

แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สพีเคชั้นของยูคาลิปตัส



นางสาว สุพัตรา ชีวธนาคุปต์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5136-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS GAS FROM GASIFICATION OF EUCALYPTUS



SUPATRA CHEWATANAKUP

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5136-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แก๊สสังเคราะห์จากแก๊ซิฟิเคชันของยูคาลิปตัส
โดย นางสาว สุพัตรา ชีวธนาคุปต์
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

สุพัตรา ชีวธนาคุปต์ : แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สซิโพลีเคชันของยูคาลิปตัส. (SYNTHESIS GAS FROM GASIFICATION OF EUCALYPTUS) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 94 หน้า. ISBN 974-17-5136-2

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแก๊สซิโพลีเคชันจากชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 - 800 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยทำการทดลองใช้ไม้ยูคาลิปตัสโดยมีการป้อนไอน้ำที่อัตราการป้อนคือ 0.15 – 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล ซึ่งไอน้ำทำหน้าที่เป็น gasifying medium เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน แก๊สไฮโดรเจน ต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1:1 โดยประมาณ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ ปริมาณไอน้ำต่อชีวมวล และการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองป้อนไม้ยูคาลิปตัสปริมาณ 15 กรัม เข้าเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลต่ำ จะได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ ที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลสูง จะได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง สำหรับที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ต่ำนั้นจะให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ ส่วนที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์สูงนั้นจะให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 1:1 คือ ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 1:1.612 และเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโรไมต์ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0.96

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4472463223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: GASIFICATION / EUCALYPTUS / SYNTHESIS GAS

SUPATRA CHEWATANAKUP : SYNTHESIS GAS FROM GASIFICATION OF EUCALYPTUS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG VITIDSANT,PhD, 94 pp. ISBN 974-17-5136-2

Synthesis gas by gasification of Eucalyptus with the operating temperature of 550-800 °C was studied. In this process, Eucalyptuses were used as the reactant. Steam was added with feed rate of 0.15-2.100 g/h/g of biomass as gasifying medium for synthesis gas. The effects of temperature, steam feed rate, and amount of catalyst were also studied. The objective of this research is to synthesize gas with the ratio of H₂/CO as 1:1 which will be suit for dimethylether (DME) production.

It was found that with low steam feed rate, the ratio between H₂ and CO is about 1:1. In contrast, at high steam feed rate the ratio between H₂ and CO was significantly increased. The same result was also observed for the case of temperature. The ratio between H₂ and CO was increased when temperature in reactor was increased. And the ratio was decreased when temperature was decreased. The ratio of 1:1.612 for H₂ and CO was achieved at 15 g of Eucalyptus 0.15 g/h/g of biomass 550°C. By adding dolomite catalyst with the same condition, it was found that the product has the ratio of H₂ and CO as 1:0.96.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2003

Student's

Advisor's

Co-advisor's

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ, ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	4
2.1. แก๊สซิฟิเคชัน(Gasification).....	1
2.1.1. วิวัฒนาการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	1
2.1.2. ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน.....	7
2.1.3. ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	12
2.1.4. วัสดุดิบที่ใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	19
2.1.5. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	20
2.2. สารชีวมวล.....	23
2.2.1 สมบัติของสารชีวมวล.....	23
2.2.2 หลักการแปรรูปสารชีวมวล.....	24
2.2.3 ยุคาลิปตัส.....	26
2.3. แก๊สสังเคราะห์.....	31
2.3.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์.....	31
2.3.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์.....	32
2.4. ทาร์.....	37
2.4.1 สมบัติของสารชีวมวล.....	37
2.4.2 สมบัติทางเคมีของทาร์.....	37
2.5. ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี.....	38
2.5.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีซัพพอร์ต.....	40
2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	47
3.1. อุปกรณ์การทดลอง.....	47
3.2. สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	56
3.3. ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	56
3.4. วิธีการทดลอง.....	56
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	59
4.1. สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส.....	59
4.2. ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	61
4.3. ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	67
4.4. ผลของอัตราการป้อนไอน้ำ และอุณหภูมิต่ออัตราส่วนของ H_2/CO	71
4.5. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	74
4.6. การเปรียบเทียบผลงานวิจัยกับงานวิจัยจากต่างประเทศ.....	75
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง	79
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เชื้อเพลิงไม้.....	86
ภาคผนวก ข แก๊สโครมาโตกราฟี.....	87
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	94

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปฏิบัติการเผาไหม้พื้นฐาน	9
ตารางที่ 2.2 แสดง Major Independent & Dependent Gasifier Characteristics	12
ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers โดยใช้ bituminous coals มีการป้อนไอน้ำและออกซิเจน หรืออากาศ.....	14
ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดขององค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์* เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล ⁺ จาก กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของ bituminous coals ใน moving bed gasifier กับไอน้ำ และออกซิเจนหรืออากาศ.....	15
ตารางที่ 2.5 แสดงสูตรโครงสร้าง น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต และลิกนิน	24
ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล.....	25
ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ.....	32
ตารางที่ 2.8 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่างๆ.....	35
ตารางที่ 2.9 ปริมาณการใช้แก๊สไฮโดรเจนทั่วโลกในปี 2000.....	36
ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars	38
ตารางที่ 2.11 การแบ่งตัวรองรับตามจุดหลอมเหลว และความเป็นกรด-เบส.....	42
ตารางที่ 2.12 ตัวรองรับชนิดต่างๆ ตามพื้นที่ผิว.....	43
ตารางที่ 3.1 รายการทดลองและมาตรฐานวิธีวิเคราะห์.....	57
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ.....	59
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบแยกธาตุ.....	60
ตารางที่ 4.3 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	66
ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์.....	71
ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์.....	73
ตารางที่ 4.6 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลต่ออัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อ คาร์บอนมอนอกไซด์.....	73
ตารางที่ 4.7 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ.....	75
ตาราง ข1 แสดงภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส.....	87
ตาราง ค1 วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น.....	89
ตาราง ค2 วิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย.....	89
ตาราง ค3 วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า.....	90

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง ค4 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล.....	91
ตาราง ค5 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล.....	91
ตาราง ค6 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล.....	92
ตาราง ค7 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล.....	92
ตาราง ค8 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่ออัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 550 650 700 และ800 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/นาที่ /กรัมของชีวมวล.....	93
ตาราง ค9 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล	93

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดง Moving bed gasifier.....	8
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของ Lurgi Dry Ash Gasifier.....	16
รูปที่ 2.3 แสดงเตาผลิตแก๊ส 4 ประเภท.....	19
รูปที่ 2.4 แสดงเตาผลิตแก๊สในรูปแบบต่างๆ โดยแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศ.....	20
รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล.....	25
รูปที่ 2.6 แสดงผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ.....	33
รูปที่ 2.7 แผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
รูปที่ 2.8 แสดงถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มาเกี่ยวข้อง.....	40
รูปที่ 3.1 แสดงถึงลักษณะการทำงานของเครื่อง.....	48
รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์.....	49
รูปที่ 3.3 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง.....	50
รูปที่ 3.4 เทอร์โมคัปเปิล.....	51
รูปที่ 3.5 เครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล.....	51
รูปที่ 3.6 เครื่องผลิตไอน้ำ.....	52
รูปที่ 3.7 เครื่องสูบน้ำ.....	52
รูปที่ 3.8 เครื่องแยกไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	53
รูปที่ 3.9 เครื่องควบแน่นของเหลวออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์.....	53
รูปที่ 3.10 แสดงถึงเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ.....	54
รูปที่ 4.1 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไอน้ำ 15 กรัม).....	61
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไอน้ำ 15 กรัม).....	62
รูปที่ 4.3 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไอน้ำ 15 กรัม).....	63
รูปที่ 4.4 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไอน้ำ 15 กรัม).....	64
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไอน้ำ 15 กรัม).....	67

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 1.05 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม).....	68
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม).....	69
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ H ₂ /CO ที่อัตราการป้อนไอน้ำต่างๆ และอุณหภูมิต่างๆ (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม).....	72
รูปที่ 4.9 ปริมาณองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม).....	74
รูปที่ ข1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD.....	87
รูปที่ ข2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID.....	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์พลังงานของโลกที่มีการใช้พลังงานในอัตราที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสภาพการเจริญทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้ปริมาณน้ำมันดิบมีการใช้เพิ่มขึ้น ราคา น้ำมันดิบก็มีแนวโน้มสูงขึ้น และจากการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วของประเทศไทยในปัจจุบัน ทำให้ความต้องการใช้เชื้อเพลิงมีปริมาณที่สูงมาก มีการใช้น้ำมันซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักเพียงอย่างเดียว ประเทศไทยเป็นประเทศที่ยังต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นหลักนั้นจะได้รับผลกระทบโดยตรงเมื่อราคาน้ำมันถูกปรับให้สูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาหาแหล่งพลังงานรูปอื่นมาใช้ทดแทน แหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจมากที่สุดคือ แหล่งพลังงานภายในประเทศในลักษณะของพลังงานคืนรูป (Renewable Source) แหล่งพลังงานคืนรูปที่สำคัญก็คือ แหล่งพลังงานจากชีวมวล (Biomass) โดยที่ส่วนใหญ่ จะอยู่ในรูปของแข็ง ไม่สะดวกในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดปัญหาในการนำมาใช้งานจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้สะดวกขึ้น

กระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสภาพแก๊สเชื้อเพลิง เป็นวิธีหนึ่งซึ่งได้มีการศึกษาทางด้านทฤษฎีกันอย่างกว้างขวาง และมีการนำมาใช้ในการผลิตแก๊สได้ในระดับหนึ่ง กระบวนการนี้เรียกว่าแก๊สซิเคชัน (Gasification) แก๊สเชื้อเพลิงจะเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในที่ที่มีออกซิเจนจำกัด มีกลไกการทำงานไม่ยุ่งยาก โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเป็นไปภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 700-1,200 องศาเซลเซียส แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการนี้ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้ โดยหากเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (เครื่องเบนซิน) สามารถที่จะใช้แก๊สดังกล่าวเป็นเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องผสมกับเชื้อเพลิงอื่น กระบวนการแก๊สซิเคชันไม่ใช่เทคโนโลยีใหม่มีการพัฒนามาตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 20 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากเกิดการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงในระหว่างนั้น จึงมีการศึกษากระบวนการนี้ และนำแก๊สที่ได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ประเภทต่างๆ ทั้งในยุโรป และประเทศที่อยู่ใต้การปกครองของญี่ปุ่นรวมทั้งประเทศไทยด้วยแต่เมื่อสงครามยุติ ราคาของน้ำมันต่างๆ มีราคาถูกลงอีกทั้งหาง่ายและการใช้ก็สะดวกกว่ามาก เป็นเหตุให้การใช้แก๊สเชื้อเพลิงลดลงอย่างรวดเร็วและเลิกใช้ไปในที่สุด การ

วิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีในเรื่องนี้จึงจะงักตามไปด้วย ยกเว้นประเทศสวีเดนซึ่งได้ทำการค้นคว้าเทคโนโลยีนี้มาโดยตลอด ในปัจจุบันนี้ราคาน้ำมันดิบเริ่มขยับสูงขึ้น และตามทฤษฎีแล้วราคาน้ำมันดิบคงจะไม่ลดลงอยู่ในราคาที่ต่ำมาก ๆ เป็นระยะเวลาอีกต่อไป ทั้งนี้เพราะอัตราการพบหรือการเกิดของน้ำมันดิบในโลกมีน้อยกว่าอัตราการใช้มาก ซึ่งกล่าวได้ว่าน้ำมันดิบซึ่งประชากรในโลกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับให้เกิดพลังงานนั้นจะต้องลดน้อยลงและหมดไปจากโลกในไม่ช้า ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ หรือเทคนิคในการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพนั้นจะต้องมีประโยชน์อย่างแน่นอน

โดยการที่จะทำแก๊วพีเคชั่นเพื่อที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ ถ้านำมาผลิตให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้ก็จะนำไปผลิตพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้าได้เป็นปริมาณมาก เนื่องจากประเทศของเราส่วนใหญ่มีแต่เครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังนั้นเครื่องยนต์ที่มีอยู่แล้ว อาจใช้ได้เลยโดยสร้างเพียงระบบผลิตแก๊สเท่านั้น แก๊สชีวมวลสามารถที่จะนำไปใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์จากน้ำมัน ในโครงการต่างๆ ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องวัตถุดิบในการผลิตแก๊สเลย

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีชีวมวลอยู่มากมาย โดยเฉพาะตามแถบชนบทมีชีวมวลเหลือใช้ สามารถนำมาเปลี่ยนให้เป็นไบโอดีเซลแก๊สได้ เช่น ไม้ยูคาลิปตัส เนื่องจากประเทศไทยมีการปลูกไม้ยูคาลิปตัสเป็นจำนวนมากซึ่งไม้ชนิดนี้มีปลูกในประเทศไทยกว่า 3 ล้านไร่แต่การนำไปใช้ประโยชน์นั้นยังมีไม่มากนัก โดยเนื้อไม้จากลำต้นจะถูกนำไปทำเยื่อกระดาษ ส่วนเศษของลำต้นซึ่งมีประมาณ 30 % จะถูกเผาเป็นถ่าน หรือ เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มประโยชน์จากไม้ยูคาลิปตัส และจะเป็นการเอื้อประโยชน์แก่เกษตรกรที่ปลูกต้นยูคาลิปตัส ซึ่งปัจจุบันกำลังประสบปัญหาราคาคต่ำเนื่องจากปริมาณการปลูกมีมากเกินไปจนเกิดโรงงานที่ผลิตเยื่อในปัจจุบัน และข้อสำคัญเป็นการใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง ที่มีเป็นจำนวนมากมาผลิตซึ่งจะเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีคุณค่าและเป็นประโยชน์แก่สังคมไทยในอนาคต

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาถึงการนำพลังงานรูปใหม่ คือการใช้สารไดเมทิลอีเทอร์มาใช้แทนที่การใช้พลังงานจากน้ำมัน โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สพีเคชั่น ให้มีองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในอัตราส่วนที่เท่ากันซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปเป็นสารตั้งต้นในผลิตสารไดเมทิลอีเทอร์ ไดเมทิลอีเทอร์เป็นสารที่ไม่มีมลพิษ สามารถที่จะใช้ป็นทางเลือกใหม่ของการใช้เชื้อเพลิงได้ทางหนึ่ง โดยเป็นแก๊สไม่มีสี มีจุดเดือด และสมบัติต่างๆ คล้ายแก๊สแอลพีจี การนำไดเมทิลอีเทอร์ไปใช้ประโยชน์นั้นมีหลายรูปแบบเช่น นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดโดยใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลที่ใช้ในรถบรรทุกหรือรถยนต์ได้ เนื่องจากมีค่าซี

แทนใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และไม่มีการเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า สามารถใช้เป็นแก๊สหุงต้มได้

โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากสารชีวมวล คือ ไม้ยูคาลิปตัสเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed Bed

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 โดยประมาณ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้แก๊สสังเคราะห์ที่จะเป็นสารตั้งต้นที่จะสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ ซึ่งจะเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่หมด สำรองไว้ใช้ในอนาคตโดยเฉพาะในอีก 40 ปีข้างหน้าประชาชนจะมีพลังงานอีกรูปหนึ่งมาทดแทน
- 1.3.2 เพิ่มคุณค่าของไม้ยูคาลิปตัส และเป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้ประโยชน์ไม้ยูคาลิปตัส

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้ารวบรวมทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำแกซิฟิเคชัน
- 1.4.2 ออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือ Gasifier, CO₂ Separator อุปกรณ์ วัดอุณหภูมิ และสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 หาภาวะที่เหมาะสมของการทำแกซิฟิเคชันโดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแกซิฟิเคชัน (550-800 °C)
 - อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล
 - การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.4.4 วิเคราะห์ สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 แก๊สซิฟิเคชัน(Gasification)^(1,2,3,4,5,6,7)

2.1.1 วิวัฒนาการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การค้นพบแก๊สชีวมวลเริ่มมีบันทึกไว้เมื่อ Clayton (พ.ศ. 2242) ทดลองกลั่นสลาย ถ่านหินแล้วพบว่าแก๊สที่ปล่อยออกจากเตาผลิตแก๊สสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ต่อมา Gardner และ Barker (พ.ศ. 2334) ค้นพบว่าแก๊สร้อนที่ปล่อยออกมาจากปล่องควันของหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้สำหรับหม้อไอน้ำได้อีกครั้งหนึ่งในระยะแรกนั้นประมาณปี พ.ศ. 2343 มีการนำเอาแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเชื้อเพลิงแข็ง ต่อมาจึงมีการใช้แก๊สซิฟิเคชันจากวัตถุดิบอย่างอื่นจำพวกชีวมวลมาใช้งาน เช่น ไม้ Labon (พ.ศ. 2341), ถ่านไม้ Lampadius (พ.ศ. 2344) เป็นต้น กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงก็คือ การไพโรไลซิส (Pyrolysis) เชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ในระหว่างปี พ.ศ. 2358-2382 เป็นช่วงที่พัฒนาเกี่ยวกับแก๊สซิฟิเคชันเน้นไปที่การออกแบบเตาปฏิกรณ์ เช่น J. Taylor (พ.ศ. 2358) และ Biscof (พ.ศ. 2383) เป็นต้น เตาผลิตแก๊สในระยะแรกเป็นแบบใช้อากาศ (Air Blown Type) โดยการใส่ถ่านโค้ก ถ่านหิน หรือถ่านไม้ ลงไปในท่อทรงกระบอกเหนือแผ่นรองรับที่มีรูพรุน (Perforated Grate) และเป่าอากาศผ่านเข้าไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนั้นจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทนอีกเล็กน้อย เครื่องมือนี้มีปัญหาสำคัญในการใช้งาน คือ น้ำมันทาร์ (Tar) จำนวนมากปะปนอยู่กับแก๊สผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่สามารถนำแก๊สนั้นไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ จึงมีการพัฒนารูปแบบเตาผลิตแก๊สเป็น Down-Draught กล่าวคือ การตั้งแก๊สผลิตภัณฑ์ออกทางด้านล่างของเตา โดยผ่านเบดของคาร์บอน (Bed of Carbon) หรือถ่านที่เป็นเชื้อเพลิงเพื่อกำจัดน้ำมันทาร์ ทำให้แก๊สที่ได้สะอาดขึ้น

ในช่วงปี พ.ศ. 2423-2463 ที่ประเทศเยอรมันมีการปรับปรุงเครื่องมือให้สามารถใช้งานกับ ถ่านหินเกรดต่ำได้ โดยการออกแบบเตาผลิตแก๊สที่พิจารณาถึงการนำเอาแก๊สออกด้วย การพัฒนาครั้งนี้ ทำให้เกิดรูปแบบเตาที่มีชื่อเสียงคือ Rotating Grid Type ออกแบบโดย Kerpely ในปี พ.ศ. 2447

ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เกิดการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้มีการหันมาค้นคว้า รูปแบบของเตาผลิตแก๊สให้ดีขึ้น ในช่วงนั้นแก๊สเชื้อเพลิงถูกนำไปใช้แทนที่น้ำมันในรถยนต์

รถบรรทุก รถแทรกเตอร์ เรือยนต์ รถมอเตอร์ไซด์ และเครื่องสับเปลี่ยนวางรถไฟ เต่าผลิตแก๊สได้รับการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปใช้ทั้งเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์ otto โดยมาผลิตแก๊สที่นำไปใช้กับรถยนต์มีขนาดเล็กและส่วนใหญ่มักจะใช้ Fisher Tropsch Process เป็นขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหิน

หลังสงครามโลก ในช่วงปีพ.ศ. 2493-2503 ผลิตภัณฑ์ทางด้านปิโตรเลียมห่างยั้งขึ้นอีกทั้งมีราคาถูกลงการใช้งานก็สะดวกเป็นเหตุให้การใช้แก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแกซิฟิเคชันลดลงจนแทบจะหมดไปที่ยังเหลือใช้อยู่ก็ไม่มีการพัฒนากระบวนการให้ดีขึ้นแต่อย่างใด

Tao Von Fredersdoff (พ.ศ. 2498) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีของการผลิตแก๊สชีวมวลจากถ่านหิน ต่อมา May et al. ได้ศึกษาการเกิดแก๊สชีวมวลจากการที่เผาถ่านโค้กในเตาผลิตแก๊สทั้งแบบฟลูอิดไธด์เบด และแบบเบดอยู่กับที่ ในปี พ.ศ.2504 Squires นำผลการศึกษาของ May และคณะ มาศึกษาเพิ่มเติมแล้วสรุปว่า ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดอยู่กับที่คาร์บอนจะว่องไวต่อปฏิกิริยาเฉพาะตรงบริเวณทางเข้าของไอน้ำร้อน แต่ในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธด์เบด คาร์บอนจะว่องไวต่อปฏิกิริยาเหมือนกันตลอดเตา ปี พ.ศ. 2516-2517 เกิดวิกฤตการณ์การขาดแคลนน้ำมันอีก เนื่องจากการไม่ส่งออกน้ำมันของกลุ่มประเทศผู้ผลิต ประเทศที่พัฒนาแล้ว และกำลังพัฒนา จึงเริ่มหันมาฟื้นฟูกระบวนการแกซิฟิเคชัน สำหรับประเทศที่พัฒนาแล้ววัตถุประสงค์หลักคือ การผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยกระบวนการแกซิฟิเคชันที่ใช้ออกซิเจนหรืออากาศเท่านั้น เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขนส่งและเครื่องทำความร้อน จึงเป็นเหตุให้ความสนใจทั้งหมดมุ่งไปสู่ Air Blown Gasifier ที่มีขนาดเล็ก โดย Johnson (พ.ศ. 2517) ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดแก๊สชีวมวลในอุดมคติ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

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

Jensen (พ.ศ. 2518) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันของถ่านหินด้วยไอน้ำในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบฟลูอิดไธด์เบดที่อุณหภูมิ 1,000-1,300 องศาเซลเซียส โดยพบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินกับไอน้ำในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนี้ ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลมากต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

Georgakis และคณะ (พ.ศ. 2522) ได้ศึกษาและเสนอกลไกของการเกิดการเผาไหม้ของถ่านโดยอาศัยทฤษฎีฟิล์มชั้นเดียว และฟิล์มสองชั้น ในปี พ.ศ. 2524 Kasaoka ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดแก๊สชีวมวล พบว่าเมื่อเติมเหล็กและนิกเกิลลงในเตาปฏิกรณ์จะช่วยให้เกิดแก๊สสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดแก๊สสังเคราะห์เกิดเร็วขึ้น และในปีเดียวกัน Purdy ศึกษาปฏิกิริยา

ระหว่างถ่านหินและแก๊สผสมของไอน้ำ และออกซิเจนในเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ และอัตราส่วนของไอน้ำต่อคาร์บอน เป็นฟังก์ชันต่ออัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ถ้าเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าวจะทำให้อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลเพิ่มขึ้น

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

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

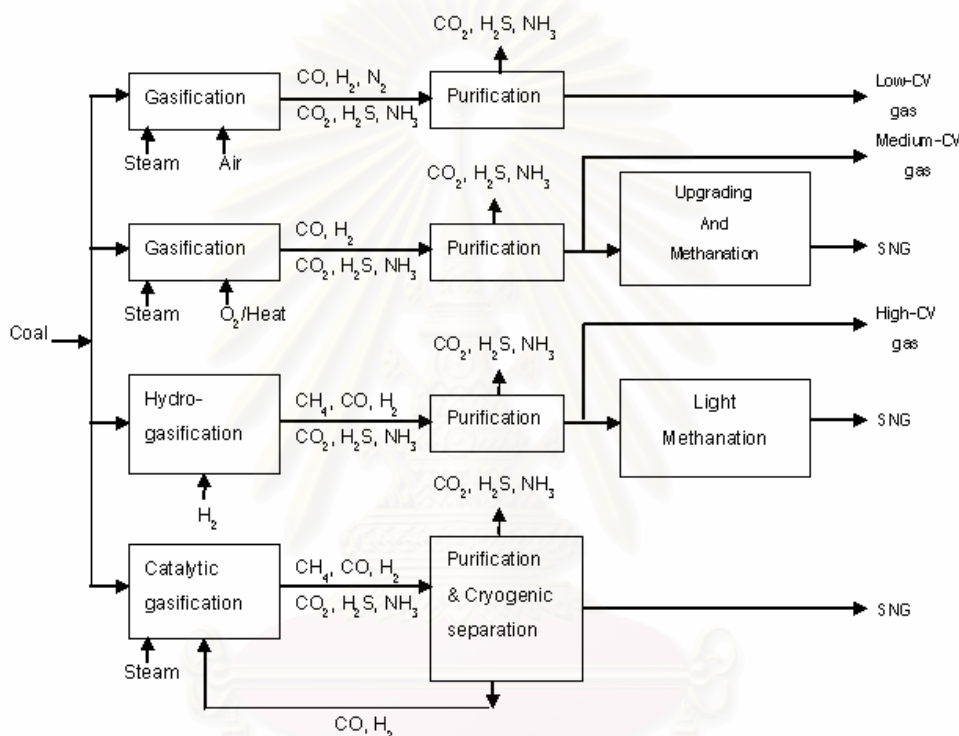
สำหรับประเทศไทยแม้ว่าความรู้ทางด้านแก๊สชีวมวลยังมีเหลืออยู่บ้างจากสงครามโลกครั้งที่สอง และได้มีการทดลองเกี่ยวกับการใช้แก๊สชีวมวลในเครื่องยนต์มาบ้างแล้ว แต่ก็ยังไม่ได้มีการวิจัย และพัฒนากันอย่างจริงจังเป็นระบบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 ทฤษฎีแก๊สซิเคชัน

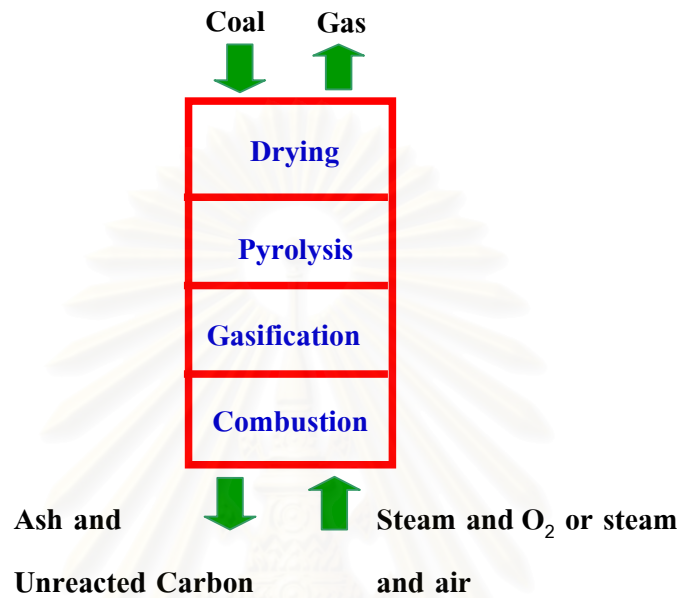
แก๊สซิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งเช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สดังเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) ในแง่ของกระบวนการหมายถึง ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่รวมการไพโรไลซิสในขั้นต้น และการปรับปรุงคุณภาพแก๊สในขั้นถัดไป



กระบวนการแก๊สซิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical Conversion Process) ได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอน กับออกซิเจน และ/หรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูงความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาคูดความร้อน และปฏิกิริยาคายความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วยแก๊สผสมระหว่าง CO และ H_2 เรียกว่าโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer Gas)

โปรดิวเซอร์แก๊ส เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) ของคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน

ลำดับการเปลี่ยนแปลงอาจแสดงได้โดยตัวอย่างของ Moving bed gasifier ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 moving bed gasifier ^[8]

ถ่านหินเคลื่อนที่ลงมาถูกทำให้แห้งด้วยแก๊สร้อนที่สวนทางขึ้นมาเมื่อเคลื่อนต่อดลงมาจะร้อนขึ้นจนเกิดการไล่สารระเหย และไพโรไลซิส ในขั้นถัดไปอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการแก๊สซิฟาย (gasify) ถือได้ว่าเป็นการแก๊สซิฟายซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซ์ นั่นก็คือ solid carbon นั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกิริยาเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental Combustion Reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและ/หรือไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาเหล่านี้มีการศึกษามานานแล้ว นับว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆได้

ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน^[9]

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

- หมายเหตุ
1. ปฏิกิริยาทดลองที่ภาวะ 1,200 องศาเซลวิน (1,700 องศาฟาเรนไฮต์ 927 องศาเซลเซียส) ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์
 2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction)
เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

ปฏิกิริยาที่ 2.1 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนในบริเวณที่มีคาร์บอนมากเกินพอ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนปฏิกิริยาที่ 2.2 เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ เกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2.3 เรียกว่า “Boudouard Reaction” เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินพอ (Excess Carbon) ในอุณหภูมิของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ มีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยา (Reactivity) ของเชื้อเพลิงต่างๆ พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ขึ้นกับธรรมชาติของ

เชื้อเพลิงและลักษณะเฉพาะของผิว (Surface Characteristic) ของเชื้อเพลิง อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการแตกตัวของคาร์บอนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่านี้

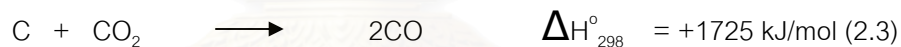
ปฏิกิริยาที่ 2.4 จะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนเหลืออยู่ คาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับออกซิเจนได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

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

ปฏิกิริยาในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ในชั้นการแก๊สไฟ (Gasification zone) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ การแก๊สไฟคาร์บอนซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ

1. Oxygenolysis หรือ การทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจน เพื่อ เกิด คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศที่มี ออกซิเจนจำกัดเพราะ อากาศที่ป้อนเข้าจากด้านล่างถูกใช้ในชั้นการเผาไหม้ (Combustion zone) ไปส่วนมาก ปฏิกิริยาในชั้นนี้ คือ

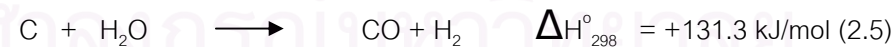


2. Hydrogenolysis คือ ปฏิกิริยากับ ไฮโดรเจน เพื่อเกิด มีเทน หรือ ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน



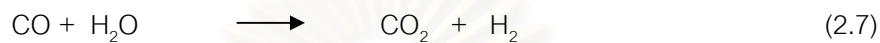
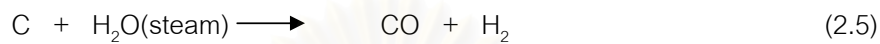
H_2 จะทำปฏิกิริยากับ N_2 และ S ในถ่านหินด้วย เกิดแก๊ส NH_3 และ H_2S การเติมไฮโดรเจนในรูปของไอน้ำนี้เพื่อเพิ่มอัตราส่วน H/C ในแก๊สผลิตภัณฑ์

3. hydrolysis



ในปัจจุบันกระบวนการแก๊สซิเคชันมีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

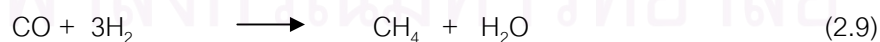
ก. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value Gas or Low Btu Gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ $3.3\text{-}5.6 \text{ MJ/m}^3$ ($90\text{-}150 \text{ Btu/SCF}$) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้



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

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

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



เมื่อผ่านการทำให้แห้งก็จะได้แก๊สซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สบริสุทธิ์

2.1.3 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Classification of Gasification)

ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอาจแยกออกไปตามลักษณะการให้ความร้อน หรือ ชนิดของ gasifying medium เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถือเป็น independent characteristic หรือแยกออกไปตามปฏิกิริยา อุณหภูมิ คุณสมบัติแก๊ส หรือกากของแข็งที่เหลือซึ่ง ถือเป็น dependent characteristic แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดง Major Independent & Dependent Gasifier Characteristics^[8]

Independent	Dependent
1. Method of Supplying heat <ul style="list-style-type: none"> - direct - indirect 	1. Reaction temperature <ul style="list-style-type: none"> - high - medium - low
2. Gasifying medium & amount <ul style="list-style-type: none"> - steam with air or O₂ - Air - H₂ with or without steam - Steam with catalyst 	2. Raw gas properties <ul style="list-style-type: none"> - composition - H₂/CO ratio - Tar & oil content - CV
3. Reactor type <ul style="list-style-type: none"> - moving packed bed - fluidized bed - entrained flow - molten media 	3. Solid residue <ul style="list-style-type: none"> - ash - slag - unconverted carbon

เนื่องจากแบบของ gasifier (reactor) ถือเป็น characteristics ที่สำคัญๆ ของกระบวนการ ซึ่งมีอยู่ 3 แบบใหญ่ๆ คือ

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

กากที่เหลือต่างกันด้วยช่วงอุณหภูมิที่ดำเนินการคือประมาณ 815-1925 องศาเซลเซียส และ gasifier แต่ละแบบจะทำงานที่ช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ สำหรับ gasifier ที่เถ้าไม่หลอมละลายเรียกว่า dry bottom gasifier และแบบที่เถ้าหลอมละลายเรียกว่า slagging gasifier (ช่วงอุณหภูมิ 1200-1800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเถ้า)

Moving bed gasifiers

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

- การ drying เมื่อสัมผัสกับแก๊สร้อนที่ลอยตัวขึ้น
- การ devolatilization สารระเหยในวัตถุดิบจะระเหยออกมาแตกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่นๆ ลอยปะปนไปกับผลิตภัณฑ์แก๊ส
- เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือก็จะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด

การดำเนินการใช้ถ่านหินขนาด 3-50 mm. ถ่านขนาดเล็กเกินไปอาจแตกออกและออกไปกับแก๊สขาออก หรือเมื่อเคลื่อนลงมาจะทำให้เบดอุดตัน และทำให้แก๊สไหลขึ้นมาไม่สะดวก

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

อุณหภูมิภายใน gasifier ขึ้นอยู่กับระดับของ oxidant ใน atmospheric gasifier อุณหภูมิจะไม่สูงกว่า ash fusion point สำหรับ steam/O₂ gasifier อาจเป็นแบบ dry bottom หรือ slagging ขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำเทียบกับออกซิเจน ถ้าพ่นไอน้ำมากทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ 2.5 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนมีผลให้อุณหภูมิของเบดลดลง



เพื่อลดปริมาณการใช้ไอน้ำอาจยอมให้อุณหภูมิสูง และกำจัดเถ้าในรูปของ molten slag เป็นหลักการของ slagging gasifier การดำเนินการที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ 2.5 มากขึ้นด้วย (โดยไม่ต้องใช้ไอน้ำมากเกินไป)

ข้อดีของ moving bed คือ การมีการสัมผัสโดยตรงกับแก๊สร้อน ทำให้ได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนสูงสุด และมีการสูญเสียความร้อนน้อย

ปัญหาที่พบคือการเฝ้าและการเกาะติดกันเป็นก้อนของของถ่านหิน ทำให้เกิดการอุดตันในเบดจำเป็นต้องมี preoxidative treatment และภายใน gasifier อาจต้องมีใบพัดกวาดเพื่อให้ถ่านหินแตกเป็นก้อนไม่ติดกัน นอกจากนี้ยังเป็นปัญหาที่ไม่สามารถใช้ถ่านหินละเอียดได้

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

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะการดำเนินการของ moving bed gasifiers โดยใช้ bituminous coals มีการป้อนไอน้ำและออกซิเจน หรืออากาศ^[8]

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

* Dependent on coal

Assuming coal bed density of 720 kg/m³

+ Based on estimated coal bed heights N/A Not available.

ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส* เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล[†]จากกระบวนการแก๊สซิเคชันของ bituminous coals ใน moving bed gasifier กับไอน้ำและออกซิเจนหรืออากาศ^[8]

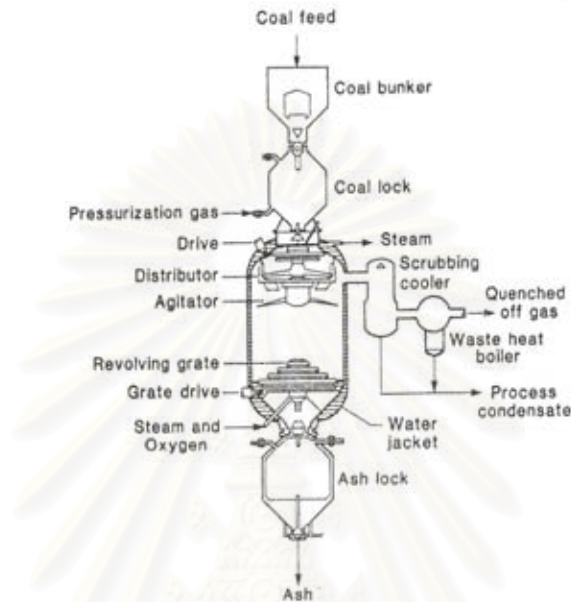
Constituent	steam/oxygen		steam/air	
	Lurgi Slagging	Lurgi Dry Ash	Woodhall Duckham/ Gas Integrale	Wellman-Galusha
CO	61	18	28	29
CO ₂	3	30	5	3
H ₂	28	40	17	15
CH ₄	7	9	3	3
N ₂	1	1	47	50
Other	–	2	–	–
Total	100	100	100	100
GCV, MJ/m ³	13.8	11.3	6.5	6.3

* Dry basis after scrubbing and cooling

[†] Identical with volume percent

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

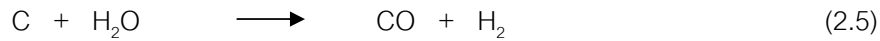
ตัวอย่างการทำงานของ moving bed gasifier คือ Lurgi Dry Ash Gasifier ซึ่งเป็น gasifier ที่ความดันสูงตัวแรกและยังคงใช้อยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



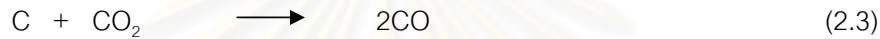
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของ Lurgi Dry Ash Gasifier^[8]

Gasifier นี้ใช้ได้กับลิกไนต์ที่มีความชื้นได้ถึง 35% และเถ้าสูงถึง 35% มีความดันภายในเขต 3.2 เมกะปาสคาล และมี coal residence time ประมาณหนึ่งชั่วโมง อุณหภูมิที่เริ่มแก๊สฟายประมาณ 650-815 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเถ้าอาจอยู่ในช่วง 980-1370 องศาเซลเซียส โดยไม่หลอมละลาย ซึ่งจะถูกทำให้เย็นลงถึง 400-500 องศาเซลเซียส โดยพ่นไอน้ำและอากาศเข้ามา ส่วนแก๊สขาออกทำให้เย็นลงถึง 200-540 องศาเซลเซียส โดย waste heat boiler ใน gasifier แบบนี้ให้ไอน้ำสูงถึง 50% มากเกินพอ ซึ่งมีประโยชน์ในแง่ทำให้อุณหภูมิใน combustion zone ลดลง และทำให้สมดุลของ คาร์บอน-ไอน้ำ และ gas shift reaction เลื่อนออกไป เกิดไฮโดรเจนมากขึ้น gasification zone temperature ในช่วงกลางๆทำให้เกิดมีเทนน้อย (แต่มีเทนส่วนใหญ่ได้จากการ devolatilization) นอกจากแก๊สแล้วยังได้ทาร์ และน้ำมันซึ่งถูกแยกออกโดยการล้างใน scrubber หรือ cooler ด้วยน้ำ

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



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



แก๊สผลิตภัณฑ์ยังคงมีมีเทนอยู่แต่เกิดจากการ devolatilization ของถ่านหินในช่วงการไพโรไลซิสมากกว่า

Fluidization Bed Gasifier

เป็นระบบที่มีการพัฒนาน้อยที่สุดในบรรดาระบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในสมัยก่อนสงครามโลกครั้งที่สอง เตาผลิตแก๊สนี้ใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และเดินเครื่องยนต์ Gas Engines ที่ใช้ในโรงงานการสังเคราะห์แอมโมเนีย เตาผลิตแก๊สนี้มีขนาดเล็กๆ ถูกฟลูอิดิไดซ์โดยความเร็วของแก๊สแบบมีทิศทาง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ Entrained Flow Gasifier พบว่ามีความร้อนและฝุ่นเล็กๆ ซึ่งสูญเสียไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากตัวเตา ผลเสียอันนี้ถูกชดเชยด้วยความสามารถในการเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่องที่ปริมาณการป้อนสูง การใช้ถ่านต่อเวลาและปริมาณการป้อนของเตาสูงกว่า อีกทั้งการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนดี ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย

ระบบนี้สามารถทำงานได้ทั้งในภาวะที่แห้ง หรือเปียกก็ได้ การฟลูอิดิไดซ์แบบแห้งสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของถ่าน อนุภาคของเศษถ่านและถ่านจะถูกดึงออกทางด้านล่างโดยกรรมวิธีทางกล ในขณะที่บางส่วนถูกพัดติดมากับแก๊สเชื้อเพลิงทางด้านบน ทำให้ต้องมีการติดตั้งไซโคลน (Cyclone) เพื่อดักเก็บถ่านไว้ การผลิตแก๊สที่มีถ่านอยู่ และอุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัวของถ่าน ทำให้ถ่านรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นจะตกลงมายังส่วนล่างของเบดและถูกดึงออก

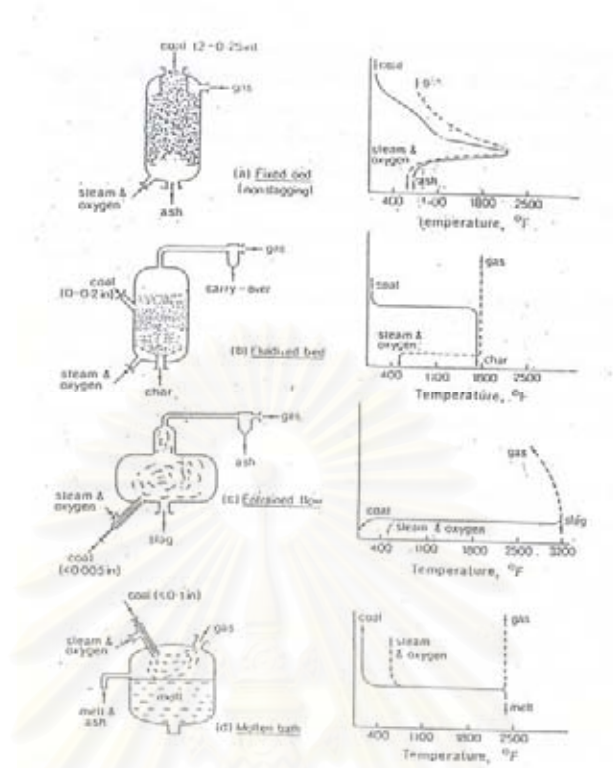
Entrained Flow Gasifier

เป็นการใช้ส่วนผสมของวัตถุดิบกับแก๊ส (อากาศ/ไอน้ำ หรือ ออกซิเจน/ไอน้ำ) เพื่อนำเอาผงละเอียดเล็กๆ ของวัตถุดิบเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส โดยที่ขนาดของวัตถุดิบ และความเร็วของแก๊สที่เข้าจะต้องพอดีกันเพื่อรักษาสภาพของการแขวนลอยไว้ การทดลองเรื่องนี้ได้รับการพัฒนา มาจากระบวนการเผาไหม้ของ Pulverized-Coal เถ้า และถ่าน (Char) จะออกจากเตาพร้อมกับแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีการแยกออกอีกครั้งหนึ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยาของถ่านและอุณหภูมิสูงมากเมื่อเทียบกับเบดนิ่ง และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินสภาวะเกิด Slag แก๊สพีเคชั่นจะสำเร็จด้วยการผ่านเข้าเพียงครั้งเดียว ซึ่งในระบบแห่งนี้จะมีการนำถ่านกลับ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณสูง

Molten Salt Gasifier

สารหลอมเหลวสามารถใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อที่จะถ่ายโอนความร้อนและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการ สารที่เป็นสารหลอมเหลวนอกจากเกลือแล้วอาจจะเป็นเหล็ก หรือ โลหะอื่นๆ รวมทั้งเถ้าของถ่านเอง การผลิตแก๊สที่ใช้ตัวกลางที่หลอมเหลวได้นั้นทำให้ผลิตแก๊สได้มากขึ้น เพราะการเร่งปฏิกิริยาของสารหลอมเหลว กำมะถัน จะอยู่ในส่วนที่หลอมเหลว ทำให้กรรมวิธีที่ใช้ในการทำความสะอาดแก๊สน้อยลง

ผลเสียที่สำคัญคือ เกิดการกัดกร่อน เนื่องจากการใช้สารหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง โดยการผสมกระเบื้องอะลูมินา (Alumina) ที่มีความบริสุทธิ์สูงในเกลือที่ใช้ เป็นเพียงการแก้ปัญหาอย่างชั่วคราว



รูปที่ 2.3 แสดงเตาผลิตแก๊ส 4 ประเภท^[10]

2.1.4 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน

2.1.4.1 ถ่านหิน

จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์ (Fossil Fuel) ชนิดหนึ่งเกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ซึ่งอาจสะสมกันอยู่ชายฝั่งทะเล บริเวณน้ำกร่อย น้ำจืด หรือแผ่นดินที่ขึ้นแฉะ ในขณะเดียวกันเกิดการกักตัวของดินตะกอนลงทับถมกับซากพืชทำให้เกิดการเน่าเปื่อยผุพังกลายเป็น ถ่านพีต ถ่านพีตนี้เป็นต้นกำเนิดของถ่านหิน

การจำแนกถ่านอาจดูได้จากชนิด และศักดิ์

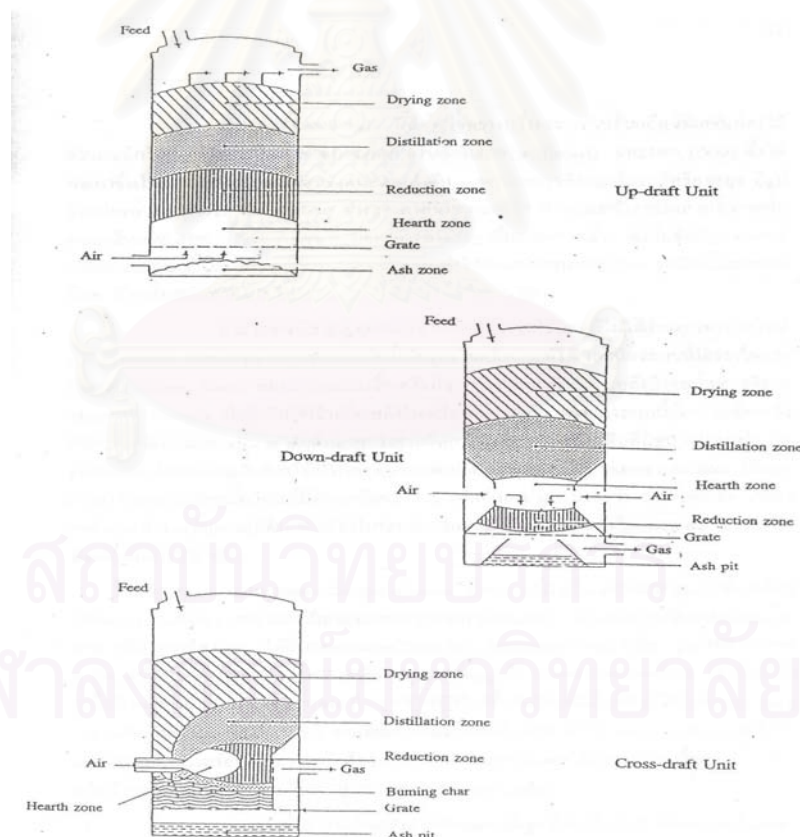
จากเชื้อเพลิงแข็งซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนสูงคือ ประมาณ 15 มาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือแก๊ส เชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำๆ โดยการทำปฏิกิริยา Hydrogenation ในกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเหลว หรือ ปฏิกิริยา Partial Oxidation ในกระบวนการแกซิฟิเคชัน หรือ ปฏิกิริยา Decomposition ในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน และจะมีการกำจัดหรือลดสารประกอบไนโตรเจนกับซัลเฟอร์จากถ่านหินในรูป H_2S และ NH_3 ไปด้วยพร้อมๆกัน

2.1.4.2 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่รู้หมด และสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable energy resources) หมายรวมทั้ง energy crops, ฟาร์ม, กากทางการเกษตร และ ของเสียชุมชน รวมทั้ง ของเสียจากสัตว์ ในแง่ที่ใช้อาหารเป็นพืช การใช้ประโยชน์ของสารชีวมวลซึ่งอาจใช้เป็นทั้ง แหล่งอาหาร และแหล่งพลังงาน สารชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานเนื่องจากเป็นสารประกอบของ H, C และ O คุณสมบัติของชีวมวลที่แตกต่างจากถ่านหินคือมีความชื้น ออกซิเจน ไฮโดรเจน สูง แต่มี แถ้า ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ต่ำ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊สสูง ปริมาณคาร์บอนต่ำ

2.1.5 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier)^[5,11]

สามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือ



รูปที่ 2.4 แสดงเตาผลิตแก๊สในรูปแบบต่างๆ โดยแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศ^[9]

2.1.5.1 Up-Draught Gasifier ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนี้ป้อนอากาศ หรือไอน้ำเข้าทางด้านล่างที่มีการสันดาป (Hearth Zone) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 900 องศาเซลเซียส หรือมากกว่าตามความต้องการ ในกรณีที่ป้อนอากาศหรือไอน้ำเข้าเป็นจำนวนมากเกินไป การลดอุณหภูมิในบริเวณสันดาป หรืออาจทำการหล่อเย็นในบริเวณนี้ด้วยน้ำตลอดเวลาเป็นการยืดอายุการใช้งานของเครื่องได้ แก๊สที่ได้จากบริเวณการเผาไหม้ (Combustion Zone) จะผ่านไปยัง Reduction Zone เข้าไป Distillation Zone หรือ Drying Zone ตามลำดับ

กระบวนการชนิดนี้ได้มีการพัฒนาเป็นเตาผลิตแก๊สแบบผสม (Hybrid Up Draught Reactor) หรือเป็นเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ 2 ชั้นตอน ผลิตออกมาครั้งแรกโดยบริษัท US Gas Integrate เมืองมิลาน ประเทศอิตาลี (สมาคมวิจัยและพัฒนาพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา 1976) ได้ใช้งานมากกว่า 20 ปี แก๊สที่เกิดขึ้นออกมา 2 ระดับ คือ ระดับแรกได้มาจาก Gasification Zone ในช่วง Reduction Zone ซึ่งให้แก๊สที่สะอาดใส (Clear Gas) ออกมา ระดับต่อมาได้จาก Distillation Zone หรือ Drying Zone ได้ Top Gas อุณหภูมิของ Top Gas ถูกควบคุมโดยการปรับสัดส่วนของ Clear Gas ซึ่งไปออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

Top Gas ไหลผ่าน Condenser เพื่อดึงหยดของน้ำมันทาร์ออก ในขณะที่ Clear Gas ไหลผ่านไซโคลนเพื่อกำจัดฝุ่นแก๊สทั้งสองระดับมารวมกัน ความร้อนจาก Clear Gas ทำให้ละอองไขมัน (Oil Mist) ใน Top Gas ระเหยออกไป อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 350 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้สามารถผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้อุณหภูมิลดลง แก๊สที่ยังร้อนมีค่าความร้อนประมาณ 7,500 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร สำหรับแก๊สที่ทำความสะอาดและเย็นลงแล้วมีค่าความร้อนลดลง เหลือประมาณ 6,300 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร

2.1.5.2 Down-Draught Gasifier ระบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยมีจุดมุ่งหมายที่เปลี่ยนน้ำมันทาร์ (Tar) ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สซึ่งมีความสำคัญมาก กรณีส่งแก๊สเชื้อเพลิงไปตามท่อระยะทางไกลๆ จากเตา และยังสามารถประยุกต์ใช้กรณีเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้ด้วย เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมี Distillation Zone และ Drying Zone อยู่เหนือ Hearth Zone และมี Reduction Zone อยู่ด้านล่าง บริเวณที่สำคัญที่สุดคือ Combustion Zone

ระบบ Down-Draught นี้มีการใช้อย่างกว้างขวางสำหรับแก๊สซิฟิเคชันถ่านไม้พีท และลิกไนต์ ตัวอย่างคือ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของอิมเบิร์ต (Imbert) และรอต (Roth) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นในเยอรมนี และสวีเดนแลนด์ตามลำดับ เตาดังกล่าวทำงานมีประสิทธิภาพสูง มีรูปร่างเป็นกรวยอยู่ภายใน Hearth Zone ข้างล่างทางเข้าของอากาศ ส่วนคอดเข้าจะเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความเร็วของอากาศ และทำให้อุณหภูมิของการทำงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่เปลี่ยนน้ำมันทาร์ไปเป็นแก๊ส ระบบ Down-Draught ได้รับการพัฒนาสำหรับการใช้กับไม้ และเศษวัสดุ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีไฮโดรเจนสูงกว่าใช้ถ่านไม้ หรือถ่านหิน

ประโยชน์ที่สำคัญของระบบนี้ก็คือสามารถใช้วัสดุที่ไม่ได้ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (Uncarbonised Materials) และสามารถลดน้ำมันทาร์ในผลิตภัณฑ์ได้ แต่เป็นระบบที่มีเวลาในการสัมผัส (Contact Time) ของอากาศและเชื้อเพลิงน้อย เป็นระบบที่ให้เชื้อเพลิงแก๊สสม่ำเสมอ ดีกว่าระบบ Up-Draught Gasifier เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามระบบนี้ต้องการเชื้อเพลิงที่มีความสม่ำเสมอของขนาดวัตถุดิบมากกว่าสำหรับการทำงาน และวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 เซนติเมตร ไม่เหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ Imbert และ Roth ได้ออกแบบไว้ เตาเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กกว่า 1.5 เซนติเมตร และมากกว่า 5 เซนติเมตร เครื่องเหล่านี้จะทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าเครื่องในระบบ Cross-Draught และยังไม่เหมาะสมกับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงปริมาณต่ำ

2.1.5.3 Cross-Draught Gasifier ในระบบนี้การไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ได้จะขวางกับตัวเตา แต่ก็ไม่จำเป็นต้องขนานในแนวอนนเสมอ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบนี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูงมาก ให้มี Combustion Zone และ Reduction Zone จำกัด โดยใช้ท่ออากาศตรงทางเข้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อุณหภูมิจะสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส จึงต้องมีน้ำหล่อเย็นอยู่ข้างนอก เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาล้นจึงต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีน้ำมันทาร์ต่ำ และขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6-1 เซนติเมตรเป็นขนาดที่ดี เชื้อเพลิงใน Hopper จะประพฤติเป็นเกราะป้องกันความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน และเมื่อทำงานโดยใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงก็ไม่จำเป็นต้องก่อปูนทนไฟ (Refractory Liner)

พื้นที่ส่วนใหญ่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง ที่ซึ่งเป็นปลายท่อมีความเร็วของอากาศสูงถึง 80 เมตรวินาที เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนี้มีลักษณะพิเศษคือ มีรูปทรงง่ายๆ และเริ่มเดินเครื่องได้เร็ว ใช้ได้ดีด้วยเครื่องยนต์ขนาดเล็กตอบสนองต่อความต้องการแก๊สที่ไม่คงที่

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 แบบ ป้อนวัตถุดิบเข้าทางด้านบนของเตาครั้งแรก วัตถุดิบถูกทำให้แห้ง แล้วถูกกลั่นสลายด้วยความร้อน (Pyrolyse) เนื่องจากความร้อนที่บริเวณที่ร้อนกว่าข้างล่างเตา เรียงลำดับคือ Combustion Zone และ Reduction Zone องค์ประกอบที่เป็นน้ำมันทาร์และถ่านแดงถูกออกซิไดซ์บางส่วนให้ความร้อนมา และทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปอีก 500 องศาเซลเซียส ปริมาณคาร์บอนที่เหลือทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจนในช่วงสุดท้าย แก๊สวิ่งผ่านตะแกรงลงไปสู่ส่วนล่าง อากาศร้อนถูกแยกออกในสวนตรงข้ามกับอากาศเข้า อาจเป็นส่วนบน หรือส่วนล่างขึ้นกับการออกแบบของเตา องค์ประกอบของแก๊สที่แน่นอนที่ได้จากเตาผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้อากาศขึ้นกับชนิดของชีวมวลที่ใช้

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นมาใช้งานในปัจจุบันถึงแม้ว่าจะสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงออกมาใช้งานได้แต่ถ้าวิเคราะห์ดูใกล้ๆแล้วจะพบว่ายังขาดหลักการการทำงานที่

เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สต่ำ มีผลกระทบต่อการใช้สายเชื้อเพลิงไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร การที่ร้อยละของปริมาณแก๊สติดไฟได้ต่ำมีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ดีควรมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณร้อยละของแก๊สติดไฟได้สูง ปริมาณทาร์จะต้องถูกเผาไหม้ภายในเตาหรือถูกกำจัดออกมากที่สุด สารเชื้อเพลิงแข็ง คือ ถ่านที่ออกมากับเถ้าและปริมาณเถ้าที่ออกมาควรมีน้อยที่สุด การที่จะทำเช่นนี้ได้จะต้องมีการศึกษาวิจัยหาข้อมูลต่างๆเพื่อที่จะนำไปแก้ไขตัดแปลงเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอยู่ หรือที่จะสร้างขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด

2.2 ชีวมวล^[8]

ชีวมวลมีความสำคัญมากในแง่ที่เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่รู้หมด และสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable energy resources) สารชีวมวลมีความหมายรวมทั้ง energy crops, ฟาร์ม, กากทางการเกษตร และ ของเสียชุมชน รวมทั้ง ของเสียจากสัตว์ ในแง่ที่ใช้อาหารเป็นพืช การใช้ประโยชน์ของสารชีวมวลซึ่งอาจใช้เป็นทั้งแหล่งอาหาร และแหล่งพลังงาน สารชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานเนื่องจากเป็นสารประกอบของ H, C และ O โดยสร้างจาก CO₂ และน้ำด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) เมื่อมีแสงแดด และ คลอโรฟิลล์

2.2.1 สมบัติของชีวมวล

สารชีวมวลมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต และ ลิกนิน

ก. คาร์โบไฮเดรต คือสารพวก Saccharides, เซลลูโลส, แป้ง และ hemicellulose

- เซลลูโลส เป็นเส้นใย polysaccharide ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของพืช และมีอยู่มาก เซลลูโลสเป็นตัวที่ไม่ละลาย และไม่ค่อยทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะไฮโดรไลซิส

- แป้ง เป็นเม็ด polysaccharide ถูกเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่พวก เมล็ด, ราก, หัว และลำต้น ประกอบด้วย 10-20% α -amylose ซึ่งละลายน้ำ และ 80-90% amylopectin ซึ่งไม่ละลายน้ำ

- Hemicellulose เป็น polysaccharide ที่พบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส แตกต่างกันที่เป็น amorphous และมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส

ข. ลิกนิน เป็นกลุ่มสำคัญที่มีในชีวมวลไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบพิเศษของผนังของ woody cell ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมเกาะให้เกิดความแข็งแรงเชิงกล เป็น amorphous

และละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส สามารถแยกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้ไอน้ำ ลิกนินต้านทานปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และไม่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียได้

ตารางที่ 2.5 แสดงสูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต และลิกนิน^[8]

	Approximate Representation	Monomer Building Block	Molar Mass
Polysaccharides			
Cellulose	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	D-glucose	>100,000
Starch	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	D-glucose	35,000-90,000
Hemicellulose	-	Various sugars	1 0,000-35,000
Wood	$C_{36}H_{54}O_{23}$	Lignocellulose	5,000-10,000
Lignin	-	Hydroxyphenyl-propane (C_3H_7, C_6H_4, OH)	5,000-10,000

2.2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปสารชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานกระทำได้โดยใช้กระบวนการแปรรูป 2 หลักการด้วยกันคือ

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

กระบวนการแกซีฟิเคชันใช้หลักการและวิธีการคล้ายกับของถ่านหินที่ได้กล่าวถึงแล้วในแง่ของเชื้อเพลิงจะสนใจองค์ประกอบของ C,H,O,N,S และค่าความร้อน รวมทั้งร้อยละของเถ้า (%ash) ที่มีอยู่ในชีวมวลมากกว่าซึ่งแสดงในตารางที่ 2.6

ในเนื้อไม้สามารถ hydrolyse ส่วนที่เป็น hemicellulose ได้ทั้งหมด และส่วนที่เป็นเซลลูโลสได้เพียงหนึ่งในสี่ไปเป็นน้ำตาล แต่เซลลูโลสส่วนที่เหลือ กับลิกนินจะไม่เปลี่ยนแปลงดังซึ่งอาจใช้วิธีการสกัดลิกนินออกก่อนแล้วจึงย่อยส่วนของเซลลูโลส แต่วิธีนี้แพงและไม่นิยมใช้ ดังนั้นจึงไม่ค่อยใช้วิธีการแปรรูปชีวมวลทางชีวภาพกับไม้ แต่จะใช้วิธีทางความร้อนแทน

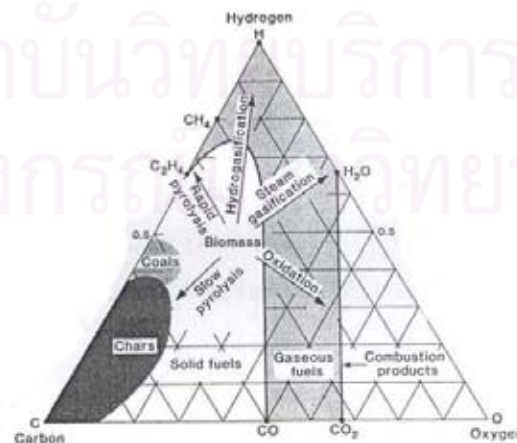
ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล^[8]

Mass %,dry	wood	grain	multupal Solid waste	animal waste (manure)
Carbon	50-53	45.0	47.60	3.51
Hydrogen	5.8-7.0	5.8	6.0	5.3
Nitrogen	0-0.3	2.4	1.20	2.52
Sulfur	0-0.1	0	0.3	0.4
Oxygen	38-44	42	32.9	38.7
Volatile matter	77.87	80	77	76.5
Fixed Carbon	13-21	-	11	0
Ash	0.1-2.0	4.0	12	23.5
H/C atom ratio	1.4-1.6	1.5	1.5	1.8
GCV,MJ/kg(dry)	19.8-21.0	16.8	19	13.4
Moisture,%	25.60	16	20	7-35

กระบวนการแปรรูปทางความร้อน รวมถึงกระบวนการ

- Pyrolysis
- Gasification
- Combustion

สามารถแสดงกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ในกราฟสามเหลี่ยม เปรียบเทียบกับรูปที่ 2.5 ของด้าน
 หิน



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนของชีวมวล^[8]

ชีวมวลเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ความร้อนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่กระบวนการไพโรไลซิสเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า หรือเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส ขณะที่กระบวนการแกซิฟิเคชันใช้อุณหภูมิประมาณ 800 – 1100 องศาเซลเซียส และ เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส

- Slow pyrolysis ให้ปริมาณถ่านชาร์ที่อยู่ที่มีมของคาร์บอนขณะที่ rapid hydrolysis ให้ของเหลว และแก๊สมากกว่า และ hydrolysis ให้ปริมาณผลได้แก๊สสูงมาก และให้ของเหลวคุณภาพดี
- กระบวนการแกซิฟิเคชันให้แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงประกอบไปด้วย CO, CH₄ และ H₂
- Combustion ต้องการ O₂ ได้ผลิตภัณฑ์ CO₂, H₂O

สำหรับชีวมวลกระบวนการ และหลักการที่ใช้กับถ่านหินทั้งแกซิฟิเคชัน และไพโรไลซิสสามารถใช้กับชีวมวล

คุณสมบัติของสารชีวมวลที่แตกต่างกับถ่านหินในแง่เชื้อเพลิง คือ ชีวมวลจะให้ปริมาณความชื้น ออกซิเจน และไฮโดรเจนสูง ส่วนปริมาณเถ้า ซัลเฟอร์ และ ไนโตรเจนมีปริมาณต่ำ นั่นคือทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สและของเหลวสูง ส่วนปริมาณผลได้ชาร์ต่ำแต่เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนสูงจึงต้องใช้ไฮโดรเจนมากในการเกิดน้ำที่อยู่ในเนื้อไม้ ดังนั้นจึงไม่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วน ไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูงตามต้องการ แต่ข้อดีของชีวมวล คือ มีเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์ต่ำ และให้สารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

2.2.3 ยูคาลิปตัส^[12]

2.2.3.1 ประวัติ ความเป็นมาของไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส เป็นไม้ชนิดหนึ่งในจำนวนมากกว่า 500 ชนิด ของ สกุลยูคาลิปตัสเป็นไม้ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แพร่กระจายอย่างกว้างขวางทั่วประเทศออสเตรเลีย สามารถขึ้นได้ในที่ริมน้ำและที่ราบน้ำท่วมถึง ตลอดจนในบริเวณที่มีดินเหลวซึ่งมีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 650 มิลลิเมตรต่อปี รวมทั้งในพื้นที่ที่มีดินเค็มด้วย แต่จะไม่ทนต่อสภาพดินที่มีกำเฒ่าจากหินปูน ในประเทศออสเตรเลียไม่นิยมปลูกไม้ยูคาลิปตัสชนิดนี้เท่าใดนัก เนื่องจากไม้ชนิดนี้ในถิ่นกำเนิดซึ่งเป็นป่าธรรมชาตินั้นลำต้นรูปทรงไม่ดี มีลักษณะคดงอและแตกกิ่งก้านมาก ประกอบกับมีไม้ยูคาลิปตัส ชนิดอื่นให้เลือกมากกว่า 500 ชนิด และมีเป็นป่าธรรมชาติมากอยู่แล้ว

ไม้ยูคาลิปตัสที่นิยมปลูกนอกถิ่นกำเนิดของประเทศออสเตรเลียที่สำคัญๆ ได้แก่ ยูคาลิปตัส โรบัสต้า (E. robusta) ยูคาลิปตัส โกลบูลัส (P. globulus) ยูคาลิปตัส เทอเร็ติกอร์นิส (E. tereticornis) ยูคาลิปตัส ยูโรฟิลล่า (E. urophylla) และยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส

(*E. camaldulensis*) ซึ่งลี้วนแล้วแต่ได้เคยนำมาปลูกทดลองในประเทศไทยแล้วทั้งสิ้น สาเหตุที่ไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส ได้รับความนิยมปลูกในท้องที่อื่นนอกประเทศออสเตรเลีย เช่น ในประเทศสเปน มอโรคโค บราซิล อาเจนตินา อูรุกวัย เคนยา ไนจีเรีย ทานซาเนีย ตุรกี อิสราเอล บังคลาเทศ ปากีสถาน อินเดีย และประเทศไทย เป็นต้นนั้น เนื่องจากไม้ชนิดนี้เมื่อนำไปปลูกนอกถิ่นกำเนิดแล้วสามารถปรับตัว และเจริญเติบโตได้ดี ในสภาพของดินแทบทุกประเภท แม้แต่ดินที่เป็นทรายและมีความแห้งแล้งติดต่อกันเป็นเวลานาน ตลอดจนรูปทรงของลำต้นสามารถปรับตัวให้สูงตรง และมีกิ่งก้านน้อยแตกต่างจากถิ่นกำเนิดเดิม ในประเทศออสเตรเลียนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ชนิดอื่น ๆ ซึ่งปลูกในที่เดียวกัน

การปลูกไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส ในประเทศไทย เริ่มปลูกครั้งแรกเมื่อปี 2508 ซึ่งสามารถปรากฏเป็นหลักฐานได้ ภายใต้โครงการสำรวจวัตถุดิบเพื่อผลิตเยื่อกระดาษ โดยนำเมล็ดมาจากประเทศออสเตรเลียและปลูกทดลองเพื่อคัดเลือกชนิด และถิ่นกำเนิดในท้องที่จังหวัดเชียงใหม่ ศรีสะเกษ และกาญจนบุรี ปรากฏว่า ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด

สำหรับการปลูกไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส เพื่อการใช้สอยในครัวเรือนได้เริ่มขึ้นเมื่อปี 2524 ภายใต้โครงการปลูกป่าฟื้นฟูชุมชนสำหรับหมู่บ้าน เพื่อเป็นแหล่งผลิตไม้ฟืนและถ่าน สำหรับราษฎรในหมู่บ้านในอนาคต ดำเนินการโดยโครงการศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทน ในการดำเนินงานในท้องที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือรวม 7 จังหวัด คือ ในท้องที่จังหวัดศรีสะเกษ ยโสธร ร้อยเอ็ด มหาสารคาม ขอนแก่น สุรินทร์ และ กาฬสินธุ์ โดยมีศูนย์ประสานงานภาคสนามอยู่ที่ศูนย์ปรับปรุงป่าสงวนแห่งชาติที่ 4 กิ่งอำเภอน้ำเกลี้ยง จังหวัดศรีสะเกษปรากฏว่าไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางตั้งแต่ 2524 เป็นต้นมา รวมทั้งการปลูกสร้างสวนป่าของกรมป่าไม้ เพื่อปรับปรุงป่าสงวนแห่งชาติที่สี่มโหรีม ได้้นำเอาไม้ชนิดนี้มาปลูกเพื่อเป็นไม้เบิกนำอย่างจริงจังเมื่อประมาณปี 2525 เช่นเดียวกัน

2.2.3.2 ลักษณะทั่วไปยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส สามารถเจริญเติบโตได้ในทุกสภาพของดินแทบทุกประเภท ตั้งแต่ในที่ริมน้ำ ที่ราบน้ำท่วมบางระยะในรอบปี แม้แต่ดินที่เป็นทรายและมีความแห้งแล้งติดต่อกันเป็นเวลานาน พื้นที่ดินเลวที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 650 มม.ต่อปี รวมทั้งพื้นที่ที่มีดินเค็ม ดินเปรี้ยว แต่จะไม่ทนทานต่อดินที่มีหินปูนสูง

- ลำต้น เป็นไม้ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีความสูง 24 – 26 เมตร และอาจสูงถึง 50 เมตร ความโตทางเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 – 2 เมตร หรืออาจโตมากกว่านี้ รูปทรงสูง เปลือกตรง มีกิ่งก้านน้อย

- ใบ เป็นคู่ตรงข้ามเรียงสลับกัน ลักษณะใบเป็นรูปหอก มีขนาด 2.5 – 12 x 0.3 – 0.8 นิ้ว ก้านใบยาว ใบสีเขียวอ่อนทั้งสองด้าน บางครั้งมีสีเทาใบบาง ห้อยลง เส้นใบ มองเห็นได้ชัด
- เปลือก มีลักษณะเรียบเป็นมัน มีสีเทาสลับสีขาวและน้ำตาลแดงเป็นบางแห่ง เปลือกนอกจะแตกออกเป็นแผ่นหลุดออกจากผิวของลำต้น เมื่อแห้งและลอกออกได้ง่ายในขณะสด หลังจากการ ตัดฟัน เปลือกนอกหนา
- เมล็ด ขนาดเล็กกว่า 1 มม. สีเหลือง เมล็ด 1 ก.ก. มีเมล็ดประมาณ 1 – 200,000 เมล็ด
- ช่อดอก เกิดที่ข้อต่อระหว่างกิ่งกับใบ มีก้านดอกเรียวยาว และมีก้านย่อยแยกไปอีก ออกดอกเกือบตลอดปี ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของต้นไม้บางครั้งมีทั้งดอกตูม ดอกบาน ผลอ่อน และผลแก่ในกิ่งเดียวกัน ออกดอกปีละ 7 – 8 เดือน เหมาะกับการเลี้ยงผึ้ง
- ผล มีลักษณะครึ่งวงกลม หรือรูปถ้วย มีขนาด 0.2–0.3 x 0.2–0.3 นิ้ว ผิวนอกแข็ง เมื่อยังอ่อนอยู่จะมีสีเขียว และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเมื่อแก่ เมื่อผลแก่ปลายผลจะแยกออก ทำให้เมล็ดที่อยู่ภายในร่วงหล่นออกมา
- ลักษณะเนื้อไม้ มีแก่นสีน้ำตาล กระจุกสีน้ำตาลอ่อน กระจุกและแก่นสีแตกต่างกันได้ชัด ไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส ที่มีอายุมากขึ้นจะมีสีน้ำตาลแดงเข้มกว่าไม้อายุน้อย เนื้อไม้มีลักษณะค่อนข้างละเอียด เส้นสน (Interlocked grain) บางครั้งบิดไปตามแนวลำต้น เนื้อไม้มีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 0.6 – 0.9 ในสภาพแห้งซึ่งขึ้นอยู่กับอายุของไม้ เนื้อไม้แตกง่าย หลังจากตัดฟันตามแนวยาวขนานลำต้น แต่ถ้าทำให้ถูกหลักวิธีก็สามารถนำมาเลื่อยทำเครื่องเรือนและก่อสร้างได้

2.2.3.3 ประโยชน์ของไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัสสามารถนำมาปลูกเป็นสวนป่าเจริญเติบโตดี ให้ผลผลิตสูงเมื่อเปรียบเทียบกับไม้โตเร็วชนิดอื่น ในช่วง 1 – 2 ปีแรกสามารถปลูกพืชควบในพื้นที่สวนป่าแบบไร่ป่าผสม หรือวนเกษตรได้ เช่น ปลูกมะม่วง ฝรั่ง ถั่วลิสง สับปะรด ข้าวโพด ข้าว หญ้ากีนี ฯลฯ ในระหว่างแถวของยูคาลิปตัสซึ่งจากการวิจัยของนักวิชาการพบว่า พืชควบที่ปลูกให้ผลผลิตอยู่ในเกณฑ์ดีและ ยูคาลิปตัสไม่เป็นพิษเป็นภัยต่อพืชเกษตรที่ปลูกแต่อย่างใด

ไม้ยูคาลิปตัสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการเหมือนกับพรรณไม้ชนิดอื่นๆ และสามารถจำแนกการใช้ประโยชน์ตามลักษณะต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การใช้ประโยชน์ก่อสร้างทั่วไป ไม้ยูคาลิปตัสแม้ว่าจะมีข้อตำหนิ เนื้อไม้บิดงอ แต่ก็มีผู้นำไปใช้ ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในประเทศออสเตรเลียไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างสำหรับเป็นโครงสร้างบ้านเรือน และเป็นไม้หมอนรถไฟได้เป็นอย่างดี ไม้ชนิดนี้มีความแข็งแรงทนทานปานกลาง ความหนาแน่นของเนื้อไม้ประมาณ 0.6

นอกจากนี้ยังนำมาใช้ภายในโดยทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

2. การใช้ประโยชน์ด้านพลังงานเชื้อเพลิงในรูปฟืนและถ่าน ไม้พินยูคาลิปตัส ความลาดดูเลนซิสขนาด 5x4x3 เซนติเมตร จำนวน 500 กรัม เมื่อนำไปเผาไฟในเตาอั้งโล่ขนาดกลาง ให้ปริมาณความร้อน 4,600 แคลลอรี่ต่อกรัม สามารถทำให้น้ำในภาชนะ 3 ลิตรเดือดในเวลา 6.6 นาที ในขณะที่ฟืนลูกดีนาน 33 นาที และปริมาณเถ้าที่เหลืออยู่เพียง 0.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนับว่าเป็น ไม้พินที่มีคุณภาพดีกว่าไม้พินของพรรณไม้หลายชนิด เช่น ไม้กระถินยักษ์ ไม้กระถินณรงค์ ไม้สน ประติพัทธ์ ไม้เหล่านี้ทำให้น้ำในการเดือดได้ 7-7.3 นาที ในขณะที่ฟืนลูกดีนาน 28-30 นาที และมีปริมาณเถ้าเหลืออยู่ 0.24-0.90 เปอร์เซ็นต์

3. การใช้ประโยชน์ในด้านน้ำมัน น้ำมันจากต้นยูคาลิปตัสสามารถใช้ประโยชน์ทั้ง ในด้านการแพทย์ การอุตสาหกรรมและน้ำมันหอมระเหย

ในด้านการแพทย์น้ำมันยูคาลิปตัสสามารถใช้เป็นวัตถุดิบและเป็น ส่วนผสมที่สำคัญในการผลิตยาอมแก้ไอ ยาต้มแก้หวัด ยาล้างปาก ยาสีฟัน น้ำมันทาถูวนวดและ สบู่ นอกจากนี้ยังใช้ในน้ำยาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย น้ำมันยูคาลิปตัสสามารถสกัดจากรอยเปื้อน และใช้ เป็นตัวทำละลายได้ดี ยูคาลิปตัสที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสโดเวส ยูคาลิปตัสโกลบูลัส ยูคาลิปตัสโครวินก้า และยูคาลิปตัสยูมานิไอ

ในด้านการอุตสาหกรรม การใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการผลิต เมนทอล ซึ่งนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อและเป็นตัวทำละลายอื่นๆ ยูคาลิปตัสที่ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสโกลบูลัส ยูคาลิปตัสโพลีแบกเทีย ยูคาลิปตัส ราดิอาต้า ยูคาลิปตัสสมิททิโอ เป็นต้น

ด้านน้ำหอม การใช้ประโยชน์ด้านนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ระเหย เพราะยูคาลิปตัสเหล่านี้มีกลิ่นหอม โดยทั่วไปจะใช้ผสมลงไปน้มน้ำยาฆ่าเชื้ออื่น เพื่อ ปรับปรุงให้มีกลิ่นดีขึ้น ยูคาลิปตัสที่ใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัสชิริโอโดร่า และ ยูคาลิปตัสสตายเจอรานา เป็นต้น

4. การใช้ประโยชน์ในการย้อมสี สารที่อยู่ในเปลือก ใบ ดอก หรือตาดอกของยูคา ลิปตัสสามารถให้สีต่างๆ กันตั้งแต่สีแดง สีส้ม สีเหลือง เป็นต้น การที่ทำให้เกิดสีต่างๆ กันนี้ นอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของยูคาลิปตัสเองแล้วยังขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ทำให้สีติดด้วย

ประโยชน์ทางตรง

1. ทำไม้ใช้สอย เฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ทำรั้ว ทำคอกปศุสัตว์ ทำเสาก ใช้ในการ ก่อสร้างต่างๆ ไม้ยูคาลิปตัสสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาคารบ้านเรือนได้ แต่ควรจะได้ ทำการอบน้ำยารักษาเนื้อไม้ไว้ก่อน ก็จะยืดอายุ การใช้งานได้นาน

2. ทำฟืนเผาถ่าน ถ่านไม้ยูคาลิปตัสใช้เป็นเชื้อเพลิงติดไฟได้ดีและมีชี้อ่อนนุ่มจากการทดลองไม้ฟืนยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อน 4,800 แคลอรีต่อกรัม ส่วนถ่านไม้ยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อน 7,400 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งให้ความร้อนใกล้เคียงกับถ่านไม้โกงกาง ซึ่งจัดว่าเป็นถ่านไม้ชั้นดีที่สุด

3. ทำชิ้นไม้สับ ไม้ยูคาลิปตัสเมื่อนำมาแปรรูปและสับทำชิ้นไม้สับ สามารถนำไปผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด แผ่นใยไม้อัด แผ่นปาร์ติเกิล และแผ่นไม้อัดซีเมนต์ นอกจากนี้ได้มีโรงงานผลิตชิ้นไม้สับ เพื่อนำส่งไปจำหน่ายให้กับโรงงานเยื่อกระดาษทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น ประเทศเกาหลี ไต้หวัน และญี่ปุ่น เป็นต้น ซึ่งมีความต้องการสูงมาก ไม้ท่อนยูคาลิปตัส 2.2 ตัน นำมาผลิตเป็นชิ้นไม้สับได้ 1 ตัน ราคาชิ้นไม้สับ ประมาณตันละ 3,000 บาทเศษ

4. ทำเยื่อไม้ ไม้ยูคาลิปตัสสามารถแปรรูปทำเยื่อไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งมูลค่าผลผลิตเยื่อไม้ราคาตัน 17,000 บาท โดยไม้ท่อนยูคาลิปตัส 4.5 ตัน ผลิตเยื่อไม้ได้ 1 ตัน เยื่อไม้ให้สารพวกเซลลูโลส ซึ่งนำไปใช้ทำเส้นใยเรยอนและทำผ้าแทนเส้นใยฝ้าย และปุ๋ยนุ่นได้อีกด้วย โดยมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็นตันละ 60,000 บาท และเมื่อนำเส้นใยเรยอนมาปั่นเป็นเส้นด้าย และทอเป็นผ้า จะมีมูลค่าสูงถึง ตันละ 75,000 บาท และ 300,000 บาท ตามลำดับ

5. ทำกระดาษ จากการประเมินเยื่อไม้ยูคาลิปตัส 1 ตัน ผลิตเยื่อกระดาษได้ประมาณ 1 ตัน เยื่อไม้ยูคาลิปตัสมีคุณสมบัติเด่น คือ มีความฟูสูง และมีความทึบแสง ประกอบกับ ไฟเบอร์มีความแข็งแรงเหมาะต่อการใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียวประเภทต่างๆ ได้

ประโยชน์ทางอ้อม

1. เพาะเห็ด ที่ระบบรากของไม้ยูคาลิปตัสจะมีเชื้อราไมคอร์ไรซาชนิดต่างๆ อาศัยอยู่ เป็นตัวช่วยดูดธาตุฟอสฟอรัสให้กับต้นยูคาลิปตัสได้มากขึ้น ช่วยให้ต้นไม้เจริญเติบโตดี และปรับปรุงดินเสื่อมให้มีคุณภาพดีขึ้น เมื่อถึงฤดูฝนเชื้อไมคอร์ไรซาเหล่านี้ ก็จะแทงดอกเห็ดโผล่เหนือพื้นดิน เพื่อแพร่กระจายพันธุ์ออกไป คนจึงเก็บดอกเห็ดเหล่านี้ไปกินไปขายได้ ในที่สวนป่ายูคาลิปตัสบางแห่งพบว่า มีเห็ดเกิดขึ้นใต้ต้นยูคาลิปตัสมากมายซึ่งเรียกว่า เห็ดยูคา ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น เห็ดเสม็ด เห็ดไซ เห็ดระโงกขาว เป็นต้น ซึ่งสามารถรับประทานได้ อาจารย์ตีพร้อม ไชยวงศ์ เกียรติ แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ทดลองหาวิธีการเพาะเลี้ยงเชื้อเห็ดยูคาในห้องปฏิบัติการอยู่ ซึ่งเชื่อแน่ว่าหากสามารถเพาะเชื้อเห็ดยูคาได้ และนำเชื้อเห็ดชนิดนี้ไปใส่ในสวนป่ายูคาลิปตัส และใส่ปุ๋ยคอกช่วยแล้ว จะทำให้เกษตรกรสามารถเก็บเห็ดยูคาบริโภค และส่งขายได้ เป็นการเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรได้อีกทางหนึ่ง

2. เลี้ยงผึ้ง ดอกยูคาลิปตัสมีน้ำหวานล่อแมลงมาผสมเกสรและดูดเอาน้ำหวานไปสร้างรวงผึ้ง และไม้ยูคาลิปตัสมีดอกปีละ 7 – 8 เดือนหรือเกือบตลอดปี ซึ่งติดกับพันธุ์ไม้ชนิดอื่นๆ

ทั่วไป ที่มีจะมีดอก 1 – 2 เดือน/ปี จึงเป็นประโยชน์มากสำหรับการเลี้ยงผึ้ง น้ำผึ้งที่ได้จากดอกไม้ยูคาลิปตัสมีรสและคุณภาพดีเหมือนกับน้ำผึ้งที่ได้จาก ดอกไม้ชนิดอื่นๆ

3. สิ่งแวดล้อม ช่วยทำให้เกิดความสมดุลตามธรรมชาติ เช่น เพิ่มความชุ่มชื้นให้แก่ พื้นที่อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ต้นไม้ยูคาลิปตัสดูดขึ้นไปคายน้ำออกทางใบ เป็นปริมาณกว่า 95% มีส่วนช่วยทำให้ฝนตก ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุอาหารในดิน

4. เศรษฐกิจ ก่อให้เกิดการปลูกสร้างสวนป่าเชิงพาณิชย์อย่างครบวงจร โดยเฉพาะเกษตรกรรายย่อยที่ปลูกยูคาลิปตัส จะมีแหล่งตลาดรองรับผลผลิตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความมั่นคงในอาชีพ และรายได้

5. สังคม สร้างงานในชนบท ทำให้คนมีงานทำ กระจายโรงงานอุตสาหกรรมไปสู่ชนบท

6. ประหยัดเงิน ลดเงินที่จะออกไปต่างประเทศ จากการที่จะต้องสั่งซื้อไม้ท่อน และ วัสดุดิบ เยื่อกระดาษเข้าประเทศ

7. ช่วยฟื้นฟูพื้นที่ป่าไม้ของชาติ โดยเฉพาะพื้นที่ป่าเศรษฐกิจได้มากขึ้น ตามเป้าหมายของรัฐบาล

2.3 แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas) ^[13,14,15]

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

2.3.1 กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์

แก๊สสังเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะผลิตจากไฮโดรคาร์บอน ดังเช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน และชีวมวลโดยวิธีการ

2.3.1.1 การรีฟอร์มแก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรคาร์บอนเบาด้วยไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือทั้งไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.3.1.2 การออกซิไดซ์บางส่วนของน้ำมันหนัก(Partial oxidation of heavy oil)

2.3.1.3 การแกสซิฟิเคชันถ่านหิน หรือ ถ่านโค้ก (Gasification of coal or coke)

วิธีการต่างๆ ข้างต้นจะให้สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันไปซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ^[16]

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

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ได้นั้นจะมีสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนในสัดส่วนต่างๆ ขึ้นกับกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์ระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

2.3.2 การนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

2.3.2.1 การใช้ประโยชน์ในรูปแก๊สสังเคราะห์

ผลิตภัณฑ์ขั้นต้น (Primary product) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่ได้จากการใช้แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ^[17]

แก๊สสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสารเคมีอินทรีย์อื่นๆ ได้อย่างมากมายซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกปิโตรเคมี ในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ค้นพบว่า แก๊สสังเคราะห์ สามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้เป็นอย่างดีโดยใช้ซิงค์-โครเมียมออกไซด์ (Zinc-Chromium Oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแอลเคน (Alkanes) ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์ ที่มีเหล็กเป็นโปรโมเตอร์ และตัวรองรับ ปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นแอลเคนและแอลกอฮอล์ เป็นที่รู้จักกันทั่วโลกคือปฏิกิริยา ฟิชเชอร์-ทรอปส์ช (Fischer-Tropsch reaction) โดยจุดประสงค์ของปฏิกิริยานี้เพื่อที่จะผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ซึ่งเป็นสารแอลเคนที่มีโมเลกุลสูง

สำหรับการผลิตเมทานอลนั้นนอกจากจะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงแล้ว ยังนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปิโตรเคมีอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น พอร์มัลดีไฮด์ กรดอะซิติก เมทิลคลอไรด์ เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ยังใช้เป็นตัวเติม (Additive) ในแก๊สโซลีนในรูปของ Methyl tertiary butyl ether (MTBE)

นอกจากนี้แก๊สสังเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า แร่เหล็กที่ขุดได้จากเหมืองในตอนแรกจะเป็นเหล็กออกไซด์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สสังเคราะห์

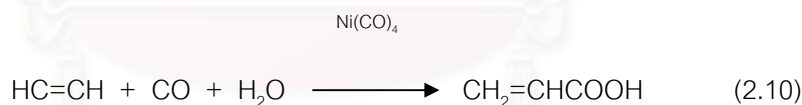
ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นแก๊สรีดิวซ์ (Reducing Gas) ซึ่งพร้อมจะถูกนำไปผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้าตามต้องการ

2.3.2.2 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

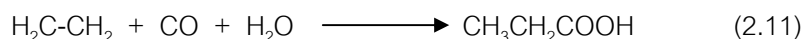
นอกจากการใช้ประโยชน์แก๊สสังเคราะห์ในลักษณะรวมแล้วนั้น ยังสามารถแยกแต่ละแก๊สมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์สารเคมีตัวอื่นๆได้อีกจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของแก๊สแต่ละชนิด

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สพิษที่ติดไฟได้ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยสามารถที่จะแยกออกจากแก๊สสังเคราะห์ได้โดยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว โดยมากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะนำไปใช้ในปฏิกิริยาพื้นฐานที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ คาร์บอนิลเลชัน (Carbonylation) และ ไฮโดรฟอर्मิลเลชัน (Hydroformylation) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรฟอर्मิลเลชันนั้นอาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปฏิกิริยาออกโซ (Oxo Reaction)

ในกระบวนการโอเลฟิน คาร์บอนิลเลชัน โดยทำปฏิกิริยากับน้ำ แอลกอฮอล์ เอมีน และกรดคาร์บอกซิลิก โดยไซโลหะกลุ่ม VIII เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารประกอบตัวใหม่ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ เช่น การผลิตกรดอะคริลิก (Acrylic acid) โดยใช้อะเซทิลีนทำปฏิกิริยากับน้ำและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ $\text{Ni}(\text{CO})_4$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 30 บาร์ จะได้ปริมาณของกรดอะคริลิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



ในการผลิตการผลิตกรดโพรพิโอนิกจากเอทิลีน สามารถทำได้โดยกระบวนการไฮดรอกซีคาร์บอนิลเลชัน (Hydroxycarbonylation) โดยใช้นิกเกิลโพรพิเนต (Nickel propionate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 270 ถึง 320 องศาเซลเซียส ความดัน 200 ถึง 300 บาร์จะได้กรดโพรพิโนอิกมากกว่าร้อยละ 90 ดังปฏิกิริยา



นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดฟอร์มิก และกรดโพพิโนอิก ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มิเลชัน หรือใน อุตสาหกรรมการผลิตอัลดีไฮด์ต่างๆ

2.3.2.3 แก๊สไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีอยู่มากมาย โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้น ต่างๆกันซึ่งขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และปริมาณแก๊สที่ต้องการผลิต ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ด้วยเช่น ราคาและความเหมาะสม วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอย่างง่ายคือ การแยกสารละลายที่มี น้ำเป็นตัวทำละลาย (Electrolysis of an aqueous solution) เช่นการแยกน้ำเกลือด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้โดยการผ่านไอน้ำไปบนเหล็กสปองจ์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 650 องศาเซลเซียสและความดันบรรยากาศ และในปัจจุบันพบว่าแก๊สไฮโดรเจนเป็น ผลิตผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนในอุตสาหกรรมที่มีการ ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นนั้นจะนิยมใช้กระบวนการรีฟอร์มมิง ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่างๆ^[18]

Method	Temp	Pressure	Catalyst	Remarks
1. Electrolysis of Brine	-	-	-	This method is employed where 100 – 500 tons/annum of gas are required
2. Reaction of steam with spongy iron	650 °C	atmospheric pressure	-	-
3. Reaction of natural gas with steam	900 °C	-	Ni catalyst promoted by magnesia or alumina	-

ได้มีการคาดการณ์ว่าในปี 2000 ทั่วโลกจะมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการผลิตแอมโมเนีย และอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปริมาณการใช้แก๊สไฮโดรเจนทั่วโลกในปี 2000^[19]

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

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนียนิยมใช้กระบวนการฮาเบอร์(Haber Process) โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และจากหลักของ เลอ ชาเตอลีเยร์ (Le Chatelier's Principal) พบว่าควรทำที่ความดันสูงและอุณหภูมิต่ำๆ และยังมีการใช้โปรโมเตอร์เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_4) ร่วมกับออกไซด์ของโลหะอื่นๆ ในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนที่สูงขึ้น

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

2.4 ทาร์ (Tar)^[1,2]

2.4.1 คำจำกัดความของทาร์ (Definition of Tar)

ทาร์ (Tar) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เราไม่ต้องการที่เกิดจากแกซีพีเคชันหรือเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของทาร์เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (High Viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก คำที่มีความหมายคล้ายๆกันได้แก่ Pyrolysis Oil, Pyrolytic Tar

2.4.2 สมบัติทางเคมีของทาร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าปริมาณทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้ และองค์ประกอบของทาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง จากการวิเคราะห์ทาร์ดิบ (Crude Tar) ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สแล้วคำนวณองค์ประกอบของทาร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะลดลง และสัดส่วนของ H/C จะตอมก็ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงการผันกลับของ Highly Oxygenate Pyrolyzate ไปเป็น Less Oxygenate Pyrolyzate และมีความคงที่ทางอุณหภูมิมากกว่า (Thermally Highly Aromatic Structure Stable) ซึ่งในที่สุดจะไม่มีออกซิเจน (Deoxygenate) และคงเหลือแต่โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก (Aromatic) ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของทาร์กับอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบทางเคมีของ Biomass Tars^[1]

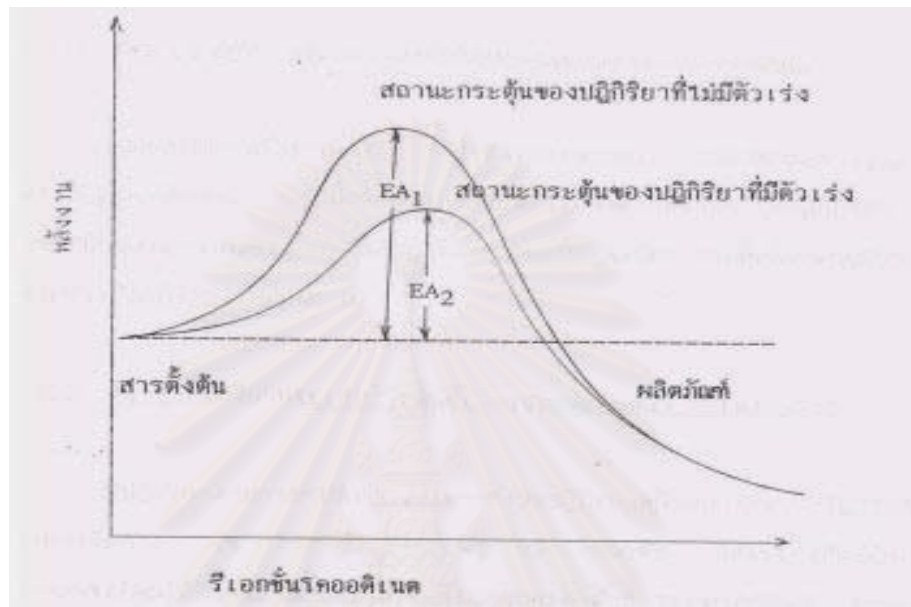
Conventional Flash Pyrolysis (400-500 °C)	Hi-Temperature Flash Pyrolysis (600-650 °C)	Conventional Steam Gasification (700-800 °C)	Hi-Temperature Steam Gasification (900-1,000 °C)
Acids	Benzenes	Naphthalenes	Naphthalene
Aldehydes	Phenols	Acenaphthalenes	Acenaphthalene
Ketones	Catechols	Fluorenes	Phenanthrene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

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) ^[14,20,21,22,23]

คำว่า “ ตัวเร่งปฏิกิริยา ” มาจากภาษากรีก 2 คำ ได้แก่คำว่า คตะ(cata) หมายถึง หัก (down) และไลไซน์ (lysein) หมายถึง แยกหรือแตก (split or break) ดังนั้น “ตัวเร่งปฏิกิริยา ” จึงหมายถึง ตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมีหน้าที่เร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในการเลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิด ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ส่งเสริมปฏิกิริยาอื่นที่อาจเกิดขึ้นข้างเคียง การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีมาใช้ ยังคงต้องอาศัยวิธีการทดลองเป็นหลัก

ความว่องไวและความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง ได้มีความพยายามที่จะอธิบายถึงการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมองภาพว่าโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนแปลงสภาพไปมีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (intermediate) หลายทฤษฎีได้พยายามอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ทฤษฎีภาวะทรานสิชัน (Transition - State - Theory)

อธิบายว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยลดพลังงานศักย์ขวางกั้น (Potential energy barrier) ซึ่งสารตั้งต้นต้องมีเพื่อเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ คือ ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาให้ต่ำลงนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพพลังงานศักย์ของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา^[20]

ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมดุลของปฏิกิริยาหรือเศษส่วนการเปลี่ยน ซึ่งถูกควบคุมโดยอุณหพลศาสตร์เพียงอย่างเดียว

2.5.1 ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นสารช่วยควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาเคมี แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

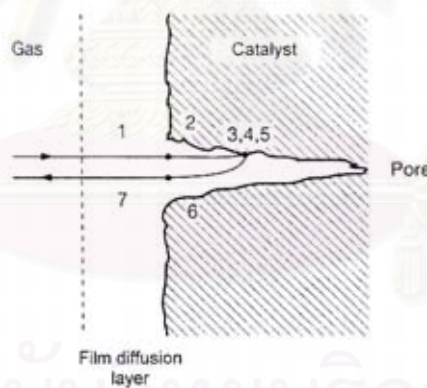
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นโดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปแก๊สหรือของเหลว ซึ่งนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม

การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีแบบเนื้อผสมนี้เนื่องจากความว่องไวและ

ความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา มีอิทธิพลโดยตรงจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของของแข็ง สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงควรมีพื้นผิวต่อปริมาตรมาก โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนวัสดุ (support) ที่มีรูพรุนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากที่ใช้ไปช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเสื่อมสภาพลง จะต้องมีกระบวนการปรับสภาพเดิมอีกเป็นระยะ ๆ เรียกว่า activation

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่เคลือบบนวัสดุที่มีความพรุนสูง (high porosity) จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ และสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

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



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนมาเกี่ยวข้อง^[21]

2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ (Supported metal catalysis)

ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พื้นที่ผิว ความมีรูพรุน ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว ความสามารถในการต้านการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยเหล่านี้ในปฏิกิริยาบางชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเฉพาะโลหะอย่างเดียวอาจไม่สามารถทำ

หน้าที่ได้ดี ถึงแม้ว่าจะทำได้แต่ก็ไม่คุ้มกับการลงทุน จึงมีการนำเอาสารชนิดหนึ่งมาใช้ เรียกว่า เสรสาร เหล่านี้ว่า ตัวรองรับ(Support)

ข้อดี หรือข้อได้เปรียบของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดที่มีตัวรองรับ ได้แก่

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

สำหรับข้อดีอื่นๆ นั้นขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของระบบตัวเร่งปฏิกิริยา อันได้แก่ ธรรมชาติของโลหะ และสารที่ใช้เป็นตัวรองรับ

สมบัติที่สำคัญของตัวรองรับมีดังนี้

ก. แข็งแรงวัสดุศาสตร์

- 1) เพื่อลดต้นทุนโดยการขยายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง

ข. แข็งกล

- 1) เพื่อให้ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength)
- 2) เพื่อปรับให้ความหนาแน่นของบัลคดีซีขึ้น (Optimize bulk density)
- 3) เพื่อเป็นแหล่งความร้อน
- 4) เพื่อเจือจางบริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากเกินไป

ค. แข็งลักษณะทางเรขาคณิต

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

ง. แข็งเคมี

- 1) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ทั้งนี้จะได้เพิ่มความว่องไว

จำเพาะในการเกิดปฏิกิริยา และลดกระบวนการซินเทอริง

- 2) เพื่อยอมรับความเป็นไปได้ทางเคมีในการเกิดปฏิกิริยาตามกลไกของ

การหมุน

จ. การเสื่อมสภาพ

- 1) เพื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีเสถียรภาพต่อการซินเทอริง

2) เพื่อลดความเป็นพิษลง

ตัวรองรับแต่ละชนิดที่นำมาใช้ต้องมีสมบัติตามข้างต้นมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของตัวรองรับ จึงแล้วแต่ผู้ที่จะนำไปใช้ว่าจะยอมรับตัวรองรับชนิดไหนในปฏิกิริยานั้นๆ ตัวรองรับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ อลูมินา ซิลิกา และถ่านกัมมันต์

สิ่งสำคัญที่สุดของตัวรองรับที่ต้องมีอยู่ คือ ความสามารถในการต้านทานภาวะการรวมตัว อันเนื่องมาจากความร้อน อุณหภูมิที่โครงผลึก (Lattice) เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ เรียกว่า อุณหภูมิฮัตติก (Huttig temperature) มีค่าประมาณ 0.3 ของจุดหลอมเหลวของโลหะ อุณหภูมิแทมแมน (Tamman's Temperature) เป็นอุณหภูมิที่ผลึกเริ่มเคลื่อน มีค่าประมาณ 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลวของโลหะ

ในตารางที่ 2.10 แสดงถึงจุดหลอมเหลวของตัวรองรับชนิดต่างๆ และยังแสดงว่าตัวรองรับเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นกรด เบส หรือกลาง ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกชนิดของตัวรองรับ ส่วนตารางที่ 2.11 แสดงถึงตัวรองรับชนิดต่างๆ โดยแบ่งตามพื้นที่ผิวของตัวรองรับ

ตารางที่ 2.11 การแบ่งตัวรองรับตามจุดหลอมเหลว และความเป็นกรด-เบส^[22]

Bases	Amphoters	Neutral	Acids
MgO (2800)	Al ₂ O ₃ (2015)	MgAl ₂ O ₄ (2135)	SiO ₂ (1713)
CaO (1975)		CaAl ₂ O ₄ (1600)	SiO ₂ .Al ₂ O ₃
ZnO (1975)	TiO ₂ (1825)	CaAl ₂ O ₄ (d 1535)	Zeolites
MnO (1600)	ThO ₂ (3050)		Al phosphates
	Ce ₂ O ₃ (1692)		
	CeO ₂ (2600)	MgSiO ₂ (1910)	Carbon
	Cr ₂ O ₃ (2435)	Ca ₂ SiO ₄ (2130)	
		CaTiO ₃ (1975)	
		CaZnO ₃ (2550)	
		MgSiO ₃ (d 1557)	
		Ca ₂ SiO ₃ (1540)	
		Carbon	

d = decompose

ตารางที่ 2.12 ตัวกรองรับชนิดต่างๆ ตามพื้นที่ผิว^[13]

<p>Low surface area < 1 m²g⁻¹</p>	<p>Essentially Non- porous Porous</p>	<p>ground glass Alundum (-Al₂O₃) Silicon carbide kieselguhr Pumice</p>
<p>High surface area > 1 m²g⁻¹</p>	<p>Essential Non-porous Porous</p>	<p>natural silica-alumina carbon black Titania Zinc oxide natural clays Synthesis silica-aluminas Alumina Magnesia Activated carbon Silica Abestos</p>

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. T. Chaudhari., et al^[24] ทำการศึกษากระบวนการ steam-gasification ของซาร์ที่ได้จากชีวมวลเพื่อทำการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 650 – 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำที่ 2.5 – 15 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของซาร์ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.5 – 2 ชั่วโมง พบว่าที่อัตราการป้อนไอน้ำต่ำ (ประมาณ 2.5 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของซาร์) และอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 700 องศาเซลเซียส) จะผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ (ประมาณ 1.33) ในทางตรงกันข้ามที่อัตราการป้อนไอน้ำสูง (ประมาณ 10 กรัม/ชั่วโมง/กรัมของซาร์) และอุณหภูมิสูง (ประมาณ 800 องศาเซลเซียส) จะให้แก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงมาก (ประมาณ 5 – 6) ซึ่งที่ภาวะนี้เหมาะทำให้เกิดการเปลี่ยนสูงถึง 90% ของซาร์ที่ได้จากชีวมวล ผลิตแก๊สได้ถึง 350 ลิตรต่อ 100 กรัมของซาร์ที่ได้จากชีวมวล

C. Franco., et al^[25] ทำการศึกษากระบวนการ steam-gasification ที่ความดันบรรยากาศ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิโดซ์เบต ทำการทดลองที่อุณหภูมิช่วง 700-900 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่ 0.4-0.85 น้ำหนัก/น้ำหนัก โดยทำการศึกษาชีวมวล 3 ชนิด คือ pinus pinaster (ไม้เนื้ออ่อน), ยูคาลิปตัส และไม้โอ๊ก(ไม้เนื้อแข็ง) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ แก๊สพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันคือประมาณ 830 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวลคือ 0.6-0.7 น้ำหนัก/น้ำหนัก ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนการป้อนไอน้ำนี้จะทำให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมาก และปริมาณไฮโดรคาร์บอน และปริมาณทาร์ต่ำ จากงานวิจัยนี้จะได้ว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อองค์ประกอบของแก๊สคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น ขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงอย่างช้าๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 730-850 องศาเซลเซียส แล้วคงที่ และอัตราการป้อนไอน้ำก็มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส อัตราส่วนของไอน้ำต่อชีวมวลที่เหมาะสมคือ 0.6-0.7 น้ำหนัก/น้ำหนัก เพราะจะให้พลังงานสูงและมีการเปลี่ยนคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมาก

Di Blasi C., Signorelli G., Di Russo C., Rea G.^[26] ทำการศึกษาหาลักษณะของการสลายตัวทางความร้อน (pyrolysis) ของกากทางการเกษตร เช่นเปลือกมะกอก กากองุ่น ฟางข้าว และเศษไม้ โดยทำการทดลองใน เบตคองตัว (Packed bed) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4×10^{-2} เมตร ภายในบรรจุชีวมวล (biomass) ได้รับความร้อนจากเตาเผา กระบวนการนี้จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส ของเหลว ซาร์ และ องค์ประกอบของแก๊สซึ่งถูกผลิตออกมาจากไม้กระบวนการสลายตัวทาง

ความร้อนของกากทางการเกษตรมีปริมาณผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นของแข็งสูงและ ของเหลวต่ำ ปริมาณแก๊สรวมที่ได้มีความแตกต่างกันน้อย. อัตราส่วนของแก๊สหลักโดยเปรียบเทียบกับค่าพลังงานกระตุ้น อัตราส่วนนี้ของเศษไม้ เปลือกข้าว และฟางข้าวสาลี ไม่แตกต่างกันมาก แต่เปลือกมะกอกและกากองุ่นจะมีค่าน้อย. อัตราการกำจัดสารระเหยแตกต่างกันมาก พบว่าสำหรับฟางข้าวสาลีเร็วที่สุด ส่วนกากองุ่นจะช้าที่สุด

อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย^[1] ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีววมวลจากกระบวนการแกซีฟิเคชัน โดยใช้เครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่งโดยใช้แกลบ มีตัวแปรที่พิจารณา คือ อุณหภูมิของกระบวนการแกซีฟิเคชัน และอัตราการไหลอากาศ ในการทดลองแกลบจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่อง เพื่อเผาไหม้แกลบให้เกิดเป็นแก๊สร้อน และผ่านคอลัมน์เข้าทางด้านล่าง ปฏิกริยาแกซีฟิเคชันเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650-900 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และค่าอัตราการไหลของอากาศ 0.12 ถึง 0.32 ลูกบาศก์เมตร/นาที องค์ประกอบของแก๊สชีววมวลจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีววมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิของการทดลอง 850 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของอากาศ 0.2 ลูกบาศก์เมตร/นาที อัตราการป้อนแกลบ 100-260 กรัม/นาที แก๊สชีววมวลที่ได้มีปริมาณร้อยละ โดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 8.46 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละโดยปริมาตร 5.12 แก๊สไฮโดรเจนร้อยละโดยปริมาตร 7.78 และแก๊สมีเทนร้อยละโดยปริมาตร 0.83 ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวล 671.79 กิโลแคลอรี/ลูกบาศก์เมตร

Di Blasi C., Signorelli G., Portorico G.^[27] ทำการศึกษากากการแกซีฟิเคชันแบบไหลสวนทางกันในเครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed-bed เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการแกซีฟิเคชันของชีววมวลต่างๆ เช่น เปลือกไม้ เปลือกผลไม้ เปลือกมะกอก และ กากองุ่น เป็นต้น องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊ส และ ทำการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ ค่าความร้อนของแก๊สจะได้ค่ามากที่สุดซึ่งเป็นฟังก์ชันกับตัวแปรในการทำงานถ้าทำการลดอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง ภาวะการแกซีฟิเคชันที่ดีที่สุดของไม้ และ กากทางการเกษตร ให้ค่าความร้อนของแก๊สอยู่ในช่วง 5- 5.5 เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตร กับ CO 28-30% , CO₂ 5-7% , H₂ 6-8% , CH₄ 1-2% และ c-2-ไฮโดรคาร์บอนเล็กน้อย

Mohammad A., Kimio K., Keiichi T.^[28] ทำการศึกษหาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการแกซีฟิเคชันเซลลูโลส ทำการทดลองในฟลูอิดไธด์เบด ใช้อากาศเป็นตัวพา ทำการหาประสิทธิภาพของตัวรองรับชนิดต่างๆ และทำการเปรียบเทียบ เนื่องจากเชื้อเพลิง เช่น

synthetic diesel และ ไดเมทิลอีเทอร์ สามารถผลิตจากแก๊สสังเคราะห์. ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ผลิตได้จากกระบวนการแกซิฟิเคชันของชีวมวล กระบวนการผลิตแก๊สจาก ชีวมวลมีข้อดีในมุมมองการปกป้องธรรมชาติ เชื้อเพลิงสะอาดจาก แก๊สสังเคราะห์ จะลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ จึงมีความสนใจที่จะศึกษาเพื่อค้นหากระบวนการที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับแกซิฟิเคชันของชีวมวล อย่างไรก็ตาม กระบวนการก็มีปัญหาการเกิดทาร์ ถ้าทำที่ภาวะอุณหภูมิสูง กระบวนการควรดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ แต่ การลดอุณหภูมิเป็นการลดลงของผลได้ของแก๊สสังเคราะห์ ปัญหานี้สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการจึงจะสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ

Michael L., Jack B., John P., William A.^[29] ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (pyrolysis) ของไม้ โดยขั้นแรกใช้ packed bed เล็ก ๆ ลึก 2 เซนติเมตรและ ขั้นที่สองเป็นขั้นการแตกตัวของแก๊สจากการสลายตัวทางความร้อนของ tar ที่ความเข้มข้นต่ำ อุณหภูมิ 773-1,073 K ผลิตภัณฑ์จากขั้นแรกเป็น ทาร์ ชาร์ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ กับ มีเทนเล็กน้อย ในขั้นที่สอง คาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นจากการแตกตัวกลายเป็นไอของทาร์ แต่ทาร์ส่วนมากจะถูกเปลี่ยนกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเกิดมีเทน และ เอทิลีน เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของทาร์ที่ถูกเปลี่ยน ส่วนโค้กเกิดน้อยมาก

Chang J.,^[30] ทำการศึกษากระบวนการ air-steam gasification ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธด์เบด โดยศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และขนาดของชีวมวลต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ผลได้ของแก๊ส ค่าความร้อน และประสิทธิภาพการเปลี่ยนของคาร์บอน พบว่าในช่วงภาวะที่ทำการทดลอง เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.43 และ 2.57 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของชีวมวล ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 6741-9143 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร และจากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูงจะได้แก๊สไฮโดรเจนมากแต่ที่อุณหภูมิสูงนี้จะได้แก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำ ไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการจะช่วยเพิ่มคุณภาพของแก๊สผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าป้อนไอน้ำมากเกินไปที่อุณหภูมิการแกซิฟิเคชันต่ำๆ จะทำให้คุณภาพแก๊สลดลงเช่นกัน การใช้ชีวมวลที่มีขนาดเล็กจะได้แก๊สที่ค่าความร้อน และผลได้สูงขึ้น

บทที่ 3

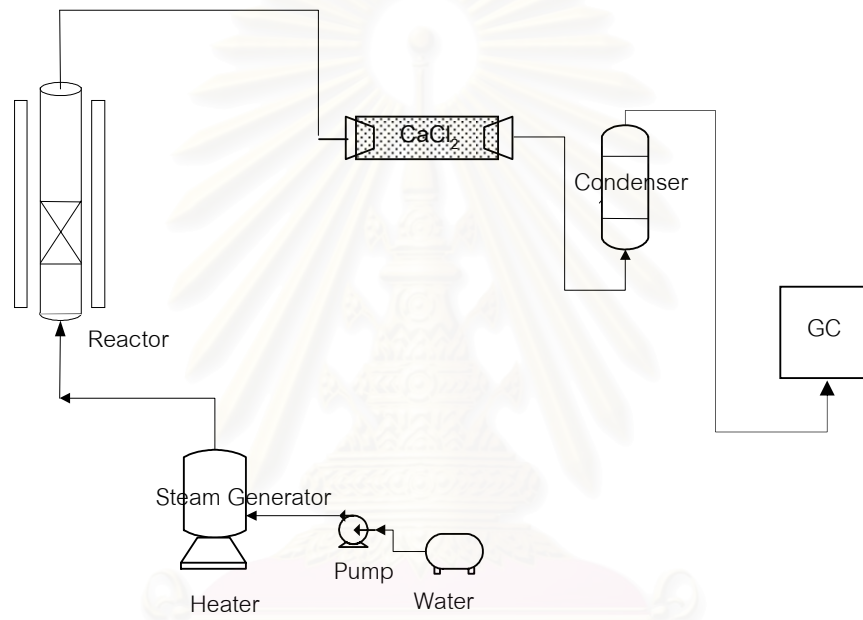
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการแกซีฟิเคชัน จากชีวมวล คือไม้ยูคาลิปตัส เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยอุปกรณ์การทดลองนั้นจะประกอบด้วย

1. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน แบบเบดนิ่ง
2. ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน ประกอบไปด้วย
 - เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง (Tubular Furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น GSC 12/110/300
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K) และชุดวัดให้ความร้อน
 - เครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงผล (Recorder) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น 4173
3. เครื่องผลิตไอน้ำ (Steam Generator)
4. เครื่องสูบน้ำ (Peristaltic Pump) ยี่ห้อ Master Flex รุ่น 77200-60
5. เครื่องแยกไอน้ำออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้
6. เครื่องควบแน่นของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ (condenser)
7. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph ; GC) ยี่ห้อ Thermofinnigan รุ่น KA000023

แผนผังกระบวนการแกซีฟิเคชันโดยรวมแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการแกซีพีเคชั่นโดยรวม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบเบดนิ่ง

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



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สสังเคราะห์

3.1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน
ชุดควบคุมอุณหภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเบดในเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ โดยจะประกอบไปด้วย เตาเผาแบบท่อกลวง และเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิชนิด K

3.1.2.1 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง

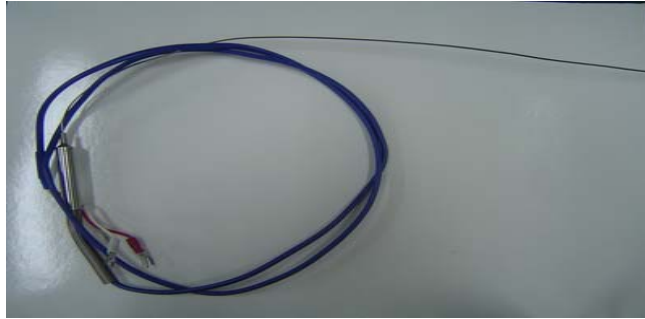
เตาเผาที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยเตาเผาให้ความร้อนจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ให้ได้ตามภาวะที่ต้องการ โดยจะแปรค่าจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนให้แก่เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.3 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง

3.1.2.2 เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นรุ่น K แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 1300 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการทำงานของความต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างขั้วทั้งสอง เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิมากก็จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ส่งมาจากเทอร์โมคัปเปิลจะเข้าเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะขยายสัญญาณประมาณ 40 เท่า สัญญาณที่ถูกขยายจะถูกส่งเข้าไมโครคอมพิวเตอร์จากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะประมวลผลของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้เป็นค่าของอุณหภูมิเบด ซึ่งจะปรากฏให้เห็นบนเครื่องบันทึกผล (Recorder)



รูปที่ 3.4 เทอร์โมคัปเปิล

3.1.2.3 เครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงผล



รูปที่ 3.5 เครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล

3.1.3 เครื่องผลิตไอน้ำ

3.1.3.1 เครื่องผลิตไอน้ำที่ใช้เป็นรูปทรงกระบอกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งควบคุมการให้ความร้อนโดยใช้เครื่องให้ความร้อน (Heater) โดยภายนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนแบบใยแก้ว (Asbestos) รอบเครื่องผลิตไอน้ำเพื่อลดการสูญเสียความร้อน และทำให้เปลี่ยนสถานะของน้ำที่อุณหภูมิห้องให้กลายเป็นไอน้ำได้ทันที แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องผลิตไอน้ำ

3.1.3.2 เครื่องสูบน้ำ

ในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในการทดลองจะนำน้ำกลั่นมาป้อนเข้าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องสูบน้ำ (Peristaltic Pump) ดังรูปที่ 3.7 ทางด้านล่างของเครื่องผลิตไอน้ำด้วยอัตราคงที่ น้ำกลั่นจะกลายเป็นไอน้ำภายในเครื่องผลิตไอน้ำทันที จากนั้นไอน้ำจะออกสู่ด้านบนของเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งเป็นช่องเปิดที่ต่อกับท่อทองแดงซึ่งรอบท่อจะมีการพันขดลวดให้ความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของไอน้ำไม่ให้กลั่นตัว จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ต่อไป



รูปที่ 3.7 เครื่องสูบน้ำ

3.1.4 เครื่องแยกไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้

เครื่องแยกไอน้ำจากผลิตภัณฑ์แก๊สมีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่บรรจุแอนไฮดรัสแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 Anhydrous) เพื่อดูดซับความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส



รูปที่ 3.8 เครื่องแยกไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์แก๊ส

3.1.5 เครื่องควบแน่นของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้



รูปที่ 3.9 เครื่องควบแน่นของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์แก๊ส

3.1.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph ; GC)^[31]

Gas Chromatography (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary Phase และมีแก๊สพา (Carrier Gas) เป็น Mobile Phase เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่

เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็น Chromatogram โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ยี่ห้อ Thermofinnigan รุ่น KA000023 ดังรูปที่ 3.8 โดยแก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

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



รูปที่ 3.10 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี
รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญ มีดังนี้

ก) แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอที่ Injector Port ให้เข้าสู่คอลัมน์ โดยจะต้องมีการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่เสมอ แก๊สพาโดยทั่วไปมีคุณสมบัติดังนี้ เป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีความบริสุทธิ์ และง่ายต่อการซื้อหาและมีความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปแก๊สที่นิยมใช้ คือ ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน และ ไฮโดรเจน แต่ในการทดลองนี้จะใช้ แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา

ข) คอลัมน์

วัสดุที่ใช้ทำคอลัมน์มีหลายชนิด ในการวิเคราะห์นี้ใช้คอลัมน์บรรจุแบบ พอราแพกเอ็น (Porapak N) เป็นตัวดูดซับสารต่างๆไว้ระหว่างการวิเคราะห์

ค) ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์ คือ เครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะสามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และอาจจะมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์ นั้นควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ดีเทคเตอร์ 2 ชนิดคือ เทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID)

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

ดีเทคเตอร์แบบ FID เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจหาสารประกอบอินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกจุดให้ติดไฟด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (Heater) ที่อยู่บริเวณใกล้ๆกับ Flame Jet ส่วนอากาศที่ผ่านเข้าไบนั้นจะทำหน้าที่ 2 อย่างคือ ช่วยเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจน และช่วยพาแก๊สที่เผาไหม้ออกไป แก๊สพาและสารตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์จะเข้าสู่เปลวไฟ จะทำให้สารเหล่านั้นเกิดไอออนไนเซชันได้เป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยัง Flame jet ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรด สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังอิเล็กโทรมิเตอร์ และบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกได้เป็นโครมาโทแกรม ในการทดลองนี้จะใช้ FID ในการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ในรูปของแก๊สมีเทน

ง) เมทาไนเซอร์ (Methanizer)

เป็นเครื่องสำหรับการเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปแก๊สมีเทนด้วยแก๊สไฮโดรเจน เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์แก๊สทั้งสองในระดับปริมาณ ppm ใน FID Detector ได้ โดยภายในจะเกิดปฏิกิริยาเมทาไนเซชัน มีโคบอลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

1. แก๊สไฮโดรเจน 99.999 % จากบริษัทเอนไวโรเมต
2. แก๊สไนโตรเจน 99.99 % จากบริษัทเอนไวโรเมต
3. น้ำกลั่น
4. แอนไฮดรัสแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 Anhydrous) จาก Fluka
5. ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ จาก รศ.ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์
6. ไม้ยูคาลิปตัส

3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

3.1 อัตราการป้อนไอน้ำ (Steam Flow Rate) เพื่อศึกษาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน โดยในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนอัตราการป้อนของไอน้ำโดยการปรับที่เครื่องสูบน้ำ (Pump) ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ค่าอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15, 1.05, 2.10 กรัม/นาที่/กรัมของชีวมวล

3.2 อุณหภูมิภายในเตาเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน และศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิที่ 550, 650, 700, 800 องศาเซลเซียส

3.3 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1% ของชีวมวล คือ ปริมาณ 0.15 กรัม

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล^[32,33,34]

3.4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) นำไม้ยูคาลิปตัสมาวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายการทดลองและมาตรฐานวิธีวิเคราะห์

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

หมายเหตุ : รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงอยู่ในภาคผนวก ก
ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่องมือ CHNS/O Analyser (Perkin Elmer PE2400 SeriesII)

3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.2.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน อุณหภูมิที่ได้ทำการศึกษา คือ ที่อุณหภูมิ 550, 650, 700 และ 800 องศาเซลเซียส

3.4.2.2 ศึกษาหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของไอน้ำต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน ทำการศึกษาอัตราการไหลไอน้ำที่ 0.15, 1.05, 2.10 กรัม/นาที/กรัมของชีวมวล

3.4.2.3 เปรียบเทียบผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน โดยใช้โดโรไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ปริมาณโดโรไมต์ 0.15 กรัม

3.4.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สด้วยแก๊สผสมมาตรฐาน

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

3.4.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.4.1 ตั้งอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ณ ความดันบรรยากาศ

3.4.4.2 ตั้งอัตราการไหลไอน้ำที่ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

3.4.4.3 บ้อนไอน้ำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นจึงทำการบ้อนไม้ยูคาลิปตัสเข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์เป็นปริมาณ 15 กรัม

3.4.4.4 ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส จนกระทั่งปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่

3.4.4.5 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 650, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.4.4.6 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการบ้อนไอน้ำต่อชีวมวลเป็น 0.15, 1.05, 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

3.4.4.7 ทำการทดลองซ้ำโดยทำการบ้อนตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ด้วยปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันจากชีวมวล คือไม้ยูคาลิปตัส เพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether, DME) ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน แก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 โดยประมาณ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ปริมาณ 1% ของชีวมวล

4.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส โดยการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุตามวิธี ASTM E871, D1102, E872 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
ความชื้น	10.68
เถ้า	10.08
สารระเหยได้	62.52
คาร์บอนคงตัว	16.72
รวมทั้งหมด	100

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
C	38.70
H	5.40
N	0.23
O	34.91
ความชื้น	10.68
เถ้า	10.08
รวมทั้งหมด	100

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของไม้ยูคาลิปตัสพบค่าคาร์บอนคงตัว 16.72% และสารระเหยได้ 62.52% และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีคาร์บอน 38.70% ไฮโดรเจน และออกซิเจน 5.40% และ 34.91% ตามลำดับ แสดงว่าศักยภาพของไม้ยูคาลิปตัสสามารถให้ผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ที่มีไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นองค์ประกอบ

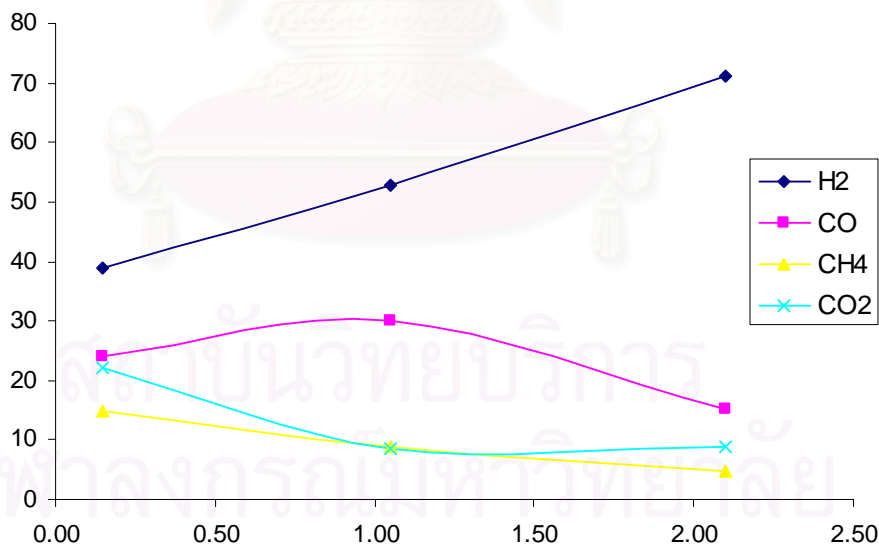
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลของไอน้ำทำการทดลองที่อุณหภูมิ 550, 650, 700 และ 800 องศาเซลเซียส โดยทำการป้อนไอน้ำด้วยคาลิปดัสเข้าเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณ 15 กรัม

ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สคือ แก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 4.2 4.3 และรูปที่ 4.4 โดยทำการทดลองที่อัตราการป้อนไอน้ำต่างๆ คือ 0.15 1.05 และ 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล พบแนวโน้มอิทธิพลของไอน้ำที่เหมือนกันในทุกอุณหภูมิของการทดลอง โดยที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล เป็น 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล พบว่า องค์ประกอบของไฮโดรเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 38.79% เป็น 76.13% ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าที่ลดลงจาก 24.06% เป็น 15.13%, 14.88% เป็น 4.84% และ 22.25% เป็น 2.91% ตามลำดับ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

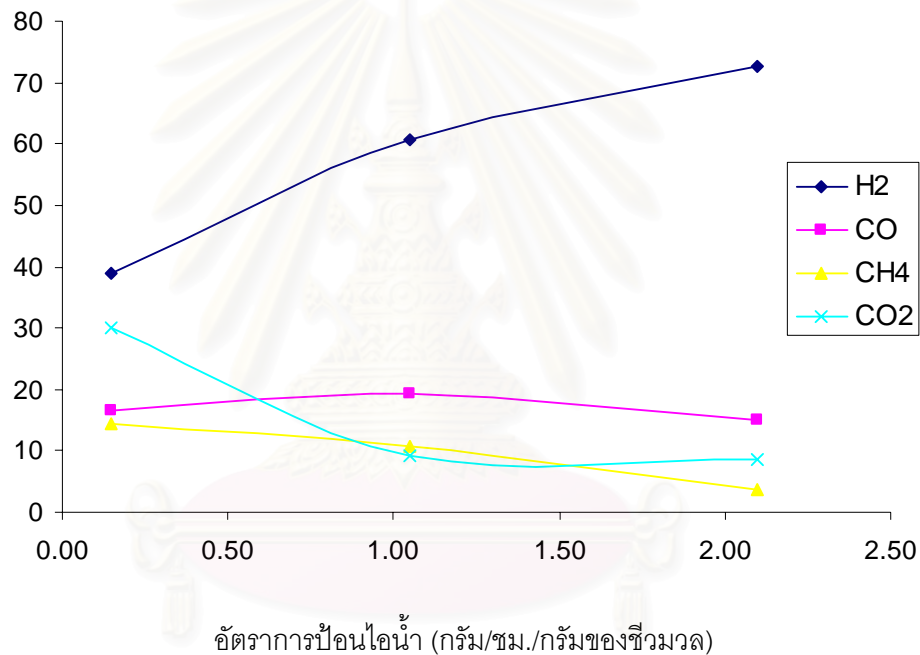


อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)

รูปที่ 4.1 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไอน้ำด้วยคาลิปดัส 15 กรัม)

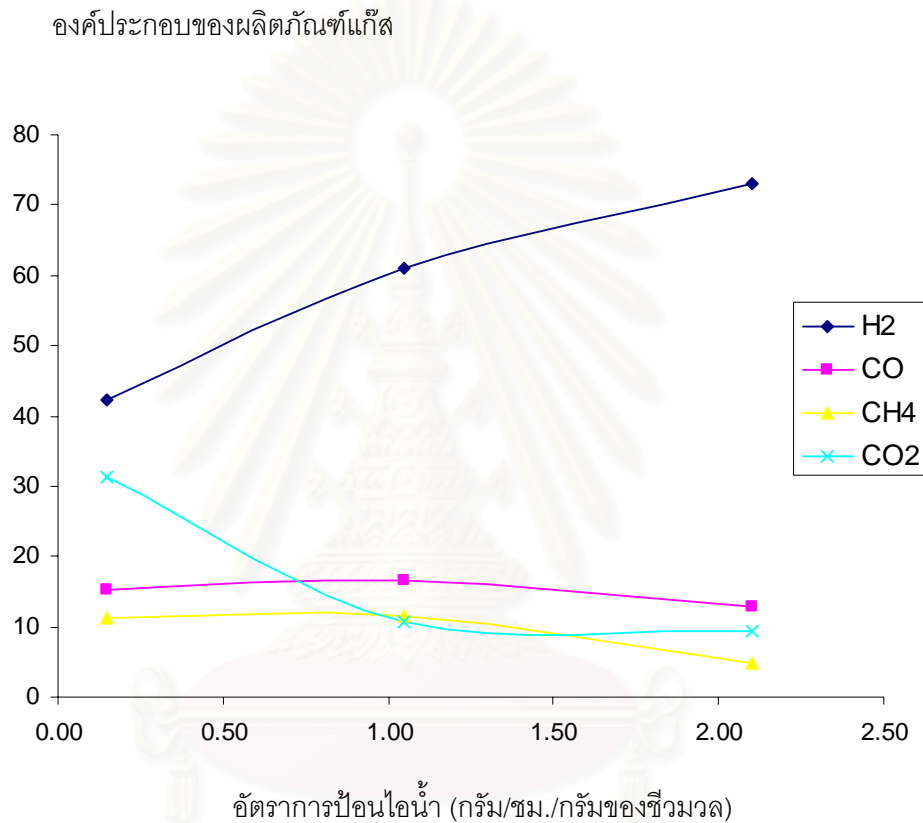
การทดลองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ผลการทดลองเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนไอน้ำจาก 0.15 เป็น 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล พบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 39.04% เป็น 72.72% ส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 16.67% เป็น 14.96%, 14.36% เป็น 3.65% และ 29.93% เป็น 8.66% ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส



รูปที่ 4.2 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

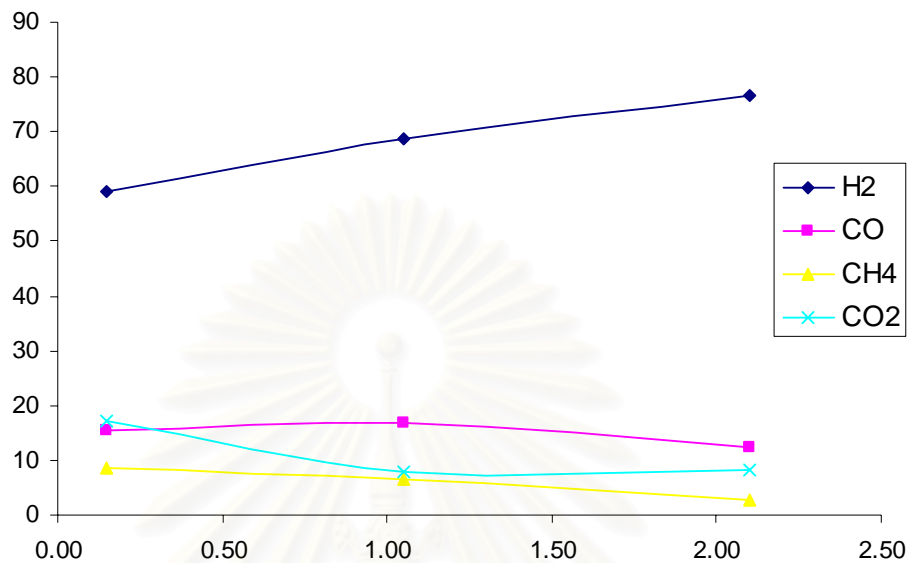
การทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 42.28% เป็น 73.02% ส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 15.31% เป็น 12.73%, 11.12% เป็น 4.91% และ 31.30% เป็น 9.34%



รูปที่ 4.3 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 จะมีแนวโน้มที่เหมือนกับการทดลองที่อุณหภูมิ 550 650 และ 700 องศาเซลเซียส คือไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 58.99% เป็น 76.70% ส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 15.31% เป็น 12.47%, 8.66% เป็น 2.73%, 17.03% เป็น 8.10%

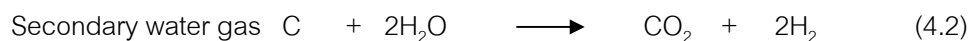
องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส



อัตราไอน้ำ (กรัม/ซม./กรัมของชีวมวล)

รูปที่ 4.4 ผลของอัตราไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่า เมื่ออัตราไอน้ำต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 2.10 กรัม/ซม./กรัมของชีวมวล ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ไอน้ำเป็นแหล่งใหญ่ที่ผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการ steam-gasification ดังนั้นการเพิ่มอัตราไอน้ำทำให้การผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Primary water gas ดังสมการที่ (4.1), Secondary water gas ดังสมการที่ (4.2), Water-gas shift ดังสมการที่ (4.3), Steam reforming ดังสมการที่ (4.4) ซึ่งมีปฏิกิริยาเป็นดังนี้คือ





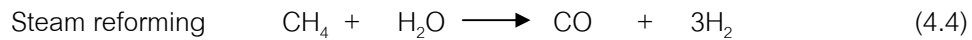
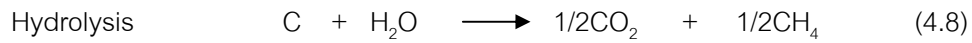
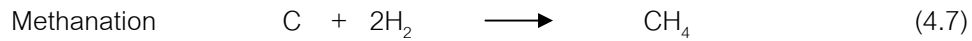
ทุกปฏิกิริยาที่กล่าวถึงจะมีการเกิดไฮโดรเจนเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่ออัตราการป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น

ร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Primary water gas, Steam reforming และ Partial oxidation ดังสมการที่ (4.1), (4.4), (4.5) โดยเกิดในช่วงอัตราการป้อนไอน้ำต่ำ เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลสูงขึ้นร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเนื่องจากที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลสูงๆ จะเกิดปฏิกิริยา Secondary water gas ดังสมการที่ (4.2) และ ปฏิกิริยา Water-gas shift ดังสมการที่ (4.3) ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Secondary water gas, Water-gas shift และ Oxidation ดังสมการที่ (4.2), (4.3), (4.6) ซึ่งปฏิกิริยา Secondary water gas และ Water-gas shift จะเกิดได้ดีที่อัตราการป้อนไอน้ำสูงขึ้น



ส่วนร้อยละของแก๊สมีเทนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Methanation และ Hydrolysis ดังสมการที่ (4.7), (4.8) แต่เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลสูงขึ้น จะเกิดปฏิกิริยา Steam reforming ดังสมการที่ (4.4) ทำให้ร้อยละของแก๊สมีเทนที่ได้มีค่าลดลง



ดังนั้นอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลจะมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น แก๊สมีเทนจะมีปริมาณลดลง ส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วจะมีแนวโน้มลดลง แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จะมีปริมาณลดลงในช่วงแรกแล้วจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงถึงอิทธิพลของปริมาณไอน้ำในตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. T. Chaudhari^[24]

ตารางที่ 4.3 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 – 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล			
	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
550	↑	↓	↓	↓
650	↑	↓	↓	↓
700	↑	↓	↓	↓
800	↑	↓	↓	↓

+ คือ %เพิ่มขึ้น

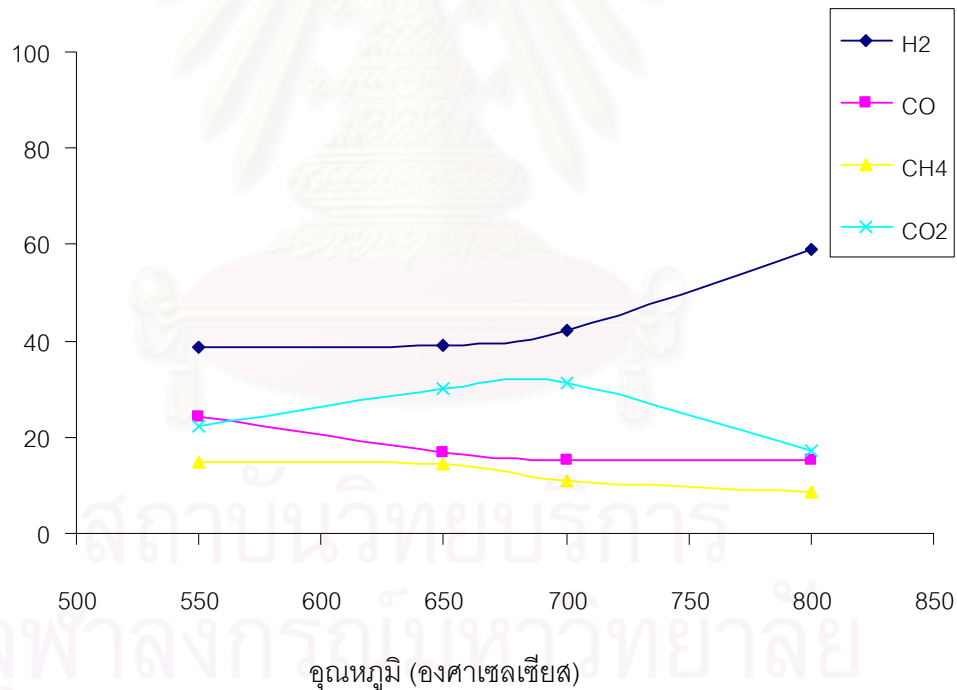
- คือ %ลดลง

4.3 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

การศึกษาผลของอุณหภูมิเริ่มต้นด้วยการที่ป้อนไ้ม้ยูคาลิปตัสเข้าเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณ 15 กรัม แล้วป้อนไอน้ำด้วยอัตราการป้อน 0.15 1.05 และ 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล โดยทำการวัดปริมาณไอน้ำจากอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งจะวัดได้จาก peristaltic pump

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 4.6 และรูปที่ 4.7 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 550 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอุณหภูมิการทดลอง โดยการทดลองที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล ผลการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 550 เป็น 800 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 38.79% เป็น 58.99% ส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 24.06% เป็น 15.31%, 14.89% เป็น 8.66% และ 22.26% เป็น 17.03% แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

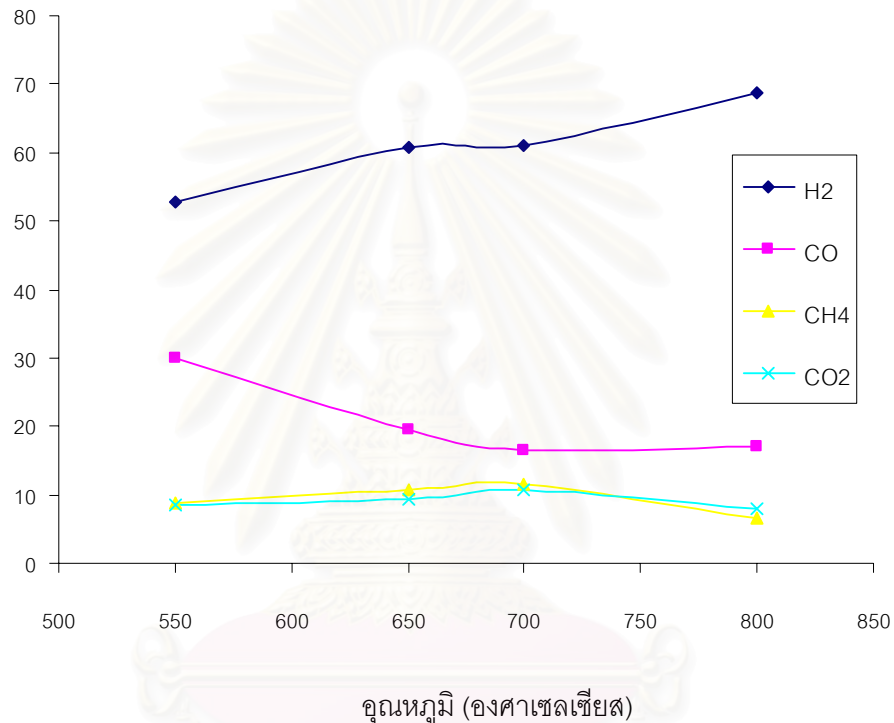


รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไ้ม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

การทดลองที่อัตราการป้อนไอน้ำ 1.05 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล นั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 550 เป็น 800 องศาเซลเซียส พบว่า องค์ประกอบของไฮโดรเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก

52.69% เป็น 68.68% ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ จะมีค่าที่ลดลงจาก 35.26% เป็น 18.01%, 10.52% เป็น 6.93% และ 9.94% เป็น 8.32% ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

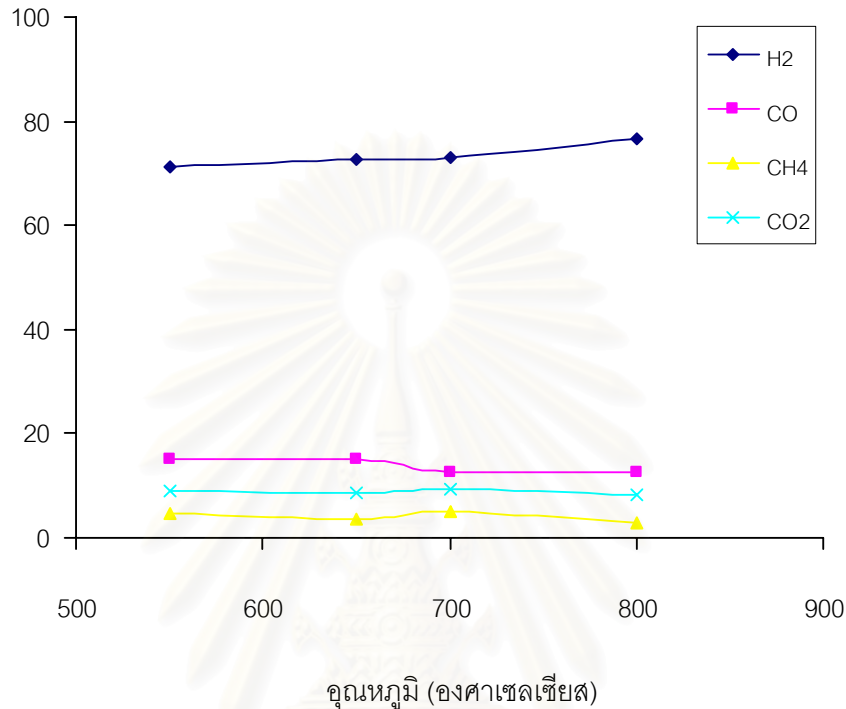
องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนไอน้ำ 1.05 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

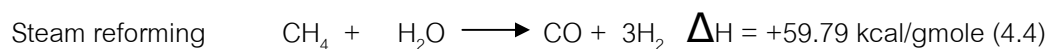
ที่อัตราการป้อนไอน้ำ 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 จะมีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล และ 1.05 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล คือไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 71.13% เป็น 76.70% ส่วนปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 15.13% เป็น 12.47%, 4.84% เป็น 2.73%, 8.91% เป็น 8.10% ตามลำดับ

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

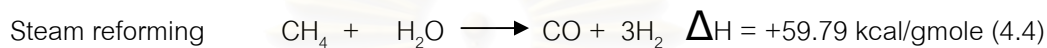
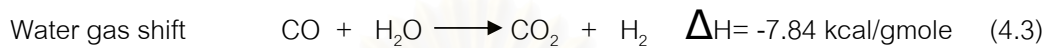


รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการป้อนไอน้ำ 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

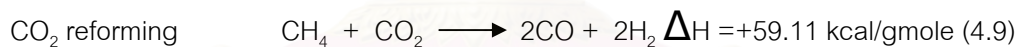
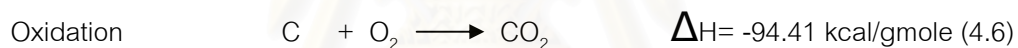
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 550 เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Primary water gas ดังสมการที่ (4.1), Secondary water gas ดังสมการที่ (4.2), Steam reforming ดังสมการที่ (4.3) เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งมีปฏิกิริยาเป็นดังนี้ คือ



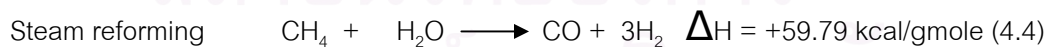
ร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงในช่วงอุณหภูมิต่ำเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Water gas shift ดังสมการที่ (4.3) แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเกือบคงที่ เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยา Secondary ของมีเทนดังสมการที่ (4.4)



ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการ Oxidation ดังสมการที่ (4.6) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะลดลงเนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไปเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ดังสมการที่ (4.9)



ร้อยละของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยา Steam reforming ดังสมการที่ (4.4) และปฏิกิริยา CO₂ reforming ดังสมการที่ (4.5) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน จะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูง



ดังนั้นอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สมีเทนจะมีปริมาณลดลง ตารางที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์แก๊ส ทุกการทดลองของอัตราการป้อนไอน้ำที่ทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. T. Chaudhari^[24]

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)	อุณหภูมิ 550 – 800 องศาเซลเซียส			
	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.15	↑	0	↓	0
1.05	↑	0	↓	0
2.10	↑	0	↓	0

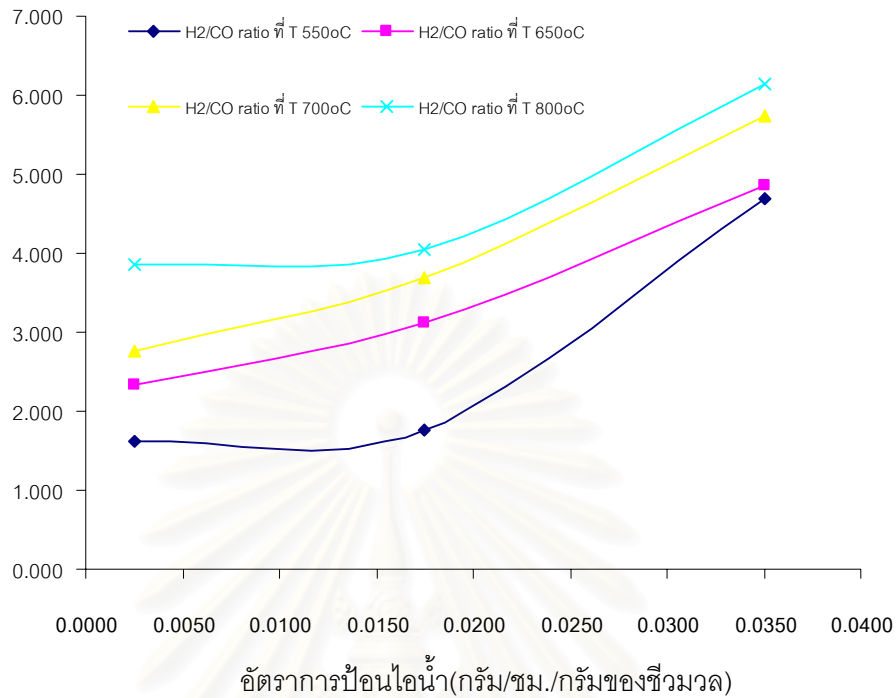
↑ คือ %เพิ่มขึ้น

↓ คือ %ลดลง

0 คือ ไม่มีนัยสำคัญ

4.4 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำ และอุณหภูมิต่ออัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

การศึกษาผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลและผลของอุณหภูมิ ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 โดยทำการทดลองที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่ 0.15, 1.05, 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล และที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 550 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 1.05 และ 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.612 เป็น 1.76 และ 4.702 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.341 เป็น 3.119 และ 4.861 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.761 เป็น 3.691 และ 5.734 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.852 เป็น 4.052 และ 6.148 ตามลำดับ

อัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO 

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ H_2/CO ที่อัตราการป้อนไอน้ำต่างๆ และ อุณหภูมิต่างๆ (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่กล่าวถึงแล้วว่า เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Primary water gas ดังสมการที่ (4.1), Secondary water gas ดังสมการที่ (4.2), Water-gas shift ดังสมการที่ (4.3), Steam reforming ดังสมการที่ (4.4) และจากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 550 เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Primary water gas ดังสมการที่ (4.1), Secondary water gas ดังสมการที่ (4.2), Steam reforming ดังสมการที่ (4.3) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน

ทุกปฏิกิริยาที่กล่าวถึงจะมีการเกิดไฮโดรเจนขึ้น ดังนั้นเมื่ออัตราการป้อนไอน้ำเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นมากกว่าการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นผลให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ทุกอัตราการป้อนไอน้ำ และทุกอุณหภูมิมิมีแนวโน้มที่ได้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)	อุณหภูมิ 550 – 800 องศาเซลเซียส
	H ₂ /CO
0.15	↑
1.05	↑
2.10	↑

ตารางที่ 4.6 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลต่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 – 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล
	H ₂ /CO
550	↑
650	↑
700	↑
800	↑

↑ คือ %เพิ่มขึ้น

↓ คือ %ลดลง

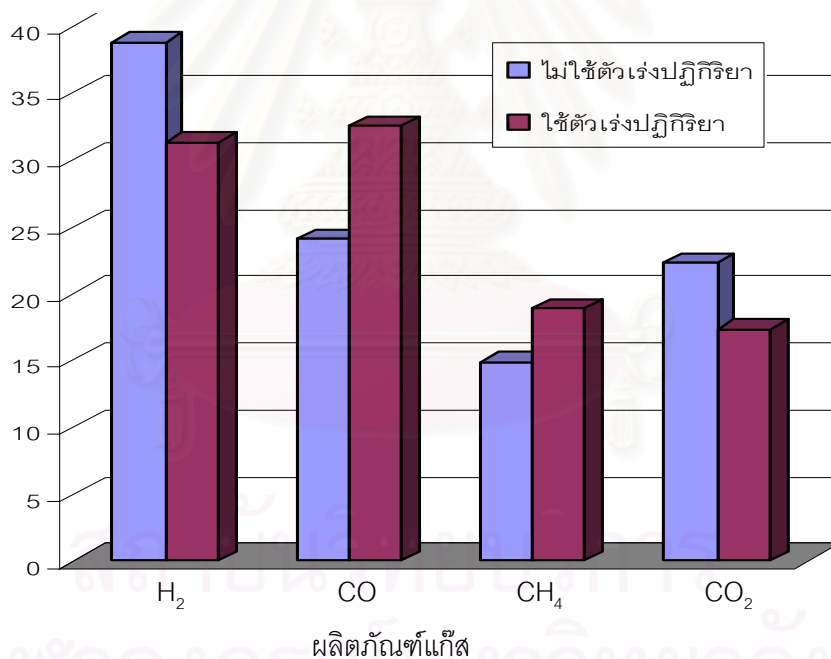
ดังนั้นที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลต่ำ (0.15 g/hr/g of biomass) และอุณหภูมิต่ำ (550 °C) เหมาะในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ (มีค่าประมาณ 1.612) และที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลสูง (2.10 g/hr/g of biomass) และอุณหภูมิสูง (800 °C) เหมาะในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง (มีค่าประมาณ 1.612) ผลที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. T. Chaudhari^[24]

4.5 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

การทดลองเริ่มด้วยตั้งอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 550 องศาเซลเซียส โดยทำการป้อนไม้ยูคาลิปตัสปริมาณ 15 กรัมที่ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์เป็นปริมาณ 0.15 กรัมเข้าเครื่องปฏิกรณ์ แล้วป้อนไอน้ำโดยทำการวัดปริมาณไอน้ำจากอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งวัดได้จาก peristaltic pump

การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สคือ แก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยทำการทดลองที่อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล และอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่าแก๊สไฮโดรเจนที่ได้มีค่าลดลงจาก 38.79% เป็น 31.33% แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 24.06% เป็น 32.54% แก๊สมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14.88% เป็น 18.83% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงจาก 22.25% เป็น 17.31% เป็นผลทำให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงจาก 1.612 เป็น 0.963

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส



รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล (ปริมาณการป้อนไม้ยูคาลิปตัส 15 กรัม)

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ในการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจน ที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากตัวเร่ง

ปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ไปแตกตัวน้ำมันที่ได้ออกจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำการแตกตัวน้ำมันที่ร่วมกับไฮโดรเจนแล้วเกิดเป็นมีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้ร้อยละของแก๊สมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเป็นผลให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง

ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคืออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีค่า 0.963

4.6 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยกับงานวิจัยจากต่างประเทศ

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

	สารป้อน	gasifying medium	ภาวะการทดลอง	เครื่องปฏิกรณ์	H ₂ /CO
S.T.Chaudhari ^[24]	Biomass	Steam	- T 650 °C steam flow rate 2.5 g/h/g of biomass	Fixed bed	1.33
	Derived char		- T 800 °C steam flow rate 10 g/h/g of biomass		6

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อสรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยเรื่องแก๊สสังเคราะห์จากแก๊สพีเคชันของยูคาลิปตัส สามารถที่จะสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล ต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

5.1.1.1 เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.1.1.2 เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วจะมีแนวโน้มลดลง

5.1.1.3 เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงในช่วงแรกแล้วจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.1.1.4 เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละของแก๊สมีเทนมีแนวโน้มลดลง

5.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

5.1.2.1 เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.1.2.2 เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ร้อยละของแก๊สมีเทนมีแนวโน้มลดลง

5.1.3 ผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลและอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

5.1.3.1 เมื่ออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.3.2 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.3.3 ที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลต่ำ (0.15 g/h/g of eucalyptus) และอุณหภูมิต่ำ (550 °C) เหมาะในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ (มีค่าประมาณ 1.612)

5.1.3.4 ที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลสูง (2.10 g/h/g of eucalyptus) และอุณหภูมิสูง (800 °C) เหมาะในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง(มีค่าประมาณ 1.612)

5.1.4 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

5.1.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์มีผลทำให้ ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลง

5.1.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์มีผลทำให้ ร้อยละของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์มีผลทำให้ ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง

5.1.4.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์มีผลทำให้ ร้อยละของแก๊สมีเทนมีค่าลดลง

5.1.4.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์มีผลทำให้ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าใกล้เคียง 1 คือมีค่าเป็น 0.963

5.1.5 ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคืออัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และมีตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีค่า 0.963

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรจะมีการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น NiMgO เพื่อเปรียบเทียบกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดแก๊สฟิเคชัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. อภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบในเบตนึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
2. พรทิพย์ แก้ววรรณพิชัย. แบบจำลองของการแก๊สฟิวเคชันจากถ่านไม้ในฟลูอิดไธด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
3. Beagle E.C., Rice-husk conversion to energy. Food and Agriculture organization of the United nations Rome,1978
4. Kirk R. E., Producer gas. Encyclopedia of Chemical Technology.John Wiley & Sons. Inc. 8(1956);765-769
5. จิระศักดิ์ แสงฟุ้ง. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ในฟลูอิดไธด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
6. Levenspiel O., Chemical Reaction Engineering. 2nd. Ed. Wiley & Sons. Inc.1978;360-368
7. Hulber J. and Janka J. C., Fuels Synthetic. Encyclopedia of Technology. 11(1966);410-425
8. Ronald F. Probst and R. Edwin Hicks. Synthetic Fuels. USA:McGraw-Hill,1982.
9. Breag G.R. and Chittenden A.E., Producer gas; Its Potential and Application in Developing Country. Publication of Tropical Product Institute, 1979:3-15
10. Elliot M. A., Chemistry of Coal Utilization. Wiley-Interscience. 1603-1614, 1640-1642, 1711-1712,1763
11. Sitthipong N., Fluidized Bed Gasification of Agricultural Wastes for Rural Communities in Thailand. A Research on Biomass Gasification in Thailand Submitted to the National Energy Administration. Ministry of Science. Technology and Energy. Bangkok.1984;229-257
12. <http://www.forest.go.th>
13. ลาวัลย์ เขียวถาวร. รีฟอร์มมิงของก๊าซ มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลอลูมินาในฟลูอิดไธด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
14. ชัยวัฒน์ ธานีรัตน์. จลนพลศาสตร์ของการรีฟอร์ม มีเทน ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อลูมินา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

15. วสิน กาจนภ. การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัวดูดซับทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
16. Larminie James and Dicks Andrew. Fuel Cell System Explained. UK: JOHN WILEY&SONS. LTD, 2000.
17. Volkel H.K.Chemical Industrial, USA:McGraw-Hill,1979.
18. Shukla S.D. and Pandey G.N. A Text Book of Chemical Technology (Inorganic). New Delhi:Vikas Publishing House PUT Ltd, 1977
19. Seifrita W. Introduction to Hydrogen Energy. Caracus: IAHE fuel, 1975.
20. Satterfield C. N. Heterogeneous Catalysis in Practice. USA: McGraw-Hill, 1980
21. Jens Hagen. Industrial Catalyst. 1st edition. New York:Wiley-VCH,2000.
22. Trim D.L. Design of Industrial Catalyst. Amsterdam: Elsevier Science, 1980
23. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534
24. Chaudhari S. T., Bej S. K., Bakhshi N. N., Dalai A. K., Steam gasification of biomass-derived char for the production of carbon monoxide-rich synthesis gas. Energy and Fuels, 15(2001):736-742
25. Franco C., Pinto F., Gulyurtlu I., Cabrita I., The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. Fuel. 82(2003):835-842
26. Di Blasi C., Signorelli G., Di Russo C., Rea G., Product Distribution from Pyrolysis of Wood and Agricultural Residues. Journal of Ind. Eng. Chem. Res. 38(1999):2216-2224.
27. Colomba Di Blasi, Gabriella Signorelli, and Giuse Portoricco, Countercurrent fixed-bed gasification of biomass at laboratory. Journal of Ind. Eng. Chem. 38(1999):2571-2581
28. Mohammad A., Kimio K., Keiichi T., Catalytic Gasification of Biomass To Produce Synthesis Gas at Low Temperature. Journal of Fuel Chemistry Division Preprints, 46(2001):405-407.
29. Michael L., Jack B., John P., William A., Product Yields and Kinetics from the Vapor Phase Cracking of Wood Pyrolysis Tars. Journal of AIChE. 35(1989);120-128

30. Lv P.M., Xiong Z.H., Chang J., Wu C.Z., Chen Y., Zhu J.X., An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed. Bioresource Technology,2004
31. แม้น อมรสิทธิ์และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ชวนพิมพ์,2534.
32. ASTM Standards, E871. Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuel. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
33. ASTM Standards, E872. Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuel. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
34. ASTM Standards, D1102. Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuel. American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1986.
35. Rapagna S., Jand N., Foscolo P.U., Catalytic gasification of biomass to produce hydrogen rich gas. Journal of Hydrogen Energy,23(1998): 551-557
36. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
37. กัญจนา บุญเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ :จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เชื้อเพลิงไม้

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

1.1 วิเคราะห์ความชื้น (Moisture analysis) : ASTM E871

อุปกรณ์ที่ใช้

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

วิธีการทดสอบ

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

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ	W_c	=	น้ำหนักภาชนะ, กรัม
	W_i	=	น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม
	W_f	=	น้ำหนักสุดท้าย, กรัม

1.2 วิเคราะห์สารระเหย (Volatile matter) : ASTM E872

อุปกรณ์ที่ใช้

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

วิธีการทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนัก crucible พร้อมฝาปิด โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนัก (W_c)
2. ใส่ตัวอย่างทดสอบประมาณ 1 กรัม ลงใน crucible จากนั้นปิดฝา แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยผลต่างไม่เกิน 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น (W_i)
3. วาง crucible ใน wire support จากนั้นสอดเข้าไปใน furnace chamber ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ที่ 950 ± 20 องศาเซลเซียส วางกลางเตาซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการให้ความร้อน 7 นาที
4. นำ crucible ซึ่งยังปิดฝายู่ออกจาก furnace นำ crucible ไปวางในเดสสิเคเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก crucible ซึ่งยังมีตัวอย่างบรรจุอยู่ โดยผลต่างไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักสุดท้าย (W_f)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ W_c = น้ำหนักภาชนะ, กรัม

W_i = น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม

W_f = น้ำหนักสุดท้าย, กรัม

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

เมื่อ A = weight loss%

B = Moisture%

สถาบันวิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 วิเคราะห์เถ้า (Ash) : ตามมาตรฐาน ASTM D1102

อุปกรณ์ที่ใช้

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

วิธีการทดสอบ

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

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

$$\text{เมื่อ } W_1 = \text{น้ำหนักเถ้า, กรัม}$$

$$W_2 = \text{น้ำหนัก oven-dry sample, กรัม}$$

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

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

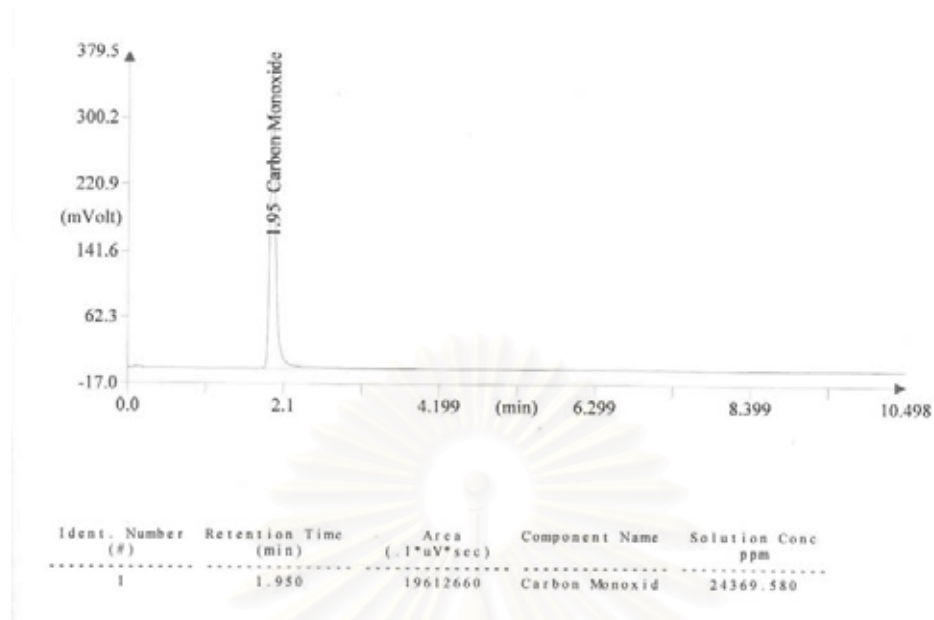
ภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค1
ตาราง ข1 แสดงภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส

แก๊สพา	ไนโตรเจน 99.99%
อุณหภูมิอินเจคเตอร์	70 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	40 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (TCD) (FID)	150 องศาเซลเซียส 250 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเมทาไนเซอร์	350 องศาเซลเซียส
คอลัมน์	พอรapak เอ็น
อัตราการไหลของแก๊สพา	7 มิลลิลิตรต่อนาที

โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟที่สามารถที่จะคำนวณหาปริมาณสารว่ามีความเข้มข้นเท่าไร ได้โดยซึ่ง
ผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค1 และ ค2



รูปที่ ข1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD



รูปที่ ข2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟโดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติไม้ยูคาลิปตัส
1.1 วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (%moisture)

ตารางที่ ค1 วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น

ตัวอย่าง	น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม (W_i)	น้ำหนักสุดท้าย, กรัม (W_f)	น้ำหนักภาชนะ, กรัม (W_c)	ร้อยละความชื้น : M
1	274.830	269.360	224.830	10.94
2	284.650	279.44	234.65	10.42
			ค่าเฉลี่ย	10.68%

- 1.2 วิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย (% Volatile Matter)

ตารางที่ ค2 วิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย

ตัวอย่าง	น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม (W_i)	น้ำหนักสุดท้าย, กรัม (W_f)	น้ำหนักภาชนะ, กรัม (W_c)	weight loss%
1	21.7878	21.0553	20.7872	73.206
2	21.8184	21.0860	20.8178	73.196
			ค่าเฉลี่ย	73.201

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละสารระเหย} &= 73.201 - 10.68 \\ &= 62.521 \end{aligned}$$

1.3 วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (% Ash)

ตารางที่ ค3 วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า

ตัวอย่าง	น้ำหนักเริ่มต้น, กรัม (W_i)	น้ำหนักสุดท้าย, กรัม (W_f)	น้ำหนักภาชนะ, กรัม (W_c)	Ash%
1	26.689	25.600	25.477	10.15
2	25.058	23.800	23.660	10.01
			ค่าเฉลี่ย	10.08

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} &= 100 - 10.68 - 10.08 - 62.52 \\ &= 16.72 \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค4 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)	องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.15	38.794	24.064	14.886	22.256
1.05	52.692	29.937	8.932	8.438
2.10	71.126	15.127	4.838	8.909

ตาราง ค5 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)	องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.15	39.037	16.673	14.362	29.928
1.05	60.619	19.438	10.694	9.249
2.10	72.720	14.961	3.655	8.665

ตาราง ค6 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)	องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.15	42.279	15.310	11.107	31.304
1.05	61.038	16.536	11.593	10.833
2.10	73.017	12.734	4.912	9.337

ตาราง ค7 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)	องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0.15	58.989	15.314	8.663	17.033
1.05	68.679	16.949	6.522	7.850
2.10	76.700	12.476	2.727	8.097

ตาราง ค8 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของอัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล และอุณหภูมิต่ออัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 550 650 700 และ800 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 1.05 2.10 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

อัตราการป้อนไอน้ำ (กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล)	H ₂ /CO (550 °C)	H ₂ /CO (650 °C)	H ₂ /CO (700 °C)	H ₂ /CO (800 °C)
0.15	1.612	2.341	2.761	3.852
1.05	1.760	3.119	3.691	4.052
2.10	4.702	4.861	5.734	6.148

ตาราง ค9 ข้อมูลการทดลองและผลการทดลองสำหรับผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำที่ 0.15 กรัม/ชม./กรัมของชีวมวล

องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์	ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
%H ₂	38.794	31.327
%CO	24.064	32.536
%CH ₄	14.886	18.829
%CO ₂	22.256	17.308
H ₂ /CO	1.612	0.963

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุพัตรา ชีวธนาคุปต์ เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน พุทธศักราช 2522 จบการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรมในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิคในปี 2544 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย