

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชี้เลี้ยงในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่



นายรติ แสงบุญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNGAS PRODUCTION FROM SAWDUST IN DUAL-BED GASIFIER



Mr. Rati Sangboon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

รติ แสงบุญ : การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชี้เส้อยในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่. (SYNGAS PRODUCTION FROM SAWDUST IN DUAL-BED GASIFIER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก : ผศ. ดร. ประพันธ์ คูชลธารา, 88 หน้า.

แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลที่มีความโดดเด่นและน่าสนใจ เพราะเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานโดยรวมของระบบสูง อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ยังมีค่าความร้อนที่ต่ำ เนื่องจากเตาผลิตแก๊สทั่วไปจะออกแบบให้การเผาไหม้และการผลิตแก๊สเกิดขึ้นพร้อมๆกัน และใช้อากาศในการเผาไหม้ ทำให้มีแก๊สไนโตรเจนที่เหลือจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ปนอยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊ส งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาเตาผลิตแก๊สแบบใหม่ให้สามารถผลิตแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงกว่าเตาผลิตแก๊สทั่วไป โดยใช้แนวคิดของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ ซึ่งมีการแยกส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊สออกจากกันอย่างชัดเจน ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จึงไม่ปะปนกับแก๊สที่เหลือจากการเผาไหม้ เตาผลิตแก๊สในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกเป็นเตาฟลูอิดไคซ์แบบพองอากาศทำหน้าที่เป็นส่วนเผาไหม้ ส่วนที่สองเป็นเตาแบบเบดเคลื่อนที่สองชั้นตอนทำหน้าที่เป็นส่วนผลิตแก๊ส ความร้อนที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ในส่วนแรกจะถูกถ่ายโอนไปยังส่วนที่สองเพื่อใช้ในการผลิตแก๊สโดยอาศัยทรายซึ่งไหลเวียนอยู่ในระบบเป็นวัสดุในการถ่ายโอนความร้อน ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยใช้ชี้เส้อยเป็นสารป้อนและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเตาผลิตแก๊สแบบใหม่ พบว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 31.14 คาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับร้อยละ 23.79 ในขณะที่สัดส่วนโดยปริมาตรของไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 2.87 โดยมีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊สเท่ากับร้อยละ 64.51 และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงความร้อนไปเป็นแก๊สร้อยละ 56.66 ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าความร้อน 12.52 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร จากผลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ในงานวิจัยนี้สามารถผลิตแก๊สที่มีคุณภาพสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง ทั้งยังใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากแก๊สได้อีกด้วย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....
ปีการศึกษา.....2553.....

ลายมือชื่อนิสิต.....รติ แสงบุญ.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5172414523: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS: GASIFICATION / SAWDUST / DUAL-BED GASIFIER

RATI SANGBOON: SYNGAS PRODUCTION FROM SAWDUST IN DUAL-BED GASIFIER. THESIS ADVISOR: ASST.PROF.PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 88 pp.

Gasification, the important and promising technologies for biomass conversion, can provide a high overall thermal efficiency. Conventional gasification typically employs a partial oxidation process using air. However, the calorific value of product gas is relatively low because of the dilution of product gas by nitrogen in air. The aim of this study is to develop a new gasifier based on a concept of separation of combustion zone and gasification zone to increase the calorific value of the product gas. The new gasifier, dual-bed gasifier (DBG), consists of bubbling fluidized bed and a two-stage moving bed reactor. The former served as a combustor to provide the energy for endothermic gasification reactions in gasification zone while the latter served as a gasifier to produce syngas. Sawdust was used as feedstock in this study. The hydrogen content of 31.14 vol %, carbon monoxide content of 23.79 vol % and the nitrogen content of 2.87 vol % could be obtained by using S/C ratio of 1 at 700 °C without using catalyst. The high hydrogen yield and extremely low nitrogen yield lead to considerably high heating value (12.52 MJ/Nm³) of product gas. Carbon conversion into gas is 64.51% and cold gas efficiency is 56.66%. The result verifies that this new gasifier, DBG, can produce high quality of product gas that can be use as direct fuel or be subjected to gas to liquid processes for synthesis of liquid fuels.

Department : Chemical Technology Student's Signature : *Rati Sangboon*
Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature : *Prapan Kuchonthara*
Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมารวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ของศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และทุนอุดหนุนงานวิจัยในโครงการวิจัยร่วมคณะวิทยาศาสตร์กับสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ดร.สุชาติ บุตรนาค กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณนายประจักษ์ ทรัพย์อุดมมากและเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทดลองและห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย | 2 |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ชีวมวล..... | 4 |
| 2.2 ชี๊เลี้ยง..... | 7 |
| 2.3 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวล..... | 7 |
| 2.4 กระบวนการแกซีฟิเคชัน..... | 9 |
| 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส..... | 16 |
| 2.6 ชนิดของเตาปฏิกรณ์ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน..... | 18 |
| 2.7 การกำจัดน้ำมันทาร์..... | 26 |
| 2.8 ตัวอย่างระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง..... | 30 |
| 2.9 การผลิตเมทานอล..... | 36 |
| 2.10 การผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์..... | 37 |
| 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 39 |
| 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง..... | 36 |
| 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... | 41 |
| 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี..... | 43 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.3 วิธีการทดลอง..... | 44 |
| 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 47 |
| 4.1 ผลการดำเนินการสร้างและทดสอบเตาผลิตแก๊สแบบใหม่..... | 47 |
| 4.2 ผลการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากซีลีเนียมในเตาผลิตแก๊สแบบใหม่..... | 61 |
| 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ..... | 73 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 73 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 74 |
| รายการอ้างอิง..... | 75 |
| ภาคผนวก..... | 77 |
| ภาคผนวก ก..... | 78 |
| ภาคผนวก ข..... | 81 |
| ภาคผนวก ค..... | 83 |
| ภาคผนวก ง..... | 86 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 88 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและน้ำมันทาร์ของอุปกรณ์ดักจับน้ำมันแบบต่างๆ..... | 28 |
| 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... | 39 |
| 4.1 ผลการทดสอบเตาผลิตแก๊สที่ภาวะอุณหภูมิห้อง..... | 60 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)..... | 61 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แยกธาตุ (ultimate analysis)..... | 61 |
| 4.4 สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์..... | 62 |
| 4.5 ข้อมูลผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองผลิตแก๊ส..... | 65 |
| 4.6 องค์ประกอบและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากเตาผลิตแก๊สทั้งสามแบบ..... | 66 |
| 5.1 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่ทั้งที่ไม่ใช้ตัวเร่งและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 73 |
| ง1 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.5..... | 86 |
| ง2 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1..... | 86 |
| ง3 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.5..... | 87 |
| ง4 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซิฟิเคชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา..... | 87 |

สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล..... | 5 |
| 2.2 กระบวนการแปรรูปเชิงเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้..... | 8 |
| 2.3 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและการนำไปใช้ประโยชน์..... | 9 |
| 2.4 ขั้นตอนของกระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน..... | 10 |
| 2.5 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์แก๊ซิฟิเคชัน..... | 12 |
| 2.6 โชนกการเกิดแก๊สตามปฏิกิริยาทางเคมี และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตา... | 15 |
| 2.7 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น..... | 19 |
| 2.8 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง..... | 20 |
| 2.9 ลักษณะคอคอดและการจ่ายลมของเตาแบบไหลลง..... | 21 |
| 2.10 บริเวณการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ..... | 22 |
| 2.11 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง..... | 24 |
| 2.12 เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์..... | 24 |
| 2.13 เตาแบบฟลูอิไดซ์ชนิดหมุนวน..... | 25 |
| 2.14 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Lurgi..... | 30 |
| 2.15 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Imbert..... | 31 |
| 2.16 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบปรับปรุงจาก Imbert..... | 31 |
| 2.17 ระบบผลิตเชื้อเพลิงแก๊สในประเทศจีน..... | 32 |
| 2.18 ระบบผลิตแก๊สแบบอากาศอุณหภูมิสูง (MEET gasification system)..... | 33 |
| 2.19 เตาผลิตแก๊สแบบอากาศอุณหภูมิสูง (MEET gasifier)..... | 33 |
| 2.20 เตาผลิตแก๊สแบบหลายขั้นตอน..... | 34 |
| 2.21 ระบบผลิตแก๊สแบบผสม..... | 34 |
| 2.22 เตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่ SilvaGas..... | 35 |
| 2.23 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ FICFB..... | 36 |
| 2.24 การสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว..... | 38 |
| 3.1 เตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่..... | 41 |
| 3.2 เครื่องคัดขนาด..... | 42 |
| 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... | 43 |
| 4.1 หัวเผา..... | 48 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|------|
| 4.2 | 49 |
| 4.3 | 50 |
| 4.4 | 51 |
| 4.5 | 51 |
| 4.6 | 52 |
| 4.7 | 53 |
| 4.8 | 53 |
| 4.9 | 54 |
| 4.10 | 55 |
| 4.11 | 56 |
| 4.12 | 56 |
| 4.13 | 57 |
| 4.14 | 58 |
| 4.15 | 58 |
| 4.16 | 59 |
| 4.17 | 59 |
| 4.18 | 60 |
| 4.19 | 63 |
| 4.20 | 64 |
| 4.21 | 64 |
| 4.22 | 66 |
| 4.23 | 67 |
| 4.24 | 67 |

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.25 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีต่อปริมาณแก๊สจากการดำเนินการที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส..... | 69 |
| 4.26 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สจากการดำเนินการที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส..... | 69 |
| 4.27 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1..... | 70 |
| 4.28 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สแต่ละชนิดที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1..... | 71 |
| 4.29 ผลการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนจากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1..... | 72 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันโลกกำลังเผชิญวิกฤตปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง อันเกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ประเทศไทยก็เป็นอีกประเทศหนึ่งที่พึ่งพาการนำเข้าวัตถุดิบดังกล่าวในปริมาณที่สูงมากจนมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจ และกลายเป็นปัญหารุนแรงของสังคม ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการนำเอาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนในด้านต่างๆ มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานจากผลพลอยได้ของพืชและสัตว์ที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งภาครัฐ เอกชน และรัฐวิสาหกิจ โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เหมาะสมกับการพัฒนาการใช้พืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง และปาล์มน้ำมัน เป็นต้น มาผลิตเป็นพลังงานทดแทน เพื่อรองรับสถานการณ์การขาดแคลนพลังงานในอนาคต อีกทั้งเกษตรกรยังมีรายได้เพิ่มเติมจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ปัจจุบันรัฐบาลจึงให้ความสำคัญต่อการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทดแทนมากขึ้น อย่างไรก็ตามชีวมวลส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแข็งทำให้การใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในกระบวนการเผาไหม้มีประสิทธิภาพต่ำ การแปรรูปขั้นต้นจึงมีความสำคัญ มีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการใช้ชีวมวลอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) การผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquefaction) และแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยเฉพาะแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นกระบวนการในการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถให้รายละเอียดการเปลี่ยนรวมทั้งประสิทธิภาพเชิงพลังงานโดยรวมของระบบสูง นอกจากนี้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง และสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากแก๊ส หรือ Gas to Liquid (GTL) ซึ่งจะทำให้ค่าการเลือกเกิด (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่ากระบวนการ Liquefaction โดยสามารถควบคุมชนิดของผลิตภัณฑ์จากสมบัติของแก๊สป้อน ภาวะดำเนินการ และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่เลือกใช้

โครงการวิจัยนี้มุ่งพัฒนาเตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่ที่ให้องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์สูง โดยการลดปริมาณไนโตรเจนที่ปนอยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊ส และให้ประสิทธิภาพการแตกตัวทาร์ที่ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาเตาผลิตแก๊สแบบใหม่โดยใช้แนวคิดของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่อเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงกว่าเตาผลิตแก๊สแบบเดิม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่โดยใช้แนวคิดของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่อ
2. ทดสอบและประเมินสมรรถนะของเตาผลิตแก๊ส
3. วิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เตาผลิตแก๊สที่ผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลที่มีคุณภาพดี
2. ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนต่ำมากและมีค่าความร้อนสูงขึ้นซึ่งสามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. องค์ความรู้ในการพัฒนาและออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่อ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบใหม่
2. ดำเนินการสร้างเตาผลิตแก๊สแบบใหม่
3. ทดสอบเตาผลิตแก๊สแบบใหม่ที่ภาวะอุณหภูมิห้อง
 - 3.1 ตรวจสอบการไหลเวียนของอากาศและทรายในเตา
 - 3.2 ตรวจสอบระบบควบคุมการป้อนลม
 - 3.3 ตรวจสอบระบบการป้อนเชื้อเพลิง
 - 3.4 ตรวจสอบระบบการป้อนกลับทราย

4. จัดสร้างอุปกรณ์อื่นๆ ของระบบผลิตแก๊ส
 - 4.1 ติดตั้งชุดทำความสะอาดแก๊ส
 - 4.2 ติดตั้งชุดควบคุมและอุปกรณ์วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ
5. ทดสอบระบบผลิตแก๊สแบบใหม่โดยใช้ซีล้อยเป็นสารป้อน
6. เก็บและวิเคราะห์ผลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้
7. ทดสอบระบบผลิตแก๊สเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
8. เก็บและวิเคราะห์ผลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
9. วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

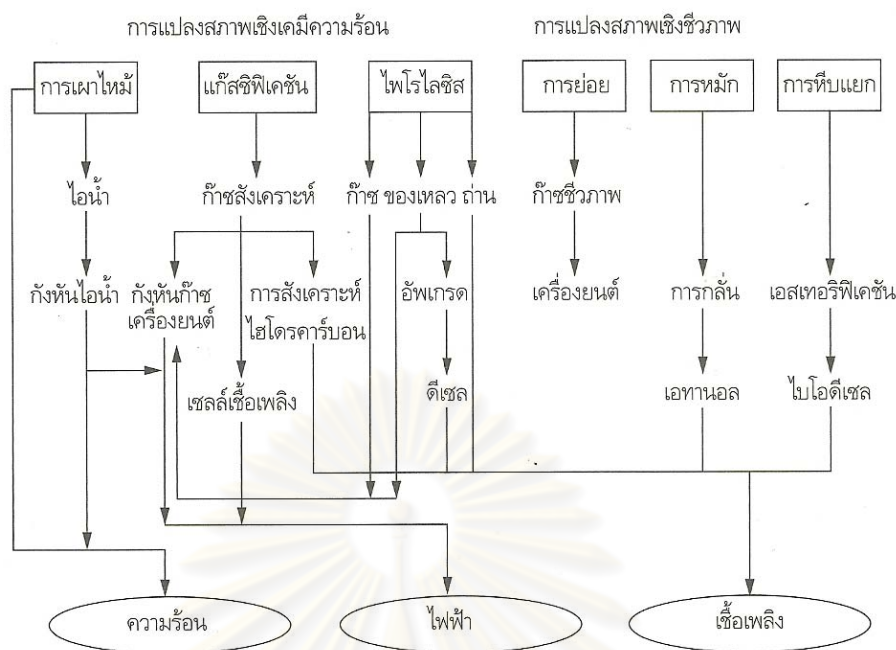
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจึงมีรายได้เพิ่มเติมจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณแก๊สที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่งหรือการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาและการขนส่งชีวมวลมีความยาก รวมถึงมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อย จะมีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาระบบและวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงมีความสำคัญและจำเป็นมาก



รูปที่ 2.1 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล (ที่มา นคร ทิพย์วงศ์, 2552)

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อยในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรตหรือเซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมาย ทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักในรูปแบบอื่นๆ โดยทั่วไปชีวมวลอาจจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ ชีวมวลแบบไม้ (woody) แบบไม่ใช่ไม้ (non woody) และของเสียจากสัตว์ ซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

- ผลผลิตจากป่า ไร่ นา สวน ต้นไม้ และวัชพืชต่างๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากสวนเม็ด เปลือก ผล และจากมวลสำหรับรายพืชน้ำ เป็นต้น
- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน แกลบ ฟาง ชานอ้อย เหง้ามัน ชังข้าวโพด ทะลายปาล์ม
- เศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการและการประกอบการของภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เถ้า กลีเซอริน ส่วเหล้า กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูป ของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม
- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
- ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น ไนมัน มูลสัตว์ เป็นต้น

แหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิที่ชัดเจน ได้แก่ ไม้พืน ซึ่งมีความสะดวกในการใช้และมีการใช้กันมากอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในชนบท ในเขตเมืองก็มีการใช้ไม้พืนในอุตสาหกรรมและโรงงานขนาดเล็ก แหล่งที่มาของไม้พืนเหล่านี้หาได้ตามป่าไม้ พืนที่รกร้าง ป่าปลูก และต้นไม้ตามหัวไร่ปลายนา หรือในสวน ซึ่งจะเป็นส่วนลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ หรือบางครั้งอาจรวมถึงโคนและรากด้วย ในพื้นที่ที่ค่อนข้างอุดมสมบูรณ์ แหล่งไม้พืนจะหาได้จากการเก็บ ตัด พืน ไม้แห้งๆ ที่ตายแล้ว ในบางพื้นที่ที่มีจำกัดอาจจะได้จากการตัดโค่นไม้สดมาเลย

แหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิได้จาก ชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เศษกากจากกระบวนการในโรงงาน ชีวมวลจากสัตว์เลี้ยง หรือชีวมวลที่ผ่านกระบวนการการแปรรูปมาแล้ว เศษกากวัสดุที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น กากมันสำปะหลังและส่าเหล้า เพราะมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 80-90 บางชนิดต้องนำมาย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น

แหล่งผลิตชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทยมีดังนี้

- แกลบจากโรงสีข้าว
- กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล
- กากปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
- เศษไม้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา สวนยางพารา และโรงงานผลิตไม้อัด
- ชังข้าวโพดจากการแยกเมล็ดข้าวโพดออก ซึ่งกระจายอยู่ตามไร่ข้าวโพด
- กาบมะพร้าวจากสวนมะพร้าว ร้านขายส่งลูกมะพร้าว และโรงงานแปรรูปเนื้อมะพร้าว
- ส่าเหล้าจากโรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์
- กากมันสำปะหลังจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง

ข้อจำกัดในการใช้กากชีวมวลเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิง

1. ความหนาแน่นต่ำ ปริมาตรมาก และขนย้ายได้ยาก ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการขนส่งไปไกลจากสถานที่ผลิต
2. การนำเศษวัสดุทางการเกษตรออกไปจากพื้นที่การเกษตรจำนวนมาก ทำให้สารอาหารในดินลดลง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรในพื้นที่นั้นในอนาคต

3. เศษวัสดุที่เหลือจากการเกษตรเหล่านี้จะมีเฉพาะในฤดูกาลที่มีการผลิต ในช่วงเวลาอื่นของปีจะไม่มี หากต้องการมีไว้ใช้ตลอดปีจำเป็นต้องมีสถานที่เก็บรักษาขนาดใหญ่ซึ่งมีราคาแพง และอาจเกิดปัญหาในการจัดการได้

ชีวมวลจากสัตว์ที่สำคัญได้จากของเสียหรือมูลสัตว์ ซึ่งถ้าทำให้แห้งแล้วจะมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับไม้ฟืน พลังงานนี้อาจได้จากการเผาไหม้โดยตรงหรือนำไปหมักให้เกิดแก๊สชีวภาพตามปกติแล้วมูลสัตว์ไม่ใช่ทางเลือกแรกๆ หรือเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญเท่าไรนัก ผู้คนจะหันมาสนใจใช้มูลสัตว์ก็ต่อเมื่อไม้ฟืนหรือแหล่งชีวมวลอื่นๆ หาได้ยาก เช่น ในประเทศอินเดีย

2.2 ชี้อ้อย

ชี้อ้อย คือ เศษไม้จากการตัดหรือเลื่อยไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ ชี้อ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ทำปุ๋ยชีวภาพผสมดินช่วยให้ดินร่วนซุย รองพื้นเล้าไก่ เพาะเห็ด ทำเป็นผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ ปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่นำชี้อ้อยไปผสมกับพอลิเมอร์ผลิตเป็นวัสดุทดแทนไม้ นอกจากนี้ชี้อ้อยยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้แต่ประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างต่ำ จึงมีการนำชี้อ้อยไปแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งเพื่อใช้หุงต้ม หรือนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊สโดยผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชันซึ่งเป็นที่ยอมรับเพราะชี้อ้อยมีสัดส่วนของซีเถ้าในปริมาณน้อย ทั้งยังไม่ต้องเสียเวลาในการย่อยอีกด้วย

2.3 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวล

มีชีวมวลเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้โดยตรงตามลักษณะสภาพเดิมเพื่อให้ได้พลังงานออกมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น ไม้ฟืน ในขณะที่ชีวมวลส่วนใหญ่อาจจำเป็นต้องแปรสภาพก่อนนำไปใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวลสดจะมีลักษณะที่ด้อยกว่าดังต่อไปนี้

- ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่า
- ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูง เป็นอุปสรรคในการเก็บรักษา ส่งผลให้เป็นอุปสรรคในการเผาไหม้ เกิดการสูญเสียความร้อนและเกิดมลพิษสูง
- ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ มีความจำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก และต้องใช้อุปกรณ์ในการจัดการ การเก็บรักษา การขนส่ง และการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่

- รูปแบบกายภาพไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว ไม่สะดวกต่อการขนถ่าย ตรวจวัด หรือ ป้อนเข้า

โดยทั่วไปวัตถุประสงค์หลักของการแปรสภาพชีวมวลคือ เพื่อลดปริมาณความชื้นซึ่งจะส่งผลให้เพิ่มค่าความร้อนและมีความสะดวกในการเก็บรักษา และปรับปรุงคุณลักษณะของชีวมวลเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิม การแปรสภาพชีวมวลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันนั้น สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

1. กระบวนการแปรรูปเชิงกายภาพ (physical conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง (densification) การคัดแยกเฉพาะส่วน และการสกัดน้ำมัน (oil extraction)
2. กระบวนการแปรรูปเชิงชีวเคมี (biochemical conversion) ใช้กิจกรรมของจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยยับอากาศเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ และกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล
3. กระบวนการแปรรูปเชิงเคมีความร้อน (thermo chemical conversion) โดยกระบวนการนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก คือ การเผาไหม้ ไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการสังเคราะห์เมทานอล



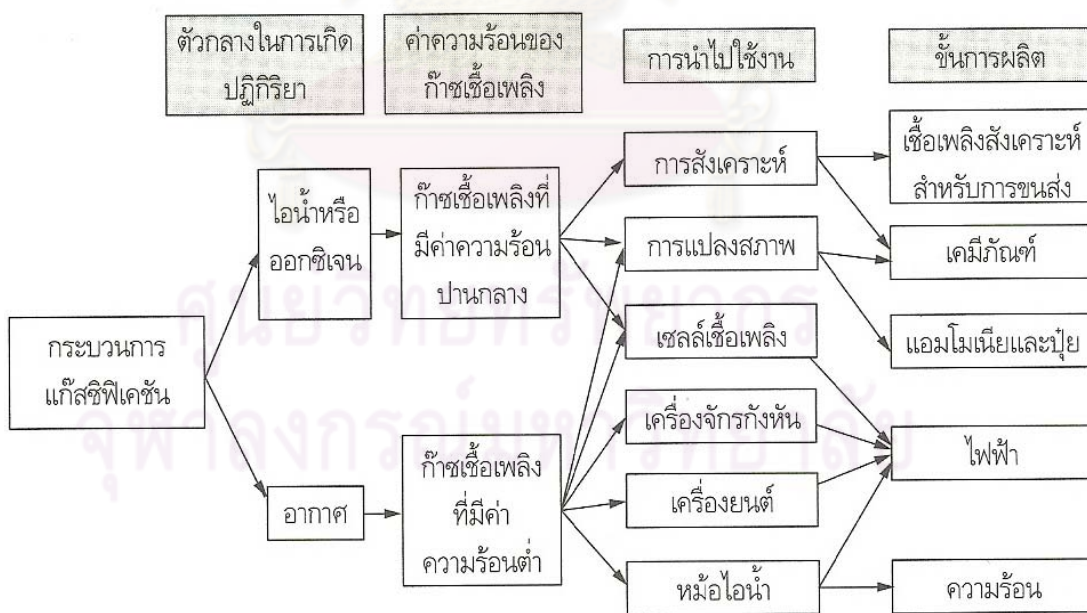
รูปที่ 2.2 กระบวนการแปรรูปเชิงเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้
(ที่มา นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้และวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2

2.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

2.4.1 นิยาม

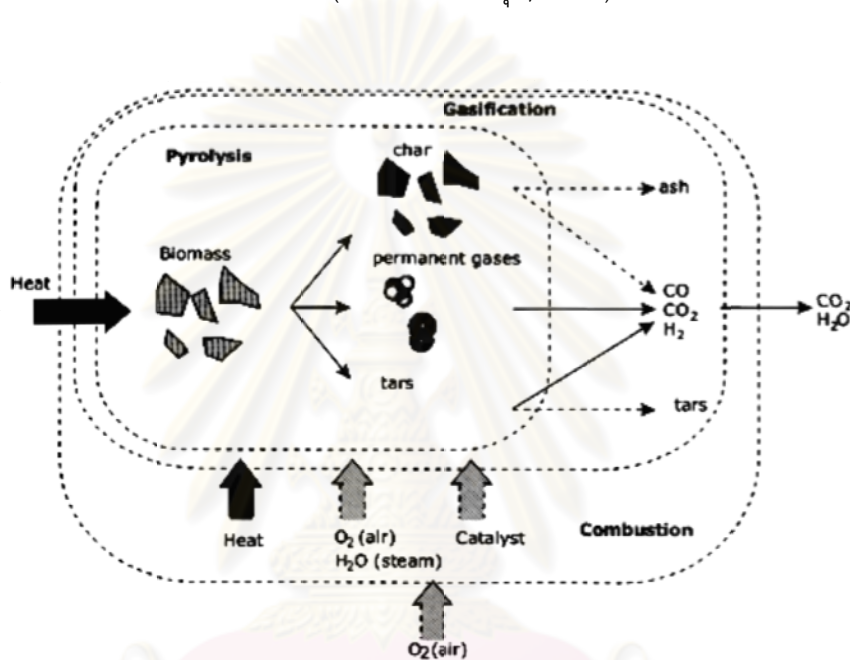
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) เป็นกระบวนการที่น่าสนใจกระบวนการหนึ่งในการแปรรูปชีวมวลในรูปเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊สโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ในช่วง 800-1800 องศาเซลเซียส ทำให้แตกตัวมาเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (producer gas) ที่มีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำถึงปานกลางประมาณ 3-10 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรคาร์บอนเบา นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ น้ำมันทาร์ และ ชาร์ เป็นต้น เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายดังแสดงในรูปที่ 2.3 เช่นการนำไปใช้เผาไหม้สร้างความร้อนโดยตรงในหม้อไอน้ำ การใช้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สในรถยนต์ เครื่องจักรกังหันน้ำ การใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า การใช้เป็นสารตั้งต้นในการเพิ่มคุณภาพให้เป็นสารเคมีหรือน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์สำหรับการขนส่ง



รูปที่ 2.3 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและการนำไปใช้ประโยชน์
(ที่มา นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

2.4.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชัน

ในกระบวนการแกซิฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการไพโรไลซิสของชีวมวล ในขั้นตอนแรก ซึ่งจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไอน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นจะเกิดขั้นตอนที่ 2 คือ กระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยน้ำมันทาร์และชาร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันมี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศรีสุข, 2541)



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนของกระบวนการแกซิฟิเคชัน
(ที่มา Prof. Animesh Dutta, 2007 : online)

2.4.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน (ถ่านไร้ควัน) เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันที่เกิดจากสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.4.2.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากพวกวงแหวนแนพทาลินเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C₅ - C₆ ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด โดยแบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

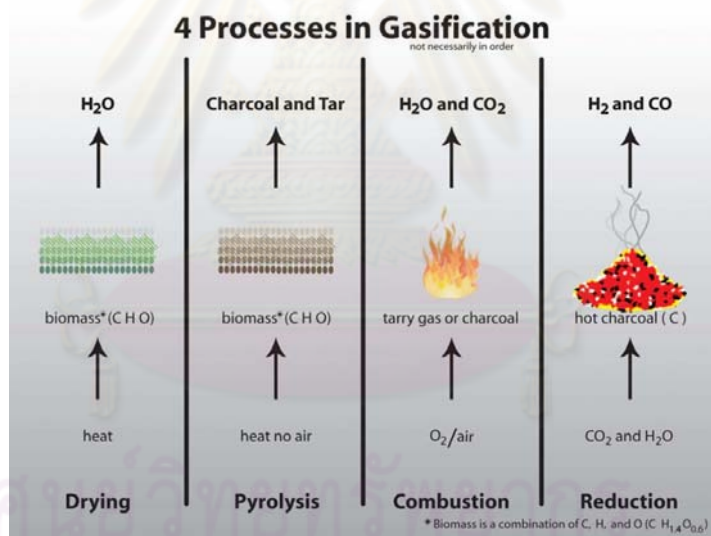
- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซีน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิลเบนซีน ไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพรีดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 - 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิล แนพทาลิน
- น้ำมันแอนทราซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 - 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนแนพทีน
- พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไซซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

2.4.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไฮโดรเจน (H₂) และแอมโมเนีย (NH₃) ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน (CH₄) อีเทน (C₂H₆) เอทีลีน (C₂H₄) เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน โดยเชื้อเพลิงแก๊สจะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่าเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวทั่วไป หรือนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ระบบวัฏจักรรวมการแก๊สไฟชีวมวล (Integrated gasification combine cycle, BIG-CC) หรือผลิตเป็นสารเคมีต่างๆ เช่น เมทานอล ไฮโดรเจน อีกทั้งยังสามารถนำไปผลิตเป็นน้ำมันดีเซลสังเคราะห์โดยผ่านกระบวนการฟิชเชอร์โทรปช์ (Fischer-Tropsch synthesis) ถ้าเชื้อเพลิงแก๊สมีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงกว่า

2.4.3 ปฏิกริยาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

เตาปฏิกรณ์ของกระบวนการเรียกว่า แก๊สซิไฟเออร์ (gasifier) ซึ่งมีหลากหลายลักษณะ รูปแบบ กระบวนการภายในตัวเตาปฏิกรณ์จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเทคนิคการปฏิบัติการ ในเตาปฏิกรณ์สำหรับผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจะเกิดกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.5 ได้แก่ การทำแห้ง (drying) ไพโรไลซิส (pyrolysis) การเผาไหม้ (combustion) และการรีดักชัน (reduction) ซึ่งได้มาจากความร้อนถ่ายเทจากการเผาไหม้หรือบริเวณออกซิเดชัน ในบริเวณการทำแห้งความชื้นของชีวมวลจะถูกขับออกมาให้ระเหยกลายเป็นไอน้ำ ชีวมวลที่ถูกทำให้แห้งแล้วจะขยับเข้าสู่บริเวณไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการนี้จะแปรสภาพชีวมวลให้กลายเป็นถ่านชาร์ ไอสารระเหย ไอน้ำมันนาร์ ไอน้ำและแก๊สที่ไม่ควบแน่น ส่วนที่เป็นสถานะแก๊สและไอจะไหลออกจากแก๊สซิไฟเออร์ออกไป ถ่านชาร์จากไพโรไลซิสจะมีมวลประมาณร้อยละ 15 ของชีวมวลตั้งต้น แล้วเข้าสู่บริเวณออกซิเดชันและรีดักชันต่อไป

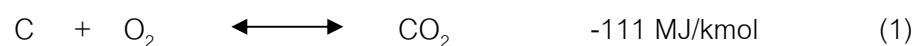


รูปที่ 2.5 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน (ที่มา Gasifier Experimenters Kit [GEK] : online)

ในการควบคุมการทำงานของเตาปฏิกรณ์ที่ดี ปริมาณออกซิเจนที่ป้อนเข้ามาจะไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ เพราะปริมาณออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงต่ำเกินไป ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นการเผาไหม้บางส่วนเท่านั้น และมีการย่อยสลายทางความร้อนและไอน้ำมันนาร์ด้วย ในบริเวณรีดักชัน ผลผลิตจากการออกซิเดชันจะเกิดปฏิกริยารีดักชันกับทานชาร์ในสภาพไร้ออกซิเจน ซึ่งเกิดขึ้นเหมือนกับในเตาปฏิกริยาที่ใช้ผลิตถ่านชาร์

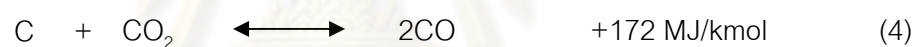
ระหว่างกระบวนการ เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงสัมผัสกันก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง และเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ (Higman and van der Burgt, 2008) ดังนี้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (combustion reaction)

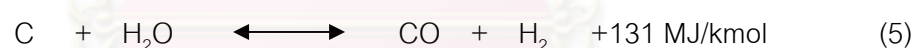


ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในบริเวณอื่นภายในเตาปฏิกรณ์ อุณหภูมิในบริเวณการเผาไหม้มีค่าระหว่าง 1,100 - 1,500 องศาเซลเซียส แก๊สร้อนที่ผ่านจากกระบวนการเผาไหม้จะไหลผ่านมายังชั้นเชื้อเพลิงถัดไป ซึ่งไม่มีออกซิเจนเหลือในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาบูดูอาร์ต (Boudouard reaction)



ปฏิกิริยาน้ำแปลงแก๊ส (water gas reaction)



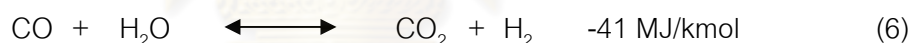
บริเวณถัดมาเกิดปฏิกิริยารีดักชัน อุณหภูมิในช่วงรีดักชันมีค่าระหว่าง 500 - 900 องศาเซลเซียส ในโซนนี้แก๊สบางส่วนจากการเผาไหม้จะไหลเข้าทำปฏิกิริยากับถ่านร้อนที่กำลังลุกไหม้อยู่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแปลงสภาพของแข็งเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนได้ ปฏิกิริยาในสมการที่ 4 และ 5 เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แก๊สที่ได้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้คือ คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนซึ่งจะต้องผลิตให้ได้มากที่สุด ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีวมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนได้มากน้อยเพียงใด

ในบริเวณการเกิดรีดักชันนี้จะเกิดขึ้นปฏิกิริยาได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วระหว่างที่แก๊สสัมผัสกับเชื้อเพลิงแข็ง และพื้นที่สัมผัส ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงแข็งที่ป้อนเข้าไปยังเตาเผาจึงมีผลต่อการผลิตแก๊ส เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของ

พื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ยากต่อการจุดเผาภายในเตา และจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อย และมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก ต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น ขนาดของเชื้อเพลิงแข็งที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 20 - 100 มิลลิเมตร ถ้าอุณหภูมิในบริเวณนี้สูงกว่า 900 องศาเซลเซียสแล้ว แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กว่าร้อยละ 90 จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 1100 องศาเซลเซียส จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

เมื่อแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไหลเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณการเกิดรีดักชัน ปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของแก๊สร้อนลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 500 - 600 องศาเซลเซียส ใอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยาต่อกันก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 5 ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงแก๊สมีค่ามากขึ้น

ปฏิกิริยาชิฟต์ (water gas shift reaction)



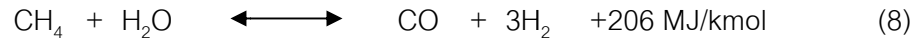
ถ้าในกระบวนการมีน้ำมากเกินไป อาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 6 ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้จะต้องมีค่าความร้อนไม่มากจนเกินไป หรือในบางสภาวะ หากมีความต้องการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มเติม เราจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยานี้ด้วยการเพิ่มไอน้ำร้อนเข้าไปผสม ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

ปฏิกิริยาแปลงมีเทน (methanation reaction)



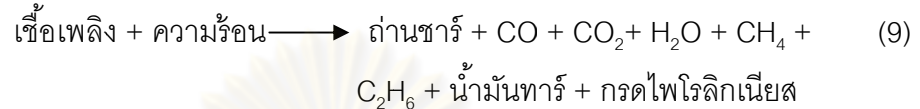
ในกระบวนการ แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนอาจจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้เล็กน้อย ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 7 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

ปฏิกิริยาแปลงแก๊สด้วยไอน้ำ (steam reforming reaction)



การเพิ่มไอน้ำร้อนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์อาจนำไปสู่การทำปฏิกิริยากับมีเทนให้แปลงเป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้ มีคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

ปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis)

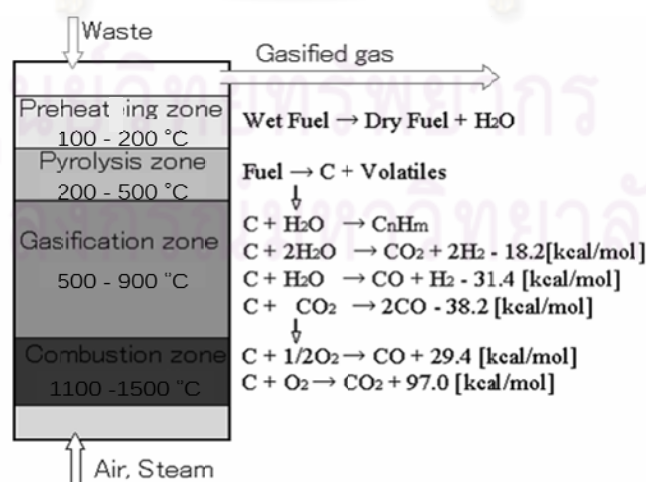


ความร้อนจากบริเวณรีดักชันจะแพร่มาสู่เชื้อเพลิงแข็ง ทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาไพโรไลซิส อุณหภูมิในบริเวณนี้จะมีค่าประมาณ 200 - 500 องศาเซลเซียส ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านจากกระบวนการคือคาร์บอนในรูปของถ่านชาร์ ซึ่งเข้าทำปฏิกิริยาต่อไป

การทำแห้ง (drying)



ความร้อนในเตามีอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะสามารถระเหยออกมาในรูปของไอน้ำได้ที่อุณหภูมิ 100 - 200 องศาเซลเซียส โดยบริเวณการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โซนการเกิดแก๊สตามปฏิกิริยาทางเคมี และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตา (ที่มา Tokyo Institute of Technology [titech] : online)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส

2.5.1 ความชื้นของเชื้อเพลิง

ความชื้นในชีวมวลช่วยทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงแก๊สสูงขึ้น แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สและค่าความร้อนที่ต้องการลดลง ความชื้นของชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล แหล่งที่มา และการเตรียมสภาพก่อนนำไปผลิตแก๊สชีวมวล ความชื้นในชีวมวลสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ

- (1) ความชื้นที่อยู่ในเนื้อชีวมวล เป็นส่วนที่สามารถอยู่ในรูปเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 96 - 97
- (2) ความชื้นที่ผิว เป็นส่วนที่ล้นเกินจากความชื้นในรูปเปิดของเซลล์ชีวมวล
- (3) ความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ด้วยความร้อน

2.5.2 ขนาดของเชื้อเพลิง

ขนาดของเชื้อเพลิงจะมีผลกับการเกิดความดันตกภายในเตาปฏิกรณ์ ถ้าเกิดความดันตกภายในเครื่องมากเกินไปจะทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำอากาศเข้าและพาแก๊สที่ได้ออกจากเตามาก เครื่องยนต์ก็ต้องมีแรงดูดมากพอที่จะเอาชนะความดันตกของระบบทั้งหมด ในทางทฤษฎีอากาศควรสัมผัสกับพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงให้มากที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นและเกิดกระบวนการได้เร็วยิ่งขึ้น ในเตาผลิตแก๊สขนาดเล็กติดตั้งกับที่ หากใช้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะเกิดปัญหาการเผาไหม้ข้ามโซน ซึ่งเป็นสาเหตุการเกิดเถ้าหลอมเยิ้มติดผนัง (slag) เพราะถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับขนาดเตา เมื่อเผาไหม้แล้วเชื้อเพลิงจะไหลลงไม่สะดวกและไม่ทันกับการเผาไหม้ที่มีอากาศเท่าเดิม อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงจึงสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงพอที่จะเหนียวน้ำให้เกิดเถ้าหลอมในเชื้อเพลิงทุกชนิดได้ จึงควรนำเชื้อเพลิงมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น

2.5.3 การกระจายขนาด

เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาให้กับเตาผลิตแก๊สต้องมีขนาดสม่ำเสมอ ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะหากขนาดแตกต่างกันมาก อากาศและแก๊สจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาด

ใหญ่และเล็กเกยกัน ทำให้บางบริเวณมีการเผาไหม้รุนแรงแต่บางบริเวณเย็นตัวลง และอาจ สลับกันในเวลาต่อมา ทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน (clinker)

2.5.4 ความหนาแน่นบัลก์

เป็นค่าที่แสดงลักษณะการใช้ปริมาตรของเชื้อเพลิงนั้น กล่าวคือเมื่อเทเชื้อเพลิงที่เม็ดลงใน ภาชนะ รูปทรงของแต่ละเม็ดจะทำให้ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงแนบกันไม่ได้ นั่นคือเกิดช่องว่างระหว่าง เม็ดเชื้อเพลิงขึ้น ทำให้เปลืองปริมาตรในภาชนะ บรรจุได้น้ำหนักน้อยเนื่องจากมีช่องว่างอากาศ ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตแก๊สจะเปลืองเนื้อที่ประมาณ ร้อยละ 20 - 75 ของปริมาตรบรรจุ

2.5.5 สารระเหยในเชื้อเพลิง

สารระเหย (volatile matter) ที่ปล่องย่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยา สามารถควบแน่นได้ที่ อุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียส ซึ่งจะก่อตัวเป็นน้ำมันทาร์และน้ำมันที่กลิ่นตัวต่างๆ ถ้า เชื้อเพลิงมีสารระเหยมากอาจจะสร้างปัญหาได้ เนื่องจากน้ำมันทาร์และไอน้ำมันที่มีอุณหภูมิ ควบแน่น 120 - 150 องศาเซลเซียส จะเกาะฝังตัวบนผนัง จึงต้องแยกออกก่อนนำไปใช้งาน

2.5.6 ชี้เถ้า

ชี้เถ้าเกิดจากแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิง รวมตัวกับออกซิเจนขณะเผาไหม้ สัดส่วนของชี้เถ้าในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตาปฏิกรณ์ ถ้าสัดส่วนชี้เถ้าในเชื้อเพลิงมีค่า สูง ก็จะทำให้พลังงานของเชื้อเพลิงแก๊สลดลง และเตาปฏิกรณ์ต้องสำรองเนื้อที่เก็บชี้เถ้ามากขึ้น และหากชี้เถ้าหลอมตัว จะมีปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัดพอสมควร

2.5.7 ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง

ความหนาของชั้นเชื้อเพลิงจะมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊ส ในกรณีที่ ความหนาของชั้นเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันมีช่วงกว้างขึ้น ปฏิกิริยา เคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูด ความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของเตาลดลง

2.6 ชนิดของเตาปฏิกรณ์ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

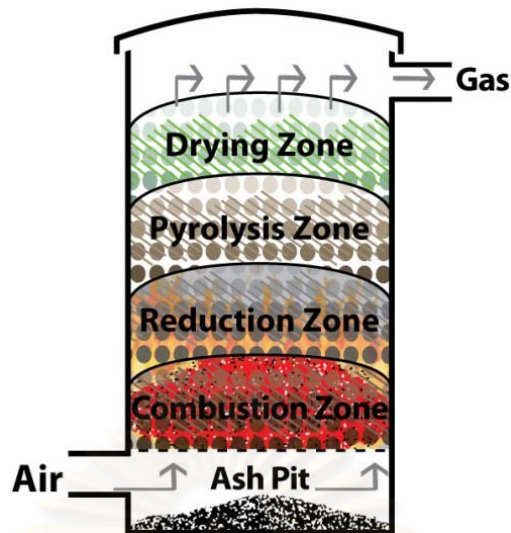
2.6.1 เตาปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

2.6.1.1 เตาแบบแก๊สไหลขึ้น (updraft gasifier)

เป็นเตาที่ผลิตใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สร้อนที่ผ่านจากบริเวณการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูง จะถูกส่งไปยังบริเวณปฏิกิริยารีดักชันซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณของคาร์บอนมากเพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวล และแตกตัวในช่วงอุณหภูมิ 200 - 500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นแก๊สก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลใหม่ที่เพิ่งป้อน แก๊สยังมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้นออก ทำให้แก๊สที่ออกจากเตามีอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เตาประเภทนี้มีรูปแบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมาก และผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัดคือ แก๊สที่ผลิตได้จะมีผลิตภัณฑ์ประเภตน้ำมันและน้ำมันทาร์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิสและกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นแก๊สที่ได้จากเตาประเภทนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้กับหม้อไอน้ำหรือการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร ซึ่งแก๊สที่ได้จะผสมกับอากาศและทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่อไป

เตาปฏิกรณ์ประเภทนี้เหมาะสมกับชีวมวลหลากหลายชนิด ง่ายต่อการเตรียมเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพสูง เพราะแก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำจึงไม่ต้องเปลืองพลังงานในการทำให้แก๊สเย็น แต่มีข้อเสียคือมีปริมาณน้ำมันทาร์ออกมามาก เพราะน้ำมันทาร์ที่ผลิตได้ในบริเวณไพโรไลซิสไม่ได้ผ่านบริเวณปฏิกิริยาการเผาไหม้ก่อน จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันทาร์น้อย การกำจัดน้ำมันทาร์ที่ควบแน่นออกมาเป็นปัญหาใหญ่ของเตาประเภทนี้ การปรับการออกแบบบางอย่างสามารถลดปริมาณน้ำมันทาร์ลงได้ เช่น การตั้งแก๊สที่ผลิตได้ออกที่เหนือบริเวณรีดักชัน อีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับได้ คือ การเติมไอน้ำร้อนผสมเข้ากับอากาศเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา water gas และจะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 2.7 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น (ที่มา GEK : online)

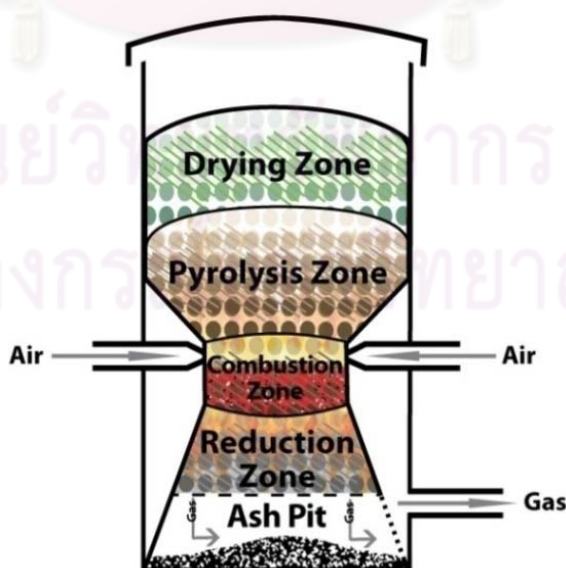
เตาแบบแก๊สไหลขึ้นอาจออกแบบให้ทำงานที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เถ้ากลายเป็นของเหลว (slagging) หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของเถ้า วิธีทั้งสองแบบต้องการตะแกรงที่แตกต่างกันออกไป สำหรับกรณีที่ต้องการให้เถ้าเหลว บริเวณการเผาไหม้ต้องทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้า เถ้าหลอมจะถูกปล่อยระบายออกตามช่องได้ บางครั้งหินปูน (limestone) จะช่วยลดอุณหภูมิการหลอมเหลวของเถ้าและค่าความหนืดซึ่งจะช่วยให้เกิดเถ้าหลอมหรือสแลกได้ง่ายขึ้น ข้อดีของแบบเถ้าหลอม คือ อัตราการเกิดแก๊สสูงมาก เพื่อต้องใช้อากาศเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้สูงเพียงพอต่อการหลอมเหลวของเถ้า การกำจัดเถ้าทำได้ง่าย เถ้าหลอมที่ได้มีปริมาณคาร์บอนค้างอยู่น้อยมากซึ่งสามารถนำไปขายได้ แต่มีข้อเสีย เช่น อัตราการเกิดแก๊สที่สูงมากจะจำกัดขนาดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ได้ เนื่องจากปริมาณฝุ่นผงที่ออกไปกับการไหลของแก๊ส การกำจัดเถ้าหลอมทำให้ค่าบำรุงรักษาเตาสูงขึ้นจากความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนวัสดุผนังบ่อย ภาวะการทำงานของระบบจำเป็นจะต้องต่อเนื่องและสม่ำเสมอ จึงจะได้สมรรถนะการทำงานที่ดี

สำหรับกรณีการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของเถ้า เตาจะมีตะแกรงไว้รองรับกองเชื้อเพลิงเหนือกองเก็บเถ้า ซึ่งจะออกแบบมาให้เถ้าเคลื่อนตัวลงสู่กองเก็บเถ้าด้านล่างได้ดี และในขณะเดียวกันจะป้องกันไม่ให้ถ่านชาร์ตออกไป ถึงแม้ว่าอุณหภูมิในเตาจะถูกออกแบบให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวของเถ้าทุกจุด แต่ในทางปฏิบัติก็อาจมีการเกิดการเกาะตัวเป็นก้อนได้ (clinker) ซึ่งจะเกิดปัญหากับชีวมวลที่มีส่วนประกอบของเถ้ามาก ฉะนั้นในการออกแบบตะแกรงอาจออกแบบให้มีกลไกไว้สำหรับทุบปับก้อนเถ้าที่เกาะตัวกันให้แตกออก อีกประเด็นที่น่าสนใจ คือ การมีชั้นเถ้าเหนือตะแกรงตลอดเวลาเพื่อป้องกันตะแกรง ซึ่งหากชั้นเถ้า

หนาเกินไปจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมสูงและอัตราการเกิดแก๊สต่ำ หากชั้นถ้ำบางเกินไปอาจจะทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปในตะแกรงจนเกิดการหลอมละลายได้

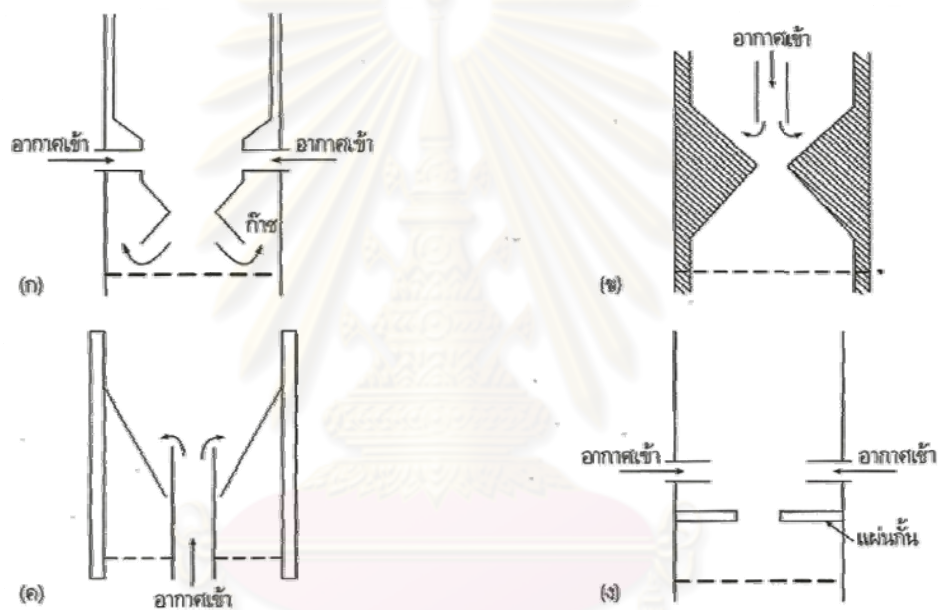
2.6.1.2 เตาแบบแก๊สไหลลง (downdraft gasifier)

เตาประเภทนี้แสดงดังในรูปที่ 2.8 ออกแบบขึ้นมาเพื่อขจัดน้ำมันนํ้าที่มียู่ภายในเชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตาผ่านกลุ่มของหัวฉีดซึ่งเรียกว่า tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรง ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน และไอของน้ำมันนํ้าที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันนํ้าเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 800 - 1000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาดูดความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิกริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของน้ำมันนํ้าที่มีปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ของน้ำมันนํ้าที่ได้จากเตาแบบแก๊สไหลขึ้น และแก๊สที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลง เตาแบบแก๊สไหลขึ้นและไหลลงจะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำ และถ้ำจะอยู่บริเวณตะแกรง จึงมีปริมาณถ้ำถ่านติดออกมากับแก๊สเชื้อเพลิงน้อยมาก



รูปที่ 2.8 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง (ที่มา GEK : online)

ในเตาปฏิกรณ์แบบแก๊สไหลลง ไอน้ำมันนําทาร์จากไฟโรไลซิสจะต้องผ่านบริเวณการเผาไหม้จึงถูกทำให้สลายตัวทางความร้อน เตาประเภทนี้ออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดลดแคบลง โดยมีการป้องกันอากาศเข้าเหนือพื้นที่หน้าตัดที่แคบที่สุดที่เรียกว่า คอคอด (throat) เพื่อกำหนดให้เกิดบริเวณถ่านร้อนแดงแคบๆ ที่บังคับให้แก๊สจากไฟโรไลซิสผ่าน ยิ่งบริเวณคอคอดลดลงมามาก จะยิ่งทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้เพิ่มสูงขึ้นภายในขอบเขตจำกัดระดับหนึ่ง แต่หากคอคอดเล็กเกินไป จะส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมาก ซึ่งจะกีดขวางการไหลของก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลหากมีขนาดไม่เหมาะสม ฉะนั้นการออกแบบจึงต้องพยายามให้มีช่องคอคอดที่ขนาดพอเหมาะ เพื่อไม่ให้ปัญหาของการไหลหรือความดันตกคร่อม โดยอุณหภูมิที่บริเวณเผาไหม้ต้องรักษาระดับให้สูง

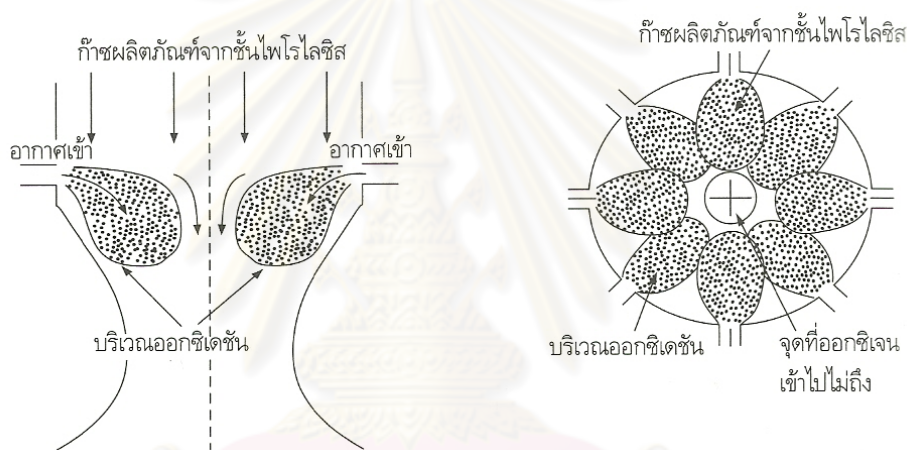


รูปที่ 2.9 ลักษณะคอคอดและการจ่ายลมของเตาแบบไหลลง
(ทีมา นคร ทิพยวงศ์, 2552)

เตาปฏิกรณ์แบบแก๊สไหลลงมีหลายแบบ ซึ่งสามารถจับกลุ่มรวมกันได้ 4 ชนิด ดังนี้ แสดงตามรูปที่ 2.9 ก) – ง)

- ก) คอคอดปกติ กับท่อป้องกันอากาศรอบผนัง
- ข) คอคอดปกติ กับท่อป้องกันอากาศตรงกลางชี้ลง
- ค) คอคอดปกติ กับท่อป้องกันอากาศตรงกลางชี้ขึ้น
- ง) แผ่นกัน กับท่อป้องกันอากาศรอบผนัง

รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพของบริเวณออกซิเดชันด้านหน้าของท่อป้อนอากาศรอบผนัง บริเวณระหว่างท่อติดกับผนังและบริเวณตรงกลางเตาจะเป็นจุดที่ออกซิเจนไปไม่ถึง ทำให้มีอุณหภูมิต่ำ ฉะนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สจากไพโรไลซิสที่ผ่านบริเวณนี้จะไม่เกิดการเผาไหม้ แต่อาจจะมี การสลายตัวทางความร้อนได้สมบูรณ์ (complete reforming) ระบบที่ใช้ท่อป้อนอากาศรอบผนัง จึงมีโอกาที่จะปล่อยไอน้ำมันนําทาร์ออกมาได้มากกว่าระบบที่ใช้ท่อป้อนอากาศตรงกลางซึ่งมี บริเวณออกซิเดชันตรงคอคอดดีและครอบคลุมกว่า อย่างไรก็ตาม ระบบที่มีท่อป้อนอากาศตรง กลางจะขวางการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลและอาจก่อให้เกิดปัญหาเกิดขวาง (bridging) ในคอคอด ได้ ส่งผลให้ชั้นเชื้อเพลิงหลวม มีช่องให้อากาศและน้ำมันนําทาร์เล็ดลอดไปได้ โดยไม่เกิดปฏิกิริยา แดกตัว



รูปที่ 2.10 บริเวณการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ
(ทีมา นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

การเปลี่ยนแปลงขนาดคอคอดและตำแหน่งของท่อป้อนอากาศจะส่งผลอย่าง มากต่อองค์ประกอบของแก๊สที่ได้และปริมาณน้ำมันนําทาร์ที่เกิดขึ้น รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลและภาวะไหลซึ่งต้องใช้ประสบการณ์ของผิ ดลองถูก เตาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างจะต้องการการป้อนอากาศที่ความเร็วสูงหรือวิธีการอื่นที่ช่วย ง่ายอากาศไปให้ลึกถึงกลางชั้นเชื้อเพลิง ซึ่งอาจทำให้เกิดความดันตกคร่อมสูงด้วย จึงเป็น ข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถใช้เตาขนาดใหญ่เกิดไปได้

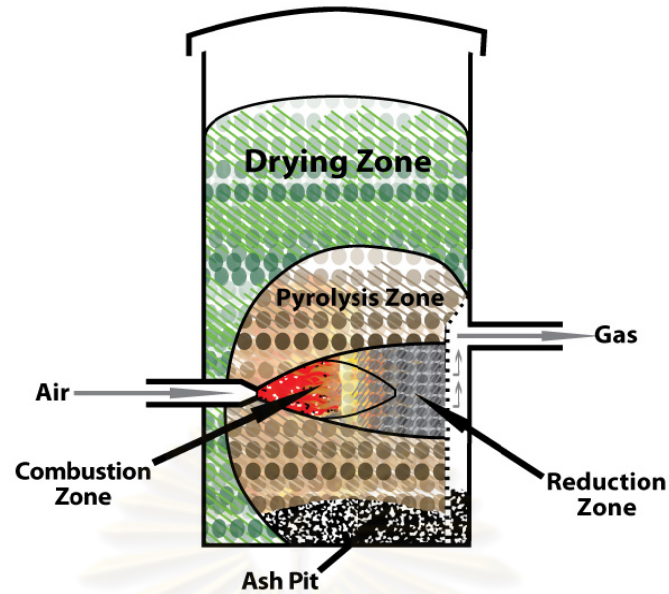
ส่วนของเตาที่เป็นโลหะที่อยู่ใกล้บริเวณคอคอดจะต้องมีการป้องกันความเค้นเชิง ความร้อน (thermal stress) เพราะอุณหภูมิสูงที่สุดในส่วนนี้อาจมีค่าถึง 1300 องศาเซลเซียส วัสดุ

ที่ใช้ควรเป็นโลหะผสมของโครเมียมและนิกเกิลสูง หากเกิดการเสียหาย (defect) กับเตาก็ต้องเปลี่ยนทั้งหมด การออกแบบเตาควรแบ่งออกเป็นส่วนๆ ที่สามารถแยกออกเปลี่ยนเฉพาะส่วนได้ ตัวอย่างเช่น เตารูปวี (v-hearth) ซึ่งมีลักษณะของตัวเตาที่เชื่อมต่อเป็นรูปทรงกรวยตัดสองอันปลายชี้เข้าหากัน โดยบริเวณยอดกรวยเชื่อมกันจะเป็นวงคอคอด ซึ่งปกติมีวงแหวนเหล็กสวมไว้เมื่อเริ่มทำการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ชั้นถ้ำจะก่อตัวรอบๆ พื้นผิววงคอคอดเตาป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนเกินต่อวัสดุ ในส่วนล่างของเตาเป็นบริเวณรีดักชัน ปกติจะต้องการให้แก๊สมีเวลาอยู่ในบริเวณนี้มากๆ ซึ่งทำได้โดยลดความเร็วของแก๊ส โดยการค่อยๆ ขยายพื้นที่หน้าตัดให้ใหญ่ขึ้น การไหลของอากาศผ่านท่อป้อนอากาศจะไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัด หากต้องการความสม่ำเสมอสามารถทำได้โดยปล่อยอากาศเข้าทางด้านบนเหนือชั้นเชื้อเพลิงไหลลงเข้ามาสู่บริเวณด้านล่างเพื่อทำปฏิกิริยา เตาแบบนี้เรียกว่า เตาแกนเปิด (open core) ไม่มีคอคอด จึงไม่มีปัญหาเรื่องการไหลของเชื้อเพลิง

เตาปฏิกรณ์แบบแก๊สไหลลงจะไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีถ้ำมาก เพราะสแตกหรือถ้ำหลอมที่เกิดขึ้นจากบริเวณออกซิเดชันจะไหลลงด้านล่าง เย็นตัวลง และแข็งตัวเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว และจะกีดขวางทางการไหลของแก๊สและเชื้อเพลิง หากจำเป็นต้องใช้กับเชื้อเพลิงที่มีถ้ำมาก จะต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของถ้ำและใช้ตะแกรงที่หมุนหรือขยับได้ ในเตาปฏิกรณ์แบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการฉีดไอน้ำเข้าไป เพราะปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงและอากาศมีเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอยู่แล้ว

2.6.1.3 เตาแบบแก๊สไหลขวาง

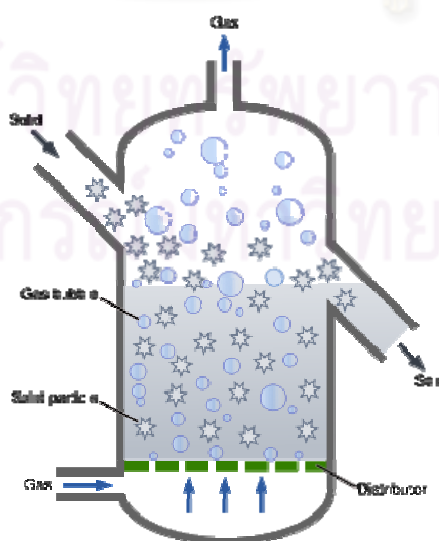
เตาประเภทนี้แสดงดังในรูปที่ 2.11 อากาศที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบ บริเวณการเผาไหม้จะอยู่ถัดจากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณการเกิดรีดักชัน ผลิตภัณฑ์แก๊สจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงรอบเตาซึ่งอยู่ในแนวตั้งโดยรอบ ไส้สารระเหยและน้ำมันที่ไต่จากการไฟโรไลซิสจะผ่านบริเวณรีดักชันอุณหภูมิสูงก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอกเตา ซึ่งทำให้น้ำมันเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อน ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณน้ำมันต่ำ ข้อดี คือ เตาแบบนี้ได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้กับยานพาหนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีผลตอบแทนของเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงที่ควรนำมาใช้กับเตาแบบนี้ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง ข้อเสียของเตาแบบนี้ คือ มีความสามารถในการแตกตัวน้ำมันที่ต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูง



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง (ที่มา GEK : online)

2.6.2 เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์

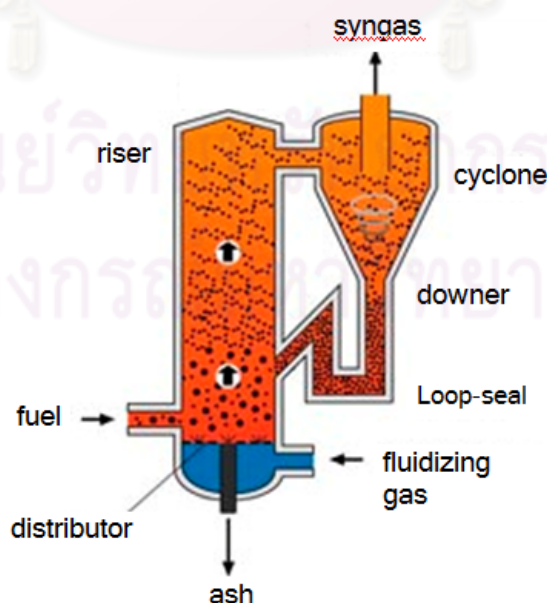
เมื่อพิจารณาเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่กล่าวมาแล้วทั้ง 3 แบบข้างต้น จะเห็นว่าการทำงานของกระบวนการในระบบจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพทางกายภาพของเชื้อเพลิง โดยที่จะเกิดปัญหาจากเถ้าหลอมที่เกิดขึ้นมากเกินไป จึงก่อให้เกิดการอุดตันในเตาบ่อยครั้ง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์ (fluidized bed) มาใช้ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์ (ที่มา wikipedia : online)

ในเตาแบบฟลูอิไดซ์นี้ แก๊สจะไหลผ่านชั้นของเม็ดวัสดุเบด ส่วนใหญ่ใช้ทรายขนาดเล็กหรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา เช่น หินปูน ซึ่งจะช่วยในการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดแก๊สที่ได้ ในขณะที่เริ่มติดไฟนั้นชั้นวัสดุเบดจะเริ่มร้อนขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิงได้ หลังจากนั้นเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็กจะถูกป้อนเข้าเตาอย่างสม่ำเสมอ

เตาปฏิกรณ์แบบนี้มีข้อดี คือ การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นไปอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากการผสมกันอย่างรุนแรงของของแข็งภายในชั้นของไหล ทำให้ไม่มีจุดใดจุดหนึ่งร้อนเป็นพิเศษ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สกับของแข็งมีมากเพราะขนาดเม็ดของแข็งเล็ก ทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างชั้นอนุภาคของแข็งกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพแตกต่างกันมากได้หลากหลายชนิด ทั้งขนาด รูปร่าง ความชื้น ค่าความร้อน และสถานะ การควบคุมอุณหภูมิในเตาสามารถกระทำได้ง่าย จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของเถ้าหลอม จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของเถ้าสูงได้ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของเตาปฏิกรณ์แบบนี้คือ อนุภาคของแข็งในชั้นของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงซึ่งจะมีผลต่อการสึกหรอภายในเตา และผลิตภัณฑ์แก๊สที่ออกจากเตาจะมีปริมาณเถ้าและฝุ่นถ่านออกมาด้วยมาก เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตามีค่าสูง จึงต้องมีการนำไซโคลนมาติดตั้งในระบบด้วย นอกจากนี้เม็ดวัสดุในชั้นของไหลมีความเป็นไปได้ที่จะเกาะรวมตัวกัน ทำให้กลายเป็นก้อนของแข็งใหญ่ไม่ลอย และขวางการไหลรวมทั้งการทำงานที่ไหลดต่ำๆ ทำได้ยาก จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีพิเศษเข้ามาช่วย



รูปที่ 2.13 เตาแบบฟลูอิไดซ์ชนิดหมุนวน (ที่มา envirotherm : online)

เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดฟองอากาศ (bubbling) และ ชนิดหมุนวน (circulating) เตาแบบฟลูอิดไชน์ชนิดฟองอากาศเกิดที่ความเร็วแก๊สต่ำ ในขณะที่เตาแบบฟลูอิดไชน์ชนิดหมุนวนถูกพัฒนาเพื่อลดปริมาณถ่านที่หลุดลอดจากปฏิกิริยา (carbon carryover) โดยการนำกลับมารวนเขาเตาปฏิกรณ์ซ้ำ เตาชนิดหมุนวนนี้จะมีความเร็วของแก๊สสูงกว่าชนิดฟองอากาศ ทำให้มีระดับความปั่นป่วนสูง อนุภาคถูกพัดออกไปนอกชั้นของไหลและถูกดักด้วยลมวนไซโคลอนดึงกลับเข้ามาในห้องเผาไหม้อีกครั้งดังรูปที่ 2.13

2.7 การกำจัดน้ำมันทาร์

น้ำมันทาร์ (tar) เป็นของผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน ควบแน่นได้ มีลักษณะข้นเหนียวสีดำ ติดไฟได้ องค์ประกอบภายในน้ำมันทาร์ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่นำมาเผาไหม้ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์ เช่น แนฟทาลีน (naphthalene) หรือเบนซีน (benzene) เป็นต้น โดยปกติน้ำมันทาร์เป็นผลผลิตจากกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวลหรือถ่านหิน น้ำมันทาร์เป็นปัญหามากในการนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้ เนื่องจากสามารถควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ นำไปสู่การอุดตัน กีดขวางเส้นทางการไหลของระบบ และเกาะติดในตัวกรองหรือในเครื่องยนต์ได้

การกำจัดน้ำมันทาร์สามารถทำได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (primary method) และช่วงหลังการเกิดปฏิกิริยา (secondary method) ซึ่งแต่ละช่วงมีวิธีการย่อยๆ ดังนี้ (Devi et al, 2003)

2.7.1 การกำจัดน้ำมันทาร์ระหว่างปฏิกิริยา

2.7.1.1 การใช้สภาวะดำเนินงานที่เหมาะสม

ตัวแปรที่มีผลสำคัญยิ่งต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์และปริมาณน้ำมันทาร์ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน คือ อุณหภูมิ ความดัน ค่าอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) ชนิด และลักษณะของชีวมวล แก๊สตัวกลางที่ใช้ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอื่นๆ โดยปกติอุณหภูมิการดำเนินงานที่ใช้จะมากกว่า 800 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีน้ำมันทาร์น้อย ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มอะโรมาติกจะสลายตัวได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลเสียต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส การเปลี่ยนของถ่านชาร์ (char conversion) และเสี่ยงต่อการเกิดการรวมตัวเป็นก้อน (sintering) น้ำมันทาร์จะถูกกำจัดหาก

ทำงานที่ความดันสูงและที่อัตราส่วนสมมูลสูงขึ้น แก๊สตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการแก๊ซิฟิเคชันก็มีผลต่อการเกิดน้ำมันทาร์ ซึ่งนอกจากอากาศแล้ว ออกซิเจน ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ก็ถูกนำมาใช้

2.7.1.2 การใช้วัสดุเติมพิเศษ

การเติมวัสดุจำพวกตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น นิกเกิล โคบอลต์ แมงนีเซียม ซีโอไซด์ โอลิวีน และเหล็ก หรือวัสดุอื่นๆ เช่น หินปูน ลงไปในชั้นเชื้อเพลิง จะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาและการกำจัดน้ำมันทาร์ ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สแล้ว ยังมีผลต่อการลดลงของน้ำมันทาร์ และอาจจะลดแนวโน้มการเกาะตัวกันของชั้นวัสดุที่จะไปขวางการไหลได้ด้วย โลหะออกไซด์อื่นๆ ที่มีการทดลองใช้ ได้แก่ V_2O_5 , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , CoO , NiO , CuO , MoO_3 เป็นต้น วัสดุชนิดอื่นที่หาได้ง่าย คือ ถ่านชาร์ ซึ่งใช้ในการแตกตัวชั้นสอง แต่ตัวมันเองก็จะถูกทำปฏิกิริยาสลายไปด้วย โดยสรุปการใช้วัสดุเติมพิเศษลงในเตาปฏิกรณ์จะมีผลดังนี้

- เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สแต่ละชนิดในผลิตภัณฑ์แก๊ส
- เกิดการลดลงของน้ำมันทาร์ แต่ขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการด้วย
- เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮโดรเจน
- เกิดการลดลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทน
- มีปัญหาการหมดสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเกิดฝุ่นผงมาก

2.7.1.3 การออกแบบเตาปฏิกรณ์ที่เหมาะสม

การออกแบบเตาปฏิกรณ์มีผลต่อกระบวนการ โดยเฉพาะในด้านประสิทธิภาพ ค่าความร้อนของแก๊ส และการเกิดน้ำมันทาร์ การปรับแต่งเตาสามารถทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่สะอาดได้ ตัวอย่างความพยายามในการปรับแก้ ได้แก่

- การฉีดอากาศช่วงที่สอง (secondary air injection)
- ปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน (two-stage gasification)
- การหมุนเวียนแก๊สภายใน (internal gas recycling)

2.7.2 การกำจัดน้ำมันทาร์หลังปฏิบัติการ

2.7.2.1 การดักจับเชิงกล

เป็นการดักจับโดยใช้อุปกรณ์เสริม เช่น การใช้ลมวนไซโคลน ชุดกรองแบบต่างๆ การแยกอนุภาค การใช้เครื่องดักไฟฟ้าสถิต หรือการดักด้วยสกรับเบอร์ โดยใช้ร่วมในการดักจับฝุ่นเข้ามาด้วย โดยประสิทธิภาพของแต่ละอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 2.1 วิธีเหล่านี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง สามารถดักได้เป็นที่น่าพอใจและมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม วิธีนี้เป็นเพียงการกำจัดน้ำมันทาร์โดยการดักจับและแยกออกไปเท่านั้น ไม่ได้ทำลายโครงสร้างภายในแต่อย่างใด มีราคาลงทุนค่อนข้างสูง และอาจเป็นปัญหาในการกำจัดของเสียอีก

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและน้ำมันทาร์ของอุปกรณ์ดักจับน้ำมันแบบต่างๆ

| | % ดักฝุ่นละออง | % ดักน้ำมันทาร์ |
|-----------------------------|----------------|-----------------|
| เครื่องกรองชั้นทราย | 70 - 99 | 50 - 97 |
| ถังพ่นน้ำ | 60 - 98 | 10 - 25 |
| สกรับเบอร์แบบคอคอด | - | 50 - 90 |
| เครื่องดักไฟฟ้าสถิตแบบเปียก | > 99 | 0 - 60 |
| เครื่องกรองผ้า | 70 - 95 | 0 - 50 |
| เครื่องแยกอนุภาคแบบหมุน | 85 - 90 | 30 - 70 |
| ตัวดูดซับน้ำมันดิน | - | 50 |

(ที่มา : Hasler and Nussbaumer, 1999)

2.7.2.2 การแตกตัวด้วยความร้อน

วิธีการทำให้น้ำมันดินแตกตัวด้วยความร้อน จะให้ความร้อนกับแก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้น้ำมันทาร์แตกตัวเป็นแก๊สเบา การทำให้แตกตัวจะเกิดได้ดีขึ้นหากเพิ่มเวลาของปฏิบัติการ หรือให้สัมผัสกับพื้นผิวร้อนโดยตรง หรือส่งเสริมให้เกิดการออกซิเดชันบางส่วนโดยการเติมอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปผสม ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันทาร์จะสูง หากทำที่อุณหภูมิสูงถึง 1250 องศาเซลเซียส และมีเวลา 0.5 วินาที โดยในเชื้อเพลิงแก๊สที่จะนำไปใช้กับเครื่องยนต์ควรมีปริมาณน้ำมันทาร์ต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.7.2.3 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ น้ำมันทาน์แตกตัวเป็นที่สนใจมากตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 (Han and Kim, 2008) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาเคมีสลายน้ำมันทาน์ให้กลายเป็นแก๊สเพิ่มขึ้นหรือปรับปรุงองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันทาน์ที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- มีผลในการกำจัดน้ำมันทาน์
- สามารถเปลี่ยนมีเทนได้ หากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส
- สามารถปรับสัดส่วนของแก๊สที่เหมาะสมจากกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ตามต้องการ
- มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกาะตัวและการเกิดการอุดตันจากเขม่าถ่านได้ดี
- สามารถนำมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากผ่านกระบวนการแล้ว
- ควรมีความแข็งแรงคงทน
- ควรมีราคาไม่แพง

โดยปกติ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

(1) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni-based catalyst) สามารถแตกน้ำมันทาน์มวลหนักได้ที่ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 90 และมีการเกิดไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากเดิม หากมีการเพิ่มอุณหภูมิ จะเกิดไฮโดรเจนมากยิ่งขึ้น และลดการเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบา เช่น มีเทนและอีเทน ได้ (Zhang et al, 2004)

(2) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแอลคาไล (alkali) เช่น กลุ่มคาร์บอนेट กลุ่มออกไซด์ และกลุ่มไฮดรอกไซด์ของโลหะแอลคาไล สามารถทำให้น้ำมันทาน์แตกตัวระหว่างปฏิกิริยาแก๊สฟีดเช็ซันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(3) ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (dolomite) คือ แร่กลุ่มแคลเซียมและแมกนีเซียม มีสูตรเคมีทั่วไปเป็น $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ โดยมีการค้นพบว่าโดโลไมต์มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดน้ำมันทาน์ออกจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล ไม่ต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยากุ่มอื่นๆ มากนัก

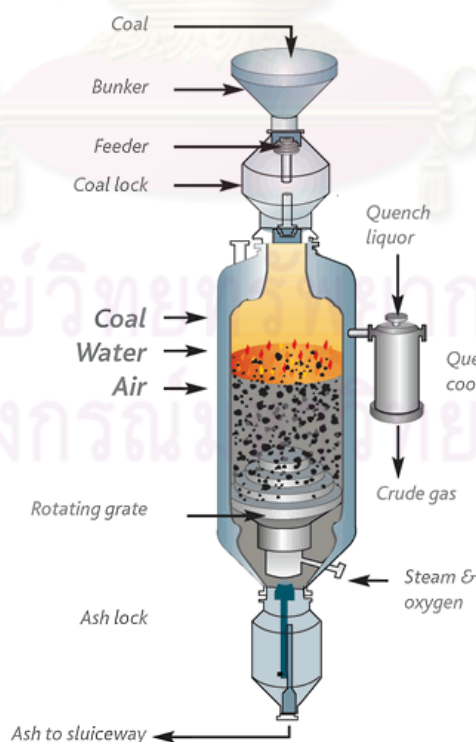
(4) ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชัน (transition metal) เช่น โรเดียม (Rd) แพลเลเดียม (Pd) แพลทินัม (Pt) และรูทีเดียม (Ru) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันทาน์สูง และมีความเสถียรในการทำงานดีกว่าตัวเร่งกลุ่มอื่นๆ แต่มีราคาแพงมาก

2.7.2.4 การแตกตัวด้วยพลาสมา

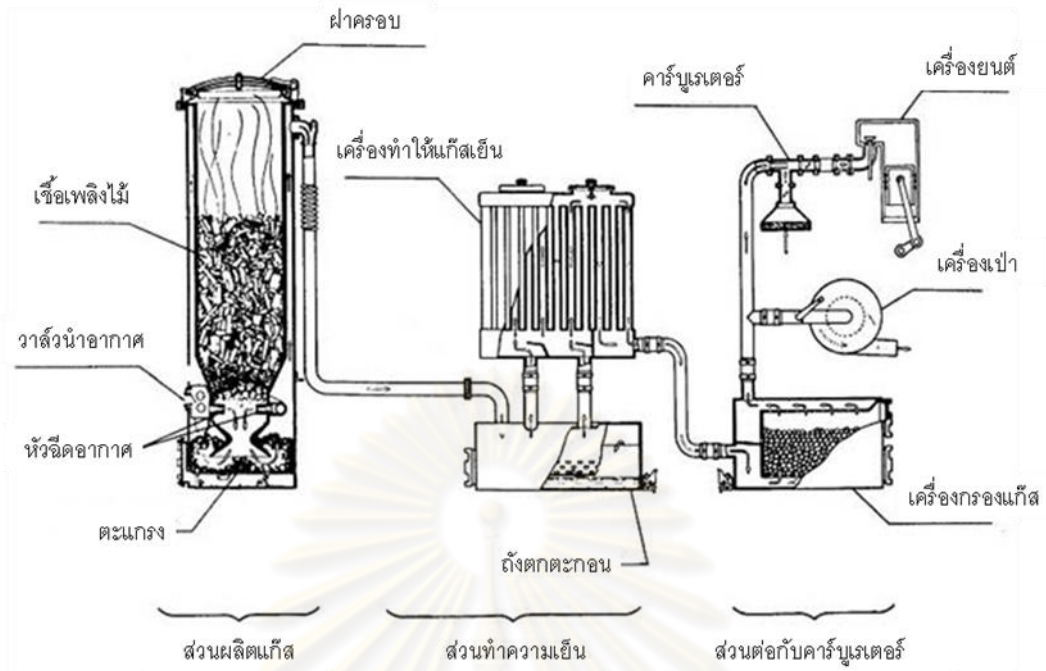
นักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มได้ทดลองพบว่าสารประกอบอินทรีย์สามารถถูกทำให้สลายได้ง่ายโดยกระแสไอออนโคโรนาหรือพลาสมา (Nair et al, 2003) โดยอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนกับโมเลกุลแก๊สทำให้เกิดสารอนุมูลที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขึ้นและเข้าทำปฏิกิริยาในการแตกตัวน้ำมันทาร์ต่ออย่างรวดเร็ว

2.8 ตัวอย่างระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

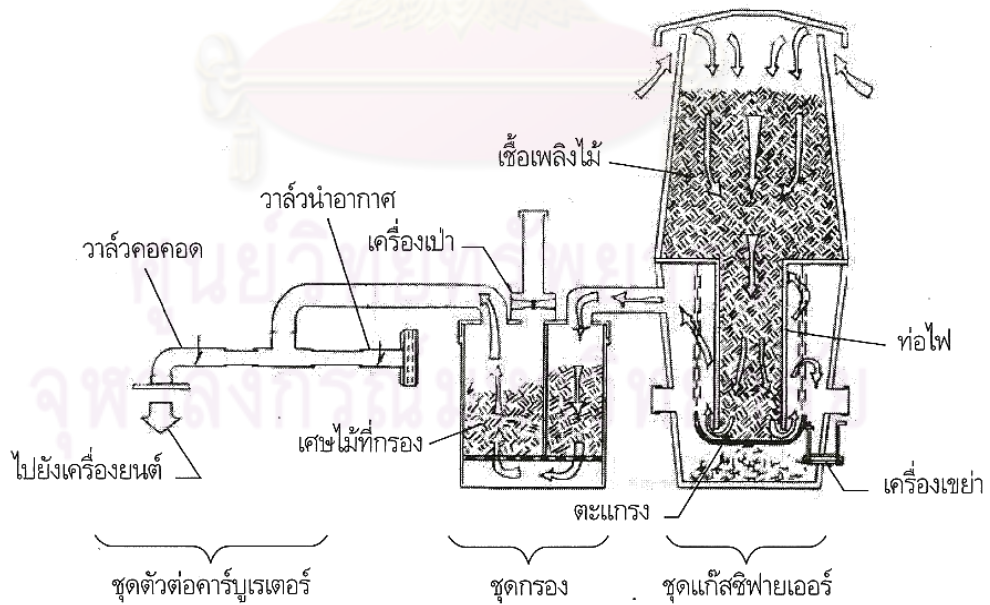
หัวใจของระบบอยู่ที่กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส ระบบที่เหมาะสมจะเป็นแบบเชื้อเพลิงนิ่งหรือขยับ (fixed or moving bed) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เก่าแก่ที่สุด ในยุคแรกเป็นการพัฒนาเพื่อใช้กับถ่านหินหรือถ่านโค้กที่ความดันบรรยากาศ เนื่องจากเป็นแบบที่สะดวก ไม่ซับซ้อน และเหมาะกับขนาดการผลิตที่ไม่ใหญ่มาก กระบวนการแรกๆ คือ กระบวนการเศษเถ้าแห้ง (dry slag) โดย Lurgi ซึ่งเป็นเตาปฏิกรณ์ที่ใช้กับถ่านหินและมีการพัฒนาและใช้งานมาอย่างต่อเนื่อง และในช่วงสงครามโลกมีการนำเสนอเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงขนาดเล็กแบบ Imbert ขึ้นมาใช้ โดยใช้วัตถุดิบป้อนเป็นเศษวัสดุทางการเกษตรดังรูปที่ 2.14 - 2.16



รูปที่ 2.14 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Lurgi (ที่มา sasol : online)



รูปที่ 2.15 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Imbert
(ที่มา lowtechmagazine, 2010 : online)



รูปที่ 2.16 เตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบปรับปรุงจาก Imbert
(ที่มา woodgas : online)

2.8.1 ระบบการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีววมวลในประเทศจีน

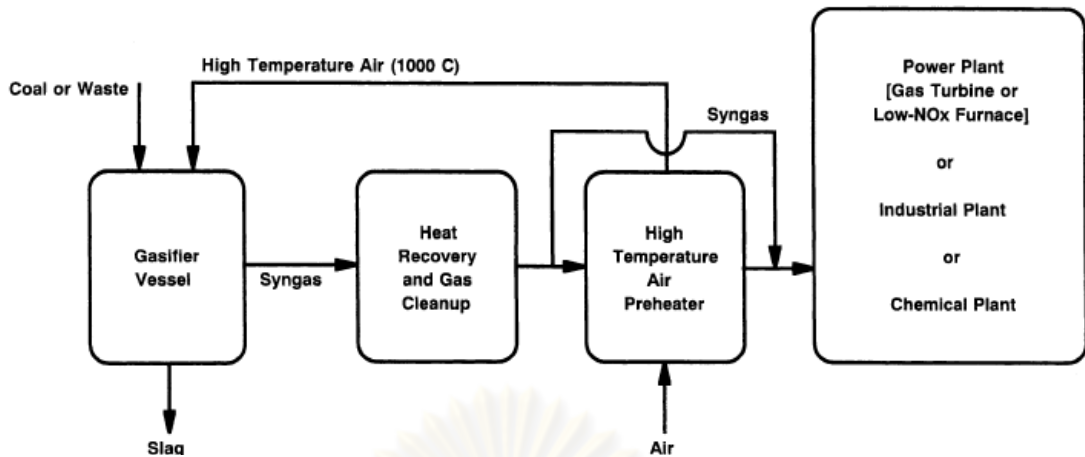
ในประเทศจีนมีการพัฒนาการใช้ประโยชน์เชิงพลังงานจากชีวมวลมาช้านาน โดยเฉพาะการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน ในระยะแรกๆ เตาผลิตแก๊สที่นิยมใช้จะเป็นเตาปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น ต่อมาเตาปฏิกรณ์แบบไหลลงสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงกว่า จึงเริ่มมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น รูปที่ 2.17 โดยเตาแบบนี้มักใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สในครัวเรือนและใช้กับเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้าระดับชุมชน และในปัจจุบันได้มุ่งความสนใจไปที่ระบบ circulating fluidized bed ซึ่งใช้ในการผลิตไฟฟ้าและพลังงานขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรม (Leung et al, 2004)



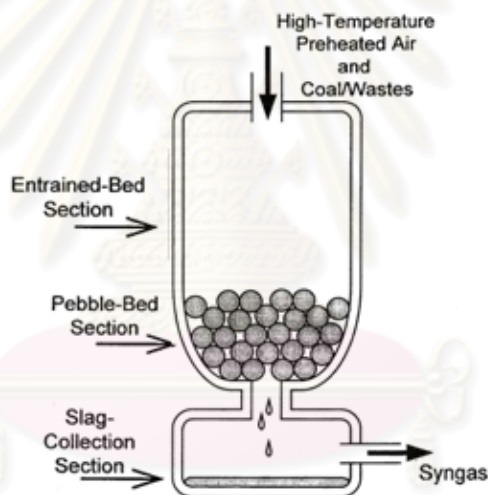
รูปที่ 2.17 ระบบผลิตเชื้อเพลิงแก๊สในประเทศจีน
(ที่มา docksidgreenenergy : online)

2.8.2 ระบบการผลิตแก๊สแบบอากาศอุณหภูมิสูง โดย Tokyo Institute of Technology

ระบบผลิตเชื้อเพลิงแก๊สแบบนี้ใช้อากาศร้อนอุณหภูมิสูงเป็นตัวกลางในการผลิตแก๊สจากชีวมวล การเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นสารระเหยสามารถเกิดขึ้นได้เร็วมาก มีสารระเหยออกมามากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สดีขึ้น อากาศร้อนอุณหภูมิสูงได้มาจากเครื่องทำความร้อนแบบรีเจเนอเรทีฟ เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนสูงกว่าการใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องเกือบร้อยละ 35 (Pian and Yoshikawa, 2001) โดยเตาผลิตแก๊สและระบบผลิตเชื้อเพลิงแบบอากาศอุณหภูมิสูงแสดงดังรูปที่ 2.18 และ 2.19



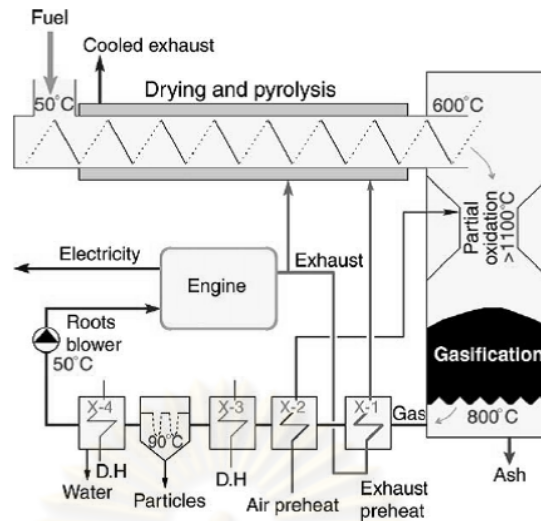
รูปที่ 2.18 ระบบผลิตแก๊สแบบอากาศอุณหภูมิสูง (MEET gasification system)
(ที่มา Pian and Yoshikawa, 2001)



รูปที่ 2.19 เตาผลิตแก๊สแบบอากาศอุณหภูมิสูง (MEET gasifier)
(ที่มา Pian and Yoshikawa, 2001)

2.8.3 ระบบผลิตแก๊สแบบหลายชั้นตอนโดย Technical University of Denmark

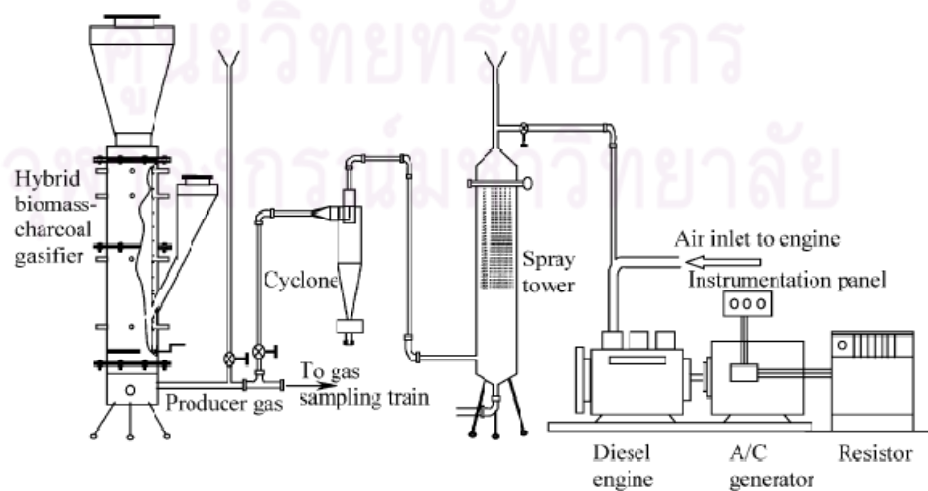
กระบวนการนี้จะแยกสารระเหยที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนไพโรไลซิสออกจากถ่านชาร์ สารระเหยที่ได้จะส่งเข้าไปเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ และให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเข้าทำปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันต่อกับถ่านชาร์ ดังรูปที่ 2.20 เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้จะไม่มีน้ำมันทาร์เหลืออยู่เลย และสามารถไ้เดินเครื่องยนต์ได้หลังจากการทำให้เย็นและกรองฝุ่นเขม่าออกไปแล้ว



รูปที่ 2.20 เตาผลิตแก๊สแบบหลายขั้นตอน (ที่มา Henriksen et al, 2006)

2.8.4 ระบบผลิตแก๊สแบบผสมโดย Asian Institute of Technology

Bhattacharya ได้พัฒนาระบบลูกผสมนี้ โดยระบบมีการป้อนอากาศเข้า สามจุดด้วยกัน ด้านบนสุดของระบบจะเป็นเตาแบบไหลขึ้น ซึ่งแก๊สที่ได้สามารถนำไปใช้เผาไหม้เป็นแหล่งความร้อน และถ่านชาร์ที่เหลือจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันต่อที่ตรงกลางและด้านล่างซึ่งเป็นแบบไหลลง แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณน้ำมันธาร์น้อยมาก และได้นำมาพัฒนาต่อ และทดสอบการผลิตไฟฟ้าโดยต่อเข้ากับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรงขนาด 2.5 ลิตรของ Perkins ดังรูปที่ 2.21 พบว่าเดินเครื่องได้ดีไม่มีปัญหาน้ำมันธาร์ (Bhattacharya et al, 2001)

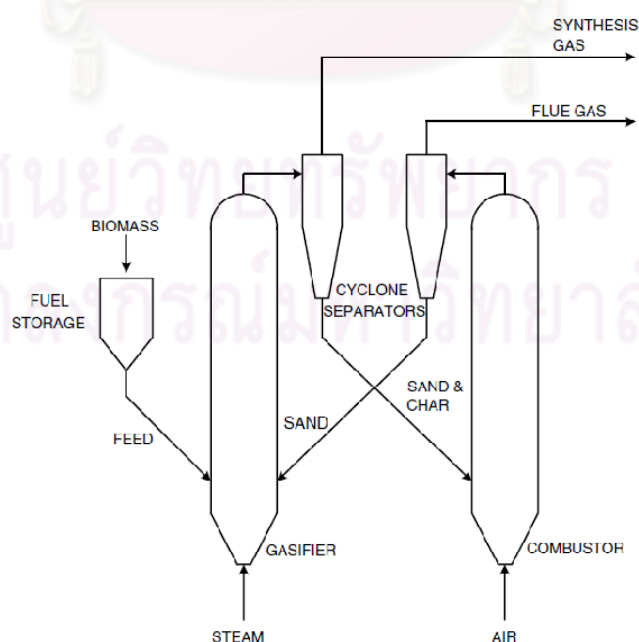


รูปที่ 2.21 ระบบผลิตแก๊สแบบผสม (ที่มา Bhattacharya et al, 2001)

2.8.5 ระบบผลิตแก๊สด้วยเตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่

2.8.5.1 กระบวนการ SilvaGas

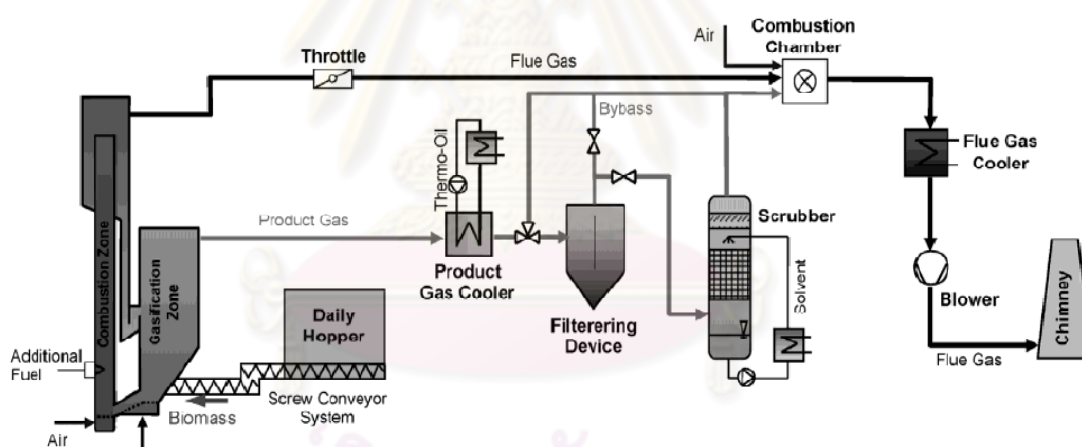
หลักการของกระบวนการ SilvaGas จะคล้ายกับหลักการของเครื่องแตกสลายเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracker) ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ หรือกระบวนการ Exxon Flexicoker ซึ่งในกระบวนการจะประกอบด้วยเตาแบบฟลูอิดไธซ์ 2 ส่วน ส่วนแรกจะเกิดกระบวนการแกซีฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน โดยความร้อนที่จำเป็นต่อปฏิกิริยาจะมาจากทรายร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในส่วนที่สอง พิจารณารูปที่ 2.22 ซึ่งมวลจะถูกป้อนเข้าทางส่วนผลิตแก๊ส โดยจะสัมผัสกับทรายร้อนและไอน้ำภายในเตาเกิดปฏิกิริยาได้เป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ หลังจากนั้นทรายและแก๊สที่ได้จะถูกแยกออกจากกันด้วยไซโคลน ซึ่งแก๊สที่ได้ก็คือ แก๊สเชื้อเพลิง ส่วนทรายที่แยกออกมาจะถูกส่งกลับมายังส่วนเผาไหม้ พร้อมกับถ่านชาร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ทรายจะถูกให้ความร้อนอีกครั้งจากการเผาไหม้ถ่านชาร์ใน ส่วนเผาไหม้ ในการเผาไหม้จะเกิดแก๊สเสียเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นต้น โดยทรายในส่วนเผาไหม้จะถูกแยกออกจากแก๊สเสียด้วยไซโคลน แก๊สเสียจะปล่อยออกทางด้านบน ส่วนทรายจะถูกป้อนกลับไปยังส่วนผลิตแก๊ส เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการแกซีฟิเคชันต่อไป



รูปที่ 2.22 เตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่ SilvaGas (ที่มา Higman and van der Burgt, 2008)

2.8.5.2 FICFB (fast internal circulating fluid-bed)

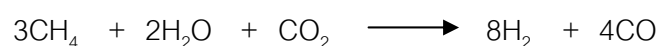
กระบวนการ FICFB ถูกพัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยเวียนนาในประเทศออสเตรีย ซึ่งเป็นอีกกระบวนการที่ทำการแยกส่วนผลิตแก๊สด้วยไอน้ำออกจากส่วนเผาไหม้ โดยส่วนเผาไหม้จะเป็นแหล่งผลิตความร้อนให้กับส่วนผลิตแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยส่วนผลิตแก๊สในกระบวนการ FICFB จะมีลักษณะเป็นเตาแบบเบดนิ่งซึ่งต่างจาก SilvaGas ที่เป็นเตาแบบฟลูอิดไดซ์ ในกระบวนการทรายและถ่านชาร์ที่เหลือจากปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันจะออกทางด้านล่างของส่วนผลิตแก๊สและถูกส่งไปยังส่วนเผาไหม้ ถ่านชาร์จะถูกเผาไหม้และส่งผ่านความร้อนมายังวัสดุเบด วัสดุเบดร้อนจะถูกแยกออกจากแก๊สเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ในไซโคลนและกลับเข้าสู่ส่วนผลิตแก๊ส โดยผ่านทาง seal leg ซึ่งวัสดุเบดจะนำความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้มาใช้ในปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันต่อไป ระบบนี้ใช้วัสดุเบดเป็นโอเลฟิน ซึ่งนอกจากทำหน้าที่เป็นวัสดุถ่ายโอนความร้อนแล้วยังทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณน้ำมันนาร์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากโอเลฟินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยให้น้ำมันนาร์เกิดการแตกตัวเป็นสารโมเลกุลที่เล็กลง



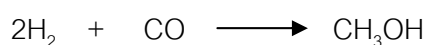
รูปที่ 2.23 เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง FICFB (ที่มา Pfeifer et al, 2004)

2.9 การผลิตเมทานอล

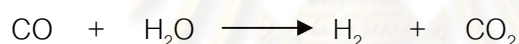
ตามปกติเมทานอลผลิตมาจากการแปลงสภาพแก๊สธรรมชาติซึ่งมีแก๊สมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักไปเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยทำปฏิกิริยาผ่านตัวเร่งปฏิกิริยากับไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในอัตราส่วน 2:1



จากนั้นนำแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นี้ไปผ่านความดันและเปลี่ยนเป็นเมทานอลในที่สุด



ในลักษณะคล้ายๆ กัน การผลิตเมทานอลจากชีวมวล จำเป็นต้องแปรรูปวัตถุดิบตั้งต้นให้เป็นแก๊สสังเคราะห์ก่อน ซึ่งต้องทำให้ชีวมวลเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่มีส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 18 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 23 คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 9 มีเทนร้อยละ 2.5 ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ร้อยละ 1 ออกซิเจนร้อยละ 0.5 และไนโตรเจนร้อยละ 46 ผ่านกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยใช้อากาศ หลังจากนั้นทำการแยกแก๊สอื่นๆ ออก ให้เหลือแต่ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ และต้องปรับสัดส่วนของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็น 2 : 1 ด้วยการให้คาร์บอนมอนอกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยา water gas shift กับไอน้ำให้ออกมาเป็นไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น จากนั้นจึงแยกคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ออกไป จะเห็นได้ว่าประมาณร้อยละ 50 ของคาร์บอนในชีวมวลที่เข้าสู่กระบวนการจะถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ



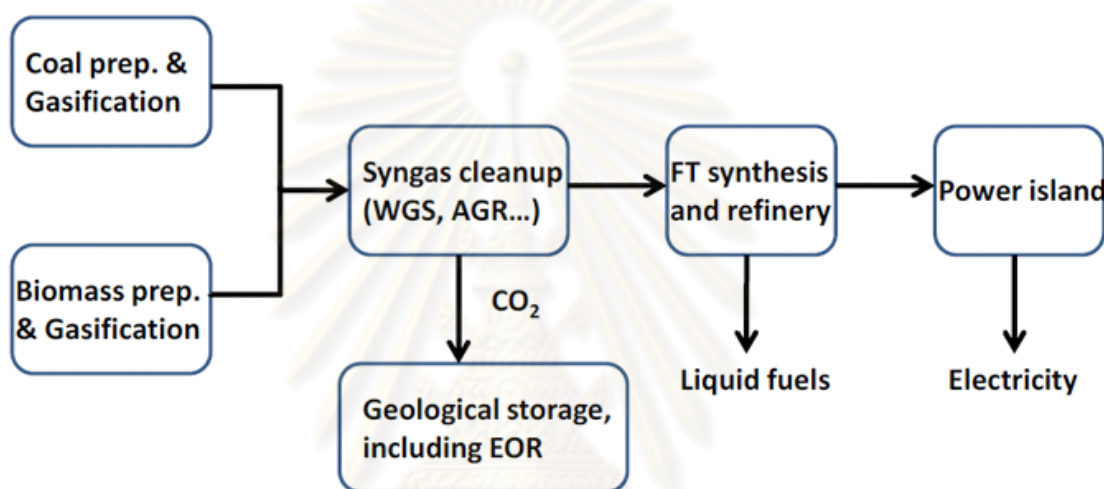
แก๊สผสมที่ถูกปรับสัดส่วนแล้วจะถูกกดอัดไปที่ความดัน 150 - 300 บาร์ แล้วส่งเข้าถังปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพวกสังกะสีและโคโรเมียมอยู่ กว่าร้อยละ 95 ของแก๊สผสมในถังจะเกิดเป็นเมทานอล ในการผลิตเมทานอล 1 ลิตร จะใช้แก๊สธรรมชาติประมาณ 0.5 กิโลกรัม ในขณะที่หากใช้ไม้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นจะต้องใช้ไม้ประมาณ 2 กิโลกรัม

2.10 การผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ได้ถูกคิดค้นขึ้นตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 เพื่อแปลงถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการฟิชเชอร์โทรปช์ (Fischer-Tropsch synthesis) นอกจากนี้ถ่านหินแล้วยังมีการใช้แก๊สธรรมชาติเป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ในการแปรรูปเชื้อเพลิงแก๊สให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวนั้นประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก คือ

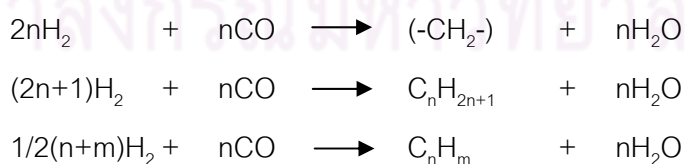
1. การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากแก๊สธรรมชาติ
2. การนำแก๊สสังเคราะห์ไปผ่านกระบวนการฟิชเชอร์โทรปช์เพื่อแปลงเป็นเชื้อเพลิงเหลว
3. การปรับปรุงคุณภาพของเหลวเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.24

แม้ว่าจะมีขั้นตอนไม่มาก แต่ก็ต้องการเทคนิคขั้นสูงในการผลิตในเชิงพาณิชย์ ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ผลิตหลายรายที่สามารถผลิตน้ำมันสังเคราะห์ได้ เช่น บริษัท Royal Dutch Shell โดยเทคโนโลยี Shell middle distillation synthesis Sasol บริษัท Chevron โดยเทคโนโลยี Sasol slurry phase distillate และบริษัท Conocophillips โดยเทคโนโลยี Gas-to-Liquid ซึ่งรายละเอียดในแต่ละเทคนิคและสารเร่งปฏิกิริยานั้นยังคงเป็นความลับของผู้ผลิต โดยตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ ส่วนประกอบของแก๊สตั้งต้น ความดัน ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับชีวมวล



รูปที่ 2.24 การสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว (ที่มา Princeton University : online)

กระบวนการฟิชเชอร์โทรปช์เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนสายยาวจากแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มักจะใช้กัน คือ เหล็ก และโคบอลต์ กระบวนการฟิชเชอร์โทรปช์สามารถอธิบายได้โดยสมการทางเคมี (Demirbas, 2007)



โดยที่ n คือ ความยาวเฉลี่ยของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน m คือ จำนวนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยพาราฟินและโอเลฟินเป็นหลัก ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นน้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และอื่นๆ ได้

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xu และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเตาฟลูอิดไดซ์แบบ low-velocity dense fluidized bed (LVFB) ซึ่งมีลักษณะการไหลของของแข็งในเบดเป็นแบบ bubbling bed และ high-velocity pneumatic riser (HVPR) ซึ่งมีลักษณะการไหลของของแข็งภายในเบดแบบ fast-fluidized bed ว่าแบบใดเหมาะสมที่จะใช้เป็นส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊สในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ จากการวิจัยพบว่ารูปแบบของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ที่ให้ประสิทธิภาพของกระบวนการแกซิฟิเคชันและความสามารถในการกำจัดทาร์สูงประกอบไปด้วยส่วนเผาไหม้ที่เป็นเตาฟลูอิดไดซ์แบบ HVPR และส่วนผลิตแก๊สที่เป็นเตาฟลูอิดไดซ์แบบ LVFB

Xu และคณะ (2009) พบว่าเตาแบบเบดคู่ที่ทำการศึกษาไปในปี 2006 ในส่วนผลิตแก๊สมีส่วนของ freeboard มากเกินไปทำให้แก๊สบางส่วนที่เกิดขึ้นไม่ได้สัมผัสกับทาร์ร้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงในส่วนผลิตแก๊สให้มีลักษณะเป็นสองชั้นเพื่อลดบริเวณ freeboard และเพิ่มโอกาสให้แก๊สได้สัมผัสกับทาร์ร้อนมากขึ้น โดยพบว่าเตาผลิตแก๊สที่ได้ทำการปรับปรุงในส่วนผลิตแก๊ส ให้ร้อยละการเปลี่ยนของทั้งคาร์บอนและไฮโดรเจน และ % cold gas efficiency สูงกว่าเดิม แต่ปริมาณทาร์ที่ได้กลับมีค่าต่ำกว่าเดิม ทั้งนี้เป็นเพราะไอระเหยเกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกับทาร์ร้อนสูงขึ้น และมีเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้ทาร์แตกตัวได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการออกแบบในส่วนผลิตแก๊ส ซึ่งมีลักษณะเป็นสองชั้นทำให้ต้องใช้ทั้งไอน้ำและอากาศเพื่อให้เกิดการฟลูอิดเซชัน ส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนผลิตแก๊สลดลง และผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีไนโตรเจนปะปนไปด้วย ส่งผลให้คุณภาพของแก๊สที่ผลิตได้ไม่ดีเท่าที่ควร

Wei และคณะ (2006) ได้ทำการออกแบบเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ที่มีส่วนผลิตแก๊สเป็นแบบเบดนิ่ง ซึ่งมีลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและไอน้ำจะไหลในทิศทางเดียวกัน โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการแกซิฟิเคชันและความสูงของเบดในส่วนผลิตแก๊สที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยใช้ซีลี้อยเป็นเชื้อเพลิงและโอลีวีนเป็นทั้ง bed material และตัวเร่งปฏิกิริยาในตัวเดียวกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส (gas yield) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปทางเคมี (chemical efficiency) ที่ได้จะสูงขึ้น แต่ปริมาณทาร์และชาร์ลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาอาร์ฟอริงด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์ (tar cracking) จะเกิดได้ดี ซึ่งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้เท่ากับ 0.84 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของชีวมวล (daf) และปริมาณทาร์เท่ากับ 1.55 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (แก๊สแห้ง) และผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของเบดในส่วนของ gasifier ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

พบว่าเมื่อความสูงของเบตเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปทางความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ปริมาณทาร์และชาร์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความสูงของเบตส่งผลโดยตรงต่อเวลาในการทำปฏิกิริยา

Hofbauer และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุเบตซึ่งมีความสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ในตัวมันเองในเตาปฏิกรณ์แบบเบตคู่เพื่อลดปริมาณทาร์และเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยใช้วัสดุเบตเป็นโอลิวินและตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโอลิวินที่มีการไหลตุนิกเกลลงไป 3.7 % โดยน้ำหนัก ซึ่งในการทดลองจะทำการผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับวัสดุเบตในสัดส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 43 % โดยน้ำหนักของวัสดุเบตทั้งหมด จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้เหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุเบตในเตาปฏิกรณ์แบบเบตคู่ อีกทั้งยังช่วยให้เกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของมีเทนและทาร์ได้ดีขึ้น โดยปริมาณทาร์ที่ได้ลดลง 75% ในขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 8% โดยปริมาตร

สมฤทัย ขุนโสภา (2550) ศึกษาและพัฒนาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลสำหรับการแตกตัวทาร์ในกระบวนการแกซีฟิเคชันของชีวมวลด้วยไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง โดยชีวมวลที่นำมาศึกษา คือ แกลบ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ชนิดของเบสออกไซด์ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา และวิธีในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ปรับปรุงด้วยแมกนีเซียม (Mg) และเตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังตามลำดับ (Sequential impregnation) ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะช่วยเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของมีเทนและปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีเสถียรภาพสูงสำหรับการแตกตัวทาร์ เนื่องจากสามารถป้องกันการเกาะติดของคาร์บอนได้เป็นอย่างดีส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิดการเสื่อมสภาพ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝังตามลำดับ จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝังร่วม (Co-impregnation) เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการเผาสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพแล้ว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะให้ผลตรงกันข้ามกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ไม่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ

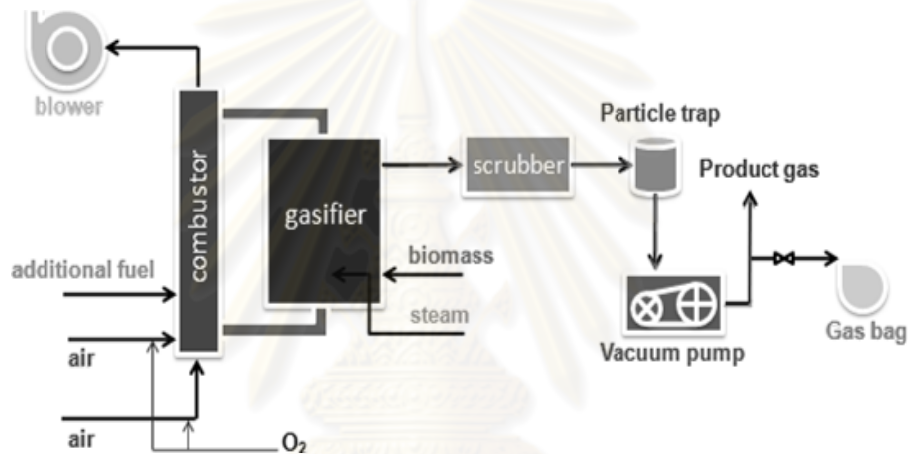
บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่ (dual-bed gasifier)

เตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่ที่ใช้ในการทดลองนี้ แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.1 เตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่

3.1.1.1 ส่วนผลิตแก๊ส (combustor) ทำจากเหล็กทนความร้อนภายในหล่อปูนเป็นฉนวนความร้อนประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนเตาเผาสูง 55 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.8 เซนติเมตร ส่วนท่อนำส่งของแข็งสูง 191 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 เซนติเมตร

3.1.1.2 ส่วนผลิตแก๊ส (gasifier) ทำจากเหล็กทนความร้อนภายในหล่อปูนเป็นฉนวนความร้อนประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนไพโรไลเซอร์สูง 72 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 33 เซนติเมตร ส่วนรีฟอร์มเมอร์สูง 55.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 เซนติเมตร

3.1.1.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (flow meter) ของอากาศ แก๊สหุงต้ม และแก๊สออกซิเจน

3.1.1.4 โบลวเวอร์ (blower)

3.1.1.5 เทอร์โมคัพเพิล (thermocouple) ชนิด K

- 3.1.1.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
- 3.1.1.7 ปั๊มน้ำ (stoke pump)
- 3.1.1.8 สครับเบอร์ (water scrubber)
- 3.1.1.9 เครื่องกรองฝุ่นเขม่า (filter)
- 3.1.1.10 อุปกรณ์ดูดความชื้น บรรจุด้วยซิลิกาเจล
- 3.1.1.11 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)
- 3.1.1.12 ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (gas bag) ขนาด 1 ลิตร

3.1.2 เครื่องคัดขนาด (sieve shaker)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องคัดขนาดเพื่อคัดขนาดของทรายและชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง โดยเครื่องคัดขนาดแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องคัดขนาด

3.1.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatograph)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC- 2014 ดังรูปที่ 3.3 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากเตาปฏิกรณ์ โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

| | |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| แก๊สพา (carrier gas) | อาร์กอน (Ar) |
| ชนิดคอลัมน์ (Column) | Unibeads C packed column |
| อุณหภูมิการฉีด (injector temperature) | 120 องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิกอลัมน์ (Column temperature) | 60, 120 และ 140 องศาเซลเซียส |
| ระบบตรวจวัด (detector) | ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD) |

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่

3.2.1 ซี้เลื่อยขนาดอนุภาคไม่เกิน 1.2 มิลลิเมตร จากโรงเลื่อยเชี่ยวชาญชัยคำไม้ จังหวัดสมุทรสงคราม

3.2.2 ทราบขนาดอนุภาค 250 – 425 ไมโครเมตร จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ตั้งฮะฮวด จังหวัดระยอง

3.2.3 ถ่านไม้ จากห้างหุ้นส่วนจำกัด ถ่านปรีชา

3.2.4 แก๊สหุงต้ม จากบริษัท ปตท. มหาชน จำกัด

3.2.5 แก๊สออกซิเจน 99.5% จากบริษัท แลปแก๊ส (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.6 ซิลิกาเจล จากบริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด

3.2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับโมลิบดีนัมจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท.

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมทรายและเชื้อเพลิง

3.3.1.1 คัดขนาดทรายให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 250 - 425 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องคัดขนาด

3.3.1.2 นำถ่านไม้ไปบดด้วยเครื่องบดขนาดกลางเพื่อป้อนเป็นเชื้อเพลิงเสริม

3.3.1.3 นำขี้เถ้าไประเหยความชื้นออกในเครื่องทำแห้งเป็นเวลา 5 ชั่วโมงก่อนการดำเนินการ

3.3.1.4 นำขี้เถ้าไปวิเคราะห์แบบประมาณและวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พร้อมหาค่าปริมาณความร้อน

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

3.3.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

- วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

3.3.2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

- วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHN analyzer

3.3.3 การทดสอบเตาผลิตแก๊สที่ภาวะอุณหภูมิห้อง

3.3.3.1 เติมทรายน้ำหนักประมาณ 110 กิโลกรัมลงในส่วนผลิตแก๊ส

3.3.3.2 ป้อนอากาศจากเครื่องอัดอากาศ 180 ลิตรต่อนาที ผ่านรูกระจายอากาศทางด้านล่างของส่วนเผาไหม้ และ 100 ลิตรต่อนาทีที่เหนือรูกระจายอากาศ

3.3.3.3 เปิด blower และเปิดสกรูในส่วนป้อนกลับให้ทรายในส่วนผลิตแก๊สไหลเข้าสู่ส่วนเผาไหม้ด้วยอัตรา 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.3.3.4 ปรับอัตราการใช้ของอากาศที่ผ่านกระจายอากาศให้ลดลงเหลือ 130 ลิตรต่อนาที แล้วปรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปผสมด้วยอัตราการใช้ 50 ลิตรต่อนาที เพื่อใช้เป็นตัวแทนของอากาศที่ไหลย้อนเข้าไปในส่วนผลิตแก๊สในส่วนป้อนกลับ

3.3.3.5 ป้อนอากาศเข้าไปทางด้านล่างของส่วนผลิตแก๊สด้วยอัตราการใช้ 70 ลิตรต่อนาที เพื่อใช้เป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นในการดำเนินการที่ภาวะอุณหภูมิจริง

3.3.3.6 เปิดปั๊มสุญญากาศแล้วปรับอัตราการดูดแก๊สเป็น 70 ลิตรต่อนาที ดูดเอาอากาศที่ป้อนเข้าไปในส่วนผลิตแก๊สออกอย่างต่อเนื่อง เพื่อจำลองให้เหมือนกับลักษณะการทำงานของเครื่องที่ภาวะอุณหภูมิจริง

3.3.3.7 เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงจึงเก็บตัวอย่างอากาศจากออกของส่วนผลิตแก๊สไปวิเคราะห์โดยใช้ปั๊มแบบเพอริสเทลติกดูดออกมาเก็บไว้ในถุงเก็บแก๊ส

3.3.3.8 วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สที่เก็บมาด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและบันทึกผล

3.3.4 การเดินระบบผลิตแก๊สที่ภาวะอุณหภูมิจริง

3.3.4.1 เติมทรายน้ำหนัก 110 กิโลกรัมลงในส่วนผลิตแก๊ส (ในกรณีของการดำเนินการภายใต้สภาวะที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย จะใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปแทนทรายเป็นปริมาณ 11 กิโลกรัมคิดเป็นประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)

3.3.4.2 อุ่นเตาในส่วนเผาไหม้ด้วยแก๊สหุงต้มโดยป้อนอากาศที่หัวจุดเตาจากเครื่องอัดอากาศ 150 ลิตรต่อนาที สังเกตกระจกดูเปลวไฟที่หัวจุดเตาว่ายังคงมีเปลวไฟสีฟ้าติดอยู่ หากไฟดับให้หยุดป้อนแก๊สหุงต้มทันทีแล้วเริ่มจุดเตาใหม่ และเมื่อไฟติดให้เปิด blower ซึ่งติดตั้งอยู่ตรงทางออกของส่วนเผาไหม้

3.3.4.3 ป้อนอากาศจากเครื่องอัดอากาศ 70 ลิตรต่อนาที ผ่านกระจายอากาศทางด้านล่างของส่วนเผาไหม้ และ 50 ลิตรต่อนาทีที่เหนือกระจายอากาศ พร้อมทั้งเปิดสกรูในส่วนป้อนกลับและใบกวนในส่วนไพโรไลเซอร์เพื่อให้ทรายในส่วนผลิตแก๊สไหลเข้าสู่ส่วนล่างของส่วนเผาไหม้ด้วยอัตราการใช้ 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.3.4.4 เมื่ออุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส จึงเริ่มป้อนถ่านไม้เข้าไปในส่วนเผาไหม้ด้วยอัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และป้อนออกซิเจนเข้าไปผสมกับอากาศที่ป้อนเข้าทางส่วนเผาไหม้ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เพื่อให้ถ่านไม้ที่ป้อนเข้าไปเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น

3.3.4.5 เมื่ออุณหภูมิในส่วนเผาไหม้สูงถึง 850 องศาเซลเซียสแล้ว ค่อยๆปรับอัตราการป้อนทรายเพิ่มขึ้นทีละน้อยโดยไม่ให้อุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ตก จนกระทั่งอุณหภูมิในส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600-700 องศาเซลเซียส

3.3.4.6 หยุดป้อนแก๊สหุงต้มและเริ่มป้อนซีลี้อยู่เข้าทางส่วนผลิตแก๊ส รอจนกระทั่งมีแก๊สเกิดขึ้นให้หยุดป้อนถ่านไม้ โดยเชื้อเพลิงในส่วนเผาไหม้จะได้จากถ่านชาร์ที่เหลือจากกระบวนการแกซีฟิเคชัน (ไพโรไลซิส) ในส่วนผลิตแก๊ส

3.3.4.7 ป้อนซีลี้อยู่ด้วยอัตรา 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและป้อนไอน้ำตามสภาวะที่ต้องการเข้าทางส่วนไพโรไลเซอร์ รอจนความดันภายในส่วนผลิตแก๊สสูงถึง 7 มิลลิบาร์จึงเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดเอาแก๊สที่เกิดขึ้นออกมา แก๊สที่ถูกดูดออกมาจะผ่านสครับเบอร์เพื่อทำความสะอาดโดยดักเอาน้ำมันทาร์ที่ปนมาด้วยออกไปและลดอุณหภูมิของแก๊สลง ผ่านชุดกรองฝุ่นและชุดดักความชื้น จากนั้นจึงดูดเข้าในถุงเก็บแก๊สโดยใช้ปั๊มแบบเพอริสเทลติก

3.3.4.8 นำตัวอย่างแก๊สที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) และบันทึกผล

3.3.4.9 หยุดการป้อนซีลี้อยู่และไอน้ำ

3.3.4.10 หยุดการป้อนถ่านไม้และออกซิเจน

3.3.4.11 เมื่ออุณหภูมิในส่วนเผาไหม้เหลือประมาณ 400 องศาเซลเซียส ปิดสกรูที่ป้อนทรายจากส่วนผลิตแก๊สมายังส่วนเผาไหม้ และปิดใบกวนในส่วนไพโรไลเซอร์

3.3.4.12 เมื่ออุณหภูมิในส่วนเผาไหม้เหลือประมาณ 300 องศาเซลเซียส หยุดการป้อนอากาศ โดยปิดวาล์วอากาศที่เข้าเครื่องทั้งหมด

3.3.4.13 ปิด blower

3.3.4.14 ปิดเครื่องอัดอากาศ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาเตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่ให้มีความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์สูงกว่าเตาผลิตแก๊สแบบเดิมที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยนำแนวคิดของเตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่ (dual fluidized bed gasifier) มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและจัดสร้างเตาปฏิกรณ์รูปแบบใหม่ โดยเตาที่ออกแบบนั้นประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเผาไหม้ (combustor) และส่วนผลิตแก๊ส (gasifier) ซึ่งทั้งสองส่วนจะแยกกันอย่างชัดเจน เพื่อให้ไม่ให้แก๊สเสียจากกระบวนการเผาไหม้ปนอยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้ โดยส่วนผลิตแก๊สจะทำหน้าที่ผลิตผลิตภัณฑ์แก๊สจากชีวมวล ซึ่งคาร์ทีเหลือจะถูกส่งไปเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ของส่วนเผาไหม้ จากนั้นส่วนเผาไหม้ก็จะถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นไปให้กับส่วนผลิตแก๊สผ่านทางวัสดุนำความร้อน

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการจัดสร้างเตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่และทดลองผลิตแก๊สจากเตาผลิตแก๊สที่จัดสร้างขึ้น ดังนั้นผลการทดลองจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นผลการดำเนินการสร้างและทดสอบเตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่ ซึ่งจะกล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบส่วนต่างๆ การเปรียบเทียบอุปกรณ์ในส่วนควบคุม และผลการทดสอบเตาผลิตแก๊สที่ภาวะอุณหภูมิห้อง ส่วนที่ 2 เป็นผลการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีเปลือยในเตาผลิตแก๊สแบบใหม่ โดยใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

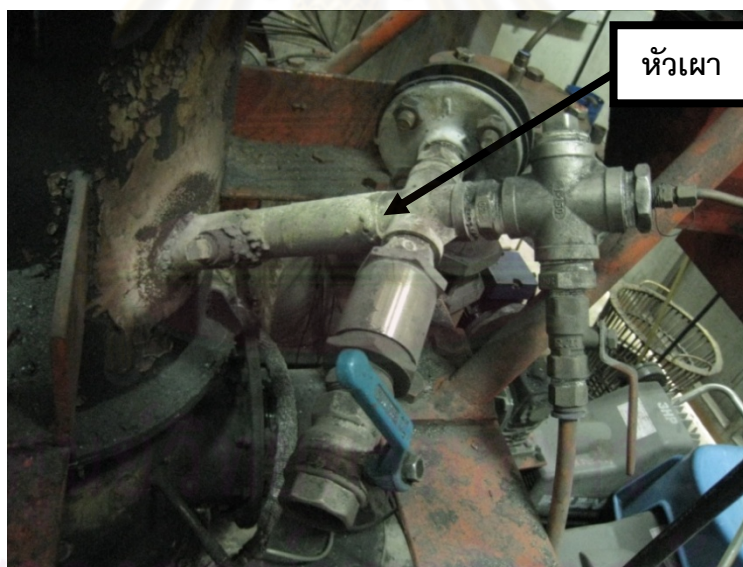
4.1 ผลการดำเนินการสร้างและทดสอบเตาผลิตแก๊สแบบใหม่

4.1.1 การออกแบบและจัดสร้างเตาผลิตแก๊ส

ระบบผลิตแก๊สของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 7 ส่วน ได้แก่ หัวเผา (start-up burner) ระบบป้อนเชื้อเพลิง (fuel feed system) เตาปฏิกรณ์ (gasification column) ส่วนแยกแก๊สและของแข็ง (gas-solid separator) ส่วนป้อนกลับของแข็ง (solid recirculation line) ระบบป้อนไอน้ำ (steam feeding) และหน่วยทำความสะอาดแก๊ส (gas cleaning unit)

4.1.1.1 หัวเผา

หัวเผาของเตาผลิตแก๊สในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ถูกติดตั้งอยู่ในส่วนของห้องเผาไหม้ซึ่งอยู่บริเวณด้านล่างของส่วนเผาไหม้ (combustor) เพื่อใช้อุ่นเตาผลิตแก๊สทั้งส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊สในช่วงเริ่มต้นของการดำเนินการ โดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิงและใช้อากาศจากเครื่องอัดอากาศ สำหรับวัสดุที่ใช้ในการสร้างหัวเผาต้องมีความสามารถทนต่อความร้อนสูงได้เป็นเวลานาน เพราะหน้าที่ของหัวเผา คือ เป็นส่วนที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันก่อนให้เกิดการติดไฟ ดังนั้นจึงใช้ท่อเหล็กไร้สนิม (stainless steel) เบอร์ 304 เป็นวัสดุในการสร้างหัวเผา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหัวเผาเท่ากับ 4 เซนติเมตร โดยปลายท่อข้างหนึ่งจะยื่นเข้าไปถึงกึ่งกลางของห้องเผาไหม้เพื่อให้หัวสตุเบตสัมผัสกับลมร้อนได้มากที่สุด ส่วนปลายท่ออีกข้างมีลักษณะเป็นสามทางเพื่อไว้ให้เชื้อเพลิงและอากาศสามารถไหลเข้ามาผสมกันได้ ด้านข้างของหัวเผาข้างหนึ่งติดตั้งกระจกทนความร้อนไว้สำหรับส่องดูเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของหัวเผาอีกข้างหนึ่งทำเป็นวาล์วเปิด-ปิดไว้สำหรับนำเปลวไฟต้นกำเนิดมาจ่อให้เกิดการติดไฟ



รูปที่ 4.1 หัวเผา

4.1.1.2 ระบบป้องกันเชื้อเพลิง

ระบบป้องกันเชื้อเพลิงของเตาผลิตแก๊สในงานวิจัยนี้เป็นแบบสกรูพีดเดอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงได้ โดยออกแบบให้เป็นสกรูพีดเดอร์แบบสองชั้นตอน เพื่อ

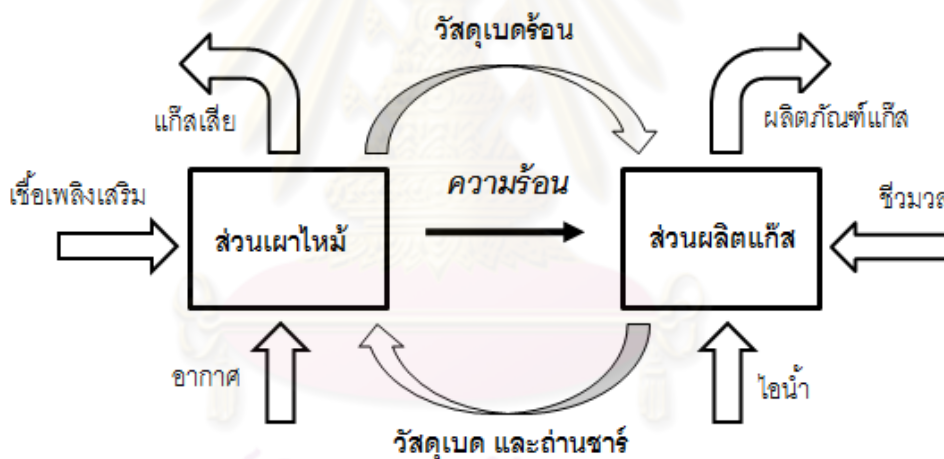
ป้องกันการไหม้ย้อนของเชื้อเพลิงเข้ามาในถังบรรจุเชื้อเพลิง (hopper) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงประกอบด้วยถังบรรจุเชื้อเพลิง และสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง 2 ชุด ชุดแรกตั้งอยู่ด้านบนบนต่อกับถังบรรจุเชื้อเพลิงทำหน้าที่ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ชุดที่สองจะอยู่ด้านล่างติดกับส่วนผลิตแก๊ส โดยระหว่างสกรูลำเลียง 2 ชุดจะมีช่องให้เชื้อเพลิงจากสกรูชุดแรกไหลตกลงมายังสกรูชุดที่สองและมีวาล์วเปิด-ปิดป้องกันการไหม้ย้อนของเชื้อเพลิง สกรูลำเลียงทั้งสองชุดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวป้อน 5 เซนติเมตร ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 1,590 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ ระบบป้อนเชื้อเพลิงติดตั้งอยู่ทางส่วนผลิตแก๊ส โดยสกรูฟีดเดอร์จะป้อนเชื้อเพลิงเข้าทางห้องด้านล่างของส่วนผลิตแก๊สหรือเรียกว่าไพโรไลเซอร์ (pyrolyser) ในไพโรไลเซอร์นั้นจะมีวัสดุเบดอัดแน่นอยู่ทำให้สกรูลำเลียงที่ทำการออกแบบในระยะแรกไม่สามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปข้างในส่วนผลิตแก๊สได้ จึงได้ทำการปรับปรุงสกรูลำเลียงโดยให้ระยะเกลียวที่บริเวณปลายสกรูแคบลง เพื่อให้ความดันบริเวณปลายสกรูสูงขึ้น ทำให้สกรูสามารถป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.2 สกรูฟีดเดอร์แบบสองชั้นตอน

4.1.1.3 เตาผลิตแก๊ส

สำหรับการออกแบบเตาผลิตแก๊สนั้นได้แนวคิดมาจากเตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่ ซึ่งมีการแยกปฏิกิริยาการเผาไหม้และปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันออกไปไว้คนละส่วน เพื่อไม่ให้แก๊สเสียจากกระบวนการเผาไหม้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้ ดังนั้นเตาปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้จึงประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเผาไหม้ (combustor) และส่วนผลิตแก๊ส (gasifier) โดยชีวมวลจะเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันในส่วนผลิตแก๊ส และถ่านชาร์ที่เหลือจากปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันจะถูกส่งไปยังส่วนเผาไหม้พร้อมกับวัสดุเบดซึ่งสูญเสียความร้อนบางส่วนไปกับปฏิกิริยาคูดความร้อนในส่วนผลิตแก๊ส โดยในส่วนเผาไหม้ถ่านชาร์ที่ถูกป้อนกลับมาจะเกิดการเผาไหม้และถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาคายความร้อนของกระบวนการเผาไหม้ให้กับวัสดุเบดซึ่งจะถูกส่งกลับไปยังส่วนผลิตแก๊สเพื่อใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชันต่อไป (Pecho et al, 2008) แนวคิดในการสร้างเตาผลิตแก๊ส แสดงดังรูปที่ 4.3

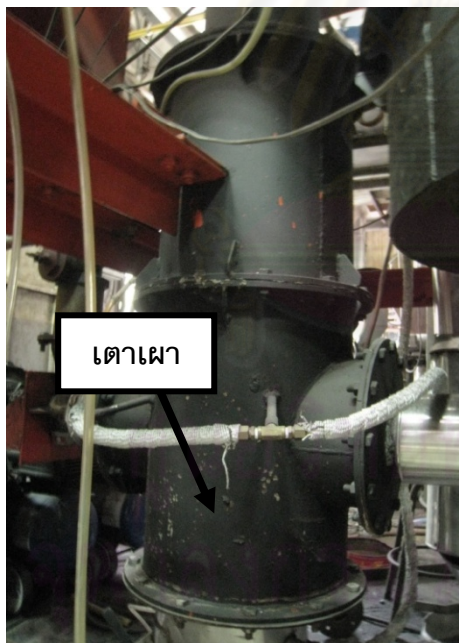


รูปที่ 4.3 แนวคิดการสร้างเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ (reproduced from Pfeifer et al, 2004)

โดยปกติส่วนเผาไหม้มักออกแบบให้เป็นเตาฟลูอิไดซ์เบดที่มีความเร็วสูงหรือเรียกว่าไรเซอร์ (riser) ในระบบฟลูอิไดซ์แบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed; CFB) เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของของแข็งภายในระบบที่ดี (Xu et al, 2006) อย่างไรก็ตามระบบแบบ CFB มีข้อจำกัดด้านเวลาในการเกิดการเผาไหม้ซึ่งขึ้นกับความสูงของไรเซอร์ ดังนั้นส่วนเผาไหม้ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้มีลักษณะเป็นเตาฟลูอิไดซ์แบบฟองอากาศ (bubbling fluidized bed) ซึ่งมีข้อดีคือ มีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้นาน ทำให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น ลดความสูงของส่วนเผาไหม้ลง และยังช่วยเพิ่มเวลาที่การถ่ายโอนความร้อนระหว่างแก๊ส

ร้อนจากการเผาไหม้กับวัสดุเบดได้ แต่ข้อเสียคือ เตาฟลูอิไดซ์แบบฟองอากาศจัดเป็นเตาฟลูอิไดซ์ที่มีความเร็วต่ำจึงมีความสามารถในการนำส่งของแข็งให้เกิดการหมุนเวียนในระบบได้ไม่ดี ดังนั้นจึงออกแบบให้มีระบบนำส่งของแข็งติดตั้งอยู่เหนือเตาเผาทำหน้าที่ส่งให้ของแข็งในส่วนเผาไหม้เคลื่อนที่ไปยังส่วนผลิตแก๊ส

ส่วนเผาไหม้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เตาเผาและท่อนำส่งของแข็ง มีความสูงรวมทั้งหมด 246 เซนติเมตร ส่วนเตาเผามีความสูง 55 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตา 14 เซนติเมตร โดยอากาศจะถูกป้อนเข้า 2 ทางคือ ทางกระจายอากาศแบบบับเบิลแคป (bubble cap) และทางช่องลม 4 ช่อง ทำมุม 45 องศากับแนวระนาบซึ่งติดตั้งอยู่สูงจากรกระจายอากาศ 32 เซนติเมตร ส่วนท่อนำส่งของแข็งมีความสูง 191 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.8 เซนติเมตร ทั้งสองส่วนทำด้วยเหล็กทนร้อนภายในหล่อปูนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม รูปส่วนเผาไหม้ทั้งส่วนเตาเผาและท่อนำส่งของแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



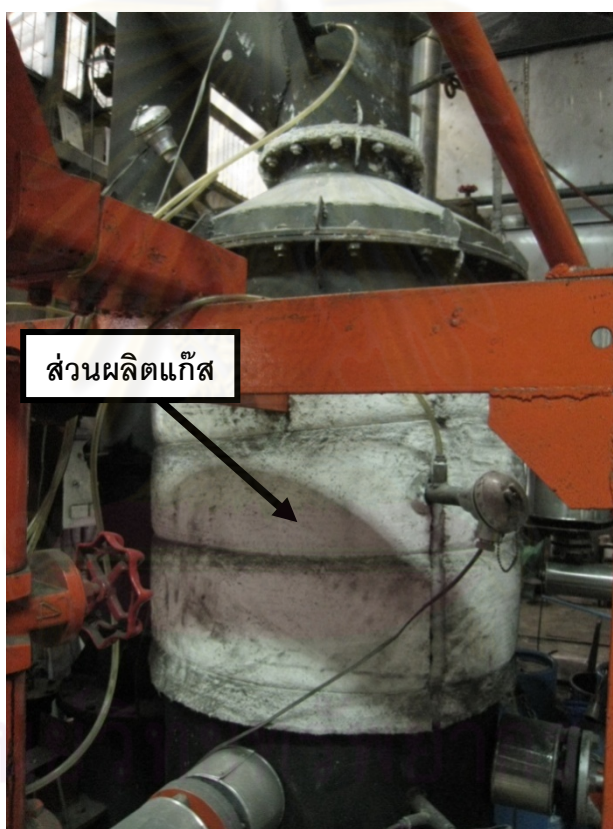
รูปที่ 4.4 ส่วนเตาเผา



รูปที่ 4.5 ส่วนท่อนำส่งของแข็ง

ส่วนผลิตแก๊ส มีลักษณะเป็นเตาแบบเบดเคลื่อนที่ (moving bed gasifier) รูปทรงกระบอกแนวตั้ง ภายนอกทำด้วยเหล็กทนความร้อน ภายในหล่อปูนเพื่อเป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนของระบบ ดังรูปที่ 4.6 ความสูงของเตาเท่ากับ 158 เซนติเมตร มีเส้นผ่าน

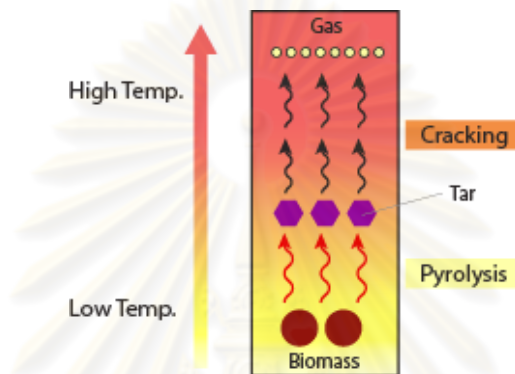
ศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 65 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยห้อง 2 ห้อง คือ ห้องไพโรไลเซอร์ (pyrolyser) ตั้งอยู่ชั้นล่าง และห้องรีฟอร์มเมอร์ (reformer) ตั้งอยู่ชั้นบน ลักษณะของส่วนผลิตแก๊สที่แบ่งเป็นสองชั้นได้แนวคิดมาจากเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบหลายชั้นตอน (Henriksen et al, 2006) ซึ่งมีข้อดีกว่าเตาผลิตแก๊สแบบชั้นตอนเดียว คือ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณทาร์ปนอยู่น้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากชีวมวลที่ถูกป้อนเข้าไปยังห้องไพโรไลเซอร์จะถูกระเหยความชื้นออกและเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสได้เป็นสารระเหยและถ่านชาร์ สารระเหยที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ต่อไปยังห้องรีฟอร์มเมอร์ซึ่งเต็มไปด้วยวัสดุเบดร้อน โดยสารระเหยจะมีโอกาสสัมผัสกับวัสดุเบดร้อนได้มาก ทำให้เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.6 ส่วนผลิตแก๊ส

ด้านบนของส่วนผลิตแก๊สเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับทางออกของส่วนแยกแก๊สและของแข็ง วัสดุเบดร้อนจากส่วนเผาไหม้จึงไหลตกลงมายังด้านบนของส่วนผลิตแก๊สก่อนและค่อยๆ เคลื่อนที่ลงมายังด้านล่าง ดังนั้นการติดตั้งห้องไพโรไลเซอร์ไว้ด้านล่างและให้ห้องรีฟอร์มเมอร์ไว้ด้านบน จึงมีจุดประสงค์เพื่อให้สารระเหยและทาร์ที่เกิดในห้องด้านล่างเคลื่อนที่ขึ้นไปไปยังห้องด้านบนซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ทำให้ทาร์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ ตามรูปที่ 4.7 โดยระหว่างชั้นบนและชั้นล่างของส่วนผลิตแก๊สกันไว้ด้วยโดม ซึ่งโดมนี้จะทำให้สารระเหยและไอน้ำที่เคลื่อนที่ขึ้นมาจากห้องไพโรไลเซอส์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของห้องรีฟอร์มเมอร์ สารระเหยจึงมีโอกาสสัมผัสกับทั้งไอน้ำและวัสดุเบดร้อนได้มาก ส่งผลให้ทาร์ในกระบวนการเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 4.8 แสดงส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊สของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ที่สร้างเสร็จอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.7 แนวคิดสำหรับการลดทาร์ในเตาผลิตแก๊ส



รูปที่ 4.8 เตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ที่สร้างเสร็จอย่างสมบูรณ์

4.1.1.4 ส่วนแยกแก๊สและของแข็ง



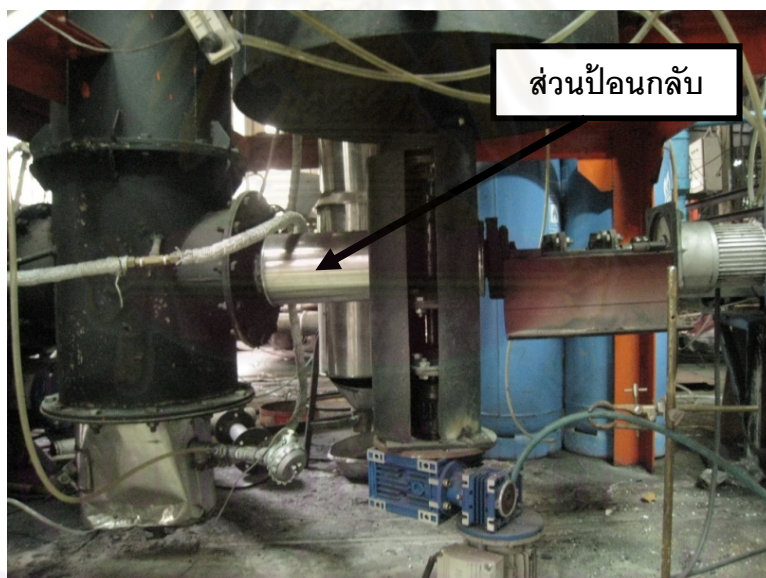
รูปที่ 4.9 ส่วนแยกแก๊สและของแข็ง

เตาฟลูอิดไคซ์แบบหมุนเวียนและเตาผลิตแก๊สแบบเบดคูโดยทั่วไป นิยมใช้ไซโคลน (cyclone) เป็นหน่วยสำหรับแยกเอาของแข็งออกจากกระแสแก๊ส เพราะให้ประสิทธิภาพในการแยกแก๊สและของแข็งค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามสภาวะการทำงานของไซโคลนจำเป็นต้องมีความเร็วของอากาศภายในเบดค่อนข้างสูงเพื่อส่งให้แก๊สและของแข็งเข้าไปในไซโคลน ซึ่งจะเกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงของแข็งไปปะทะกับผนังไซโคลนจนตกลงมาด้านล่าง สำหรับส่วนเผาไหม้ของเตาผลิตแก๊สในงานวิจัยนี้ออกแบบให้เป็นเตาฟลูอิดไคซ์แบบพองอากาศ ซึ่งมีความเร็วของอากาศภายในเบดต่ำ ทำให้ไม่สามารถใช้ไซโคลนในการแยกแก๊สและของแข็งได้ อีกทั้งไซโคลนยังมีประสิทธิภาพในการดักของแข็งที่ดีจนอาจทำให้อนุภาคขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบาเช่น เถ้าลอย ตกกลงไปยังส่วนผลิตแก๊ส ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบได้เพราะเถ้าลอยหรืออนุภาคขนาดเล็กอาจทำให้เกิดการอุดตันภายในส่วนผลิตแก๊สได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบส่วนแยกแก๊สและของแข็งให้มีลักษณะเป็นห้องว่างอยู่เหนือที่อนำส่งส่วนเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยห้องว่างดังกล่าวมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าที่อนำส่งของแข็งในส่วนเผาไหม้ กลไกการแยกแก๊สและของแข็งในส่วนแยกนี้จะเกิดขึ้นเนื่องการสูญเสียความเร็วของของแข็งเมื่อขนาดของพื้นที่ตัดขวางเพิ่มขึ้นอย่างทันที อีกทั้งของแข็งบางส่วนที่ยังมีความเร็วอยู่จะเข้าปะทะกับผนังห้องว่างนั้น ทำให้ความเร็วและพลังงานจลน์ของของแข็งนั้นลดลง ของแข็งจึงถูกแรงโน้มถ่วงดึงให้ตกลงไปยังส่วนผลิตแก๊สด้านล่าง ส่วนแก๊สและอนุภาคขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบาจะลอยไปกับแก๊ส ซึ่งภายหลังจาก

การแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วอนุภาคนาขนาดเล็กที่หลุดลอยไปเหล่านี้จะถูกแยกออกจากแก๊สด้วยไซโคลน ก่อนที่แก๊สจะถูกโบลเวอร์ดูดออกไปทางด้านบน

4.1.1.5 ส่วนป้อนกลับของแข็ง

ในส่วนป้อนกลับของแข็งออกแบบให้เป็นสกรูลำเลียงดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยมีแนวคิดมาจากเตาผลิตแก๊ส ECCMB (external circulating concurrent moving bed) ซึ่งมีข้อดีกว่าส่วนป้อนกลับของแข็งชนิดอื่นๆ เช่น Loop seal และ L-valve คือ สามารถควบคุมอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบได้โดยปรับความเร็วรอบการหมุนของสกรูลำเลียง (Wei et al, 2006) และลดโอกาสการไหลย้อนของแก๊สจากส่วนเผาไหม้มายังส่วนผลิตแก๊ส แต่อาจมีข้อจำกัดด้านความคงทนของวัสดุที่ใช้ต่ออุณหภูมิดำเนินการที่อาจจะสูงเกินไป อย่างไรก็ตามหากสามารถควบคุมอุณหภูมิของเตารวมถึงภาวะดำเนินการต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมแล้วอุณหภูมิส่วนนี้จะอยู่ที่ช่วง 200 – 350 องศาเซลเซียสซึ่งไม่สูงเกินข้อจำกัดด้านวัสดุ



รูปที่ 4.10 ส่วนป้อนกลับของแข็ง

4.1.1.6 ระบบป้อนไอน้ำ

ระบบป้อนไอน้ำของเตาผลิตแก๊สในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนผลิตไอน้ำและส่วนป้อนไอน้ำ ซึ่งถูกออกแบบมาให้ดึงพลังงานความร้อนจากแก๊สเสียที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศกลับมาใช้ในการผลิตไอน้ำ

ส่วนผลิตไอน้ำเป็นส่วนหนึ่งของหน่วยแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเชื่อมต่อกับทางออกของแก๊สในส่วนเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 มีลักษณะเป็นท่อ 2 ท่อซ้อนกัน โดยแก๊สเสียที่ไหลเข้ามาในท่อชั้นนอกจะถ่ายโอนความร้อนไปให้กับน้ำที่ป้อนถูกเข้าไปในท่อชั้นในจนเกิดการแปลงสภาพไปเป็นไอน้ำ ไอน้ำที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปยังส่วนป้อนไอน้ำต่อไป

ส่วนป้อนไอน้ำมีลักษณะเป็นท่อซึ่งต่อออกมาจากส่วนผลิตไอน้ำต่อเนื่องไปยังด้านล่างของส่วนผลิตแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยปลายท่อจะยื่นเข้าไปกึ่งกลางของห้องไฟโรไลเซอร์ บริเวณท่อก่อนเข้าส่วนผลิตแก๊สติดตั้งวาล์วไว้สำหรับปล่อยน้ำที่ยังเป็นไอไม่สมบูรณ์ทิ้ง เพื่อไม่ให้น้ำส่วนนั้นเข้าสู่กระบวนการจนทำให้อุณหภูมิในส่วนผลิตแก๊สตกลง และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ไว้บริเวณท่อไอน้ำขาเข้าเพื่อวัดอุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้าสู่ส่วนผลิตแก๊ส โดยผลการดำเนินการพบว่าไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่ส่วนผลิตแก๊สมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไอน้ำอิ่มตัว และจะกลายเป็นไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (superheated steam) ทันทีที่สัมผัสกับวัสดุร้อนภายในเตา



รูปที่ 4.11 หน่วยแลกเปลี่ยนความร้อน

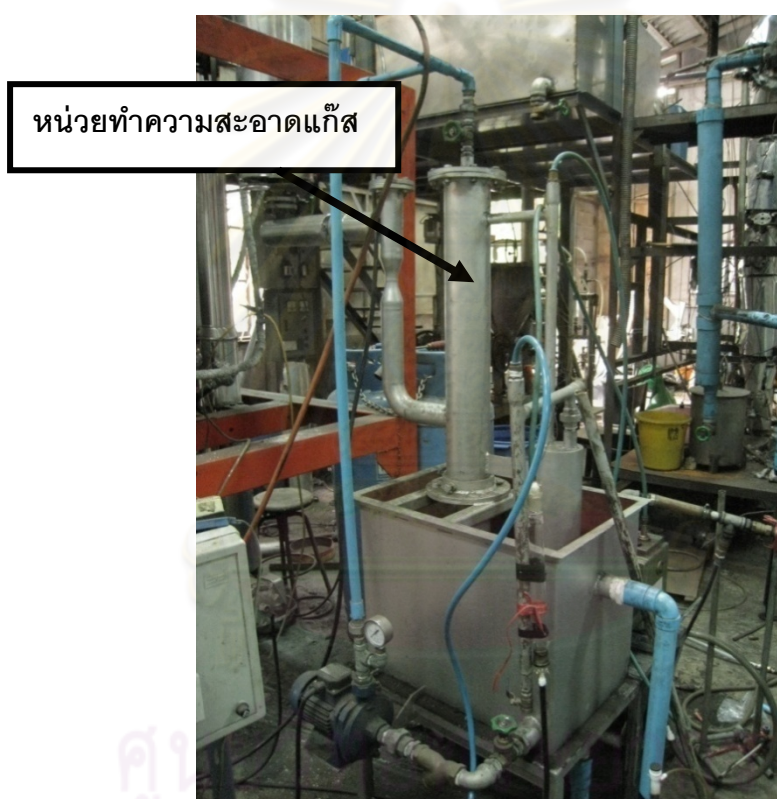


รูปที่ 4.12 ส่วนป้อนไอน้ำ

4.1.1.7 หน่วยทำความสะอาดแก๊ส

หน่วยทำความสะอาดแก๊สในงานวิจัยนี้ออกแบบให้มีการดักด้วยสกรับเบอร์ ร่วมกับการดักจับฝุ่นเขม่าซึ่งมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง สามารถดักได้เป็นที่น่าพอใจและมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย (Hasler and Nussbaumer, 1999) โดยออกแบบให้มี 3 ส่วน คือ ห้องดัก

ฝุ่น สครับเบอร์ และเครื่องกรองฝุ่นเขม่า แสดงดังรูปที่ 4.13 โดยห้องดักฝุ่นจะมีลักษณะเป็นห้องทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร ภายในมีท่อแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ตั้งอยู่ตรงกลาง ปลายท่อด้านบนเปิดให้แก๊สไหลเข้า อนุภาคขนาดเล็กที่ปนมากับแก๊ส จะร่วงลงไปอยู่ในห้องดักฝุ่น ส่วนแก๊สจะไหลเข้าไปในท่อซึ่งปลายด้านล่างต่อกับสครับเบอร์ สครับเบอร์จะทำหน้าที่ดักเอาน้ำมันทาร์ในแก๊สออกโดยใช้ระบบการฉีดน้ำให้เป็นละอองฝอยและลดอุณหภูมิของแก๊สลงให้เหลือ 40 - 60 องศาเซลเซียส ก่อนที่แก๊สจะเข้าสู่ส่วนดูดความชื้นและถูกเก็บเข้าถุงเก็บแก๊สต่อไป เครื่องกรองฝุ่นทำหน้าที่ดักอนุภาคขนาดเล็กที่ยังหลงเหลือมาจากส่วนสครับเบอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้ป้อนสู่อุปกรณ์เกิดการอุดตันหรือเสื่อมสภาพได้

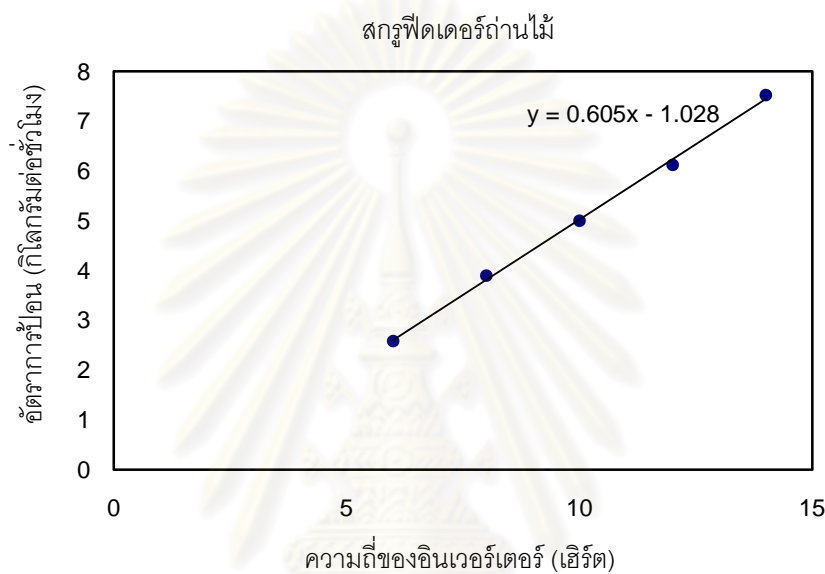


รูปที่ 4.13 หน่วยทำความสะอาดแก๊ส

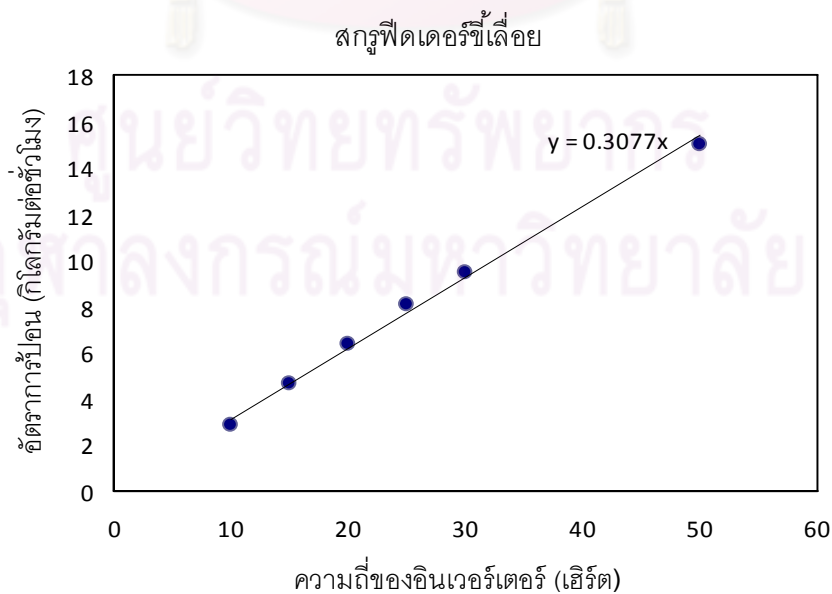
4.1.2 การปรับเทียบสกรูพีดเตอร์และอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากในการป้อนเชื้อเพลิงและควบคุมอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบ จะใช้อินเวอร์เตอร์ เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูพีดเตอร์ ซึ่งหน่วยวัดความเร็วรอบของมอเตอร์คือ เฮิร์ต ในขณะที่หน่วยของการป้อนเชื้อเพลิงที่ต้องการคือ กิโลกรัมของเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง จึงต้องมีการปรับเทียบสกรูพีดเตอร์และอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้ค่าเปรียบเทียบระหว่าง

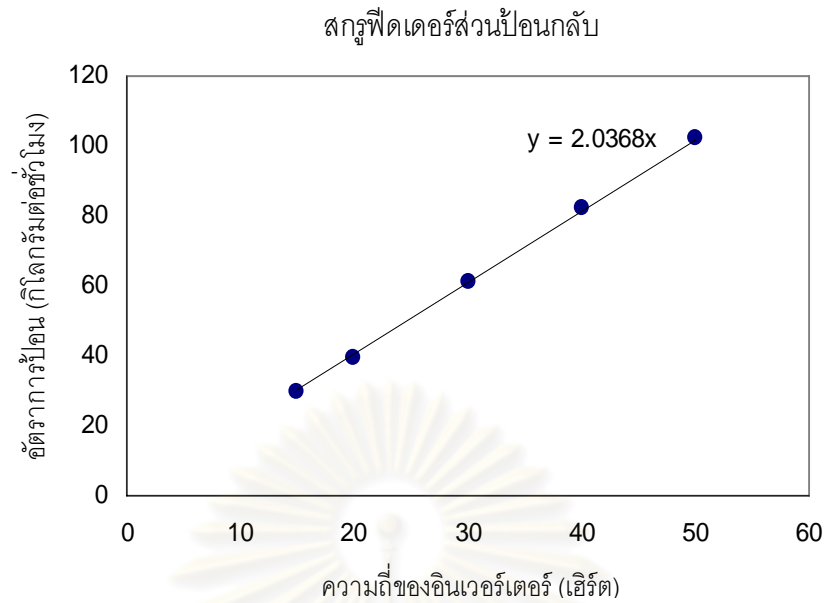
เฮิร์ตและกิโลกรัมต่อชั่วโมงของเชื้อเพลิง ซึ่งเตาผลิตแก๊สในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสกรูพีดเดอร์ 3 ชุด ชุดแรกทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงเสริม คือ ถ่านไม้ เข้าทางส่วนเผาไหม้ เพื่อรักษาอุณหภูมิในส่วนเผาไหม้ให้คงอยู่ในช่วงที่ต้องการ ชุดที่สองทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงหลัก คือ ชี้เลี้ยง เข้าทางส่วนผลิตแก๊ส และชุดที่สามทำหน้าที่ลำเลียงของแข็งที่ออกจากส่วนผลิตแก๊สกลับมายังส่วนเผาไหม้ ซึ่งสกรูพีดเดอร์ชุดนี้เป็นส่วนที่ควบคุมอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบ ผลการเปรียบเทียบสกรูพีดเดอร์และอินเวอร์เตอร์ของทั้ง 3 ชุด แสดงดัง รูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอินเวอร์เตอร์และอัตราการป้อนสกรูพีดเดอร์ป้อนถ่านไม้



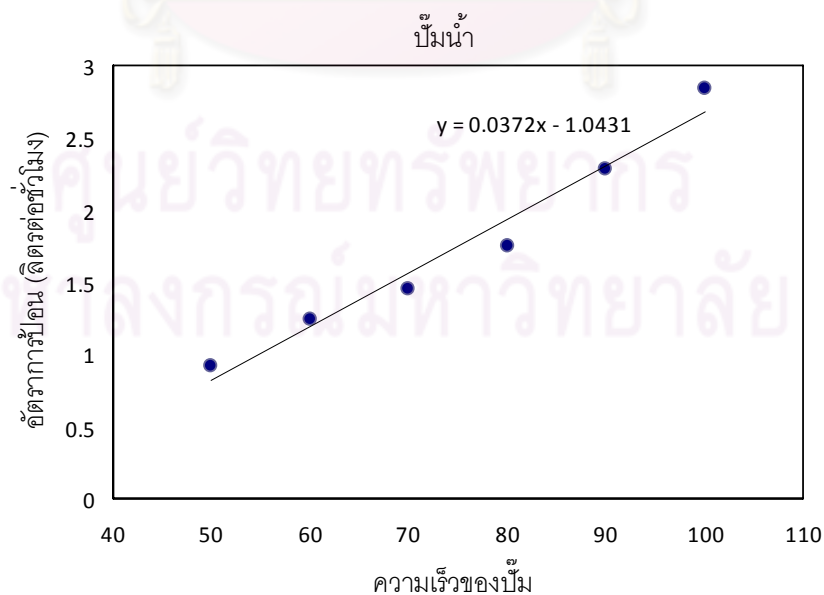
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอินเวอร์เตอร์และอัตราการป้อนของสกรูพีดเดอร์ชี้เลี้ยง



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอินเวอร์เตอร์และอัตราการป้อนสกรูพีดเดอร์ส่วนป้อนกลับ

4.1.2 การปรับเทียบปั้มน้ำ

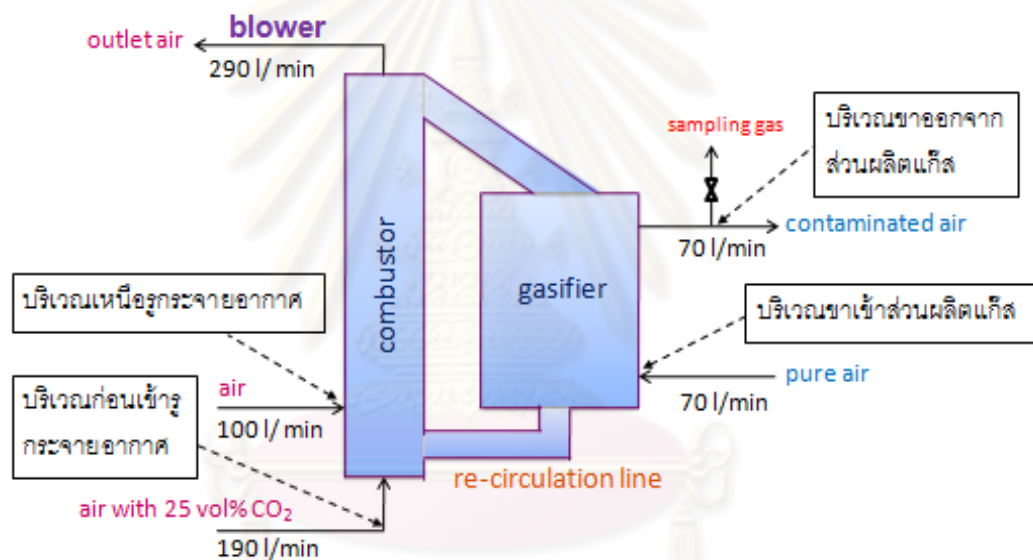
เนื่องจากอัตราเร็วในการป้อนของปั้มน้ำถูกกำหนดด้วยระดับความเร็วของปั้ม ในขณะที่หน่วยการป้อนไอน้ำที่ต้องการคือ ลิตรต่อชั่วโมง จึงต้องมีการปรับเทียบเพื่อให้ได้ค่าเปรียบเทียบระหว่างระดับความเร็วและอัตราเร็วการป้อนในหน่วยลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการป้อนของปั้มน้ำ

4.1.3 ผลการทดสอบเตาผลิตแก๊สที่ภาวะเสมือนจริง

ก่อนการทดลองผลิตแก๊สที่ภาวะอุณหภูมิจริง เราจำเป็นต้องทำการทดสอบเตาที่ภาวะเสมือนจริงก่อน เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอากาศกับวัสดุเบดระหว่างส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊ส โดยทางทฤษฎีแล้วอากาศที่ป้อนเข้าทางส่วนเผาไหม้จะไม่ไหลย้อนเข้าไปในส่วนผลิตแก๊ส เนื่องจากความแตกต่างของความดัน ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของอากาศจะใช้แก๊สผสมของอากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ร้อยละ 25 โดยปริมาตร แทนอากาศที่ป้อนเข้าในส่วนเผาไหม้ และใช้อากาศแทนผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นโดยป้อนเข้าทางด้านล่างของส่วนผลิตแก๊สและเก็บตัวอย่างแก๊สตรงบริเวณขาออก (ด้านบนของส่วนผลิตแก๊ส) ดังรูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของอากาศระหว่างส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊สแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.18 แบบจำลองการทดสอบเตาผลิตแก๊สที่ภาวะเสมือนจริง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของอากาศระหว่างส่วนเผาไหม้และส่วนผลิตแก๊ส

| ตำแหน่งที่ดูดแก๊สไปวิเคราะห์ | อัตราการป้อน (ลิตรต่อนาที) | | สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ (%) | |
|------------------------------|----------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| บริเวณก่อนเข้ารูกระจายอากาศ | 180 | 190 | 29.85 | 25.07 |
| บริเวณเหนือรูกระจายอากาศ | 100 | 100 | - | 9.65 |
| บริเวณขาเข้าส่วนผลิตแก๊ส | 80 | 70 | 0.04 | 0.04 |
| บริเวณขาออกจากส่วนผลิตแก๊ส | 80 | 70 | 0.04 | 0.08 |

ผลจากการวิเคราะห์แก๊สจากบริเวณขาออกของส่วนผลิตแก๊ส พบว่ามีคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ในปริมาณน้อยมาก ประมาณร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร จึงสามารถยืนยันได้ว่าอากาศที่ป้อนเข้าในส่วนเผาไหม้ไหลย้อนเข้าไปในส่วนผลิตแก๊สได้น้อยมาก ดังนั้นในการเดินเครื่องที่ภาวะอุณหภูมิจริง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะมีไนโตรเจนปนอยู่ในปริมาณน้อยซึ่งเป็นไปตามหลักการของเตาปฏิกรณ์แบบเบดคู่

4.2 ผลการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชี้เลี้ยงในเตาผลิตแก๊สแบบใหม่

4.2.1 คุณสมบัติของชีวมวล

ชี้เลี้ยงที่ใช้มีค่าความร้อน 17.68 เมกะจูลต่อกิโลกรัม สำหรับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทั้งแบบประมาณและแบบแยกธาตุ แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าชี้เลี้ยงมีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงถึงร้อยละ 78 โดยน้ำหนัก ในขณะที่มีปริมาณเถ้าเป็นองค์ประกอบแค่เพียงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก จึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบป้อนในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)

| องค์ประกอบโดยประมาณ | ชี้เลี้ยง (ร้อยละโดยน้ำหนัก) |
|---------------------|------------------------------|
| ความชื้น | 9.10 |
| สารระเหย | 78.43 |
| คาร์บอนคงตัว | 8.51 |
| เถ้า | 3.96 |

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์แยกธาตุ (ultimate analysis)

| องค์ประกอบแบบแยกธาตุ | ชี้เลี้ยง (%daf)* |
|----------------------|-------------------|
| คาร์บอน | 43.14 |
| ไฮโดรเจน | 5.07 |
| ออกซิเจน | 51.79 |
| ไนโตรเจน | 0.00 |

*daf = dry ash free

4.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการผลิตแก๊สสังเคราะห์

ในส่วนเผาไหม้คุณหมุมิการดำเนินการต้องสูงไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส โดยจะรักษาคุณหมุมิไว้ในช่วง 800 - 850 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดเถ้าหลอม ซึ่งเถ้าหลอมที่เกิดจะส่งผลให้ส่วนเผาไหม้เกิดการอุดตันจึงทำให้ไม่สามารถดำเนินการต่อได้ สำหรับปริมาณอากาศที่ใช้เพื่อให้เกิดการหมุนวนในระบบจะอยู่ที่ประมาณ 300 ลิตรต่ออนาที อย่างไรก็ตามความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สหุงต้มและถ่านไม้ด้วยอากาศไม่มากพอที่จะอุ่นเตาในส่วนเผาไหม้ให้มีคุณหมุมิสูงถึง 850 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงใช้ออกซิเจนเข้าไปช่วยให้เกิดการเผาไหม้ดีขึ้น โดยป้อนเข้าไปผสมกับอากาศร้อยละ 20 โดยปริมาตรซึ่งคิดเป็น 32 ลิตรต่ออนาที

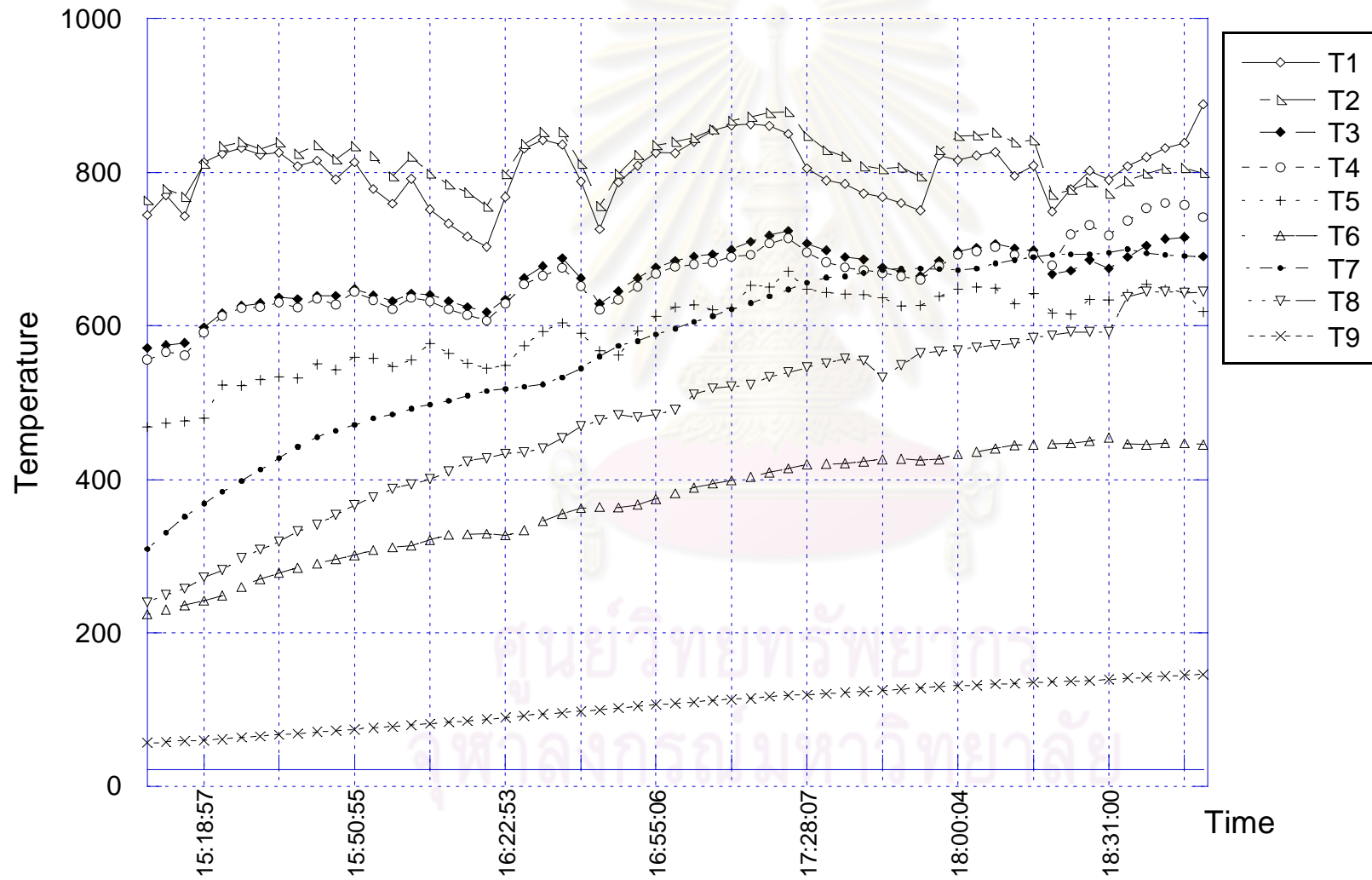
ในส่วนผลิตแก๊สคุณหมุมิการดำเนินการจะอยู่ในช่วง 600 - 700 องศาเซลเซียสเนื่องจากในส่วนเผาไหม้มีคุณหมุมิ 800 - 850 องศาเซลเซียสจึงส่งผลให้ส่วนผลิตแก๊สมีคุณหมุมิสูงได้เพียง 700 องศาเซลเซียส โดยในงานวิจัยนี้มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบเท่ากับ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมต่อการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 4.4

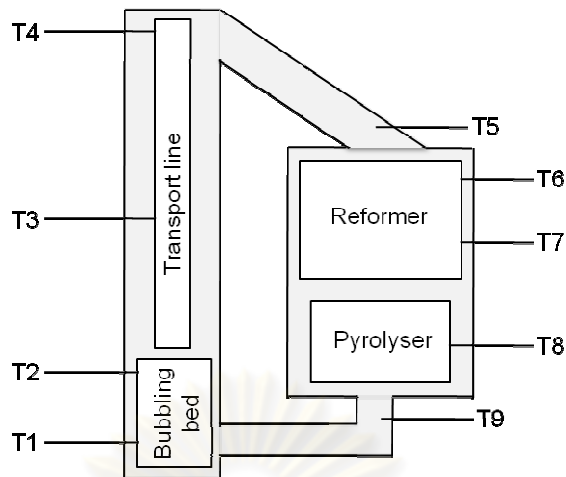
ตารางที่ 4.4 สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สสังเคราะห์

| ส่วนผลิตแก๊ส | |
|--|-----------|
| คุณหมุมิการดำเนินการ (องศาเซลเซียส) | 600 – 700 |
| อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) | 3 |
| อัตราการหมุนเวียนของของแข็ง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) | 100 |
| ส่วนเผาไหม้ | |
| คุณหมุมิการดำเนินการ (องศาเซลเซียส) | 800-850 |
| อัตราการป้อนอากาศ (ลิตรต่ออนาที) | 270 |
| อัตราการป้อนออกซิเจน (ลิตรต่ออนาที) | 32 |

การดำเนินไปของคุณหมุมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่ตั้งแต่เริ่มอุ่นเตาจนถึงช่วงทดลองผลิตแก๊สแสดงดังรูปที่ 4.20 และตำแหน่งที่ทำการวัดคุณหมุมิแสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งในการดำเนินงานที่ภาวะคุณหมุมิจริง ระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่นเตาจะอยู่ที่ประมาณ 5-6 ชั่วโมง

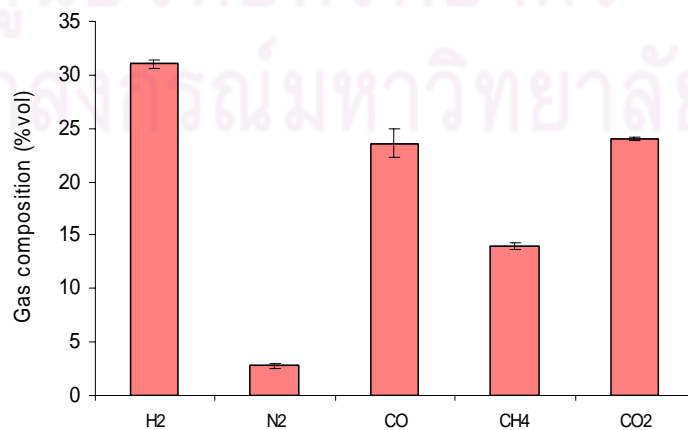
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการดำเนินไปของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเตาผลิตแก๊ส





รูปที่ 4.20 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู่

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ภาวะข้างต้น และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากไม่มีการใช้อากาศในส่วนผลิตแก๊ส สัดส่วนของไนโตรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สจึงมีค่าต่ำมากคิดเป็นร้อยละ 2.87 โดยปริมาตร ในขณะที่สัดส่วนของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงถึงร้อยละ 31.14, 23.79 และ 23.91 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นเพราะในห้องรีฟอร์มเมอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าในห้องไพโรไลเซอร์จึงทำให้ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งเกิดได้ดี สัดส่วนไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์จึงสูง อีกทั้งมีการป้อนไอน้ำเข้ามาด้วยจึงทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สัดส่วนไฮโดรเจนมีค่าสูงมาก สำหรับสัดส่วนมีเทนมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นเพราะความร้อนและระยะเวลาที่เพียงพอทำให้ทาร์ภายในห้องรีฟอร์มเมอร์เกิดการสลายตัวจนกลายเป็นแก๊สมีเทนได้มาก ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สที่ผลิต



รูปที่ 4.21 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์

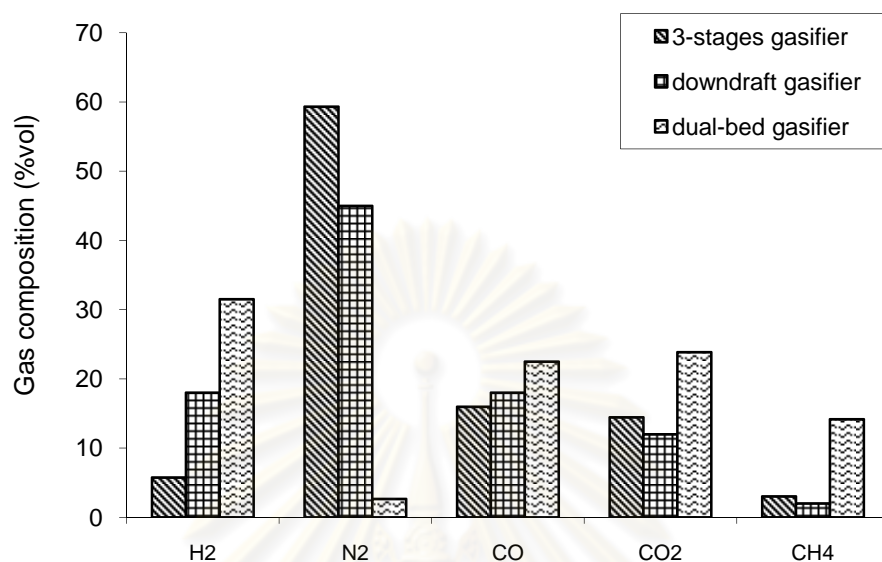
ได้มีค่าสูงถึง 12.52 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยเบื้องต้นแก๊สที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง หรือนำไปเป็นผลผลิตเชื้อเพลิงเหลวในกระบวนการฟิชเชอร์โทรปซ์ได้เนื่องจากสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูงกว่า 1 สำหรับร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊สเท่ากับ 64.51 และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 56.66

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลองผลิตแก๊ส

| | |
|---|---------------|
| องค์ประกอบของแก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) | |
| ไฮโดรเจน | 30.77 – 31.52 |
| คาร์บอนมอนอกไซด์ | 22.49 – 25.09 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | 23.86 – 23.96 |
| มีเทน | 13.68 – 14.18 |
| ไนโตรเจน | 2.65 – 3.09 |
| ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) | 12.50 – 12.54 |
| ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊ส (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 63.36 – 65.66 |
| ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงความร้อนไปเป็นแก๊ส (ร้อยละ) | 56.58 – 56.74 |

รูปที่ 4.22 เป็นกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบต่างๆ ได้แก่ เตาผลิตแก๊สแบบสามชั้นตอนขนาด 100 กิโลวัตต์ที่ใช้เกลบเป็นสารป้อน (บริษัทเกรท อะโกร) เตาผลิตแก๊สแบบแก๊สไหลลงขนาด 100 กิโลวัตต์ที่ใช้เศษไม้เป็นสารป้อน (มหาวิทยาลัยสุรนารี) และเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู้ในงานวิจัยนี้ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู้สามารถผลิตแก๊สที่มีสัดส่วนของไนโตรเจนในปริมาณที่ต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเตาผลิตแก๊สอีกสองแบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อากาศในกระบวนการแกซิฟเคชัน ในขณะที่สัดส่วนของไฮโดรเจนและมีเทนมีค่าสูงกว่าเตาแบบอื่น เนื่องจากเตาผลิตแก๊สแบบสามชั้นตอนและเตาผลิตแก๊สแบบแก๊สไหลลงมีการป้อนอากาศเข้ามาเพื่อเผาไหม้ทาร์ ทาร์จึงเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนแล้วค่อยเกิดปฏิกิริยารีดักชันเพื่อเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไป รวมทั้งไฮโดรเจนก็จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นไอน้ำ จึงทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนและมีเทนค่อนข้างต่ำ ส่วนทาร์ในเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู้จะสามารถเกิดการสลายตัวไปเป็นแก๊สต่างๆ ได้โดยตรงจึงทำให้มีสัดส่วนไฮโดรเจนและมีเทนสูง ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคู้มีค่าสูงกว่าเตาผลิตแก๊สอีกสองแบบ 2 - 3 เท่า โดยค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบแก๊สไหลลงมีค่า 5.36 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบสามชั้นตอนมี

ค่า 3.76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคูมีค่า 12.52 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงมนตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแบบเบดคูและเตาผลิตแก๊สแบบอื่นๆ (ที่มา บริษัทเกรท อะโกร จำกัด, วีรชัย อัจหาญ และคณะ, 2551)

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากเตาผลิตแก๊สทั้งสามแบบ

| องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยปริมาตร) | เตาผลิตแก๊ส แบบสามขั้นตอน | เตาผลิตแก๊สแบบ แก๊สไหลลง | เตาผลิตแก๊ส แบบเบดคู |
|--|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| ไฮโดรเจน | 6 | 18 | 31 |
| คาร์บอนมอนนอกไซด์ | 14 | 18 | 22 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | 16 | 12 | 24 |
| มีเทน | 3 | 2 | 14 |
| ไนโตรเจน | 59 | 45 | 2 |
| ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส* (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) | 3.76 | 5.36 | 12.50 |

*เป็นค่าที่ได้จากการนำองค์ประกอบของแก๊สไปคำนวณโดยใช้สมการเดียวกัน (Li et al., 2004)

เตาผลิตแก๊สทั้งสองแบบที่ยกมาเปรียบเทียบกับเตาผลิตแก๊สแบบเบดคูในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24



รูปที่ 4.23 เตาผลิตแก๊สแบบสามชั้นตอนของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ม.เกษตร และ บจ.เกรท อะโกร (ที่มา บริษัท เกรท อะโกร จำกัด : ออนไลน์)



รูปที่ 4.24 เตาผลิตแก๊สแบบแก๊สไหลลงของมหาวิทยาลัยสุรนารี (ที่มา pirun, online)

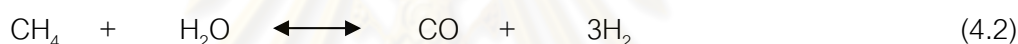
4.2.3 ศึกษาผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สภายใต้สภาวะการดำเนินการที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.25 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนจะส่งผลให้ปฏิกิริยาน้ำแปลงแก๊ส (สมการ 4.1) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (สมการ 4.2) เกิดได้ดีขึ้น จึงทำให้มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

ปฏิกิริยาน้ำแปลงแก๊ส (water gas reaction)

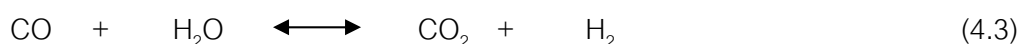


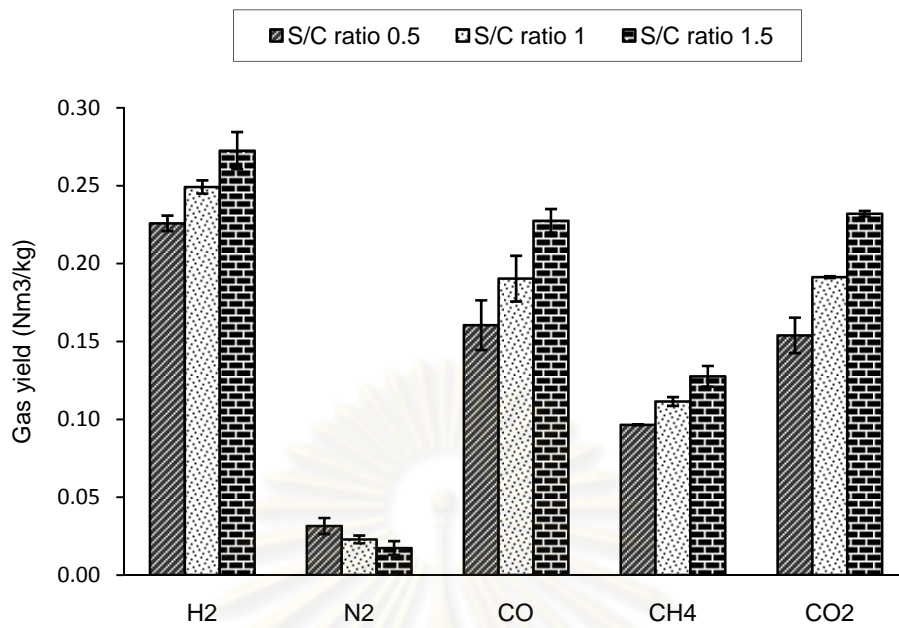
ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (steam reforming)



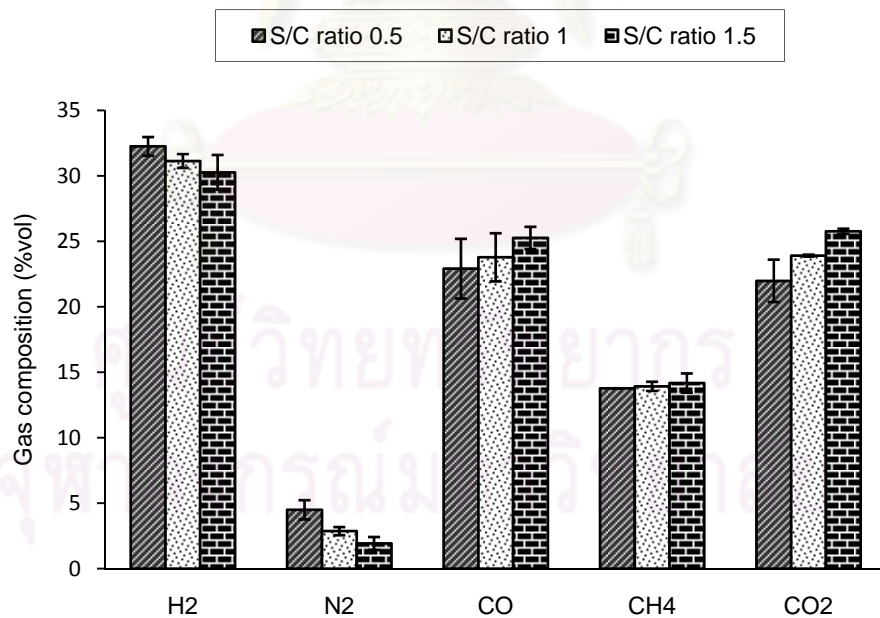
พิจารณาผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน สัดส่วนของไฮโดรเจนลดลง ขณะที่สัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และสัดส่วนของมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็นเพราะอัตราการป้อนไอน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิในรีฟอร์มเมอร์ของส่วนผลิตแก๊สลดลง ส่งผลให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนและทาร์ได้น้อยลง ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (สมการ 4.2) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน อย่างไรก็ตามสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นเกิดจากปริมาณไอน้ำที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ปฏิกิริยาชิฟต์ (สมการ 4.3) เกิดได้ดีขึ้น

ปฏิกิริยาชิฟต์ (water gas shift reaction)





รูปที่ 4.25 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีต่อปริมาณแก๊สจากการดำเนินการที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส

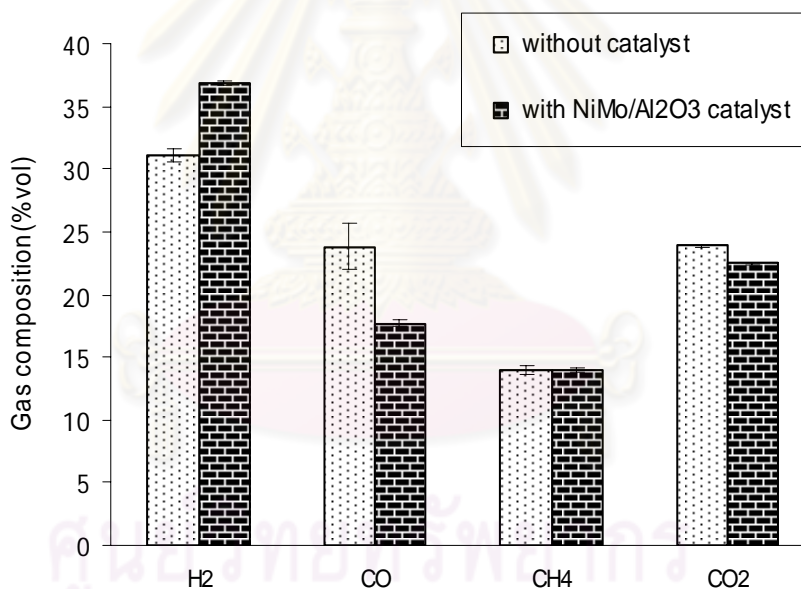


รูปที่ 4.26 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนที่มีต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สจากการดำเนินการที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส

*S/C ratio คือ อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อคาร์บอน

4.2.4 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

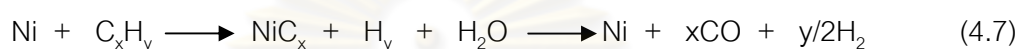
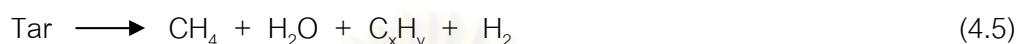
มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับ ซึ่งปัญหาหนึ่งที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้คือ เกิดการเกาะตัวของคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งได้ง่าย ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ (Osaki and Mori, 2001) เตาผลิตแก๊สแบบเบดคูในงานวิจัยนี้มีข้อดีคือสามารถบำบัด (regenerate) ตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยอาศัยส่วนเผาไหม้ของเตาในการเผาได้คาร์บอนที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เบื้องต้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. เนื่องจากสามารถจัดหาได้ในปริมาณมากพอที่จะใช้ในระบบ มีความแข็งและสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของแนฟทาไลน์ได้ดี (Monteiro-Gezork et al, 2007)



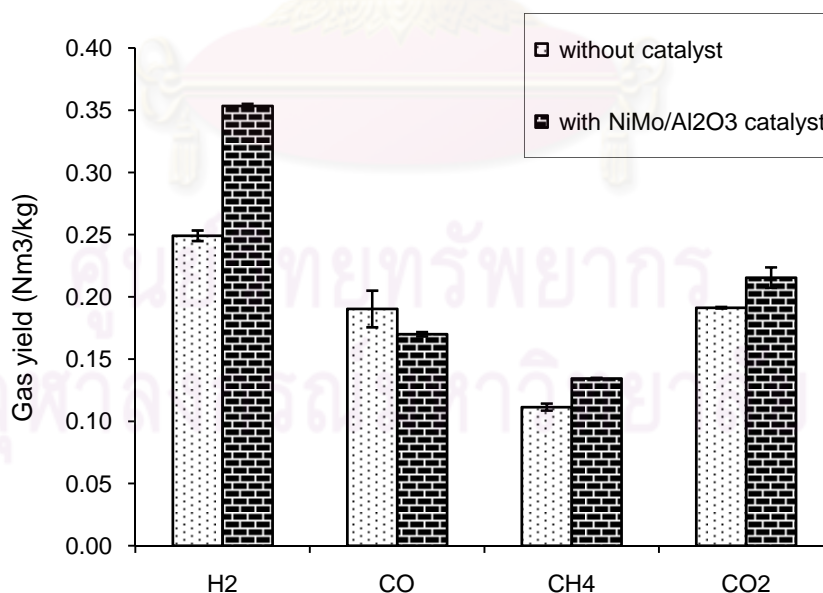
รูปที่ 4.27 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสัดส่วนของไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่

สัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง สัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเล็กน้อย และสัดส่วนของมีเทนไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก สัดส่วนของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินามีความสามารถในการช่วยให้ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ (สมการ 4.5) และปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (สมการ 4.6) ในกระบวนการแกซิฟิเคชันเกิดได้ดีขึ้น โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแสดงดังสมการที่ 4.7

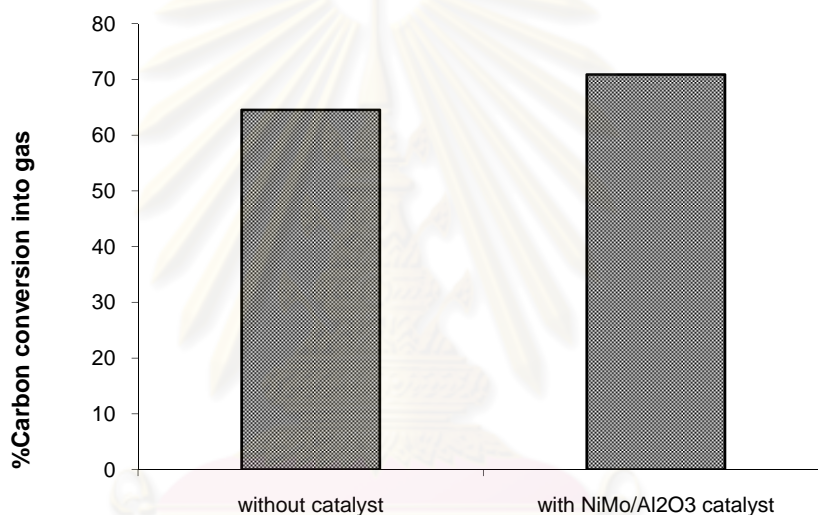


อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาสามารถเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ทั้งยังสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของสารประกอบอะโรมาติกได้ดีอีกด้วย จึงทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นในปริมาณมาก อีกทั้งคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาซีฟต์เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์หากมีปริมาณไอน้ำที่พอเหมาะ ส่งผลให้สัดส่วนของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ในขณะที่สัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง



รูปที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สแต่ละชนิดที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ และกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

ผลการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สแต่ละชนิดที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งดังกล่าวส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำได้ดีขึ้น จึงทำให้แก๊สแต่ละชนิดมีปริมาณผลได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กลับมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นเกิดปฏิกิริยาซีฟต์กับไอน้ำเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ จึงส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

ผลการเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนจากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำและกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊สสูงขึ้น ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นน้ำมันทาร์ลดลง ซึ่งเป็นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาช่วยให้ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์และปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเกิดได้ดีขึ้น น้ำมันทาร์จึงเกิดการแตกตัวเปลี่ยนไปเป็นแก๊สได้มากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

เตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่ในงานวิจัยนี้สามารถผลิตแก๊สที่มีคุณภาพสูง โดยมีค่าความร้อนสูงถึง 12.5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา องค์ประกอบของแก๊สที่ได้จะมีสัดส่วนของไฮโดรเจนร้อยละ 30 - 31 สัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 22 - 25 สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 22 - 23 และสัดส่วนของมีเทนร้อยละ 13 - 14 โดยมีการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊สเท่ากับร้อยละ 63 - 65 และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงพลังงานเท่ากับร้อยละ 56 - 57 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม องค์ประกอบของแก๊สที่ได้จะมีสัดส่วนของไฮโดรเจนร้อยละ 36 สัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 17 สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 21 - 23 และสัดส่วนของมีเทนร้อยละ 13 - 14 โดยมีการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊สเท่ากับร้อยละ 69 - 71 และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงความร้อนไปเป็นแก๊สเท่ากับร้อยละ 70 โดยสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สรูปแบบใหม่ทั้งที่ไม่ใช้ตัวเร่งและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| | ไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา | ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมบนอะลูมินา |
|---|----------------------------|--|
| ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยปริมาตร) | 30 - 31 | 36 |
| คาร์บอนมอนอกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร) | 22 - 25 | 17 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร) | 22 - 23 | 21 - 23 |
| มีเทน (ร้อยละโดยปริมาตร) | 13 - 14 | 13 - 14 |
| ไนโตรเจน (ร้อยละโดยปริมาตร) | 2 | 2 |
| ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊ส (ร้อยละ) | 63 - 65 | 69 - 71 |
| ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) | 12.5 | 12.5 |
| ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงความร้อนไปเป็น แก๊ส (ร้อยละ) | 56 | 70 |

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเตาผลิตแก๊สแบบใหม่ในงานวิจัยนี้ไม่มีหน่วยดักจับน้ำมันทาร์ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงให้เตาผลิตแก๊สแบบใหม่มีหน่วยดักจับน้ำมันทาร์เพื่อที่จะสามารถนำน้ำมันทาร์ที่ได้ไปวิเคราะห์ในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ
2. ควรปรับปรุงส่วนเผาไหม้ให้สูงขึ้นเพื่อทำให้เชื้อเพลิงมีระยะเวลาในการเผาไหม้ได้นานขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น
3. ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำในเตาผลิตแก๊สแบบใหม่มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่า 1 ซึ่งเมื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนออกเราสามารถนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการฟิชเชอร์โทรปช์ที่อุณหภูมิ 150-300 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเหล็กและโคบอลต์เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ได้
4. ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาในเตาผลิตแก๊สแบบใหม่มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่า 2 ซึ่งเราสามารถนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้นี้ไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นเมทานอลได้
5. ศึกษาผลการทดลองผลิตแก๊สโดยใช้สารป้อนเป็นชีวมวลชนิดอื่น ได้แก่ ไม้กระถินยักษ์ ฟางข้าว แกลบ เป็นต้น รวมทั้งศึกษาผลการทดลองผลิตแก๊สโดยใช้สารป้อนเป็นแบบชีวมวลผสม เพื่อให้มีข้อมูลมากพอในการเลือกใช้ชีวมวลในกระบวนการแกซิฟิเคชันของภาคอุตสาหกรรมได้
6. เนื่องจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ในงานวิจัยนี้จะถูกเผาทิ้ง ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงโดยต่อท่อจากจุดที่เผาแก๊สทิ้งให้ผลิตภัณฑ์แก๊สผ่านเครื่องคอมเพรสเซอร์แล้วบรรจุใส่ท่อแก๊สเพื่อนำไปผลิตเป็นสารเคมีต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ฉัตรชัย ธนศรีสุข. การกำจัดกำมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552

สมฤทัย ชุนโสภา. การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่มีเสถียรภาพสำหรับการแตกตัวของน้ำมันทาร์ในแก๊สไพเคชั่นด้วยไอน้ำของชีวมวล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

ภาษาอังกฤษ

Bhattacharya S. C., Shwe Hla S. and Pham H. L. A study on a multi-stage hybrid gasifier-engine system. Biomass and Bioenergy 21 (2001): 445-460

Demirbas A. Progress and recent trends in biofuels. Progress in Energy and Combustion Science 33 (2007): 1-18.

Devi L., Ptasinski K. J. and Janssen F. J. J. G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. Biomass and Bioenergy 24 (2003): 125-140.

Han J. and Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis : an overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008): 389-412.

Hasler P. and Nussbaumer T. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. Biomass and Bioenergy 16 (1999): 385-395.

Henriksena U., Ahrenfeldta J., Jensena T. K., Gøbela B., Bentzenb J. D., Hindsgaula C. and Sorensen L. H. The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier. Energy 31 (2006): 1542-1553.

Higman, C. and van der Burgt M. Gasification. Gulf Professional Publishing, 2008.

- Li X.T., Gracea J.R., Lima C.J., Watkinson A.P., Chen H.P., Kim J.R. Biomass gasification in a circulating fluidized bed. Biomass and Bioenergy 26 (2004) : 171 – 193.
- Lueng D. Y. C., Yin X. L. and Wu C. Z. A review on development and commercialization of biomass gasification technologies in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (2004): 565-580.
- Monteiro-Gezork, A. C. A., Effendi A. and Winterbottom, J. M. Hydrogenation of naphthalene on NiMo- and Ni/Al₂O₃ catalysts: Pre-treatment and deactivation. Catalysis Today 128 (2007): 63-73.
- Nair S. A., Yan K., Safriti A. and Pemen A. J. M. Tar removal from biomass derived fuel gas by pulsed corona discharges. Fuel Processing Technology 84 (2003): 161-173
- Osaki T. and Mori T., Role of potassium in carbon-free CO₂ reforming of methane on K-promoted Ni/Al₂O₃ catalysts. Journal of Catalysts 204 (2001): 89-97.
- Pfeifer C., Rauch R. and Hofbauer H. In-bed catalytic tar reduction in a dual fluidized Bed biomass steam gasifier. Industrial & Engineering Chemistry Research 43 (2004): 1634-1640.
- Pian C. C. P., and Yoshikawa K. Development of a high-temperature air-blown gasification system. Bioresource Technology 79 (2001): 231-241.
- Wei L., Xu S., Liu J., Lu C., Liu S., and Liu C.. A novel process of biomass gasification for hydrogen-rich gas with solid heat carrier: preliminary experimental results. Energy & Fuels 20 (2006): 2266-2273.
- Xu G., Murakami T., Suda T., Matsuzawa Y. and Tani H. The superior technical choice for dual fluidized bed gasification. Industrial & Engineering Chemistry Research 45 (2006): 2281-2286.
- Xu G., Murakami T., Suda T., Matsuzawa Y. and Tani H. Two-stage dual fluidized bed gasification: Its conception and application to biomass. Fuel Processing Technology 90 (2009): 137-144.
- Zhang R., Brown R. C., Suby A. and Cummer K. Catalytic destruction of tar in biomass derived producer gas. Energy Conversion and Management 45 (2004): 995-1014.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

- 1) อบครุชชีเบลในเตาอบ (oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบล
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
- 3) อบครุชชีเบลพร้อมตัวอย่างในเตาอบโดยไม่ต้องปิดฝา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมตัวอย่าง สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100 - 100(W_1 - W_2) / W$$

- เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น
 W_2 = น้ำหนักของครุชชีเบล (กรัม)
 W_1 = น้ำหนักของครุชชีเบลที่มีตัวอย่างผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (กรัม)
 W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

1.2 ปริมาณสารระเหย (volatile matter): ASTM D3175

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างแห้งใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (tubular furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

4) หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

5) หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

6) นำครุชชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย

W_5 = น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_6 = น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

M = ร้อยละของความชื้น

1.3 ถ้ำ (ash): ASTM D3174

วิธีการทดลอง

1) เผาครุชชีเบิลในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิล

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งใส่ครุชชีเบิล ประมาณ 1 กรัม

3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด

4) ใส่ครุชชีเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่

5) นำครุชชีเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

- เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า
 W_3 = น้ำหนักของครุซีเบลที่มีเถ้า (กรัม)
 W_4 = น้ำหนักของครุซีเบล (กรัม)
 W = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - A - V - M$$

- เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า
 V = ร้อยละของสารระเหย
 M = ร้อยละของความชื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC - 2014 Gas Chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า stationary phase และมีแก๊สพา (carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (recorder)

โดยแก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แก๊สพา (carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (injector port)
4. คอลัมน์ (column)
5. ดีเทคเตอร์ (detector)
6. เครื่องบันทึก (recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วน ๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดได้ด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (high sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (stability) และความเที่ยง (reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. หาอัตราการป้อนไอน้ำที่ต้องใช้ในการศึกษาผลของสัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน} = \frac{\text{อัตราการป้อนไอน้ำ}}{\text{อัตราการป้อนเชื้อเพลิง}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ หาอัตราการป้อนไอน้ำให้มีสัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

จากข้อมูล : อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ร้อยละของคาร์บอนในเชื้อเพลิง 43.14

$$\begin{aligned} \text{อัตราการป้อนไอน้ำ} &= \text{สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอน} \times \text{อัตราการป้อนคาร์บอนในเชื้อเพลิง} \\ &= 1 \times ((3000 \text{ กรัมต่อชั่วโมง} \times 0.4314) / 12 \text{ กรัมต่อโมล}) \\ &= 107.85 \text{ โมลต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

เปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยลิตรต่อนาที

$$\begin{aligned} &= \frac{(107.85 \text{ โมลต่อชั่วโมง} \times 18 \text{ กรัมต่อโมล} \times 1 \text{ ชั่วโมง})}{(1000 \text{ กรัมต่อลิตร} \times 60 \text{ นาที})} \\ &= 1.94 \text{ ลิตรต่อนาที} \end{aligned}$$

2. หาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส (high heating value, HHV)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{HHV (MJ/Nm}^3\text{)} = \frac{(12.75[\%H_2] + 12.63[\%CO] + 39.82[\%CH_4] + \dots)}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ หาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะการดำเนินงานที่อุณหภูมิ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

| องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส | สัดส่วนโดยปริมาตร |
|---------------------------|-------------------|
| ไฮโดรเจน | 31.52 |
| คาร์บอนมอนอกไซด์ | 22.49 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | 23.86 |
| มีเทน | 14.18 |
| ไนโตรเจน | 2.65 |

$$\begin{aligned} \text{ค่าความร้อน} &= \frac{(12.75[31.52] + 12.63[22.49] + 39.82[14.18])}{100} \\ &= 12.50 \text{ เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

3. หার้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊ส (%carbon conversion in to gas)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\%C \text{ conversion into gas} = \frac{\text{อัตราการเกิดแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ} \times 100}{\text{สัดส่วนคาร์บอนในเชื้อเพลิง} \times \text{อัตราการป้อนเชื้อเพลิง}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ หาร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนไปเป็นแก๊สของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะการดำเนินงานที่อุณหภูมิ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

| องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊ส | อัตราการเกิดแก๊ส (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) |
|---------------------------|---------------------------------------|
| คาร์บอนมอนอกไซด์ | 0.265 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | 0.167 |
| มีเทน | 0.281 |
| รวม | 0.713 |

$$\begin{aligned} \%C \text{ conversion into gas} &= \frac{0.713 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง} \times 100}{0.4314 \times 3 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}} \\ &= 55.09\% \end{aligned}$$

4. หาประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงพลังงาน (cold gas efficiency, CGE)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$CGE = \frac{\text{ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้} \times \text{อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊ส} \times 100}{\text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง} \times \text{อัตราการป้อนเชื้อเพลิง}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ หาประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเชิงพลังงานของเตาผลิตแก๊สแบบเบดคูที่อุณหภูมิการดำเนินงานของส่วผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

จากข้อมูล : อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราการเกิดแก๊ส 40 ลิตรต่อนาที หรือ 2.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 12.59 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส 12.50 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} CGE &= \frac{12.5 \text{ เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร} \times 2.4 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง} \times 100}{12.59 \text{ เมกะจูลต่อกิโลกรัม} \times 3 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}} \\ &= 79.48 \% \end{aligned}$$

5. การหาผลได้ของแก๊ส (gas yield)

$$\text{ผลได้ของแก๊ส} = \frac{\text{อัตราการเกิดแก๊ส}}{\text{อัตราการป้อนเชื้อเพลิง}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ หาผลได้ของแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิการดำเนินงานของส่วผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

จากข้อมูล : อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราการเกิดแก๊ส 40 ลิตรต่อนาที

$$\begin{aligned} \text{ผลได้ของแก๊ส} &= \frac{40 \text{ ลิตรต่อนาที} \times 1 \text{ ชั่วโมง}}{3 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง} \times 60 \text{ นาที}} \\ &= 0.25 \text{ ลิตรต่อกิโลกรัม} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ง1 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ ส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 - 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 0.5

| ชนิดแก๊ส | สัดส่วนโดยปริมาตร | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------|--------|------------|-------|-------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | | | | ครั้งที่ 2 | | | |
| | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | เฉลี่ย | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | เฉลี่ย |
| H ₂ | 30.99 | 32.70 | 34.59 | 32.76 | 32.01 | 32.14 | 31.09 | 31.75 |
| N ₂ | 5.36 | 4.72 | 4.98 | 5.02 | 4.94 | 3.07 | 3.93 | 3.98 |
| CO | 21.48 | 21.66 | 20.78 | 21.31 | 23.59 | 25.64 | 24.34 | 24.53 |
| CH ₄ | 13.65 | 13.83 | 13.86 | 13.78 | 13.67 | 13.81 | 13.84 | 13.78 |
| CO ₂ | 21.65 | 21.02 | 19.85 | 20.84 | 22.76 | 23.52 | 23.12 | 23.13 |

ตาราง ง2 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ ส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 - 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1

| ชนิดแก๊ส | สัดส่วนโดยปริมาตร | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | | | | | ครั้งที่ 2 | | | | |
| | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | ถุง 4 | ถุง 5 | เฉลี่ย | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | เฉลี่ย |
| H ₂ | 31.65 | 31.96 | 31.40 | 31.38 | 31.20 | 31.52 | 30.79 | 30.66 | 30.85 | 30.77 |
| N ₂ | 2.40 | 2.40 | 3.08 | 2.96 | 2.38 | 2.65 | 3.43 | 2.88 | 2.94 | 3.09 |
| CO | 22.71 | 22.75 | 22.50 | 22.20 | 22.27 | 22.49 | 25.18 | 25.06 | 25.02 | 25.09 |
| CH ₄ | 14.23 | 14.21 | 13.86 | 14.23 | 14.35 | 14.18 | 13.56 | 13.62 | 13.85 | 13.68 |
| CO ₂ | 23.49 | 24.89 | 23.42 | 22.50 | 24.99 | 23.86 | 23.64 | 23.58 | 24.66 | 23.96 |

ตาราง ง3 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากระบวนการแกซีฟิเคชันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ ส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.5

| ชนิดแก๊ส | สัดส่วนโดยปริมาตร | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------|--------|------------|-------|-------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | | | | ครั้งที่ 2 | | | |
| | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | เฉลี่ย | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | เฉลี่ย |
| H ₂ | 32.29 | 31.62 | 29.72 | 31.21 | 29.60 | 28.95 | 29.45 | 29.33 |
| N ₂ | 1.87 | 1.28 | 1.60 | 1.58 | 1.56 | 3.20 | 2.07 | 2.28 |
| CO | 24.28 | 24.62 | 25.10 | 24.67 | 26.43 | 25.54 | 25.60 | 25.86 |
| CH ₄ | 14.65 | 14.78 | 14.67 | 14.70 | 14.05 | 13.37 | 13.54 | 13.66 |
| CO ₂ | 24.67 | 26.00 | 26.23 | 25.64 | 26.66 | 25.51 | 25.56 | 25.91 |

ตาราง ง4 ข้อมูลองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากระบวนการแกซีฟิเคชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิส่วนผลิตแก๊สเท่ากับ 600 – 700 องศาเซลเซียส สัดส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนเท่ากับ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา

| ชนิดแก๊ส | สัดส่วนโดยปริมาตร | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|--------|
| | ครั้งที่ 1 | | | | | ครั้งที่ 2 | | | | |
| | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | ถุง 4 | ถุง 5 | เฉลี่ย | ถุง 1 | ถุง 2 | ถุง 3 | เฉลี่ย |
| H ₂ | 36.95 | 36.77 | 35.53 | 37.26 | 36.96 | 36.70 | 36.71 | 37.29 | 36.82 | 36.94 |
| N ₂ | 3.30 | 2.83 | 3.02 | 1.16 | 0.73 | 2.21 | 3.18 | 1.85 | 2.90 | 2.65 |
| CO | 17.02 | 17.07 | 17.51 | 18.02 | 18.27 | 17.58 | 17.78 | 18.18 | 17.56 | 17.84 |
| CH ₄ | 14.01 | 14.17 | 13.53 | 14.01 | 14.46 | 14.03 | 14.03 | 14.12 | 13.73 | 13.96 |
| CO ₂ | 20.35 | 22.33 | 21.41 | 21.60 | 23.50 | 21.84 | 21.91 | 23.94 | 23.31 | 23.05 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรติ แสงบุญ เกิดเมื่อวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2528 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์) คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย