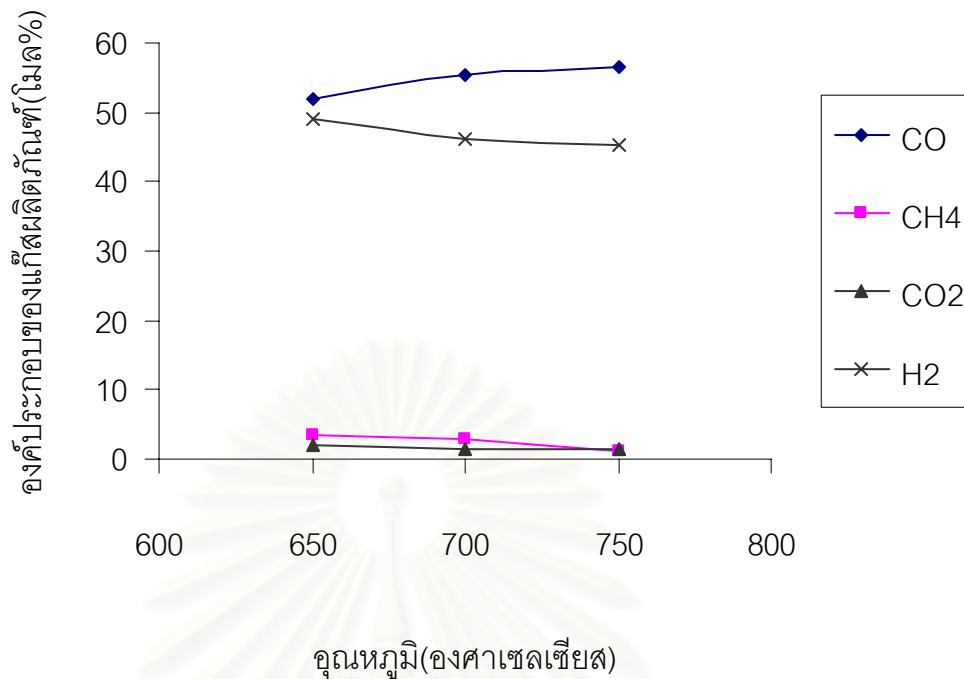


เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ร้อยละของแก๊สมีเทนมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Methane - Steam reforming ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้ได้แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

#### 4.3.2 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการทดลองโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคบอลต์ซึ่งร้อยละที่ใช้คือ 9.32 ปริมาณ 1 กรัมผสมกับไม้ยูคาลิปตัสปริมาณ 15 กรัมทำการป้อนที่อุณหภูมิ 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียสที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส จากรูป 4.4 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลงจากร้อยละ 49.12 เป็น ร้อยละ 45.36 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 51.94 เป็น ร้อยละ 56.45 ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด





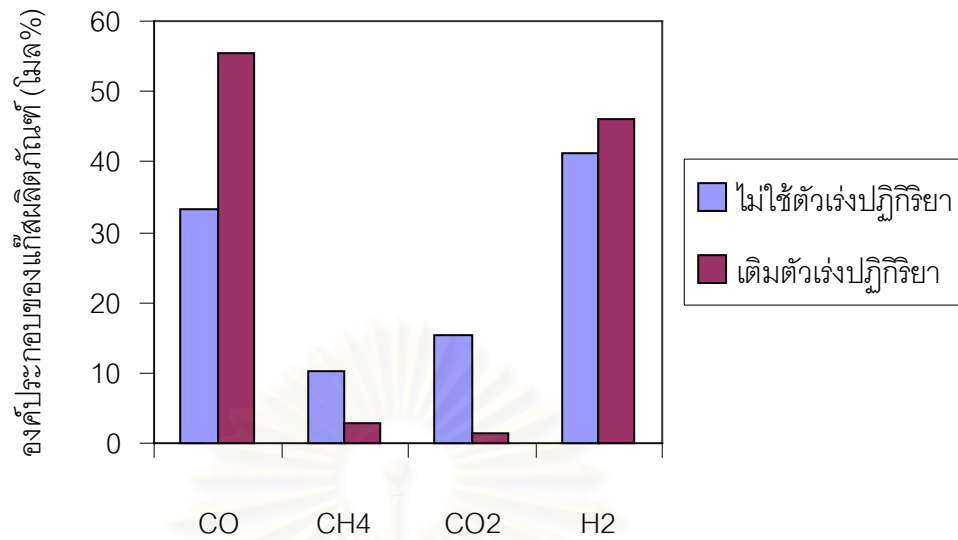
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาฬิกา/กรัม ของไม้ยูคาลิปตัสสำหรับร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ ไดโกลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแก๊สพีเคชันนี้คือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเพราะให้แนวโน้มของแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่

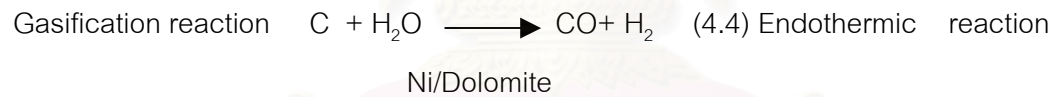
#### 4.3.3 เปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาฬิกา/กรัมของไม้ยูคาลิปตัสสำหรับร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ ไดโกลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15-กรัม-จากรูป 4.5 จะเห็นว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปพบว่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน นั่นคือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน มีค่าเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนมีค่าลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/ไดโกลไมต์เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาของน้ำกับคาร์บอนและการแตกตัวของทาร์และรีฟอร์มแก๊สมีเทนดังสมการ





รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัสสำหรับร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ โดโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม)



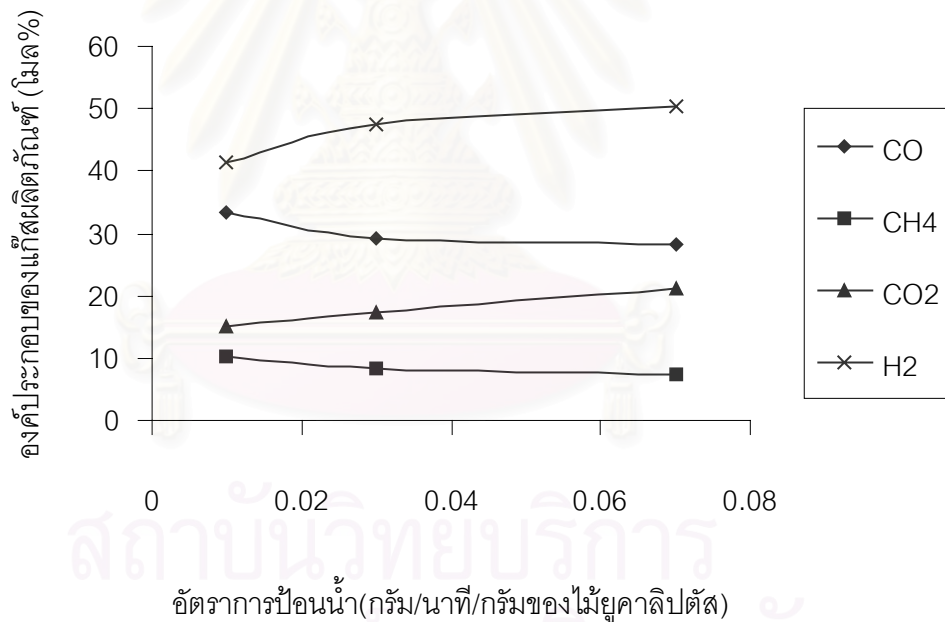
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเหมาะแก่การทำแก๊สซิฟิเคชัน จากนั้นทำการศึกษาผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สโดยเพิ่มจาก 0.01 เป็น 0.03 และ 0.07 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส

4.4.1 ผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการศึกษาผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากรูป 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจากร้อยละ 33.25 เป็น ร้อยละ 28.23 แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 41.29 เป็น ร้อยละ 50.23 ส่วน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น และแก๊สมีเทนลดลง

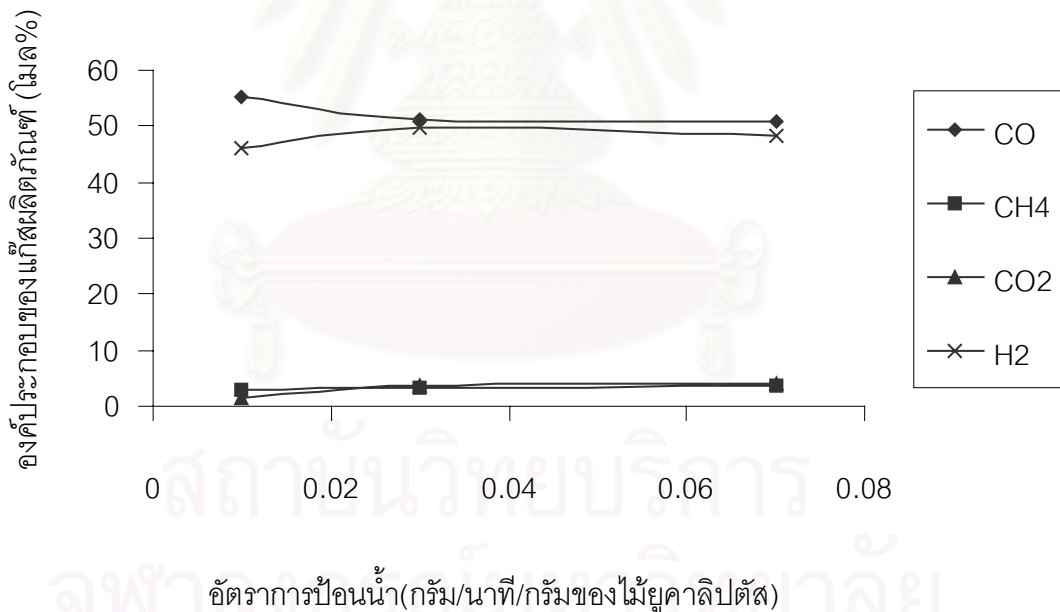


รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม)

จากการศึกษาผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อแก๊สผลิตภัณฑ์พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 0.01 เป็น 0.07 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส ร้อยละของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Water – gas shift และ ร้อยละของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา water gas shift เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ร้อยละของมีเทนลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Methane reforming

4.4.2 ผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ โดโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากรูป 4.7 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงจากร้อยละ 55.32 เป็น ร้อยละ 50.96 แก๊สไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 45.96 เป็น ร้อยละ 49.23 แก๊สมีเทนมีค่าลดลง ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากปฏิกิริยา Water gas shift เช่นกัน

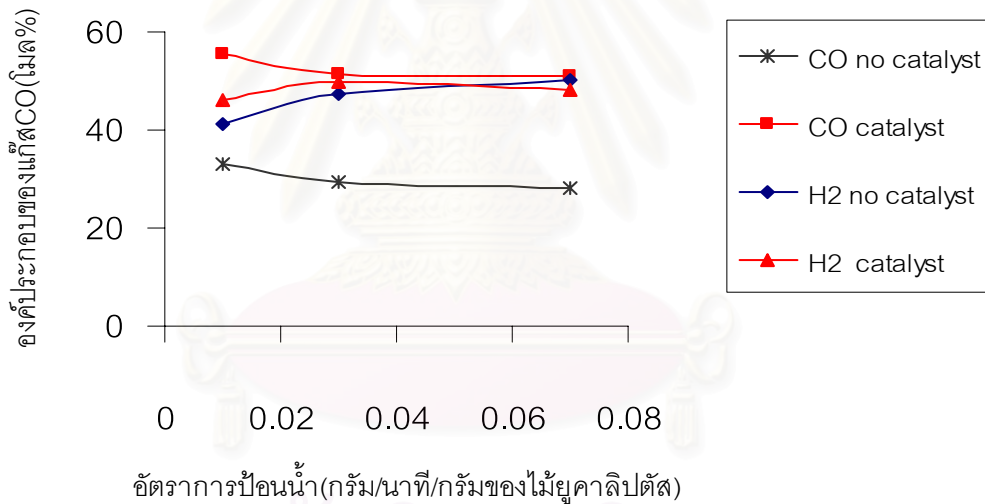


รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม)

จากการศึกษาพบว่า อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส เหมาะแก่ การทำแกซีฟิเคชันเนื่องจากให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกค่านี้มาทำการ ศึกษา

4.4.3 เปรียบเทียบผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สระหว่าง กรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ แก๊สเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคา ลิปตัส ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ ไดโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัม ปริมาณการ ป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัมเหมาะสมที่สุดในการทำแกซีฟิเคชันเนื่องจากให้ปริมาณแก๊สที่ต้องการ ซึ่งพบ ว่า หลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วปริมาณแก๊สสังเคราะห์มีค่าเพิ่มมากกว่าไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูป 4.8



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของอัตราการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01-0.07กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ปริมาณ 1 กรัม (ปริมาณการ ป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม) ระหว่างกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาผลของการป้อนน้ำที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สระหว่างกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า

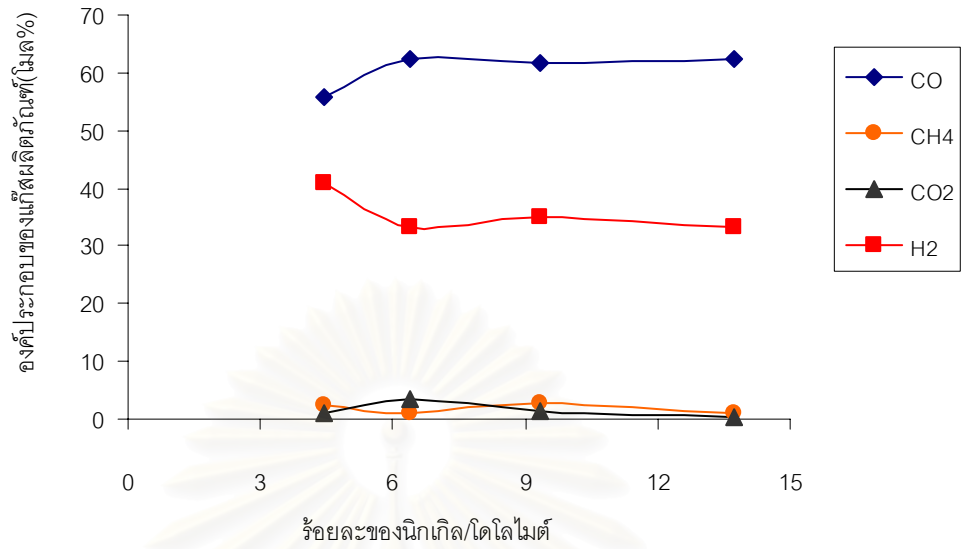
เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำ ร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยา Steam reforming แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำ ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยา Water – gas shift แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีค่าสูงกว่ากรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.5 ผลของร้อยละของนิกเกิล/โคโลไมต์ต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

เมื่อศึกษาผลของร้อยละของนิกเกิล/โคโลไมต์ต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์พบว่า เมื่อเพิ่มร้อยละของนิกเกิลจะทำให้องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณนิกเกิลจะทำให้บริเวณที่ถูกระตุ้น (Active site) มากขึ้น ส่งผลทำให้นิกเกิลออกไซด์สามารถรีดิวซ์ไปเป็นนิกเกิลในภาวะที่ถูกระตุ้น (Nickel active state) ได้มากขึ้น ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยา Steam reforming จะสูงขึ้น ทำให้ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันทาร์ได้สูงขึ้นอีกด้วย เนื่องจากน้ำมันทาร์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักเมื่อเกิดการแตกตัวทำให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จากรูป แสดงถึงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มร้อยละของนิกเกิล/โคโลไมต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



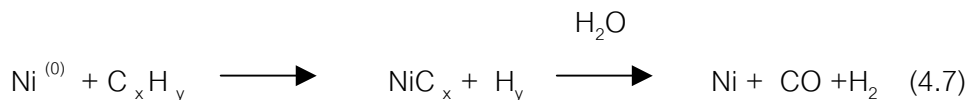
รูปที่ 4.9 ผลของร้อยละนิกเกิล/ไดโอดไมต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/ กรัมของไม้ยูคาลิปตัส (ปริมาณการป้อนยูคาลิปตัส 15 กรัม) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเพิ่มร้อยละของนิกเกิล/ไดโอดไมต์จาก 4.43, 6.41, 9.32 และ 13.71 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 45.62 เป็น ร้อยละ 55.23 เป็น จากนั้นคงที่ แก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40.69 เป็น ร้อยละ 35.23 จากนั้นคงที่ ส่วนแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง

เราสามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

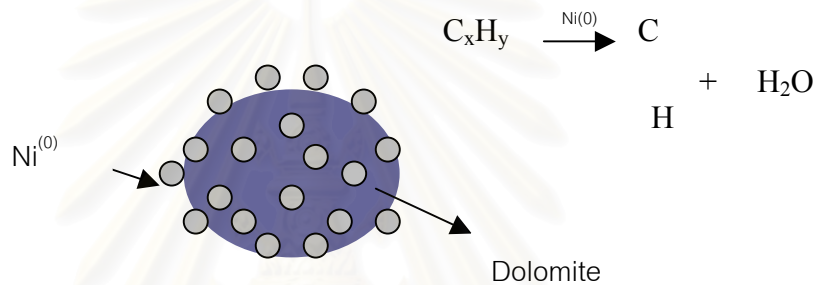


Reduce nickel





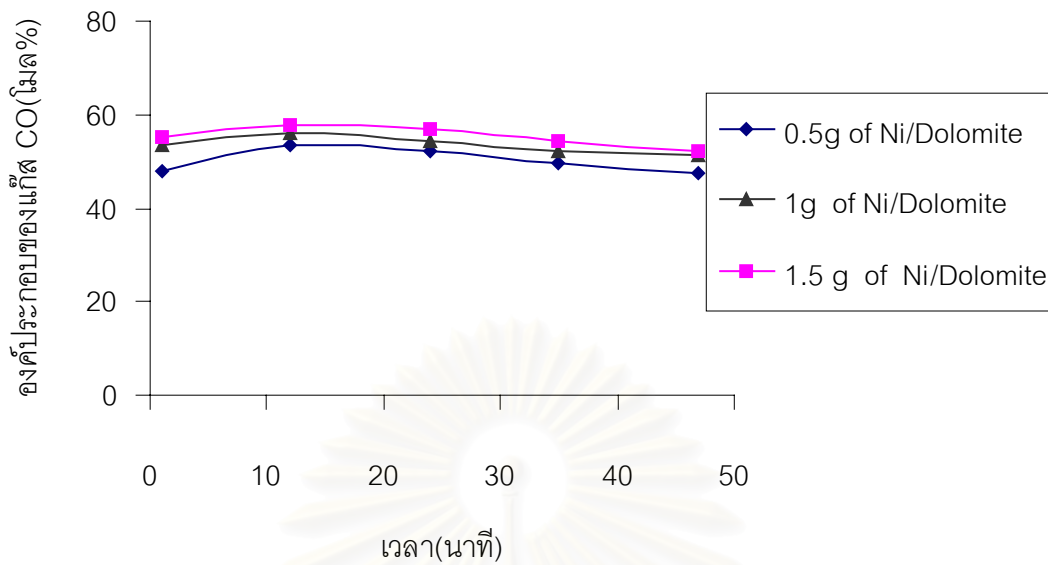
หลังจากที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ถูกรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน นิกเกิลจะอยู่ในรูปของ reduce nickel ดังสมการ 4.6 เมื่อทำการแกซีฟิเคชันไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนและไอน้ำดังรูป 4.10 Reduce nickel จะไปแตกตัวพวกไฮโดรคาร์บอนเป็นนิกเกิลคาร์ไบด์ ( $\text{NiC}_x$ ) กับไฮโดรเจนดังสมการ 4.7 หลังจากนั้นนิกเกิลคาร์ไบด์ ( $\text{NiC}_x$ ) ทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์จากผลดังกล่าวทำให้ได้แก๊สสังเคราะห์เพิ่มขึ้น



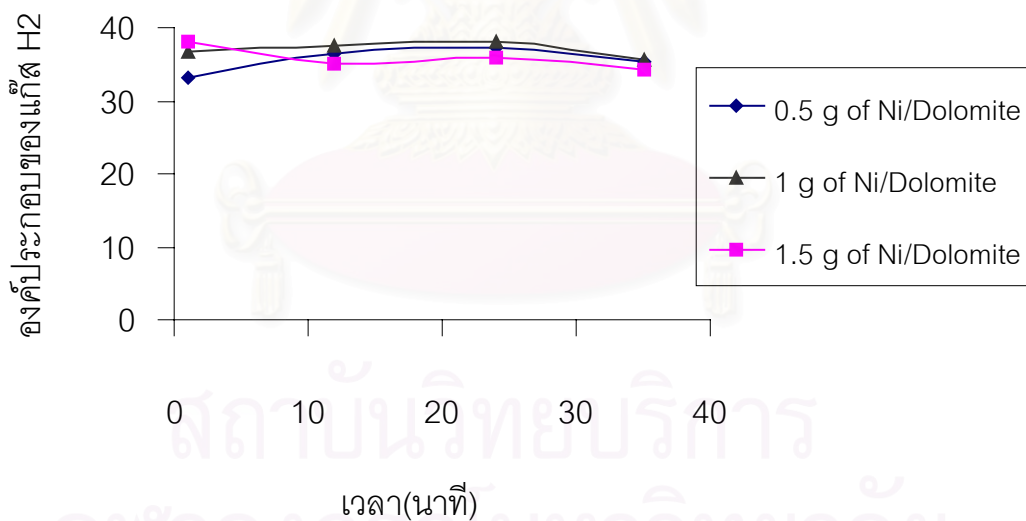
รูปที่ 4.10 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์กับไฮโดรคาร์บอน

#### 4.5 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์

เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์จาก 0.5 กรัม เป็น 1.0 และ 1.5 กรัม ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์ ในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่า ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์

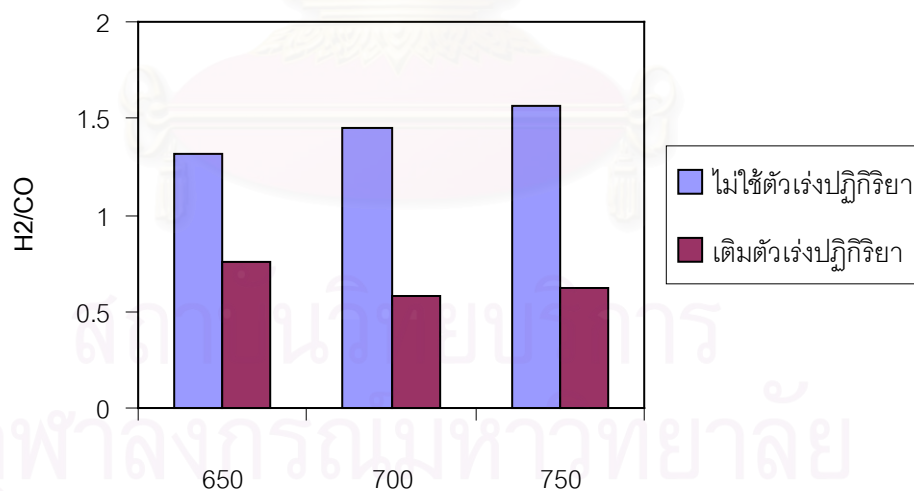


รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ต่อแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โดโลไมต์

จากรูปที่ 4.11 - 4.12 อธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ปริมาณ 0.5 กรัมต่อ ไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม ได้องค์ประกอบของไฮโดรเจนและคาร์บอน มอนอกไซด์น้อยที่สุดเนื่องจากการ สัมผัสของไฮโดรคาร์บอนที่ปลดปล่อยออกมาจากชีวมวลกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์มีค่าน้อย และที่ปริมาณ 1.5 กรัมต่อไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัมพบว่าองค์ประกอบของแก๊สทั้งสองที่ได้มีค่าใกล้เคียง กันเช่นกัน ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัมจึงถือว่าเหมาะสมเพราะจะเป็นการสิ้นเปลืองและถ้ามี ปริมาณมากไปอาจจะไปบังไอน้ำไม่ให้เกิดสัมผัสกับชีวมวลได้สะดวก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ ปริมาณ 1 กรัมจึงถูกเลือกมาทำการทดลอง

#### 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และ ตารางที่ 4.5 โดยทำการทดลองที่อัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวลที่ 0.01กรัม/นาที/กรัมของไม้ยูคา ลิปตัสร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ โคโลไมต์, ที่อุณหภูมิ 650-750 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของไฮโดรเจน ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง จาก 0.756 ถึง 0.624 กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังได้กล่าวมาแล้วถึงผล ของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ในกรณีที่ไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบแนวโน้มที่ตรงกัน ข้ามคืออัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีเพิ่มขึ้น 1.319 ถึง 1.563



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อัตราการ ป้อนน้ำต่อชีวมวลต่างๆ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส(ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างๆ ที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัสก่อนและหลังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวล0.01กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส |  |
|------------------------|---|--|
|                        | H <sub>2</sub> /CO ก่อนใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา                  | H <sub>2</sub> /CO หลังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา |
| 650                    | 1.319   | 0.756                                      |
| 700                    | 1.455   | 0.577                                      |
| 750                    | 1.563   | 0.624                                      |

#### 4.8 ผลของปริมาณน้ำมันทาร์หลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์

เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าในขวดทดลองที่ดักของเหลวมีน้ำมันทาร์หลังจากควบแน่น ปริมาณน้ำมันทาร์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะน้ำมันทาร์สามารถแตกตัวได้มากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น และหลังจากที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โคโลไมต์ที่เวลา 30 นาทีพบว่าไม่มีของเหลวในขวดทดลอง อาจเนื่องมาจากว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์สามารถแตกตัวน้ำมันทาร์ไปเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ทุกอุณหภูมิตามตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันทาร์ก่อนและหลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบปริมาณน้ำมันทาร์ก่อนและหลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราการป้อนน้ำ 0.01 กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัสอุณหภูมิ 650-750 องศาเซลเซียส ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ ไดโลไมต์ (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม) เวลา 30 นาที

| อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส) | ปริมาณน้ำ + ทาร์ก่อนเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) | ปริมาณน้ำ + ทาร์หลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) |
|------------------------|---|---|
| 650                    | 4.65  | -   |
| 700                    | 3.53  | -   |
| 750                    | 2.32  | -   |



ก่อนใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

หลังใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบน้ำมันทาร์ก่อนใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาและหลังใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.9 เปรียบเทียบผลงานวิจัยกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

|   | สารป้อน   | gasifying medium | ภาวะการทดลอง   | เครื่องปฏิกรณ์ | H <sub>2</sub> /CO           |
|---|---|------------------|--|----------------|------------------------------|
| S. Rapagna <sup>[12]</sup>              | Biomass<br>+ Dolomite                                       | Steam            | - T 660-830 °C<br>steam flow rate 0.3 g/h/g of biomass   | Fluidized bed  | 1.5                          |
| C. Franco <sup>[13]</sup>               | Pine  | Steam            | - T 800 °C<br>steam flow rate 0.60 g/min/g of biomass  | Fluidized bed  | 0.82                         |
| สุพัตรา ชีวธนา<br>คุปต์ <sup>[14]</sup> | Eucalyptus<br><br>Eucalyptus<br>+Dolomite<br><br>Eucalyptus | Steam            | - T 550 °C<br>steam flow rate 0.15 g/h/g of biomass<br><br>- T 550 °C<br>steam flow rate 0.15 g/h/g of biomass<br><br>-T 800 °C<br>steam flow rate 2.10 g/h/g of biomass | Fixed Bed      | 1.61<br><br>0.96<br><br>6.14 |
| S.T. Chaudhari <sup>[17]</sup>          | Biomass<br>Derived<br>Char                                  | Steam            | -T 650 °C<br>steam flow rate 2.5 g/hr/g of biomass<br><br>-T 800 °C<br>steam flow rate 2.5 g/h/g of biomass  | Fixed Bed      | 1.33<br><br>6                |
| งานวิจัยนี้                             | Eucalyptus<br>+<br>Ni/Dolomite                              | Steam            | T 700 °C<br>steam flow rate 0.15 g/h/g of biomass  | Fixed Bed      | 0.58                         |



จากตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในงานวิจัยนี้มีภาวะการทดลองคล้ายกับงานของของสุพัตรา ชีวธนาคุปต์ ซึ่งได้ทำการศึกษาแก๊สสังเคราะห์จากการทำแกซิฟิเคชันโดยใช้ไม้ยูคาลิปตัสได้ผลอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 1.612 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/ไดโลไมต์มาผสมกับไม้ยูคาลิปตัสในการทำแกซิฟิเคชันเพื่อศึกษาปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นพบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยได้ผลอัตราส่วน แก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่า 0.58 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของสุพัตรา ชีวธนาคุปต์, S. Rapagna, C. Franco และ S.T. Chaudhari งานวิจัยนี้มีการป้อนน้ำที่น้อยกว่ายอมก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าอัตราการป้อนน้ำที่สูงกว่าจึงทำให้งานวิจัยนี้ได้ค่าอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำกว่า



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยเรื่องแก๊สสังเคราะห์จากแกซีพีเคชั่นของยูคาลิปตัส สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของไม้ยูคาลิปตัส

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของไม้ยูคาลิปตัสพบค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 15.3 และสารระเหยได้ร้อยละ 65.20 และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีคาร์บอนร้อยละ 38.70 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.40 และออกซิเจนร้อยละ 34.91 แสดงว่าไม้ยูคาลิปตัสสามารถให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน เป็นองค์ประกอบ

##### 5.1.2 ผลขององค์ประกอบของนิกเกิล/ ไดโลไมต์

5.1.2.1 ที่ร้อยละ 4.43 ของนิกเกิล/ไดโลไมต์, ร้อยละ 6.41 ของนิกเกิล/ไดโลไมต์, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/ไดโลไมต์ และ ร้อยละ 13.71 ของนิกเกิล/ไดโลไมต์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับไดโลไมต์ พบว่าเมื่อทำการฝังตัว (Impregnation) แล้วค่า BET มีค่ามากกว่าไดโลไมต์ที่ไม่ได้ทำการฝังตัว

5.1.2.2 เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เพื่อหาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากทำการฝังตัว (Impregnation) ว่าหลังจากที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบเป็น  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  และ  $\text{NiO}$

##### 5.1.3 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแกซีพีเคชั่นนี้คือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/ไดโลไมต์ลงไป พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนมีค่าลดลง

##### 5.1.4 ผลของร้อยละนิกเกิล/ไดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

เมื่อเพิ่มร้อยละของนิกเกิล/ไดโลไมต์จาก 4.43 , 6.41, 9.32 และ 13.71 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 650, 700 และ 750 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจากนั้นคงที่ แก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกจากนั้นคงที่ เนื่องจากความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง

### 5.1.5 ผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำจาก 0.01 เป็น 0.03 และ 0.07 ตามลำดับ ร้อยละของนิกเกิล/โคโลไมต์ 9.32 แก๊สไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แก๊สมีเทนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่ามากขึ้นเช่นกัน

### 5.1.6 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์

เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์จาก 0.5 เป็น 1.0 และ 1.5 กรัมที่อุณหภูมิ องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ปริมาณ 0.5 กรัมต่อไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม ได้ปริมาณแก๊สน้อยที่สุดเนื่องจากการสัมผัสของไฮโดรคาร์บอนกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์มีค่าน้อยและที่ปริมาณ 1.5 กรัมต่อไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัมพบว่าปริมาณแก๊สที่ได้มีค่าใกล้เคียง 1 กรัมและถือว่าการสิ้นเปลืองเนื่องจากมีปริมาณมากไปและจะไปบังไอน้ำทำให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์น้อย

### 5.1.7 ผลของปริมาณน้ำมันทาร์หลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์

ไม่มีของเหลวในขวดทดลองและปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์สามารถแตกตัวน้ำมันทาร์ได้

### 5.1.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนที่มีต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

อัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวลที่ 0.01กรัม/นาที่/กรัมของไม้ยูคาลิปตัส, ร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โคโลไมต์, ที่อุณหภูมิ 650-750 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง นั่นคือ ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่ามากกว่าของไฮโดรเจน

5.1.9 สรุปได้ว่า ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือที่อัตราการป้อนน้ำต่อชีวมวล นั่นคือ 0.01กรัม/นาที่ต่อชีวมวลที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ร้อยละของนิกเกิล/โคโลไมต์ คือ 9.32 ปริมาณ 1 กรัม พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไม้ยูคาลิปตัสและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์ องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.75 เป็นร้อยละ 56.45และไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 41.23 เป็น ร้อยละ 45.26 อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่า 0.577

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 โคโลไมต์ก่อนที่นำมาทำการฝังตัวทำการเผาที่อุณหภูมิสูงก่อนแล้วนำมาเปรียบเทียบกับโคโลไมต์ที่อยู่ตามธรรมชาติ
- 5.2.2 หลังทำการฝังตัวลงเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเพื่อดูองค์ประกอบใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา

## รายการอ้างอิง

- (1) อภาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบในเบดนิ่ง.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2538.
- (2) พรทิพย์ แก้ววรรณนชัย. แบบจำลองของการแก๊สฟิเคชันจากถ่านไม้ในฟลูอิดเบด.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2534.
- (3) จิระศักดิ์ แสงพุ่ม. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ในฟลูอิดเบด.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2530.
- (4) Levenspiel O., Chemical Reaction Engineering. 2<sup>nd</sup> . Ed.Wiley & Sons. Inc1978;360-368.
- (5) Ronald F.Probstein and R. Edwin Hicks. Synthetic Fuels. USA:McGraw-Hill,1982.
- (6) Volkel H.K. Chemical Industrial, USA:McGraw-Hill,1979.
- (7) Jens Hagen. Industrial Catalyst. 1<sup>st</sup> edition. New York:Wiley-VCH,2000.
- (8) Charles N. Satterfield.Heterogeneous Catalysis in Practice.McGraw-Hill ,1980.
- (9) David Sutton,Brian Kelleher,Julian R.H. Ross. Review of Literature on Catalysts for Biomass Gasification. Fuel Processing Technology 73(2001)155-173.
- (10)Royal Forest Department. Eucalyptus Camaldulensis Dehn.[online].2000 Available from://[www.forest.go.th/Private/eucamal2.html](http://www.forest.go.th/Private/eucamal2.html)[2004, Feb 14]
- (11) แม้น อมรสิทธิ์และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ชวนพิมพ์,2534.
- (12) Rapagna S., Jand N., Foscolo P.U.,Catalytic Gasification of Biomass to Produce Hydrogen Rich Gas. Journal of Hydrogen Energy,Vol.23,No.7,pp.551-557,1998.
- (13) Franco C.,Pinto F.,Gulyurtlu I.,Cabrital . The Study of Reaction Influencing The Biomass Steam Gasification. Journal of Fuel 82(2003) 835-842.
- (14) สุพัตรา ชีวธนาคุปต์.แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สฟิเคชันของยูคาลิปตัส.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2546.

- (15) ชัยวัฒน์ ธาณีรัตน์. จลนพลศาสตร์ของการรีฟอร์ม มีเทน ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- (16) วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเสทเทอโรจีเนียส. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- (17) Chaudhari S.T., Bej S.K., Bakhshi N. N., Dalai A K., Steam gasification of biomass derived char for the production of carbon monoxide-rich synthesis gas. Energy and Fuels, 15(2001):736-742.
- (18) Di Blasi C., Signorelli G., Di Russo C., Rea G., Countercurrent fixed-bed gasification of biomass at laboratory. Chem. 38(1999):2571-2581.
- (19) Mohammad A., Kimio K., Keiichi T., Catalytic Gasification of biomass To Produce Synthesis Gas at Low Temperature. Journal of Fuel Chemistry Division Preprints.46(2001):405-407.
- (20) Michael L., Jack B., John P., William A., Product Yields and Kinetics from the Vapor Phase Cracking of Wood Pyrolysis Tars. Journal of AIChE.35(1989);120-128.
- (21) ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- (22) ทัศนัย บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- (23) จำลั กษณ์ ศรีนาค เรือง. Development of Ni/dolomite catalyst for tar gasification with steam. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

### วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เชื้อเพลิงใหม่

#### 1.วิเคราะห์แบบประมาณ ( Proximate Analysis )

##### 1.1วิเคราะห์ความชื้น ( Moisture analysis ) : ASTM E871

##### อุปกรณ์ที่ใช้

1. เตาอบ
2. ภาชนะสำหรับบรรจุตัวอย่างทดสอบซึ่งอาจทำจากแก้ว โลหะ หรือเซรามิค
3. เดสสิเคเตอร์ ( desiccators )

##### วิธีการทดสอบ

1. อบภาชนะที่อุณหภูมิ  $103\pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำภาชนะไปวางในเดสสิเคเตอร์จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักภาชนะโดยผลต่างไม่เกิน 0.02 กรัม บันทึกน้ำหนัก ( $W_c$ ) จากนั้นใส่ตัวอย่างประมาณ 50 กรัม ลงในภาชนะชั่งน้ำหนักตัวอย่างและภาชนะ โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น( $W_i$ )
2. อบภาชนะบรรจุตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $103\pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
3. นำภาชนะที่บรรจุตัวอย่างออกจากเตาอบ จากนั้นนำไปวางที่เดสสิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักโดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนัก
4. อบภาชนะที่บรรจุตัวอย่างอีกครั้งที่อุณหภูมิ  $103\pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำตามขั้นตอน 3
5. ทำตามขั้นตอน 4 จนกระทั่งน้ำหนักรวมมีค่าไม่เกิน 0.2% บันทึกน้ำหนักสุดท้าย ( $W_f$ )

##### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{Moisture\%} = 100[(W_i - W_f)/(W_i - W_c)]$$

เมื่อ  $W_c$  = น้ำหนักภาชนะ , กรัม

$W_i$  = น้ำหนักเริ่มต้น , กรัม

$W_f$  = น้ำหนักสุดท้าย , กรัม

## 1.2 วิเคราะห์สารระเหย (Volatile matter) : ASTM E872

### อุปกรณ์ที่ใช้

1. crucible พร้อมฝาปิด ซึ่งอาจเป็น platinum crucible หรือ nickel-chromium crucible
2. Vertical electric tube furnace

### วิธีการทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนัก crucible พร้อมฝาปิด โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนัก ( $W_c$ )
2. ใส่ตัวอย่างทดสอบประมาณ 1 กรัม ลงใน crucible จากนั้นปิดฝา แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น ( $W_i$ )
3. วาง crucible ลงใน wire support จากนั้นสอดเข้าไปใน furnace chamber ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ที่  $950 \pm 20$  องศาเซลเซียส วางกลางเตา ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการให้ความร้อน 7 นาที
4. นำ crucible ซึ่งยังปิดฝาย่อยออกจาก furnace นำ crucible ไปวางใน เดสสิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก crucible ซึ่งยังมีตัวอย่างบรรจุอยู่ โดยผลต่างไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักสุดท้าย ( $W_f$ )

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{Weight loss\%} = [(W_i - W_f) / (W_i - W_c)] 100 = A$$

เมื่อ  $W_c$  = น้ำหนักภาชนะ, กรัม

$W_i$  = น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม

$W_f$  = น้ำหนักสุดท้าย, กรัม

$$\text{Volatile matter ในตัวอย่าง\%} = A - B$$

เมื่อ  $A$  = weight loss %

$B$  = Moisture%

### 1.3 วิเคราะห์เถ้า (Ash) : ตามมาตรฐาน ASTM D1102

#### อุปกรณ์ที่ใช้

1. crucible พร้อมฝาปิด ซึ่งอาจจะเป็น platinum crucible หรือ porcelain crucible ก็ได้
2. Muffle Furnace
3. เตาอบ (Drying Oven)
4. ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 (425 ไมโครเมตร)

#### วิธีการทดสอบ

1. เเผา crucible พร้อมฝาปิดใน muffle furnace ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวางที่เดสลิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักโดยผลต่างไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนัก
2. ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะต้องผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 40 ก่อน จากนั้นชั่งน้ำหนัก crucible พร้อมตัวอย่างทดสอบ
3. อบ crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ขณะอบเปิดฝา crucible ออก)
4. หลังจากอบ 1 ชั่วโมง นำ crucible ออกจากเตาอบ (ขณะออกจากเตาอบเปิดฝา crucible) จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก
5. อบอีกครั้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จนกระทั่งน้ำหนักคงที่โดยผลต่างไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนัก
6. วาง crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างหลังอบในเตาเผา (เปิดฝา crucible ออก) อุณหภูมิในการเผา 580-600 ระวังอย่าให้อุณหภูมิสูงเกิน 600 องศาเซลเซียส
7. นำ crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างหลังอบในเตาเผา (เปิดฝา crucible) วางในเดสลิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาอีกครั้งเป็นเวลา 30 นาที วางในเดสลิเคเตอร์ นำไปชั่งน้ำหนัก จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ โดยผลต่างไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม

#### สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%Ash = W_1/W_2 \cdot 100$$

เมื่อ  $W_1$  = น้ำหนักเถ้า , กรัม

$W_2$  = น้ำหนัก oven – dry sample , กรัม

( Oven-dry sample = น้ำหนัก crucible ซึ่งบรรจุตัวอย่างหลังอบ-น้ำหนัก crucible)

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว =  $100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของเถ้า} - \text{ร้อยละของสารระเหย}$



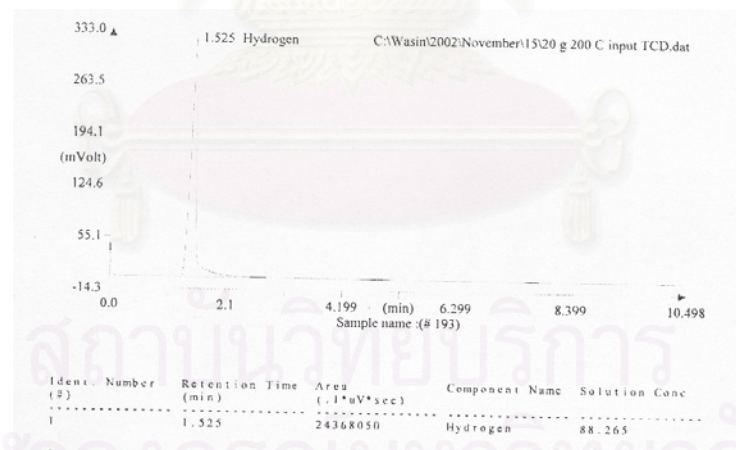
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

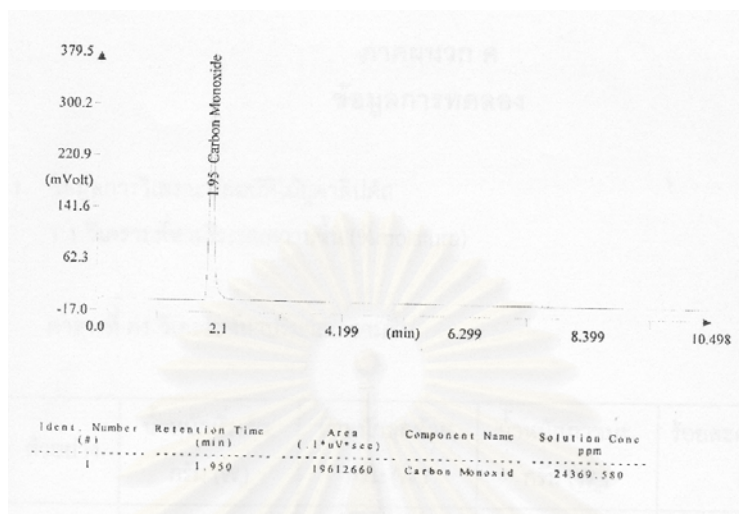
ภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ข1  
ตาราง ข1 แสดงภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส

|                                   |                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| แก๊สพา                            | ไนโตรเจน 99.99%                      |
| อุณหภูมิอินเจคเตอร์               | 70 องศาเซลเซียส                      |
| อุณหภูมิคอลัมน์                   | 40 องศาเซลเซียส                      |
| อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (TCD)<br>(FID) | 150 องศาเซลเซียส<br>250 องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิเมทาไนเซอร์               | 350 องศาเซลเซียส                     |
| คอลัมน์                           | พอร่าแพก เอ็น                        |
| อัตราการไหลของแก๊สพา              | 7 มิลลิลิตรต่ออนาที                  |

โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่สามารถที่จะคำนวณหาปริมาณสารว่ามีความเข้มข้นเท่าไร ได้โดยซึ่ง  
ผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข1 และ ข2



รูปที่ ข1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD



รูปที่ ๒2 แสดงผลการวิเคราะห์ห้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก ค**  
**ข้อมูลการทดลอง**

1. ข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติไม้ยูคาลิปตัส

1.1 วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (%moisture)

ตารางที่ ค1 วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น

| ตัวอย่าง | น้ำหนักเริ่มต้น,<br>กรัม ( $W_i$ ) | น้ำหนักสุดท้าย,<br>กรัม ( $W_f$ ) | น้ำหนักภาชนะ,<br>กรัม ( $W_c$ ) | ร้อยละความชื้น :<br>M |
|----------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1.       | 12.53                              | 12.46                             | 11.53                           | 7                     |
| 2.       | 12.47                              | 12.38                             | 11.47                           | 9                     |
|          |                                    |                                   | ค่าเฉลี่ย                       | 8                     |

1.2 วิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย (% Volatile Matter)

ตารางที่ ค2 วิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย

| ตัวอย่าง | น้ำหนักเริ่มต้น,<br>กรัม( $W_i$ ) | น้ำหนักสุดท้าย,<br>กรัม( $W_f$ ) | น้ำหนักภาชนะ,<br>กรัม( $W_c$ ) | weight loss% |
|----------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|
| 1.       | 21.79                             | 21.06                            | 20.79                          | 73.21        |
| 2.       | 21.82                             | 21.09                            | 20.82                          | 73.20        |
|          |                                   |                                  | ค่าเฉลี่ย                      | 73.205       |

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละสารระเหย} &= 73.201 - 8 \\ &= 65.201 \end{aligned}$$

### 1.3 วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (%Ash)

ตารางที่ ค3 วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า

| ตัวอย่าง | น้ำหนักเริ่มต้น,<br>กรัม(W <sub>i</sub> ) | น้ำหนักสุดท้าย,<br>กรัม(W <sub>f</sub> ) | น้ำหนักภาชนะ,<br>กรัม (W <sub>c</sub> ) | Ash%  |
|----------|---|--|---|-------|
| 1.       | 26.93                                     | 26.04                                    | 25.91                                   | 13%   |
| 2.       | 23.96                                     | 23.04                                    | 22.94                                   | 10%   |
|          |   |  | ค่าเฉลี่ย                               | 11.5% |

### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} &= 100 - 8 - 11.5 - 65.20 \\ &= 15.30 \end{aligned}$$

ตาราง ค4 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 650-750 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.01กรัม/นาที่/กรัมของชีวมวล ร้อยละ 9.316 ของนิกเกิล/โดโลไมต์

| อุณหภูมิ | ก่อนใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ |                 |                 |                | หลังใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ |                 |                 |                |
|----------|---|-----------------|-----------------|----------------|---|-----------------|-----------------|----------------|
|          | CO                                      | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | CO                                      | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
| 650      | 34.45                                   | 15.23           | 10.32           | 40.25          | 51.93                                   | 3.33            | 1.90            | 49.12          |
| 700      | 31.23                                   | 10.40           | 8.01            | 42.25          | 55.32                                   | 2.84            | 1.48            | 46.12          |
| 750      | 29.63                                   | 8.23            | 6.48            | 45.23          | 56.45                                   | 1.12            | 1.51            | 45.36          |

ตาราง ค5 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของร้อยละนิกเกิล/โคโลไมต์ต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.01กรัม/นาทีกกรัมของชีวมวล

| %นิกเกิล/โคโลไมต์ | CO    | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
|-------------------|-------|-----------------|-----------------|----------------|
| 4.427             | 55.62 | 2.38            | 1.15            | 40.82          |
| 6.405             | 62.25 | 1.26            | 3.37            | 33.19          |
| 9.316             | 61.65 | 2.84            | 1.48            | 35.02          |
| 13.71             | 62.38 | 1.05            | 0.27            | 33.49          |

ตาราง ค6 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนน้ำที่ 0.01กรัม/นาทีกกรัมของชีวมวล ร้อยละ9.32ของนิกเกิล/โคโลไมต์

| อัตราการป้อนไอน้ำ | ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา |                 |                 |                | เติมตัวเร่งปฏิกิริยา |                 |                 |                |
|-------------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------|
|                   | CO                     | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | CO                   | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
| 0.01              | 35.21                  | 8.69            | 15.21           | 40.89          | 55.45                | 1.22            | 1.01            | 45.26          |
| 0.03              | 30.17                  | 5.89            | 18.25           | 45.69          | 49.24                | 1.01            | 2.63            | 47.12          |
| 0.07              | 27.32                  | 4.12            | 19.81           | 48.75          | 50.08                | 1.04            | 2.65            | 46.23          |

ตาราง ค7 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยากับเวลาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนน้ำที่ 0.01กรัม/นาทีกกรัมของชีวมวลร้อยละ 9.32 ของนิกเกิล/โคโลไมต์

| เวลา(นาทีก) | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา(กรัม) |       |       |
|-------------|------------------------------|-------|-------|
|             | 0.5                          | 1     | 1.5   |
| 1           | 48.11                        | 53.3  | 55.23 |
| 12          | 53.29                        | 56.25 | 57.65 |
| 24          | 52.26                        | 54.24 | 56.71 |
| 35          | 49.66                        | 52.36 | 54.32 |

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนรรรตน์ เกตุคง เกิดเมื่อวันที่ 1 ตุลาคม พุทธศักราช 2523 จบการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตรในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิคในปี 2545 จนสำเร็จในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย