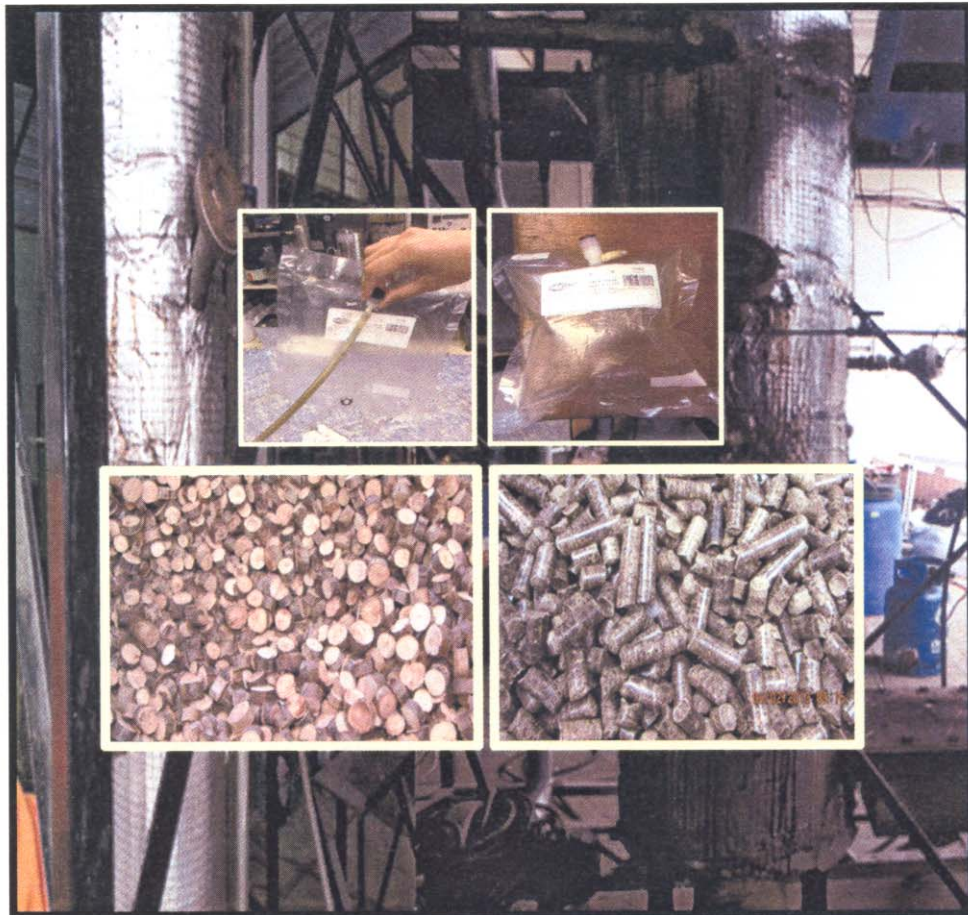




โครงการวิจัยที่ ภ.56-10/ย.2/รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงจากชีวมวลโดย  
กระบวนการ partially steam hydrogasification  
เพื่อการเผาเซรามิกที่อุณหภูมิสูง



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย  
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยเลขที่ ภ.56-10

การเพิ่มประสิทธิภาพแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลในการเผาเซรามิกอุณหภูมิสูง

โครงการย่อยที่ 2

การผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงจากชีวมวล

โดยกระบวนการ partially steam hydrogasification

เพื่อการเผาเซรามิกที่อุณหภูมิสูง

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงจากชีวมวล

โดยกระบวนการ partially steam hydrogasification

เพื่อการเผาเซรามิกที่อุณหภูมิสูง

โดย

บริสุทธิ์ จันทรวงศ์ไพศาล	ศรัทธา วัฒนธรรม
พิชัย วงศ์หาญ	ประวิทย์ เทพนุ้ย
พงษ์ศักดิ์ หงษ์เจริญศรี	นภาพร ชาญเจริญลาภ
บุญนิสา เสืองาม	โชติกา คงสมบูรณ์

บรรณาธิการ

ศิระ ศิลานนท์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

ศิริสุข ศิริสุข

ว.ว., ปทุมธานี 2559

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย  
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นางลักขมิ ปลั่งแสงมาศ)

ผู้ว่าการ

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญรูป	ค
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ	18
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์	31
4. สรุปผลการวิจัย	39
5. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	40
6. เอกสารอ้างอิง	41

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในเชิงพาณิชย์	7
ตารางที่ 2. ปฏิกริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	12
ตารางที่ 3. แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	32
ตารางที่ 4. ความเข้มข้นของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับ อะลูมินาออกไซด์ 1 โมลาร์	32
ตารางที่ 5. ความเข้มข้นของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับ อะลูมินาออกไซด์ 2 โมลาร์	32
ตารางที่ 6. ความเข้มข้นของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับ อะลูมินาออกไซด์ 3 โมลาร์	32
ตารางที่ 7. แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	33
ตารางที่ 8. ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 10 กรัม	34
ตารางที่ 9. ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 15 กรัม	34
ตารางที่ 10. ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 20 กรัม	34
ตารางที่ 11. ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 25 กรัม	34
ตารางที่ 12. อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา 750 องศาเซลเซียส แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	36
ตารางที่ 13. อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา 750 องศาเซลเซียส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	36
ตารางที่ 14. อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา 850 องศาเซลเซียส แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	36
ตารางที่ 15. อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา 850 องศาเซลเซียส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	36
ตารางที่ 16. อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา 950 องศาเซลเซียส แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	37
ตารางที่ 17. อุณหภูมิในการทำปฏิกริยา 950 องศาเซลเซียส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกริยา	37

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	8
รูปที่ 2. ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดและการปรับปรุงคุณภาพโพรวินเซอร์	11
รูปที่ 3. กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันภายในเตาปฏิกรณ์	13
รูปที่ 4. ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร	18
รูปที่ 5. การสับย่อยชีวมวล	19
รูปที่ 6. การลดความชื้นในชีวมวลด้วยความร้อนจากแสงแดด	19
รูปที่ 7. การขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิงและรูปร่างของเม็ดเชื้อเพลิง	20
รูปที่ 8. เม็ด Activated alumina	21
รูปที่ 9. สารละลายนิเกิลไนเทรตความเข้มข้น 1 โมลาร์	21
รูปที่ 10. แชนด์อะลูมินาในสารละลายนิเกิลไนเทรตที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	22
รูปที่ 11. ลักษณะตัวรองรับอะลูมินาที่จุ่มเคลือบนิเกิลไนเทรตหลังการอบ	22
รูปที่ 12. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาหลังการเผา	23
รูปที่ 13. สารประกอบที่ละลายด้วยน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร	24
รูปที่ 14. การตกตะกอนด้วยร้อยละ 2.5 NH <sub>3</sub>	24
รูปที่ 15. สารละลายเกิดการแยกชั้นของตะกอน	25
รูปที่ 16. กรองตะกอนด้วยชุดเครื่องกรอง	25
รูปที่ 17. ตัวเร่งปฏิกิริยา	26
รูปที่ 18. ชุดการทดลองรีฟอร์มมิง	27
รูปที่ 19. แก๊สที่ใช้ แก๊สไนโตรเจน, แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน	27
รูปที่ 20. ไอน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสตรีมรีฟอร์มมิง	28
รูปที่ 21. การเก็บแก๊สตัวอย่างวิเคราะห์	28
รูปที่ 22. ตัวอย่างชีวมวล	29
รูปที่ 23. จุดไฟเผาไหม้ และแหล่งกำเนิดไอน้ำ	30
รูปที่ 24. ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อความเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทน	33
รูปที่ 25. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อความเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทน	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 26. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อความเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทน	37

# SYNTHESIS WOOD GAS BY PARTIALLY STEAM HYDROGASIFICATION TO INCREASE TEMPERATURE IN CERAMIC INDUSTRY

Borisut Chantrawongphisal, Satta Watanatham, Phichai Wongharn,  
Pravit Thapnui, Phongsak Hongcharoensri, Napaporn Chancharoenlap,  
Boonnisa Suanggam and Chotika Kongsomboon

## ABSTRACT

TISTR has developed the biomass gasification process with partial steam hydrogasification to increase the temperature in the ceramic kiln by using oxygen from steam instead of oxygen from the air as this can decrease the amount of nitrogen while increasing the amount of hydrogen and methane in the synthetic gas. The oxygen and hydrogen from steam reacts with oxygenate from biomass in order to generate hydrogen and methane. The optimized reaction as a result of reforming in the laboratory will be used to develop the partial steam biomass gasification process on semi-pilot scale. The composition of the gas from the partial steam biomass gasification process is composed of carbon monoxide (CO) which makes up 16 percent, hydrogen (H<sub>2</sub>) which constituted 30 percent, methane (CH<sub>4</sub>) constituting 12 percent, nitrogen (N<sub>2</sub>) making up 33 percent, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) accounting for 9 percent. The high heating value is 9.76 Mega joules per cubic meter. Such synthesis gas can be used to generate heat which is more cost effective than natural gas.



# การผลิตเชื้อเพลิงคุณภาพสูงจากชีวมวล โดยกระบวนการ partially steam hydrogasification เพื่อการเผาเซรามิกที่อุณหภูมิสูง

ปริญญ์ จันทรวงศ์ไพศาล<sup>1</sup>, ศรัทธา วัฒนธรรม<sup>1</sup>, พิชัย วงศ์หาญ<sup>1</sup>, ประวิทย์ เทพนุ้ย<sup>1</sup>,  
พงษ์ศักดิ์ หงษ์เจริญศรี<sup>1</sup>, นภพร ชาญเจริญลาภ<sup>1</sup>, บุญณิสสา เสืองาม และโชติกา คงสมบูรณ์<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

ว. ได้พัฒนากระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลด้วยกระบวนการ partially steam hydrogasification เพื่อเพิ่มอุณหภูมิในเตาเผาเซรามิก ด้วยการใช้ออกซิเจนไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยากับสารต้นตั้ง หรือเชื้อเพลิงชีวมวลแทนการใช้ออกซิเจนจากอากาศ ทำให้ลดปริมาณแก๊สไนโตรเจนและเพิ่มปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยออกซิเจนและไฮโดรเจนจากไอน้ำทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในชีวมวลเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทน การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยไอน้ำในระดับห้องปฏิบัติการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำไปใช้เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลด้วยไอน้ำในระดับกึ่งนำทาง ผลการใช้ไอน้ำแทนอากาศในการผลิตแก๊สสังเคราะห์พบว่า องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์มีคุณภาพสูงขึ้น ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ร้อยละ 16, ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ร้อยละ 30, มีเทน (CH<sub>4</sub>) ร้อยละ 12, ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ร้อยละ 33 และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ร้อยละ 9 และมีค่าความร้อนประมาณ 9.76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร แก๊สสังเคราะห์ดังกล่าวสามารถนำไปผลิตความร้อนใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อทดแทนแก๊สหุงต้มที่มีราคาเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง.

---

<sup>1</sup> ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

# 1. บทนำ

## 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันชีวมวลได้ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อให้เกิดการพึ่งพาตนเองและสร้างความเข้มแข็งและมั่นคงทางด้านพลังงานทดแทน เพื่อหลีกเลี่ยงการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนในประเทศ และความเกี่ยวเนื่องกับปัญหาภาวะโลกร้อน เนื่องจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจก โดยมีมุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ (Low carbon society) ประกอบกับประเทศไทยมีผลผลิตทางการเกษตรและของเหลือทิ้ง จากภาคอุตสาหกรรมจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำชีวมวลเหลือทิ้งเหล่านี้มาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงาน. ดังนั้น ชีวมวลจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ เพื่อผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยผ่านกระบวนการเคมีความร้อน (thermochemical) แก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เพื่อทดแทนการใช้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม (LPG).

ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะมีศักยภาพในการปลูกพืชทดแทนเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน แต่ปัจจุบันระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียงร้อยละ 40-50 เท่านั้น เนื่องจากพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียจากระบบในรูปน้ำมันดินและการควบคุมการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงยังไม่ประสบความสำเร็จ ดังนั้น กระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบดั้งเดิมไปเป็นกระบวนการ partially steam hydrogasification เพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สมีเทนสูงขึ้น ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต.

ดังนั้น ว. จึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการใช้ประโยชน์จากชีวมวล โดยการเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงเพื่อจะสามารถตอบสนองความต้องการแก๊สอุตสาหกรรมหลายประเภท และหลีกเลี่ยงปัญหาการขาดแคลนพลังงาน เช่น อาหาร, สิ่งทอ และเซรามิก รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ชีวมวลในกระบวนการเผาไหม้.

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อสังเคราะห์แก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณไฮโดรเจนและมีเทนสูง.
- เพื่อสร้างต้นแบบเทคโนโลยีการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยกระบวนการ partially steam hydrogasification.
- เพื่อเพิ่มศักยภาพของการผลิตพลังงานจากชีวมวล.

## ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้จะดำเนินงานภายในฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน (ฟทพ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมุ่งเน้นการสังเคราะห์แก๊สเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการ gasification จากชีวมวลนั้น ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวยังคงมีประสิทธิภาพไม่สูง สาเหตุเนื่องมาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบดั้งเดิมใช้ออกซิเจนจากอากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้แก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีปริมาณแก๊สไนโตรเจนสูงเป็นสาเหตุให้ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ต่ำ จึงทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยกระบวนการ gasification แบบเดิมต่ำ ดังนั้น วว. โดย ฟทพ. ได้พัฒนากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลจากแบบดั้งเดิมเป็นแบบ partially steam hydrogasification ด้วยการใช้ออกซิเจนจากไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนในโพรวิติวเซอร์แก๊ส หรือในแก๊สสังเคราะห์ให้สูงขึ้น และจะทำให้แก๊สสังเคราะห์ดังกล่าวมีค่าความร้อนสูงขึ้นตาม.

## 1.2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการ gasification/pyrolysis ชีวมวล ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ), คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) และแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) เล็กน้อย ซึ่งแก๊สสังเคราะห์เหล่านี้เป็นแก๊สที่ติดไฟได้และปล่อยความร้อนออกมา ส่วนแก๊สไม่ติดไฟ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) พร้อมทั้งถ่านที่เหลือจากการเกิดแก๊ส, เถ้า และน้ำมันดิน เป็นต้น น้ำมันดินที่ปนเปื้อนมากับก๊าซเชื้อเพลิงจะเกิดการกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำ กลายเป็นของเหลวข้นเหนียวและหนืด และก่อปัญหาการอุดตันระบบท่อส่งก๊าซเชื้อเพลิง และเกาะติดตามผิวแผ่นกรองฝุ่น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงโดยใช้ชีวมวลลดลง นักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจศึกษาเทคโนโลยีการลดและการเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน (Binlin *et al.* 2008) ได้ทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ชนิด เพื่อกำจัดน้ำมันดินออกจากกระบวนการ gasification ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย NiMo,  $Al_2O_3$ , CaO,  $SiO_2$  และ CuMn โดยใช้ 1-Methynaphthalene เป็นตัวอย่างของน้ำมันดิน ผลการทดลองพบว่า NiMo เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวสูงสุดและสามารถกำจัดน้ำมันดินออกจากระบบได้มากที่สุด ที่อุณหภูมิ 250-650 องศาเซลเซียส (Stefano 2003) ได้สำรวจความคิดเห็นในส่วนของคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการกำหนดมาตรฐานเชื้อเพลิง โดยมุ่งเน้นที่บทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยา การเลือกตัวอย่างที่สำคัญ แม้ว่าขั้นสุดท้ายจะไม่ถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องรวมกับเครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสมและทำงานภายใต้สภาพการ

ดำเนินงาน ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและผลผลิต (Yield) น้ำมันดิน (Daravell *et al.* 2005) ได้ รายงาน ปริมาณ Yield ของน้ำมันดินจะค่อยๆ ลดลงจาก 15 ถึง 0.54 กรัม/นิวตันลูกบาศก์เมตร เมื่อ กระบวนการ biomass gasification มีอุณหภูมิในช่วง 970 ถึง 1090 เคลวิน ผลการศึกษาของ Narv Paez แสดงอุณหภูมิของกระบวนการ biomass gasification อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตปริมาณน้ำมันดินค่อยๆ ลดลงจาก 19 และ 5 กรัม/นิวตันลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (Han *et al.* 2008) ได้รวบรวมคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันดินและเสนอวิธีการกำจัด น้ำมันดินโดยคำนึงถึงข้อดีและข้อด้อยของแต่ละวิธีที่แตกต่างกัน เช่น (1) วิธีการทางกล (Mechanism methods) สามารถกำจัดน้ำมันดินและอนุภาคเล็กๆ ได้ ประมาณร้อยละ 40-99. อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ใช้ในการกำจัดน้ำมันดินเท่านั้น การกำจัดน้ำมันดินทำให้สูญเสียพลังงานเชื้อเพลิง ในรูปของน้ำมันดิน (2) Self-modification methods เป็นวิธีการลดปริมาณ น้ำมันดินได้น้อย แต่วิธีการนี้สามารถเปลี่ยนน้ำมันดินเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (3) Thermal cracking ใช้ได้ผลดี เมื่อ อุณหภูมิของกระบวนการสูงถึงจุดที่จะทำให้ น้ำมันดินสลายตัว ผลลัพธ์ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น (4) Catalytic cracking มีความเหมาะสมกับการสลายน้ำมันดินที่อุณหภูมิต่ำ แต่ข้อด้อยสารเร่งปฏิกิริยา ประเภท Ni-based และ Alkali metal จะลดความว่องไว หรือเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผิวของ สารเร่งปฏิกิริยามีการเกาะของคาร์บอนหรือ สารประกอบซัลเฟอร์ (deposited carbon และ H<sub>2</sub>S) (5) Plasma technology สามารถกำจัดได้ NO<sub>x</sub> และ SO<sub>2</sub> และยังคงองค์ประกอบของน้ำมันดิน ในระหว่างกระบวนการ biomass gasification (Zhang *et al.* 2007) นำน้ำมันดินที่ได้จาก กระบวนการ gasification ของซังข้าวโพด ไปสกัดที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (B-oil I) และ 220 องศาเซลเซียส (B-oil II) ผลผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวและคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงเปรียบเทียบ น้ำมันดีเซล ค่าการนำความร้อน ของ B-oil I และ B-oil II เท่ากับร้อยละ 85.6 และร้อยละ 87 ของค่าการนำความร้อนน้ำมันดีเซล ผลการทดสอบการใช้งานกับเครื่องยนต์ แสดง B-oil I และ B-oil II สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล (Ponzio *et al.* 2006) ได้ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันดินจาก กระบวนการ High temperature air/steam gasification ของเศษไม้และพลาสติก เป็นต้น ผลการ ทดลองแสดงการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการย่อยสลายสารประกอบแอมโรแมติก เช่น Phenolic compound paraffines olefins และ Alkylated aromatics และปริมาณการ สลายของน้ำมันดินในกระบวนการ Cracking จะเป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิที่ใช้.

## 1.2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่มีธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลักและมีอินทรีย์สารเล็กน้อยเป็นองค์ประกอบ ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1. รูปแบบถ่าน (Char) ใช้ประโยชน์ในครัวเรือน และเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้เป็นความร้อนและใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า.
2. รูปแบบน้ำมัน เนื่องจากธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบ จำพวกออกซิเจนเนต (oxygenate) และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นพลังงานในรูปแบบเชื้อเพลิงเหลว.
3. รูปแบบแก๊สเชื้อเพลิง เนื่องจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) เพื่อเป็นพลังงานในรูปแบบแก๊สเชื้อเพลิง.

### ส่วนประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลและสสารทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักสำคัญ คือ

1. ความชื้น (moisture) ความชื้นหมายถึง ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบในชีวมวล ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตจึงต้องการน้ำเป็นหลัก ชีวมวลที่ใช้ในด้านพลังงานมาจากพืชและการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ จึงมีความชื้นสูงแตกต่างกันไปตามสภาพ.
2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible substance) ส่วนที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สารระเหย (volatiles matter) และคาร์บอนคงตัว (fix carbon) สารระเหยคือส่วนที่ถูกเผาไหม้ง่าย สลายตัว เมื่อได้รับความร้อนในที่อับอากาศ ดังนั้น ชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่า เชื้อเพลิงติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลือจากการระเหยออกไปของความชื้น, สารระเหย และเถ้าที่ถูกกำจัดออก.
3. เถ้า (ash) ขี้เถ้า คือ ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร.

## เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Wood Pellets)

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellets) จัดเป็นประเภทหนึ่งของเชื้อเพลิงแข็งที่ทำจากไม้ ซึ่งโดยทั่วไปจะผลิตจากขี้เลื่อยหรือเศษวัสดุจากการผลิตไม้แปรรูป หรือเศษไม้ที่เหลือใช้จากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ ไม้จากการโค่นต้นไม้ที่ไม่จำเป็นหรือไม้ยืนต้นตาย การตัดแต่งกิ่งไม้ เป็นต้น และยังรวมถึงวัตถุดิบทางการเกษตรมีคุณสมบัติของกายภาพและทางเคมีแตกต่างกัน โดยทั่วไปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีความหนาแน่นต่ำและความชื้นต่างกัน ทำให้การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าระบบไม่สม่ำเสมอ รวมไปถึงปัญหาของพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเก็บ, การขนส่ง และการเกิดเชื้อรา เนื่องจากความชื้น, ดังนั้น จึงต้องนำวัสดุดังกล่าวมาอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นและลดความชื้นของวัตถุดิบ เพื่อลดพื้นที่ในการจัดเก็บ และสามารถเก็บได้นานขึ้น โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวจะต้องยังคงค่าความร้อนไว้เท่ากับค่าความร้อนของชีวมวลทั่วไป ดังนั้น จึงมีมาตรฐานเพื่อกำหนดคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ดังแสดงในตารางที่ 1.

### ตารางที่ 1. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในเชิงพาณิชย์

คุณสมบัติ/Specification	
ค่าความร้อน/Heat Value	16-19 เมกะจูล/กิโลกรัม
ค่าความชื้น/Moisture Content	ร้อยละ 8-15
ขี้เถ้า/Ash Content	ร้อยละ 3-5
ขนาด/Size	Ø6-10xL20-50 มิลลิเมตร

## กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 1. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.

1. กระบวนการย่อย (crushing process) เป็นกระบวนการบดย่อยวัตถุดิบที่ยังมีขนาดไม่เหมาะสมสำหรับการผลิต ต้องนำมอลดขนาดก่อน เช่น เศษไม้, ปีกไม้, เปลือกไม้ และฟางข้าว เป็นต้น โดยเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการย่อยมีหลายประเภท เช่น shredder, crusher และ hammer mill เป็นต้น.

2. กระบวนการลดความชื้น (drying process) เป็นกระบวนการลดความชื้นเพื่อให้วัตถุดิบมีความชื้นที่เหมาะสมกับกระบวนการอัด.

3. กระบวนการผสม (mixing process) เป็นกระบวนการผสมวัตถุดิบ ในกรณีที่ใช้ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป.

4. กระบวนการอัด (pelleting process) เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัตถุดิบให้เป็นเม็ด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-10 มิลลิเมตร, ความยาว 3-6 เซนติเมตร หรือตามความต้องการ โดยเครื่องจักรที่ใช้มีหลายประเภท เช่น flat die pellet mill, ring die pellet mill และ vertical ring die pellet mill เป็นต้น.

5. กระบวนการระบายความร้อน (cooling process) เป็นกระบวนการระบายความร้อนให้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วให้เย็นตัวลง และคงรูปของเชื้อเพลิง.

6. กระบวนการบรรจุ (packing process) เป็นกระบวนการบรรจุชีวมวลอัดเม็ดในถุงตามขนาด และตามความต้องการของลูกค้า.

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีการผลิตในหลากหลายรูปแบบและยังมีคุณภาพสินค้าที่หลากหลายขึ้นอยู่กับกระบวนการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งที่เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้า การให้ความร้อนกับที่อยู่อาศัย และการใช้งานประเภทอื่นๆ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีความหนาแน่นสูง ความชื้นต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 10) ซึ่งช่วยให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น.

นอกจากนี้ ด้วยรูปทรงของตัวเชื้อเพลิงที่เป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดค่อนข้างเท่ากันทุกชิ้น และมีขนาดเล็กทำให้สามารถที่จะนำระบบการป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถกำหนดปริมาณของเชื้อเพลิงได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถใช้ระบบการปล่อยเชื้อเพลิงแบบกรวย หรือระบบสายพานแบบนิวเมตริกก็ได้เช่นเดียวกัน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีความหนาแน่นสูงมาก (650-700 กิโลกรัม/ตารางเมตร) ทำให้ได้เปรียบเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่น ทั้งในด้านการประกอบทางเคมี คือ มีความหนาแน่นของสารประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้สูง ทำให้ความหนาแน่นทางพลังงานสูง และองค์ประกอบทางกายภาพ คือ พื้นที่ในการจัดเก็บสามารถเก็บไว้ได้นาน เนื่องจากไม่อับชื้นและด้านการขนส่งสามารถขนได้ในปริมาณที่มาก ชีวมวลอัดเม็ดสามารถที่จะขนถ่ายจากที่เก็บขนาดใหญ่ให้กับรถขนส่ง หรือไซโล (Silo) ตามความต้องการของลูกค้าได้โดยสะดวก.

### **ประโยชน์จากการอัดเม็ดเชื้อเพลิง**

1. สะดวกในการขนส่ง และประหยัดค่าขนส่งเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป เนื่องจากมีความหนาแน่นสูง (bulk density) ประมาณ 650-700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ชิ้นไม้สับจะมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และขี้เลื่อยความหนาแน่นที่ 200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.

2. สามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายเพราะมีขนาดที่เท่าๆกัน มีน้ำหนักที่ค่อนข้างแน่นอน ประสิทธิภาพของอัตราการเผาไหม้อยู่ที่มากกว่าร้อยละ 80 ของเตาเผา ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับผู้ประกอบการที่ใช้เตาเผาที่ต้องการอัตราการเผาไหม้ที่สม่ำเสมอ และมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์.



3. ให้พลังงานความร้อนสม่ำเสมอมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น (High Heating Value) โดยมีค่า Net Calorific Value ประมาณ 16.5 เมกะจูล/กิโลกรัม ถึง 19 เมกะจูล/กิโลกรัม แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่ได้มีการอัดและลดความชื้นค่าพลังงานจะอยู่ที่ประมาณ 10.9 เมกะจูล/กิโลกรัม เช่น ไม้ฟืน, ไม้สับ, ชี้เลื่อย และซีกบ สาเหตุที่เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีค่าพลังงานมากกว่าเป็นเพราะมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีค่าพลังงานสูงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าพลังงานกับน้ำมันเบนซิน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 2 กิโลกรัมจะเท่ากับน้ำมันเบา 1 ลิตร ในขณะที่มีต้นทุนที่ต่ำกว่ามาก.

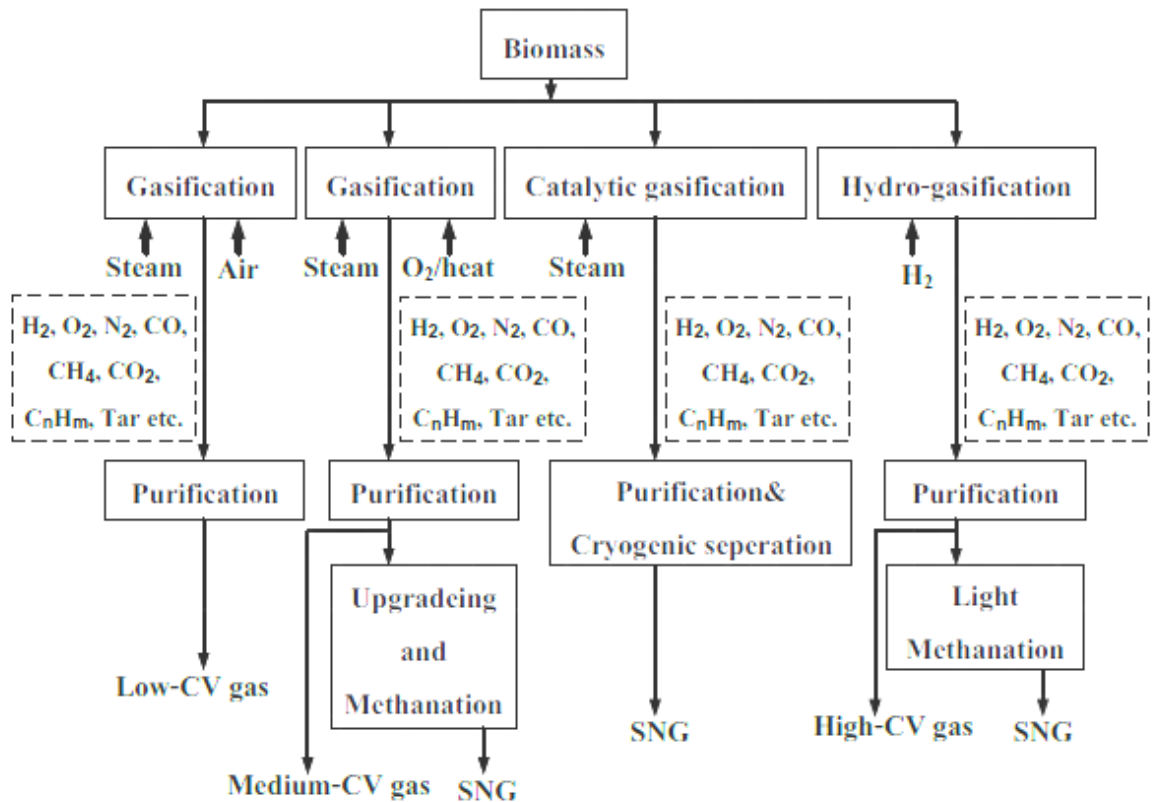
4. ค่าความชื้นต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 10) ซึ่งจากผลวิจัยพบว่า ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงมีอัตราแปรผกผันกับค่าพลังงาน ยิ่งเชื้อเพลิงมีความชื้นมาก ก็หมายความว่า มีสารประกอบที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้สูง แทนที่จะได้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน.

5. เป็นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หนึ่งในก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas) ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน (Global Warming) เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาชีวมวลจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้โดยพืชเพื่อสังเคราะห์แสง (carbon offset).

6. ค่าใช้จ่ายน้อยกว่าเชื้อเพลิงพลังงานฟอสซิล (Fossil Fuel) เช่น น้ำมันดิบ (fuel oil), ก๊าซธรรมชาติ (NGV), ก๊าซหุงต้ม (LPG), เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellet) 2-3 กิโลกรัม = น้ำมันเตา (fuel oil) 1 ลิตร.

### **กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)**

**กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน** เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเพื่อเปลี่ยนจากสารตั้งต้นไปเป็นแก๊ส ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการเปลี่ยนสภาพชีวมวลให้เป็นพลังงาน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถือว่าเป็นพื้นฐานในการเปลี่ยนสภาพชีวมวลที่เป็นเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ไม้, กากตะกอน, ของเหลือทิ้งทางการเกษตร และขยะชุมชน เป็นต้น ชีวมวลและขยะชุมชนเหล่านี้เมื่อผ่านเข้าสู่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอินทรีย์ของเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง โดยอาศัยตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา เช่น ออกซิเจนจากอากาศหรือออกซิเจนจากไอน้ำ ไพรอวิตเซอร์แก๊สที่ได้ประกอบด้วย ไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, มีเทน, ไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ และน้ำมันดิน ฯลฯ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันของแต่ละโซน ดังแสดงในรูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.



รูปที่ 2. ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดและการปรับปรุงคุณภาพโพรวินเซอร์.

กระบวนการหลักของการแก๊สซิฟายเกิดได้ 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการไพโรไลซิส ในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 400 องศาเซลเซียส ขั้นตอนนี้จะมีอัตราการเกิดที่เร็วมากและจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิสโดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส ในการเปลี่ยนแปลงความร้อนทางเคมีนั้น สารระเหย (Volatile matter) จะหลุดออกจากสารตั้งต้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่หรือสายโซ่ที่ยาวนั้นจะเกิดการแตกตัวของพันธะ C-C, C-S และ C-O พร้อมทั้งเกิดสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (intermediate) จากนั้น สารผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะตั้งไฮโดรเจนออกจากสารอื่นและกลับตัวเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ถ่านโค้ก ในขณะที่ถ่านโค้กนี้ไม่เกิดปฏิกิริยา ก็จะกลายเป็นถ่านชาร์ไปในที่สุด.

2. ขั้นตอนการเกิดแก๊สซิฟายเป็นขั้นตอนที่เกิดในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ถ่านชาร์ และน้ำมันดิน เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะผ่านกระบวนการแตกตัว (Cracking) และถูกทำ

ให้เป็นแก๊ส (Gasified) ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สขึ้นหรือที่เรียกว่า โพรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas) คือ ไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, มีเทน และไนโตรเจน.

### ปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศและหรือไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.

ตารางที่ 2. ปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ปฏิกิริยา	ชื่อของปฏิกิริยา	h(Enthalpy)(kJ/kg mole)
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Combustion	-408,632
$C + 1/2O_2 \rightleftharpoons CO$	Oxy gasification	-123,092
$CO + 1/2O_2 \rightleftharpoons CO_2$		-285,540
$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$	Carboxy gasification	+162,448
$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	Steam gasification	+118,905
$C + 2H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2$		+75,362
$C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$	Hydro gasification	-75,000
$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	Water gas shift	-43,543

หมายเหตุ : เครื่องหมาย ลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)

เครื่องหมาย บวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)

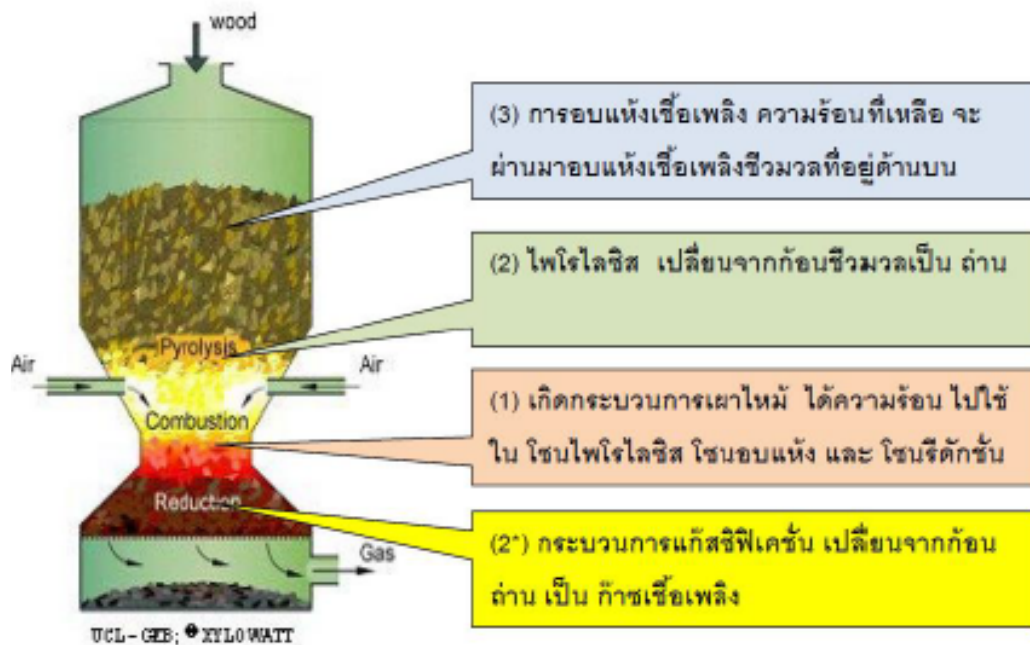
ปฏิกิริยาหลักที่เกิดภายใต้สภาวะที่แก๊สซิฟิเคชันมีการเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามประเภทของตัวกลางที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น

- ออกซิแก๊สซิฟิเคชัน (oxygasification) เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอหรือจำกัดออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรืออากาศ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยแก๊สที่เกิดขึ้น ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์.
- สตีมแก๊สซิฟิเคชัน (steam gasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน แก๊สเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาทำแก๊สเชื้อเพลิง.
- คาร์บอกซิแก๊สซิฟิเคชัน (carboxygasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน.

- ไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน (hydrogasification) เป็นปฏิกิริยาที่คาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนโดยตรง เพื่อผลิตมีเทน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกิดขี้เถ้าที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ แก๊สมีเทน ซึ่งเป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูง จึงเป็นแก๊สที่มีความต้องการให้เกิดในแก๊สซิฟาย แต่ว่าปฏิกิริยานี้เกิดน้อยมาก นอกจากจะมีการป้อนไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญของปฏิกิริยาเข้าไปเพิ่มในระหว่างปฏิกิริยาแต่ต้องมีระบบป้องกันการระเบิดจากการใช้ไฮโดรเจนด้วย.
- ปฏิกิริยาชิฟต์ (water-gas shift reaction) เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำ ดังแสดงในตาราง 2 ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์.

### กลไกการเกิดแก๊สซิฟาย

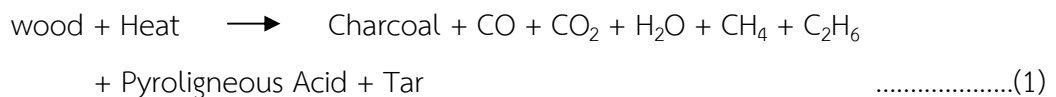
เชื้อเพลิงแข็งจำพวกชีวมวล ได้แก่ ไม้, แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในปริมาณจำกัดเพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบเป็นแก๊สไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, มีเทนและไนโตรเจน การผลิตแก๊สชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในด้านต่างๆ ได้แก่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นของเตาเผา, สารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวมวล และลักษณะของเตาที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวมวล โดยชีวมวลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพในแต่ละชั้น ดังนี้



รูปที่ 3. กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันภายในเตาปฏิกรณ์.

1. ชั้นลดความชื้น (drying zone) ในชั้นนี้น้ำจะถูกระเหยออกจากเชื้อเพลิงหรือชีวมวลที่ อุณหภูมิประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส.

2. ชั้นกลั่นสลาย (pyrolysis or distillation zone) ในชั้นนี้เชื้อเพลิงได้รับความร้อนเพื่อ สลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้ได้สารระเหยต่าง เช่น เมทานอล, กรดน้ำส้ม, น้ำมันดิน, แก๊สที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้ประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ของแข็งที่ เหลืออยู่ในกระบวนการ คือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 1.



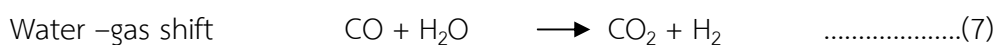
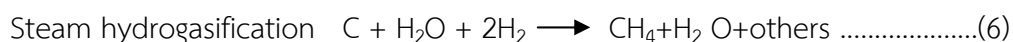
3. ชั้นรีดักชัน (reduction zone) แก๊สร้อนที่ผ่านจากชั้นกลั่นสลายจะไหลผ่านมายังชั้นนี้ ซึ่ง ปฏิกริยาหลัก คือ ปฏิกริยารีดักชัน อุณหภูมิในชั้นนี้ประมาณ 500-900 องศาเซลเซียส ในชั้นนี้แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ เกิดปฏิกริยาได้แก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 2 ถึง 4.



ปฏิกริยาที่ 2, 3 และ 4 เป็นปฏิกริยาดูดความร้อน ซึ่งจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 500-900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะผลิตแก๊สไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นหลัก.

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มค่าความร้อน ของแก๊สให้สูงขึ้น โดยการปรับเปลี่ยนปฏิกริยาเพื่อให้ได้มีเทนสูงขึ้นด้วยการผ่านกระบวนการ Water-gas shift เพื่อให้ได้ ไฮโดรเจนและนำไฮโดรเจน ไปใช้ใน Steam hydrogasification ดังแสดงใน สมการ 5 ถึง 7.





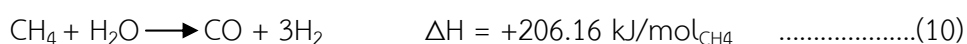
4. ชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) ในชั้นนี้คาร์บอนที่เหลืออยู่บางส่วนและไฮโดรเจนจะเผาไหม้กับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ ดังแสดงในสมการที่ 8 และ 9.



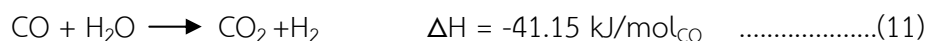
ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ระหว่าง 900-1,200 องศาเซลเซียส ความร้อนจากทั้งสองปฏิกิริยาจะถูกถ่ายเทต่อไปในชั้นอื่นๆ เพื่อให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาต่อไป.

**กระบวนการรีฟอร์มมิง (reforming processes)**

กระบวนการรีฟอร์มมิง (reforming processes) เป็นกระบวนการในการเปลี่ยนรูปใหม่ของเชื้อเพลิงในหรือแก๊ส โดยอาศัยตัวกลางในการทำปฏิกิริยา เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำ ให้ได้แก๊สสังเคราะห์ กระบวนการที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและใช้ในอุตสาหกรรมการ ได้แก่ กระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam methane reforming, SMR) กระบวนการนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมีเทน (CH<sub>4</sub>) และไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ 10.



โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องปฏิกรณ์วอเตอร์แก๊สชิฟต์ (water-gas shift) โดยเข้าทำปฏิกิริยากับไอน้ำเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 11.



ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วยไฮโดรเจนร้อยละ 70-80 และมีคาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน และน้ำปนอยู่ด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเหลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อย.

หากเน้นการผลิตไฮโดรเจนเป็นหลัก ตัวกลางที่นิยมใช้ คือ ไอน้ำ โดยเรียกระบวนการนี้ว่า สตีมน้ำแก๊สซิฟิเคชัน (Steam gasification) โดยคาร์บอนในชีวมวลจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็น คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 12 และ 13 แก๊สเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำมาเป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้.



และหากมีไอน้ำมากก็จะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 14.



นอกจากนี้ยังพบว่า กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและกระบวนการรีฟอร์มมิงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงแก๊สสูงขึ้น.

**ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)** คือ สารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาเคมีเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น โดยสารเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนวิถีที่มีพลังงานกระตุ้นจากสูงไปเป็นวิถีที่มีพลังงานกระตุ้นต่ำ จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดง่ายและเร็วขึ้น ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีผลต่ออุตสาหกรรมโดยเฉพาะการผลิตน้ำมันและแก๊สสังเคราะห์ สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีที่ได้รับความนิยมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย

1. วิธีการจุ่มเคลือบ (Impregnation method)

เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวรองรับวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด วิธีจุ่มเคลือบเป็นวิธีการแช่ตัวรองรับชุบด้วยสารละลายที่มีส่วนประกอบกับมันต์หลักที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือการทำให้ตัวรองรับชุบด้วยสารละลายนั้น.

## 2. วิธีการตกตะกอน (Precipitation method)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการตกตะกอนนั้นสามารถทำได้ คือ นำเอาสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 1 ชนิด และสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารที่จะใช้เป็นตัวรองรับผสมเข้าด้วยกัน หลังจากนั้น ทำการเติมสารก่อตะกอน (Precipitant) ลงไป ในบางครั้งการตกตะกอนร่วมอาจจะมีเพียงส่วนประกอบของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 ชนิดเท่านั้น โดยไม่มีส่วนประกอบของตัวรองรับก็ได้ หลังจากที่ได้ตะกอนแล้วก็จะทำการล้าง, อบ, ขึ้นรูป และเผาเพื่อทำความสะอาดและไล่ความชื้นต่อไป สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการ คือ นิกเกิลออกไซด์.



## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการดำเนินงานทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิง ส่วนที่ 2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ส่วนที่ 3 ทดลองกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (stream reforming) ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมสำหรับกระบวนการดังกล่าวโดยเฉพาะ และส่วนที่ 4 ทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (Hydro Steam Gasification) ในระดับนำร่อง โดยใช้ निकेलออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.

### ส่วนที่ 1 การขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิง

เป็นการเตรียมความพร้อมของเชื้อเพลิงจำพวกที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีความชื้นสูง โดยเฉพาะของเหลือทิ้งชีวมวลที่มีจำนวนมากในประเทศไทยที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ เชื้อเพลิงเหล่านี้จะเกิดปัญหาในด้านความหนาแน่นของพลังงานไม่เพียงพอ รวมถึงการจัดเก็บต้องใช้พื้นที่มากและมีเชื้อรา ซึ่งเรียกว่าเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ เพื่อเพิ่มคุณภาพของเชื้อเพลิงเหล่านี้จึงต้องนำเชื้อเพลิงมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปอัดเม็ด มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. การรวบรวมชีวมวลทางการเกษตร เป็นการเก็บรวบรวมชีวมวลชนิดต่างๆ เพื่อผสมก่อนขึ้นรูปอัดเม็ดจะทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสม่ำเสมอและง่ายต่อการควบคุมกระบวนการผลิตความร้อน.



รูปที่ 4. ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร.

2. การลดขนาดของเชื้อเพลิง โดยการสับย่อยและบดให้เชื้อเพลิงมีขนาดเล็กกลวงประมาณ 2-20 มิลลิเมตร จนสามารถขึ้นรูปอัดเม็ดได้.



รูปที่ 5. การสับย่อยชีวมวล.

3. การตากแห้งชีวมวล เพื่อลดความชื้นในชีวมวลให้เหลือประมาณร้อยละ 15 ถึง 20 ก่อนนำไปขึ้นรูปอัดเม็ด.



รูปที่ 6. การลดความชื้นในชีวมวลด้วยความร้อนจากแสงแดด.

4. การขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบ Flat Die ขนาดกำลัง 22 แรงม้า อัตราการผลิต 400 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.



รูปที่ 7. การขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิงและรูปร่างของเม็ดเชื้อเพลิง.

## ส่วนที่ 2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในกระบวนการ steam hydro gasification ในระดับนำทางนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้น จึงเลือกเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบจุ่มเคลือบ (Impregnation method) ด้วยการใช้แอคติเวเต็ดอะลูมินาที่มีขนาดแตกต่างกัน ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับกระบวนการรีฟอร์มมิงในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งแบบผง และแบบเม็ด ดังนั้น การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองนี้จึงเตรียมด้วย 2 วิธี คือ แบบจุ่มเคลือบ (Impregnation method) และแบบตกตะกอน (Precipitation method).

### 1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ (Impregnation method)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานี้ได้ใช้โลหะนิกเกิลจากสารประกอบนิกเกิลไนเตรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับแอคติเวเต็ดอะลูมินา ขนาด 4-8 มิลลิเมตร ด้วยการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.

#### วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

1. นิกเกิลไนเตรต.
2. น้ำกลั่น.
3. เม็ดอะลูมินา ขนาด 4-8 มิลลิเมตร.
4. เตาให้ความร้อน.
5. ตู้อบ.
6. เตาเผา.

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่ง Activated alumina ปริมาณ 50 กรัม เพื่อใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเคลือบโลหะนิกเกิล ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวของ Activated alumina นี้



รูปที่ 8. เม็ด activated alumina.

2. เตรียมสารละลายนิกเกิลไนเตรดความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร.



รูปที่ 9. สารละลายนิกเกิลไนเตรดความเข้มข้น 1 โมลาร์.

3. ใส่สารละลายนิกเกิลไนเตรดลงในเม็ดอะลูมินาที่ซั่งไว้ ทำการแช่ทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา.



รูปที่ 10. แช่เม็ดอะลูมินาในสารละลายนิกเกิลไนเตรดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.



รูปที่ 11. ลักษณะตัวรองรับอะลูมินาที่จุ่มเคลือบนิกเกิลไนเตรดหลังการอบ.



รูปที่ 12. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาหลังการเผา.

## 2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation method)

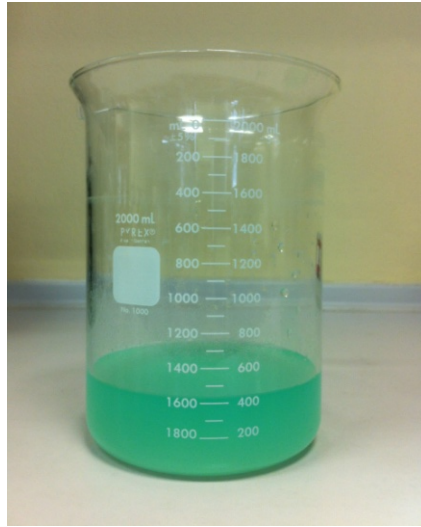
### วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

1. นิกเกิลไนเตรต.
2. อะลูมิเนียมไนเตรต.
3. ซิลิกา.
4. สารละลายแอมโมเนีย ร้อยละ 2.5.
5. น้ำกลั่น.
6. ชุดเครื่องกรอง.
7. ตู้อบ.
8. เตาเผา.

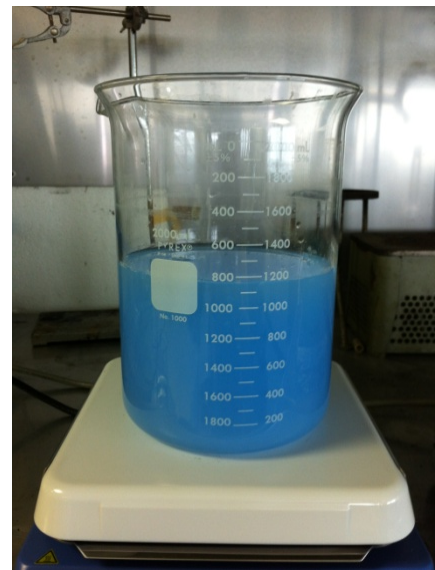
### ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมสารละลายประกอบตามอัตราส่วนโมล Si/Al/Ni : 1/1/4 ละลายด้วยน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ทำการกวนสารละลายทิ้งไว้ 10 นาที.
2. เติมร้อยละ 2.5 ของสารละลายแอมโมเนีย (ร้อยละ 2.5  $\text{NH}_3$ ) ปริมาตร 800 มิลลิลิตรลงในสารละลายผสม และทิ้งสารละลายผสมไว้ประมาณ 10 นาที.
3. ทิ้งสารละลายให้ตกตะกอน สังเกตเห็นการแยกชั้นของตะกอน.
4. ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนได้สารละลายที่มีค่า pH=7 แล้วกรองตะกอนด้วยชุดเครื่องกรอง.

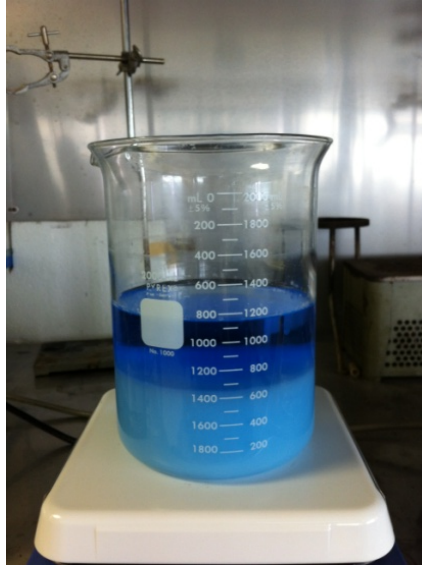
5. อบตะกอนที่ได้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกมา.



รูปที่ 13. สารประกอบที่ละลายด้วยน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร.



รูปที่ 14. การตกตะกอนด้วยร้อยละ 2.5 ของสารละลายแอมโมเนีย.



รูปที่ 15. สารละลายเกิดการแยกชั้นของตะกอน.



รูปที่ 16. กรองตะกอนด้วยชุดเครื่องกรอง.





รูปที่ 17. ตัวเร่งปฏิกิริยา.

### ส่วนที่ 3 การทดลองกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Stream reforming)

การทดลองกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำในระดับห้องปฏิบัติการเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกระทำปฏิกิริยาการเชื่อมเพลิงชีวมวล หรือสารตั้งต้นในระดับกึ่งนำทางต่อไป

#### วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

1. ชุดการทดลองรีฟอร์มมิง.
2. แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) (70%  $\text{CH}_4$  in  $\text{N}_2$  Balance).
3. แก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) (10%  $\text{H}_2$  in  $\text{N}_2$  Balance).
4. แก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ).
5. น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ).
6. เครื่องทำความร้อน.
7. ตัวเร่งปฏิกิริยา.
8. ถังเก็บแก๊ส.

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบอุปกรณ์ พร้อมใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา.
2. เปิดเครื่องรีฟอร์มมิง ตั้งค่าอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.

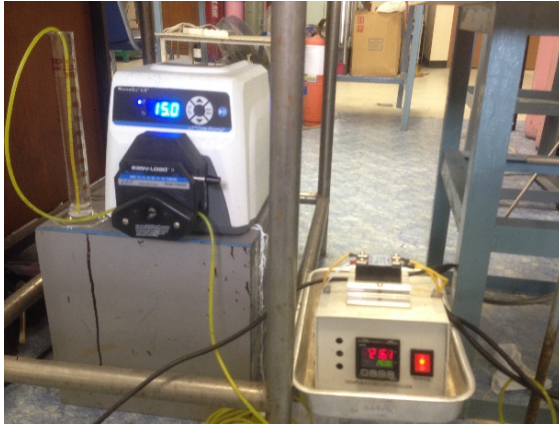
3. เปิดแก๊สไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศออกจากระบบจนอุณหภูมิถึง 800 องศาเซลเซียส แล้วปิดแก๊สไนโตรเจน.
4. เปิดแก๊สไฮโดรเจน เพื่อให้เกิดการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ังไว้ 1 ชั่วโมง ปิดแก๊สไฮโดรเจน.
5. เปิดแก๊สมีเทน พร้อมทั้งเปิดน้ำ และเปิดเครื่องทำความร้อนของน้ำเพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอ เกิดปฏิกิริยา Steam reforming ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ ).
6. เก็บแก๊สตัวอย่างวิเคราะห์ผล ทุก 30 นาที 4 ครั้ง (นาทีที่ 30, 60, 90 และ 120).



รูปที่ 18. ชุดการทดลองรีฟอร์มมิง.



รูปที่ 19. แก๊สที่ใช้แก๊สไนโตรเจน, แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน.



รูปที่ 20. ใช้น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีรีฟอร์มมิง.



รูปที่ 21. การเก็บแก๊สตัวอย่างวิเคราะห์.

**ส่วนที่ 4** ทดลองผลิตแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ (hydro Steam gasification) ในระดับกึ่งนำทาง โดยนำผลการทดลองจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำในระดับห้องปฏิบัติการและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการสังเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติเช่นกันมาขยายผลในระดับกึ่งนำทาง ดังการทดลองต่อไปนี้.

#### **วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้**

1. ชุดเตาเผาแก๊สซิฟิเคชัน ขนาด 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.
2. ชีวมวล ตัวอย่างชีวมวลแบ่งเป็น 2 แบบ คือ เม็ดเชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์ และไม้ยูคาลิปตัส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5 นิ้ว และยาว 1 นิ้ว.
3. ตัวเร่งปฏิกิริยา.
4. เทอร์มอมิเตอร์.
5. ถังเก็บแก๊ส

#### **ขั้นตอนการทดลอง**

1. ป้อนชีวมวลที่ได้จากการเตรียมลงในเตาเผาแก๊สซิฟายเออร์.
2. จุดไฟในโซนเผาไหม้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา พร้อมทั้งบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในเตา และทำการเก็บตัวอย่างแก๊สเป็นระยะๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้น.



**รูปที่ 22.** ตัวอย่างชีวมวล.



รูปที่ 23. จุดไฟเผาไหม้และแหล่งกำเนิดไอน้ำ.

### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

ผลจากการทดลองทั้ง 4 ส่วน ถูกนำมาแสดงผลเพื่อหาตัวแปรและสภาวะที่เหมาะสมในผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวล โดยใช้ออกซิเจนจากอากาศในตอนเริ่มต้นของกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจนกระทั่งแหล่งกำเนิดไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำได้แล้ว กระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ดังกล่าวใช้ออกซิเจนจากไอน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น หรือตัวอย่างชีวมวลและเพื่อลดปริมาณไนโตรเจนที่ผสมมาในแก๊สสังเคราะห์มีผลทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ด้วยการใช้แก๊สสังเคราะห์ต่ำลง.

#### 3.1 ผลการขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิง

หญ้าเนเปียร์เป็นตัวอย่างของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกนำมาขึ้นรูปอัดเม็ด เพื่อให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นและปริมาณความชื้นลดลง การเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงดังกล่าวส่งผลต่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง คุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปอัดเม็ดแล้ว คือ ความชื้นประมาณร้อยละ 9 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 4,000 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าประมาณ 560 ถึง 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร.

#### 3.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

ผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการเตรียมทั้งสองวิธีถูกนำมาใช้ในการกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ดังแสดงในตารางที่ 3-5.

##### 3.2.1 ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ

ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ โดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ที่สารตั้งต้นมีเทน ร้อยละ 70, อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 กรัม.

ตารางที่ 3. แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	0.01808	0.26088	0.1692	56.96057	42.59726	18.628
60	0.08215	-	0.09646	46.2922	53.52918	33.868
90	2.36671	2.86778	0.83979	47.2178	46.70792	32.546
120	0.11141	0.18001	0.08833	45.91475	53.7055	34.408

ตารางที่ 4. ความเข้มข้นของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 1 โมลาร์

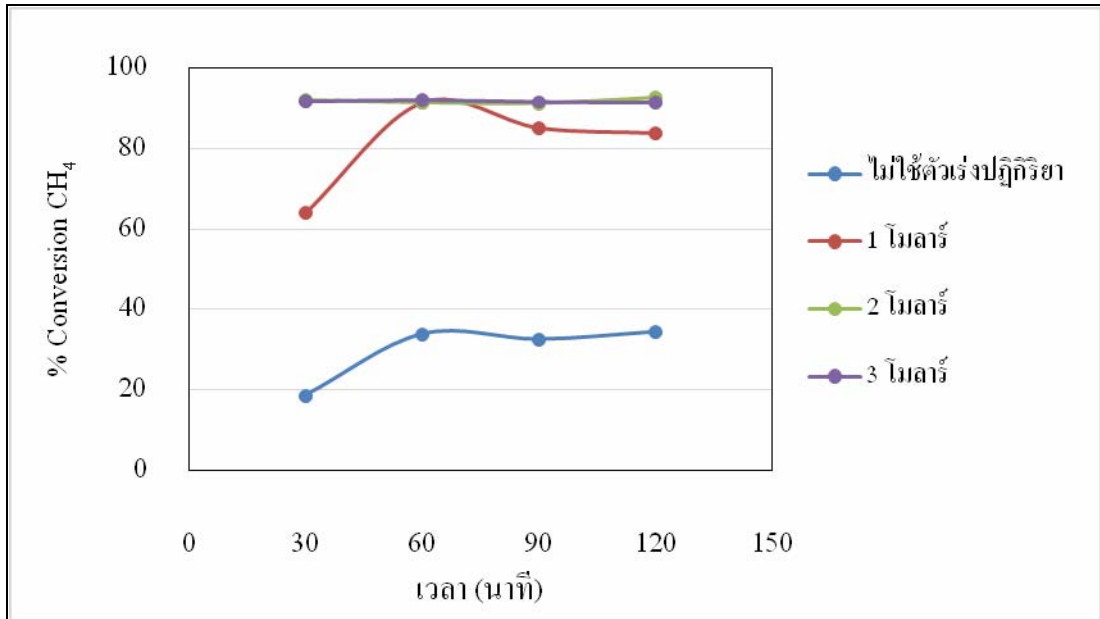
เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	12.23537	35.24492	2.40241	25.16452	24.95277	64.050
60	5.61618	-	-	5.99377	38.39005	91.437
90	19.85385	46.07135	1.26669	10.39387	22.41423	85.152
120	8.45099	31.35409	-	11.30881	48.88611	83.845

ตารางที่ 5. ความเข้มข้นของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 2 โมลาร์

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	18.28014	59.26919	1.93761	5.55096	14.96211	92.07
60	17.53502	56.51713	1.85198	6.01194	18.08393	91.412
90	18.79801	59.77787	2.44593	6.14082	12.83736	91.227
120	17.62374	58.15852	2.87764	5.12598	16.21412	92.677

ตารางที่ 6. ความเข้มข้นของนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 3 โมลาร์

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	19.20681	52.07141	3.17588	5.78168	19.76423	91.74
60	19.88418	54.45199	4.06603	5.52603	16.07177	92.106
90	20.10991	49.19715	3.45923	5.87929	21.35442	91.601
120	21.14505	42.38359	3.3935	6.02415	27.05371	91.394



รูปที่ 24. ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อความเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทน.

จากรูปที่ 24 พบว่า เวลาที่มีผลต่อการรีฟอร์มมิ่งที่ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยาต่ำ คือ ที่ 1 โมลาร์ เวลา 60 นาที จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนสูงสุดและค่อยๆ ลดลงที่เวลา 90 ถึง 120 นาที ส่วนที่ความเข้มข้น 2 และ 3 โมลาร์ ที่เวลา 30 ถึง 120 นาที การเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนค่อนข้างคงที่ ร้อยละ 91.

### 3.2.2 ผลของการปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ

ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ที่ ปริมาณ 10, 15, 20 และ 25 กรัม โดยการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ที่สารตั้งต้นมีเทนร้อยละ 70, อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา 3 โมลาร์.

#### ตารางที่ 7. แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	0.01808	0.26088	0.1692	56.96057	42.59726	18.628
60	0.08215	-	0.09646	46.2922	53.52918	33.868
90	2.36671	2.86778	0.83979	47.2178	46.70792	32.546
120	0.11141	0.18001	0.08833	45.91475	53.7055	34.408



ตารางที่ 8. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 10 กรัม

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	13.40025	50.40349	3.64491	12.83931	19.71204	81.658
60	12.38989	49.2673	5.20068	12.67802	20.37411	81.886
90	13.15665	48.54369	3.6292	13.56845	21.10201	80.617
120	13.41749	50.87505	3.43097	13.53459	18.74189	80.665

ตารางที่ 9. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 15 กรัม

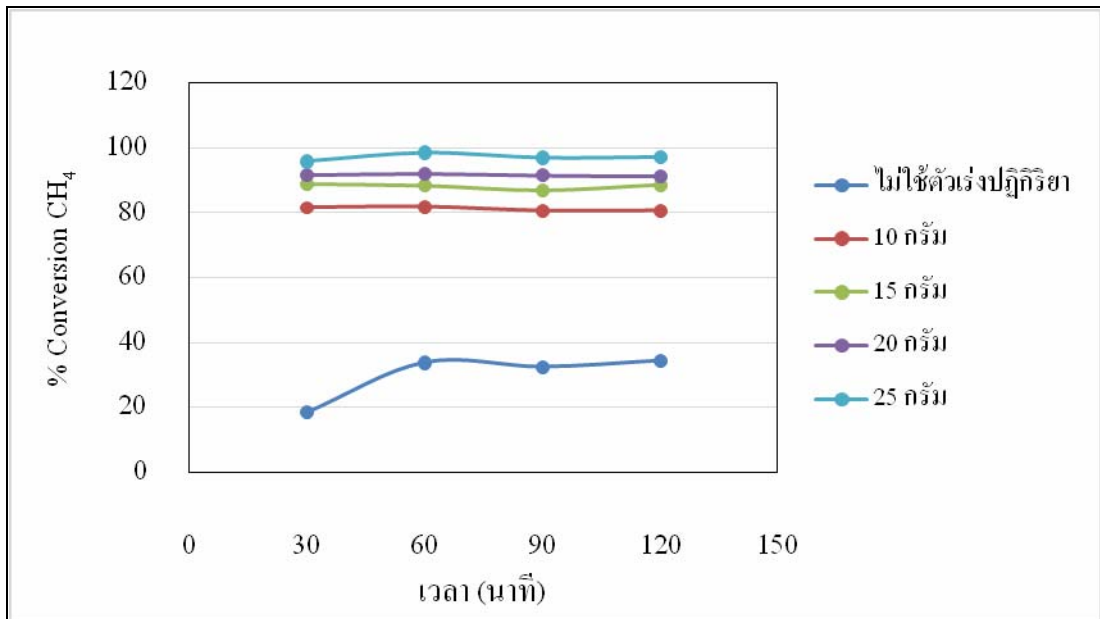
เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	15.54747	55.22307	3.63598	7.73326	17.86022	88.952
60	15.64061	56.9934	4.4477	8.06755	14.85074	88.475
90	14.25143	55.46153	4.74738	9.06011	16.47955	87.057
120	15.08203	56.00172	4.15731	7.87935	16.87959	88.744

ตารางที่ 10. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 20 กรัม

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	19.20681	52.07141	3.17588	5.78168	19.76423	91.740
60	19.88418	54.45199	4.06603	5.52603	16.07177	92.106
90	20.10991	49.19715	3.45923	5.87929	21.35442	91.601
120	21.14505	42.38359	3.3935	6.02415	27.05371	91.394

ตารางที่ 11. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 25 กรัม

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	19.01802	49.85682	2.29865	2.90255	25.92396	95.854
60	26.49991	49.40158	1.95752	0.89542	21.24557	98.721
90	23.73377	53.30463	1.53823	2.08245	19.34093	97.025
120	21.87031	51.87624	2.02157	0.95021	23.28166	97.253



รูปที่ 25. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลต่อความเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทน.

จากรูปที่ 25 พบว่า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดรีฟอร์มมิงต่ำ คือ มีค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนร้อยละ 30 ในขณะที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนมากเกินร้อยละ 80 โดยพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10, 15, 20 และ 25 กรัม ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 80, 88, 91 และ 97 ตามลำดับ.

### 3.2.3 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส โดยการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ที่สารตั้งต้นมีเทนร้อยละ 80 ทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ 3 โมลาร์ ปริมาณ 20 กรัม.

ตารางที่ 12. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 750 องศาเซลเซียส แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	-	-	-	72.05758	27.94242	9.928
60	-	-	-	72.25357	27.41658	9.683
90	-	-	-	70.38224	29.61776	12.022
120	-	-	-	72.77136	27.22864	9.036

ตารางที่ 13. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 750 องศาเซลเซียส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	8.08196	82.41591	2.17837	1.20752	6.11624	98.491
60	12.04429	75.63871	2.68326	2.52971	7.10403	96.838
90	16.7368	59.93989	4.25393	4.05516	15.01421	94.931
120	18.26775	60.25252	2.66276	3.69984	15.11713	95.375

ตารางที่ 14. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 850 องศาเซลเซียส แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	16.08565	0.47613	1.92999	55.6254	27.88282	30.468
60	2.22394	-	1.08335	71.05003	25.64268	11.187
90	2.92839	-	0.87123	64.34321	31.857117	19.571
120	2.84843	-	0.71162	56.89073	39.54923	28.887

ตารางที่ 15. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 850 องศาเซลเซียส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

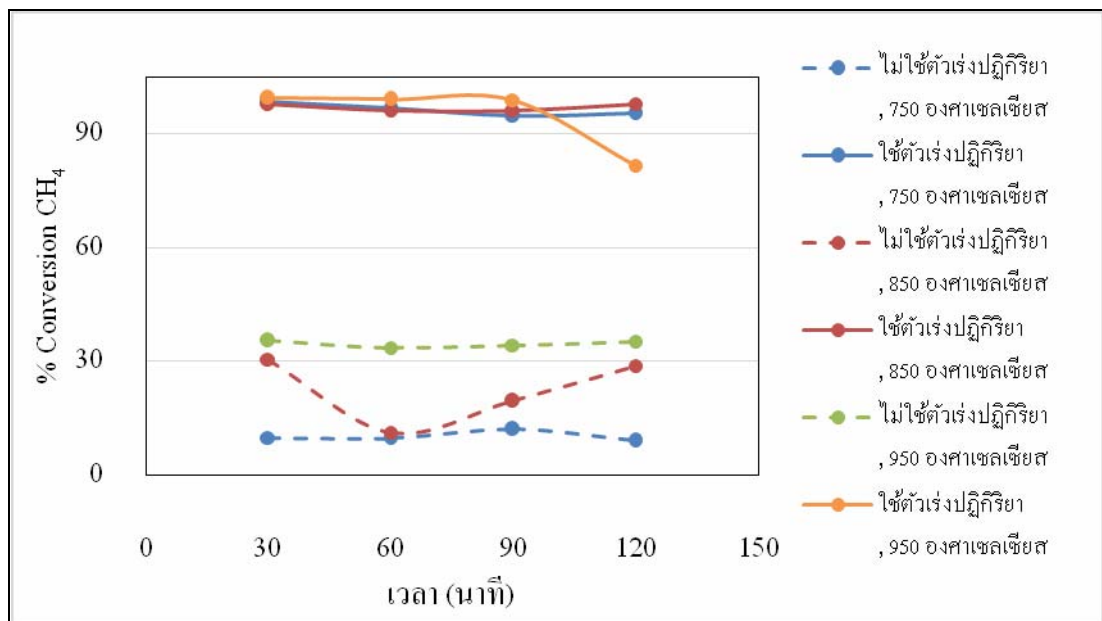
เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	23.37488	61.11121	0.92855	1.79868	12.78669	97.751
60	25.20224	36.32765	0.54624	2.94821	34.97566	96.315
90	25.87536	53.75834	1.14968	3.03848	16.17796	96.202
120	23.31546	17.71823	1.2088	1.54935	56.20816	98.063

ตารางที่ 16. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 950 องศาเซลเซียส แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	3.10886	6.96693	0.62286	51.69479	37.60657	35.382
60	3.2417	10.93159	0.65322	53.08483	32.0886	33.644
90	3.22188	12.10363	0.66063	52.62522	31.38863	34.218
120	2.92826	6.58752	0.67685	51.79472	38.01265	35.257

ตารางที่ 17. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 950 องศาเซลเซียส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	%Conversion
30	22.7252	62.45658	2.31393	0.40491	12.09938	99.494
60	23.33851	63.30243	1.34535	0.62113	10.39257	99.224
90	23.0484	62.88273	1.01795	0.77204	12.27888	99.035
120	3.515	62.79664	0.01069	14.60376	19.07391	81.745



รูปที่ 26. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อความเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทน.

จากรูปที่ 26 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ส่งผลต่อการเกิดรีฟอร์มมิงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับแบบใช้สารเร่งปฏิกิริยา โดยพบว่า การไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากประมาณร้อยละ 10, 20 และ 35 ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนค่อนข้างคงที่ โดยทั้ง 3 อุณหภูมิมีค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณมีเทนประมาณร้อยละ 96.

#### 4. สรุปผลการวิจัย

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลโดยวิธี partially steam hydrogasification เพื่อใช้ออกซิเจนจากไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นหรือเชื้อเพลิงชีวมวลแทนการใช้ออกซิเจนจากอากาศ ซึ่งเป็นวิธีผลิตแก๊สสังเคราะห์แบบดั้งเดิม เนื่องจากในอากาศมีปริมาณของไนโตรเจนมากถึงร้อยละ 79 มีผลทำให้มีปริมาณไนโตรเจนปนออกมากับแก๊สสังเคราะห์ที่ได้และมีผลทำให้ปริมาณความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ต่ำลง โดยปกติแก๊สที่ผลิตได้จากกระบวนการ biomass gasification ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ร้อยละ 20-33, ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ร้อยละ 15-20, มีเทน (CH<sub>4</sub>) ร้อยละ 1-2, ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ร้อยละ 50-60 และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ร้อยละ 10-15 และมีค่าความร้อนประมาณ 4-6 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น วว. จึงได้พัฒนากระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์ด้วยการใช้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชีวมวล โดยอาศัยออกซิเจนและไฮโดรเจนจากไอน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิงเกิดการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ดังนั้น การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำในระดับห้องปฏิบัติการได้นำไปใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลโดยใช้ไอน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณแก๊สมีเทนให้สูงขึ้นและลดปริมาณแก๊สไนโตรเจน มีผลทำให้ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์สูงขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนสำคัญมากต่อการเกิดมีเทน เนื่องจากตัวเร่งดังกล่าวเป็นสารในกลุ่มโลหะทรานซิชัน จึงมีออบิทอวาล์ว และลดระดับพลังงานในการทำปฏิกิริยา ผลการใช้ไอน้ำแทนอากาศในการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลทำให้แก๊สสังเคราะห์มีคุณภาพสูงขึ้น องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ร้อยละ 16 ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ร้อยละ 30, มีเทน (CH<sub>4</sub>) ร้อยละ 12 ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ร้อยละ 33 และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ร้อยละ 9 และมีค่าความร้อนประมาณ 9-76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร แก๊สสังเคราะห์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ปริมาณความร้อนในกระบวนการผลิตสูงมาก โดยใช้ทดแทนแก๊ส หุงต้มที่มีราคาเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง.

## 5. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานในชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และยังเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งแบ่งความต้องการใช้พลังงานตามภาคเศรษฐกิจออกเป็น 4 ภาค คือ ภาคการขนส่ง, ภาคอุตสาหกรรม, ภาคที่อยู่อาศัย และภาคเกษตรกรรม โดยความต้องการใช้พลังงานทั้ง 4 ภาคนี้สูงขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ตามความเจริญและความทันสมัยของเทคโนโลยี รวมถึงความต้องการความสะดวกสบายของประชาชนอย่างไร้ขีดจำกัด. ดังนั้นรัฐบาลต้องจัดหาพลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ในทุกภาคส่วน การพัฒนาพลังงานทดแทนจากชีวมวลจึงมีความจำเป็นต่อการเพิ่มทางเลือกในจัดหาพลังงานเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดในไม่ช้านี้และเป็นการลดความเสี่ยงที่เกิดจากการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ โดยเชื้อเพลิงจากชีวมวลสามารถผลิตเป็นพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น ถ่านหุงต้ม, แก๊สเชื้อเพลิงทดแทน, แก๊สหุงต้ม และน้ำมันชีวภาพ เป็นต้น.

ดังนั้น โครงการการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยกระบวนการ partially steam hydrogasification เพื่อเพิ่มอุณหภูมิในอุตสาหกรรมเซรามิก จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมและชุมชนต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิก, ที่ใช้ปริมาณความร้อนในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก รวมถึงอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

1. กลุ่มอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานในรูปความร้อน โดยใช้พลังงานความร้อนเป็นปัจจัยพื้นฐาน เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก, ใช้ความร้อนในการเผาสุกและเผาดิบเซรามิก อุตสาหกรรมอาหาร, อุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้ความร้อนในกระบวนการอบแห้งและผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต.

2. กลุ่มอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานในรูปไฟฟ้า การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลจำเป็นต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงตามความต้องการของเครื่องยนต์และกำลังการผลิตไฟฟ้า.

ดังนั้น การวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากชีวมวลยังคงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาต่อไปให้ได้ความร้อนและพลังงานสูงสุด รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องผลิตแก๊สสังเคราะห์และการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ชีวมวล เพื่อให้เกิดอรรถประโยชน์สูงสุดต่อการใช้งาน.

## 6. เอกสารอ้างอิง

ชีวมวลอัดเม็ด. 2558. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

[http://rubber.oie.go.th/box/ELib\\_Document/1135/%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B9%87%E0%B8%94.pdf](http://rubber.oie.go.th/box/ELib_Document/1135/%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B9%87%E0%B8%94.pdf), [เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2015].

ชีวมวลอัดเม็ด. 2558. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:

<http://www.espthailand.com/product/wood-pellets.html>, [เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2015].

Binlin, D., Weiguo, P., Jianxing, R., Bingbing, C., Jungho, H. and Tae-U, Y., 2008, Removal of tar component over cracking catalysts from high temperature fuel gas, *Energy Conversion & Management*, **49**, pp. 2,247-2,253.

Chunshan, L. and Kenzi, S., 2008. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification-An overview, *Renewable and Sustainable Reviews*, Models RSER-525, pp. 11.

Derick, G. B., Lovleen, G., Tae-Hyung, K. H., Keith, M-Y., Andrew, J. C., 2006. Comparative assessment of coal tars obtained from 10 former manufactured gas plant sites in the Eastern United States. *Chemosphere*, **65**, pp. 1,562-1,569.

Daravell, L.I., Heiskanen, K., Jones, J.M., Ross, A.B., Simell, P., Williams, A., 2003. An investigation of alumina-supported catalysts for the selective catalytic oxidation of ammonia in biomass gasification. *Catalysis Today*. **81**, pp. 681-692.

Gasification and steam reforming. 2558. [online]. Available at:

[http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2555/enen41055nk2\\_ch2.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2555/enen41055nk2_ch2.pdf), [accessed 12 July 2015].

Gasification and steam reforming. 2558. [online]. Available at:

[http://rubber.oie.go.th/file/8\\_%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B9%8A%E0%B8%AA%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%9F%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%8A%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B9%80%E0](http://rubber.oie.go.th/file/8_%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B9%8A%E0%B8%AA%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%9F%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%8A%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B9%80%E0)



- %B8%A8%E0%B8%A9%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89.pdf, [accessed 12 July 2015].
- Gasification and steam reforming. 2558. [online]. Available at:  
<http://www.sci.buu.ac.th/research/downloads/journal/2554-1/2554-1-15.pdf>,  
[accessed 12 July 2015].
- Jaime, M., Faundez, Ximena A., Garcia and Alfredo, Gordon L., 2001. A kinetic approach to catalytic pyrolysis of tars. *Fuel Processing Technology*. **69**, pp. 239-256.
- Jun, H., Heejoon, K., 2008 The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview. *Renewable and Sustainable Reviews*. **12**, pp. 397-416.
- Ponzio, A., Kalisz, S. and Blasiak, W., 2006. Effect of operations on tar and gas composition in high temperature air/steam gasification (HTAG) of plastic containing waste, *Fuel Processing Technology*, **87**, pp. 223-408.
- Stefano, R., 2003, The impact of catalytic materials on fuel reformulation, *Catalysis Today*, **77**, pp. 467-484.
- Takeo, K., Tomohisa, M., Jin, N., Shigeru, K., Kado, O., Toshihiro, M., Shuichi, N., Kimio, K. and Keiichi, T., 2006. Development of Ni catalysts for tar removal by steam gasification of biomass. *Applied Catalysis B: Environmental*. **68**, pp.160-170.
- Thiam, L.C. and Subhash, B., 2008. Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery, *Bioresource Technology*, **99**, 7,911-7,922.
- Zhang, H. and Wang, J., 2007. Oil from biomass corncob tar as a fuel, *Energy Conversion and Management*, 48(2007), **48**, pp. 1,715-1,757.