

รายงานการวิจัย

เรื่อง “โครงการวิจัยปรับปรุงระบบก๊าซฟิเคชันของสารชีวมวล  
สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงสะอาด”

“Research and Development Project of Biomass Gasification  
for Clean Fuel”

โดย

ดร.สุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ

สถาบันวิจัยพลังงาน

28 กรกฎาคม พ.ศ. 2554

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยโครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก โครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช หรือ CU-CLUSTER-FUND

## บทคัดย่อ

แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความสนใจเพื่อมาแทนพลังงานฟอสซิล และก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้นั้นสามารถนำมาใช้ได้อย่างหลากหลายเช่นใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนได้โดยตรง หรือนำไปเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องปั่นไฟก็ได้ แต่ปัญหาที่สำคัญของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของสารชีวมวลก็คือ น้ำมันดิน โดยที่น้ำมันดินมีลักษณะเหนียวข้น มีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส และจะไปอุดตันตาม ท่อ วาล์ว ข้อต่อ และตัวกรองต่างๆ รวมทั้งในเครื่องจักรกล การศึกษานี้จึงเน้นไปยังการกำจัดน้ำมันดินที่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปของน้ำมันดินซึ่งปฏิกิริยานี้ สามารถเปลี่ยนน้ำมันดินให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น และจากที่ปฏิกิริยาของแก๊สซิฟิเคชันเป็นแบบคายความร้อน และ ปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปของน้ำมันดินด้วยไอน้ำเป็นแบบดูดความร้อน การศึกษานี้จึงได้พยายามนำทั้ง 2 ระบบนี้ให้อยู่ภายในอุปกรณ์เดียวกันเพื่ออาศัยพลังงานความร้อนภายในที่เกิดขึ้นป้อนให้กับอีกส่วนหนึ่ง โดยที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกมาเพิ่มเติมจากผลการศึกษาที่อุณหภูมิดำเนินงานของแก๊สซิฟิเคชันเท่ากับ 973 ถึง 1173 เคลวิน และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อสารชีวมวลที่ 0.5 ตัวแทนน้ำมันดินที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย โทลูอิน ฟีนอล แนฟทาลีน และ ไพรีน ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานี้ มาป้อนให้กับ หน่วยแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ หน่วยผลิตไอน้ำ และ หน่วยเปลี่ยนแปลงน้ำมันดิน พบว่าพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นสามารถนำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงน้ำมันดินได้ทั้งหมด ให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนได้เพิ่มเป็น 2 เท่าจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยผลที่ได้จะนำไปออกแบบและทดลองจริงกับเตาแก๊สซิไฟเออร์เพื่อทดสอบว่าเมื่อนำแนวคิดนี้ไปปฏิบัติจริงแล้วสามารถลดน้ำมันดิน และมีวิธีการดำเนินการอย่างไร เพื่อนำไปขยายผลเพื่อนำไปสู่การใช้จริงอีกทางหนึ่ง

## Abstract

Fuel gas derived from biomass gasification is an attractive renewable energy resource. It could be utilized in many applications: e.g., for combustion engine, electricity engine and fuel cell. However, a major problem which complicates its use is due to the presence of high hydrocarbon compounds (tars). A number of post-treatment units are, therefore, traditionally required. In this project, a novel design of gasifier integrating a conventional gasifier with a catalytic reformer for tar removal and further hydrogen production is proposed. The heat demand for operating the endothermic steam reforming of tar can be directly supplied from the excess heat from the gasifier, thus allowing the efficient heat management within the system. The proposed integrated system offers several potential benefits such as reduction of number of unit operations (thus reducing system size and capital cost), improvement of system efficiency and reduction of operating cost arisen from better heat integration and increased hydrogen production in the fuel gas product, and improvement of product gas quality. This research will focus on selections of suitable catalysts and operating condition for reduction of tar and improvement of hydrogen production via steam reforming of tar. Integrated tar reformer with biomass gasification system was investigated in producing H<sub>2</sub> and energy term. This study was determined thermodynamic equilibrium. Gasification was operated at gasification temperature ( $T_{gs}$ ) =973.15-1173.15K and  $O_2:BM=0.5$ . Represented tar, toluene, phenol, naphthalene and pyrene, can reduce by increasing  $T_{gs}$ . The released energy was split for supply steam generator and tar reformer. Generating steam was restricted by exhaust energy at high  $T_{gs}$  can producing lower steam:biomass ( $S:BM$ ). And  $S:BM$  has been mainly affected on producing H<sub>2</sub>. Consequently at high  $T_{gs}$ , low steam potential affects to low producing H<sub>2</sub>. In addition, the design of the integrated system for efficient heat integration between the gasifier and the tar steam reformer and the determination of suitable operating parameters will be performed in order to achieve an efficient system that can generate high quality fuel gas suitable for various applications.

## สารบัญเรื่อง

	หน้าที่
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	15
บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา	26
บรรณานุกรม	27
ภาคผนวก	31
ประวัตินักวิจัยและคณะ	35

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล	16
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของสารต่างๆในน้ำมันดิน ที่อุณหภูมิการดำเนินการ 700-900 <sup>o</sup> C	18
ตารางที่ 3.3 ค่ามาตรฐานในการดำเนินการของแบบจำลอง	21

## สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 1.1 การทำเชื้อเพลิงชีวมวลจากตัดกิ่งไม้จามจรี	2
รูปที่ 1.2 การจุดไฟติดของก๊าซเชื้อเพลิงจากกิ่งไม้จามจรี	3
รูปที่ 2.1 เตาผลิตก๊าซจากชีวมวลแบบก๊าซไหลลง (Downdraft Gasifier)	8
รูปที่ 2.2 รูปแบบเตาผลิตก๊าซที่เสนอในงานวิจัยนี้ซึ่งจะมีการดักเก็บ สดน้ำมันดิน และเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน	14
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของตัวแทนน้ำมันดินที่ได้จากการพิจารณา	19
รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของสารต่างๆ และ พลังงานความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยา ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ	20
รูปที่ 3.3 พลังงานความร้อนจากเตาแก๊สซีฟิเออร์ และพลังงานที่เหลือสำหรับให้กับหน่วยผลิตไอน้ำและหน่วยเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน	22
รูปที่ 3.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ ไอน้ำต่อสารชีวมวล (S:BM) ที่มีผลต่ออุณหภูมิ และการใช้พลังงานจากพลังงานที่	23
รูปที่ 3.5 ปริมาณสารต่างๆที่ได้ และอุณหภูมิของระบบแปรรูปน้ำมันดิน ที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล 0-1.5 ที่อุณหภูมิแก๊สซีฟิเคชัน 973.15 เคลวิน	24
รูปที่ 3.6 ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน ต่ออัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล และ อุณหภูมิของไอน้ำ 673.15 เคลวิน	25

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

LPG = Liquid Petroleum Gas ก๊าซหุงต้ม

$\Delta H$  = ค่าพลังงานความร้อนของปฏิกิริยา

$Q_{air}$  = พลังงานความร้อนที่ต้องการของ หน่วยแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ

$Q_{exh,gs}$  = พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน และ

$Q_{out,gs}$  = พลังงานที่ออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิง

$O_2:BM$  = อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อสารชีวมวล

$S:BM$  = อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล

$T_{gs}$  = อุณหภูมิดำเนินการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

$T_s$  = อุณหภูมิของไอน้ำ

$T_{ref}$  = อุณหภูมิของระบบเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ฝ่ายวิจัย สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ดำเนินงานวิจัยโครงการ “การผลิตพลังงานความร้อนจากชีวมวลมาประยุกต์ใช้” ในช่วงเวลา 2 ปีที่ผ่านมา เพื่อหาแนวทางสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานภายในประเทศ ซึ่งที่ผ่านมาการดำเนินโครงการวิจัยในระยะปีแรกนั้นมุ่งเน้น การออกแบบ และทดลองระบบเตาเผาชีวมวล (biomass gasification) เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล เพื่อนำมาใช้งานด้านพลังงานความร้อน โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการหุงต้มแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) และการอบแห้ง เป็นต้น ผลการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมา นี้ เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำกิ่งไม้ หรือเศษไม้จามจู้รี ที่เป็นของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากการตกแต่งกิ่งไม้ เพื่อความปลอดภัยและสวยงามภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงก๊าซด้วยกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) ดังรูปที่ 1.1 เพื่อใช้งานภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเมื่อลองนำไม้จามจู้รีดังกล่าวมาวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่า ไม้จามจู้รีมีค่า High Heating Value 18.80 MJ/kg และ Volatile Matter 74.76%, Fixed Carbon 13.66%, Moisture Content 5.41% และ Ash 4.38% สามารถนำกิ่งไม้จามจู้รีที่เป็นของเสียมาทำการแปรรูปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้ เพื่อใช้ทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้มที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และคาดว่าจะสามารถประยุกต์ใช้สำหรับงานอื่นๆ ต่อไป เช่น การนำความร้อนจากก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มาผ่านเครื่องทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) เพื่อทำความเย็นสำหรับการถนอมผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น และจากการนำเศษไม้หรือกิ่งไม้จามจู้รีดังกล่าว มาทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification)



รูปที่ 1.1 การทำเชื้อเพลิงชีวมวลจากตัดกิ่งไม้จามจู้

การศึกษาโดยใช้เตาผลิตก๊าซชนิดแบบก๊าซไหลลงที่ทำการออกแบบและทดลองเบื้องต้น พบว่า ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถจุดติดไฟได้ดี ดังรูปที่ 1.2 แต่จะเห็นได้ว่าก๊าซที่ติดไฟมีเปลวไฟสีค่อนข้างจะเป็นสีส้ม แสดงให้เห็นว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกมาพร้อมกับก๊าซเชื้อเพลิง ถ้าได้เปลวไฟสีฟ้าจะแสดงว่ามีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนอยู่มากในก๊าซเชื้อเพลิง ปัญหาที่พบจากการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ยังคงมีสารปนเปื้อนอยู่มากไปใช้นั้น เช่น เมื่อนำไปใช้แทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า จะพบว่ามีคราบน้ำมันดิน (tar) ติดตามท่อส่งต่างๆ รวมถึงไปในระบบเครื่อง และเครื่องยนต์ที่ใช้จะมีอายุการใช้งานสั้นลง เป็นต้น การศึกษานี้สนใจที่จะกำจัดน้ำมันดิน (tar) ที่ปนเปื้อนออกมากับก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันของสารชีวมวลโดยใช้กระบวนการรีฟอร์มมิงของน้ำมันดิน (tar) ด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงให้มีคุณภาพสูงขึ้นเหมาะสมกับการนำมาใช้งานต่างๆ รวมถึงการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นหน่วยผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอนาคตอันใกล้ นอกจากนี้ในการกำจัดน้ำมันดินด้วยวิธีนี้ยังเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ในก๊าซเชื้อเพลิงอีกด้วย



รูปที่ 1.2 การจุดไฟติดของก๊าซเชื้อเพลิงจากกิ่งไม้จามจรี

โดยจะสนใจศึกษาการจำลองการออกแบบเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันของไม้จามจรี นำไปใช้ในการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้เข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือใช้เผาไหม้ให้ความร้อนสำหรับกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (กระบวนการเปลี่ยนแปลงสารชีวมวลที่มีสถานะของแข็ง ไปเป็นเชื้อเพลิงในสถานะก๊าซ) ซึ่งจะสามารถได้ก๊าซที่ประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ดังนั้นถ้าสามารถเปลี่ยนเป็น ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ให้ได้มากขึ้น ก็จะสามารถนำมาใช้ในการให้พลังงานที่สูงขึ้นได้ เพราะ  $H_2$  มีค่าความร้อนสูงกว่า  $CH_4$  ถึง 2.5 เท่าตัวซึ่งการที่จะเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ นั้น มีหลายปฏิกิริยาที่สามารถใช้ได้ แต่ในที่นี้สนใจการเปลี่ยนแปลงของก๊าซเชื้อเพลิงด้วยน้ำ เพราะสามารถผลิตให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) มากที่สุดเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาอื่น และยังมีโอกาสเกิดตะกอนของคาร์บอนน้อยที่สุดในเตาปฏิกรณ์ด้วย นอกจากนั้นในกระบวนการผลิตจะมี ีเถ้า (Ash) จากการเผาไหม้ และน้ำมันดิน (Tar) เกิดขึ้นซึ่งทำให้ต้องมีหน่วยกำจัดเพิ่มเติม โดยระบบแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ จะมีไซโคลน (Cyclone) ดักฝุ่นที่ออกมาจากเตาผลิตก๊าซ และยังต้องผ่านตัวกรองอีกรอบ และระบบกำจัดน้ำมันดินใช้หอลดความเย็น (Cooling Tower) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดักจับน้ำมันดินได้ดี แต่จะมีของเสียออกมาจำนวนมาก นั่นคือน้ำที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันดินออกมาด้วย ซึ่งจะต้องมีหน่วยกำจัดน้ำเสียเพิ่มเติมอีก

ดังนั้นในการวิจัยนี้จะศึกษาโดยการจำลองสภาพการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล เพื่อใช้ในการพัฒนา ออกแบบเตาผลิตก๊าซให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นให้เหมาะกับการเอาไปใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปจะมี หน่วยจัดการต่างๆ เหล่านี้ (ไซโคลนดักฝุ่น, หน่วยกรองแบบหยابและแบบละเอียด และ หน่วย เปลี่ยนแปลงสารประกอบไฮโดรคาร์บอน) เป็นหน่วยแยกออกมาจากต่างหาก ดังนั้นถ้าเราสามารถ ออกแบบและพัฒนาเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้ก็จะสามารถลดขนาดหรือไม่ต้องใช้ หน่วยจัดการปัญหาต่างๆ เหล่านี้ได้ ทำให้ระบบการผลิตก๊าซมีขนาดที่กะทัดรัดมากยิ่งขึ้น และยัง สามารถลดภาระทางด้านพลังงานที่ต้องนำมาใช้กับหน่วยต่างๆ ได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาและออกแบบเตาผลิตก๊าซ ระบบเก็บกักเก็บภายในเตาผลิตก๊าซ และ หน่วยเปลี่ยนแปลงสารโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเตาโดยอาศัยความร้อนที่เกิดขึ้นจากส่วนเผาไหม้ เพื่อให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสูง และปริมาณน้ำมันดินต่ำ ซึ่งก๊าซ เชื้อเพลิงที่จะมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในอุปกรณ์ผลิตพลังงานต่างๆ ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและออกแบบระบบสำหรับลดน้ำมันดินและเพิ่มศักยภาพการผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซ เชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) ของชีวมวล รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ และออกแบบระบบที่รวมหน่วยทั้งสองเข้าด้วยกันโดยมีการใช้พลังงานภายในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตการศึกษา

1. ทบทวนวรรณกรรมทางวิชาการ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล และการเพิ่ม ประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง
2. ศึกษาทางทฤษฎี และวารสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับชนิดของปฏิกิริยา ที่ใช้ในการเปลี่ยนก๊าซ เชื้อเพลิงต่างๆ ให้เป็นก๊าซไฮโดรเจน
3. ศึกษาทางทฤษฎีของความเป็นไปได้ทางพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้น กับพลังงานความร้อนที่ ต้องการของหน่วยต่างๆ ในเตาผลิตเชื้อเพลิง

4. ศึกษาทางทฤษฎีพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาในเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง และหน่วยแปรสภาพน้ำมันดินด้วยไอน้ำ เพื่อพิจารณาเปรียบพลังงานความร้อนที่ต้องการใช้ของหน่วยแปรสภาพน้ำมันดิน กับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน และพิจารณาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น และก๊าซอื่นๆ

6. หลังจากได้ผลการศึกษาทางทฤษฎีพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาทั้งหมด และผลการศึกษาเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้ว จึงนำมาพัฒนาเตาผลิตก๊าซที่สามารถอาศัยพลังงานความร้อนภายในระบบตามที่ได้มีการศึกษาข้างต้นแล้ว เพื่อเตรียมทำการทดลอง นำผลที่ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการศึกษาดำเนินไป

7. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์เขียนสรุปเป็นเล่มรายงาน
8. จัดทำร่างรายงานฉบับสมบูรณ์
9. แก้ไขรายงานฉบับสมบูรณ์และจัดส่งรายงาน

#### 1.4 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาเตาผลิตก๊าซจากชีวมวลที่สามารถใช้พลังงานความร้อนภายในเตาผลิตก๊าซมาใช้เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและลดปริมาณน้ำมันดิน โดย ศึกษาทางทฤษฎีของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน ของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ที่เกิดจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน มาให้พลังงานความร้อนกับหน่วยแปรสภาพน้ำมันดิน (โดยพิจารณาจากตัวแทนของน้ำมันดิน เช่น ไพรีน ฟีนอล แนฟทาลีน เป็นต้น) ด้วยไอน้ำเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิง ไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน และหน่วยผลิตไอน้ำ โดยพิจารณาถึงปริมาณที่เปลี่ยนแปลงของน้ำมันดิน และ ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสำคัญ ที่มีผลจากภาวะดำเนินการต่างๆ เช่น ปริมาณหรือสัดส่วนของ อากาศและไอน้ำ ที่ป้อนเข้าเตาผลิตก๊าซ ผลของอุณหภูมิของการดำเนินปฏิกิริยา แก๊สซิฟิเคชัน และการแปรสภาพน้ำมันดินด้วยไอน้ำ และ อุณหภูมิของไอน้ำ และพิจารณาวิเคราะห์ถึงพลังงานความร้อนทั้งหมดภายในระบบ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. นำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาอุปกรณ์เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถลดขนาดและจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ทำให้ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้สะอาดขึ้น

2. นำผลงานการทดลองและวิเคราะห์ เตาผลิตก๊าซแบบใหม่ มาเป็นต้นแบบในการใช้และวิจัยต่อไปในมหาวิทยาลัย
3. นำผลงานการทดลองและวิเคราะห์ เตาผลิตก๊าซแบบใหม่ ไปตีพิมพ์เป็นบทความวิชาการ
4. นำผลงานการทดลองและวิเคราะห์ เตาผลิตก๊าซแบบใหม่ ไปจดสิทธิบัตร

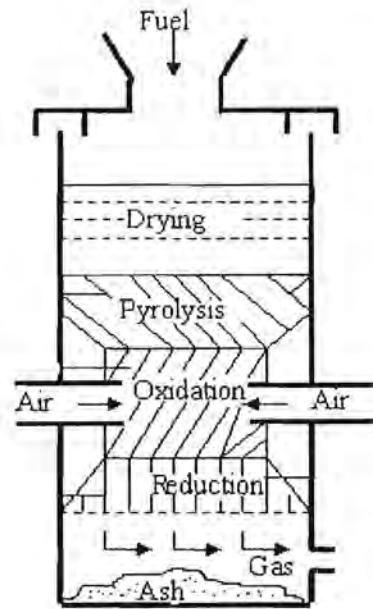


## บทที่ 2

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษานี้ได้สนใจศึกษา กระบวนการผลิตแบบก๊าซซิฟิเคชันจากสารชีวมวล เพราะพลังงานทดแทนแบบนี้ สามารถจัดหาได้ง่าย ในประเทศที่กำลังพัฒนาและเป็น ประเทศกสิกรรม อย่างเช่น ประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไม่นับว่าเป็นสารชีวมวลที่ให้พลังงานความร้อนมากกว่าสารชีวมวลประเภทอื่น เมื่อเทียบต่อน้ำหนักสารที่ใช้จำนวนที่เท่ากัน ดังนั้นในการวิจัยและพัฒนาครั้งนี้ ได้ศึกษาโดยใช้กิ่งไม้ของต้นจามจุรี เป็นตัวแทนการศึกษาของชีวมวลในประเทศไทย

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากสารชีวมวลมีการศึกษาหลากหลายกันในทุก ด้านชนิดของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่เป็นทั้งแบบเบดนิ่ง (Fixed bed) และแบบเบดเคลื่อนที่ได้ (Moving bed and Fluidized bed) [1-3] แต่ลักษณะเตาที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ เตาแบบก๊าซไหลลง (Downdraft Gasifier) ซึ่งเป็นเตาที่ป้อนเชื้อเพลิง ทางด้านบนของเตาส่วนอากาศจะป้อนเข้ากลางเตาสู่บริเวณชั้นของการเผาไหม้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนได้  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ไหลลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนที่อยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย คือ ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนได้ก๊าซเชื้อเพลิงออกมาทางด้านล่างของเตา ในขณะที่เดียวกันชั้นของเชื้อเพลิงแข็ง คือ ชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis) และ ชั้นลดความชื้น (Drying Zone) ที่อยู่ด้านบนภายในเตาเหนือบริเวณการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน เนื่องจากมีปริมาณ  $\text{O}_2$  อยู่จำกัดจะเกิดการระเหยความชื้นในชั้นลดความชื้น เกิดการกลั่นสลายในชั้น ชั้นกลั่นสลาย ได้สารระเหย เนื่องจากเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถดำเนินการได้โดยง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 เตาผลิตก๊าซจากชีวมวลแบบก๊าซไหลลง (Downdraft Gasifier)

(ที่มา: [www.ata.or.th/Ashram/ATApowerplant.html](http://www.ata.or.th/Ashram/ATApowerplant.html))

### 1) ชั้นเผาไหม้ (Oxidation zone)

ในบริเวณนี้คาร์บอนจะเผาไหม้กับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศในปริมาณจำกัด (Partial Combustion) ด้วยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ระหว่าง 900 – 1200 °C ความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นนี้ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในชั้นรีดักชันและชั้นกลั่นสลาย ผลผลิตหลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้คือ ความร้อน แก๊ส

### 2) ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone or Gasification Zone)



ก๊าซ CO<sub>2</sub> และไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้ในชั้นเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นรีดักชัน ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในชั้นนี้เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนก๊าซ CO<sub>2</sub> และไอน้ำ ให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ โดยก๊าซ CO<sub>2</sub> จะไหลผ่านคาร์บอนที่ร้อนและเกิด CO ดังสมการที่ (2.3) อุณหภูมิที่เหมาะสมในชั้นนี้อยู่ที่ประมาณกว่า 500 - 1000 °C

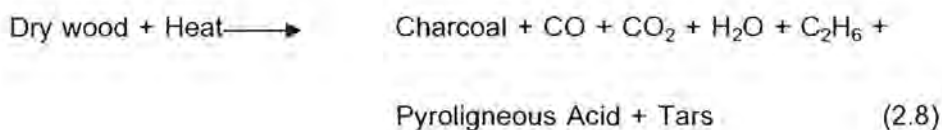


ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.3) เรียกว่า ปฏิกิริยาโบว์ดาร์ด (Boudouard Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณของ CO สามารถทำได้โดยฉีดไอน้ำร้อนเข้าไปซึ่งไอน้ำจะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ดังสมการที่ (2.4) ได้ก๊าซ CO และ H<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Water Gas Reaction ซึ่งก็เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C

สำหรับปฏิกิริยาที่ (2.5) จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500 - 600 °C ปฏิกิริยานี้ทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนใน Producer gas มีมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนของก๊าซสูงขึ้น แต่ถ้ามีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนนอกไซต์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนตามปฏิกิริยาที่ (2.6) เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Water Gas Shift Reaction ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซที่ได้อลดลง ปริมาณของไฮโดรเจนจะสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของโซนรีดักชันอยู่ประมาณ 700 °C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณไฮโดรเจนจะลดลงเรื่อยๆ แต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้น ภายใต้ความดันสูง H<sub>2</sub> อาจจะไปรวมตัวกับคาร์บอนและผลิต CH<sub>4</sub> ออกมาได้ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Methane Reaction ดังสมการที่ (2.7) โดยจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความดันสูงๆ และอุณหภูมิไม่สูงมากนัก

### 3) ชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone)

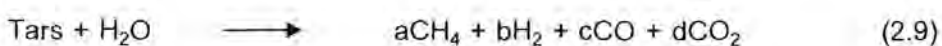
ในชั้นนี้เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากชั้นเผาไหม้ เพื่อสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงทำให้ได้สารระเหย (Volatile Matter) ต่างๆ ออกมา ซึ่งประกอบไปด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิบ ก๊าซที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้จะประมาณ 135 – 600 °C ของแข็งที่เหลืออยู่หลังกระบวนการนี้คือ คาร์บอนในรูปถ่าน (Fixed Carbon) ดังสมการที่ (2.8)



### 4) ชั้นลดความชื้น (Drying Zone)

ในชั้นนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ ความร้อนที่ได้รับมาจากชั้น Pyrolysis จะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในชีวมวลให้ออกมาในรูปของไอน้ำอุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ที่ประมาณ 100 – 135 °C

จะเห็นได้ว่าจากปฏิกิริยาที่ (2.8) จะมีน้ำมันดิน (Tars) ออกมา ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะกำจัดน้ำมันดิน [4-7] ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรเจนกับคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีมวลโมเลกุลสูง สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลงจนสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จากปฏิกิริยาการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง



ดังนั้นจะสามารถลดน้ำมันดินที่เกิดขึ้นได้ โดยเติมน้ำเข้าไปตอนร่วมเกิดปฏิกิริยาภายในเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง และยังสามารถเพิ่มปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิงได้ แต่ปริมาณน้ำที่เข้าไปต้องเหมาะสม เพราะปฏิกิริยาข้างต้นเป็นแบบดูดความร้อน ดังนั้นถ้าใส่น้ำมากเกินไปอุณหภูมิก็จะลดต่ำลงทำให้ไม่สามารถ เปลี่ยนน้ำมันดินไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ต้องการได้ และยังคงสนใจถึงปริมาณอากาศที่เข้าไปให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำที่เพิ่มเติมเข้าไปด้วย หลักการที่จะสามารถลดการเกิดน้ำมันดินจาก

กระบวนการการผลิต คือ การเพิ่มอุณหภูมิในเตาผลิตก๊าซ โดยให้อุณหภูมิสูงกว่า  $900^{\circ}\text{C}$  [4] และ การเพิ่มเติมน้ำเข้าไปในส่วนที่เกิดการสันดาป (Oxidation zone) [5, 6] Sun S. และคณะ (2009) ศึกษาการเพิ่มอากาศเข้าไปในเตาผลิตก๊าซ ในส่วนของชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) โดยหวังว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซได้ แต่ผลปรากฏในทิศทางตรงกันข้าม คือ ได้ผลของการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลต่ำลง (Carbon Conversion) ส่งผลให้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีปริมาณลดลง และที่สำคัญปริมาณน้ำมันดินกับสูงขึ้นอีกด้วย [7] โดยสารที่นิยมใช้ทดสอบเพื่อแทนน้ำมันดิน ซึ่งเป็นสารที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดหารวมกัน ในการศึกษาเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงตัวน้ำมันดินมีอยู่หลายสารด้วยกัน อาทิเช่น ฟีนอล เบนซีน ไพรีน และสารอโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น แต่ในการศึกษามีการใช้สารตัวแทนน้ำมันดินอยู่เพียง การทดลองละชนิด และมีผู้เสนอแนวความคิดถึงการใช้ สารประกอบที่เป็นตัวแทนของแต่ละกลุ่มของสารที่อยู่ในน้ำมันดินดังนี้  $\text{C}_7\text{H}_8$   $\text{C}_{10}\text{H}_8$   $\text{C}_{16}\text{H}_{10}$   $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$  มาใช้เป็นตัวแทนของน้ำมันดิน [8]

ส่วนการลดปริมาณน้ำมันดินหลังจากผ่านกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) ทำได้โดยผ่านก๊าซที่ได้ในหน่วยแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิต่ำลงน้ำมันดินจะอยู่ในสถานะของเหลว หรือ ผ่านก๊าซที่อุณหภูมิสูงเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reactor) ที่สามารถแตกสลายพันธะทางเคมี (Catalytic cracking) ของน้ำมันดิน (Tar) ให้มีขนาดโครงสร้างเล็กลง จนเหมาะสำหรับไปใช้ในการเผาไหม้ได้ โดย Li, J. และคณะ (2008) ได้ศึกษาถึงการนำ ตัวเร่งปฏิกิริยา Nano-NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มาใช้ในการลดปริมาณน้ำมันดินที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโซอยู่แล้วโดยระบบที่เตาผลิตก๊าซที่ใช้เป็นแบบก๊าซวังขึ้น ได้ผลว่าเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปร่วมด้วยนั้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดสามารถลดการเกิดน้ำมันดินได้ จากประมาณ 20% โดยน้ำหนักของชีวมวลที่ใส่เข้าไป เหลือเพียง 0.2-4% โดยน้ำหนัก และยังสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง โดยเฉพาะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเดิมประมาณ 18-19% โดยปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปเป็น 45-50% โดยปริมาตร ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา [9] ดังนั้นถ้าเราสามารถพัฒนาการนำ ตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้กับเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลลงที่ได้มีการศึกษาแล้วว่าให้ปริมาณน้ำมันดินน้อยกว่า เตาแบบก๊าซไหลขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้กับหน่วยต่อพ่วงต่างๆ ได้

นอกจากน้ำมันดินที่ต้องการกำจัดแล้วยังมีเศษเถ้าที่ต้องกำจัดด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงออกซิเดชันจะทำให้เกิดเถ้า Cummera, K.R. and Brownb, R.C., 2002 ได้รวบรวมเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง [10] ได้กล่าวถึงส่วนของการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้นโดยมีทั้งการใช้ ไชโคเนที่สามารถกำจัดเถ้าที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมโครเมตรได้ แต่โดยปกติจะมีเถ้าฝุ่นขนาด

เล็กกว่านี้ ดังนั้นจะต้องมีการติดตั้งชุดกรองเพิ่มอีกด้วย การศึกษาถึงการนำเชื้อเพลิงชีวภาพ มาใช้กับ เซลล์เชื้อเพลิง ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย [11-15] เช่น D.R. McIlveen-Wright และคณะ (2000) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบการนำปฏิกิริยาก๊าซซิพีเคซ์เข้ามาใช้ร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิง 2 ชนิดคือแบบ มอลท์ ทอลคาร์บอนเนต (MCFC) และ กรดฟอสฟอริก (PAFC) พบว่าประสิทธิภาพของ MCFC มีมากกว่า เล็กน้อย [11] H. Morita และคณะ (2004) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการนำกระบวนการ ผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) มาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก 2 วิธี คือ ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วย เครื่องปั่น กังหันด้วยก๊าซ (Gas-Turbine) และ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดมอลท์ทอลคาร์บอนเนต (MCFC) พบว่า ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแบบที่ติดกับ MCFC มีมากกว่า [12] C.A.C. Sequeira และคณะ (2007) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารชีวภาพ โดยได้สรุปและรวบรวมวิธีการเพื่อให้ ได้มาซึ่งก๊าซไฮโดรเจน ได้แก่ การหมัก (Fermentation) การผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) และการ กลั่นสลาย (Pyrolysis) ของสารที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ (carbonaceous residues) (รวมเรียกว่า FGPCR) และชนิดที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงที่จะสามารถนำมาใช้ คือเซลล์เชื้อเพลิงที่ดำเนินการได้ ที่อุณหภูมิสูง จะมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงประเภทที่กล่าวมาเบื้องต้น [13] Ph. Hofmann และคณะ (2008) ได้ศึกษาถึงผลของการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงโดยตรงหลังจากกระบวนการผลิตก๊าซ เชื้อเพลิง (Gasification) เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง โดยศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกันระหว่าง ระบบที่มีหน่วยเปลี่ยนแปลงน้ำมันดิน กับที่ไม่มีหน่วยนี้ เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ชนิดออกไซด์แข็ง ทางด้านแอโนดที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-GDC พบว่าไม่มีผลแตกต่างกัน แต่การศึกษานี้ ศึกษาเพียงในระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้นจึงยังไม่เห็นผลมากนัก แต่อีกตัวแปรที่สำคัญอีกตัวคือฝุ่นเถ้าที่มี ขนาดอยู่ระหว่าง 5-10 ไมโครเมตร จะไปอุดตันด้านเยื่อเลือกผ่าน ทำให้มีการเคลื่อนที่ผ่านของไอออน ลดน้อยลง เป็นผลสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำลง [14] และ Th. Seitarides และ คณะ (2008) ศึกษาและรวบรวมการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) จากสารชีวมวลด้วยกันกับเซลล์เชื้อเพลิง [15]

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มไอน้ำเข้าไป ร่วมในการเกิดปฏิกิริยาร่วมด้วย [16-19]. V. Skoulou และคณะ (2010) [16] ศึกษาถึงผลกระทบของ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ และน้ำมันดิน เมื่อเพิ่มไอน้ำอุณหภูมิสูง ในปฏิกิริยา แก๊สซิพีเคซ์ของชีวมวล พบว่าสามารถลดน้ำมันดินได้ แต่การ เพิ่มไอน้ำกลับทำให้ก๊าซไฮโดรเจนลดน้อยลง ทั้งนี้คณะผู้วิจัย ได้สรุปว่า ในการทดลองใช้อุณหภูมิสูง 850 และ 950 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับน้ำมันดิน คงจะเกิดจากการสลายพันธะที่อุณหภูมิสูง (Thermal cracking) จะสังเกตได้จาก ปริมาณของ CO ที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจะอาจเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้

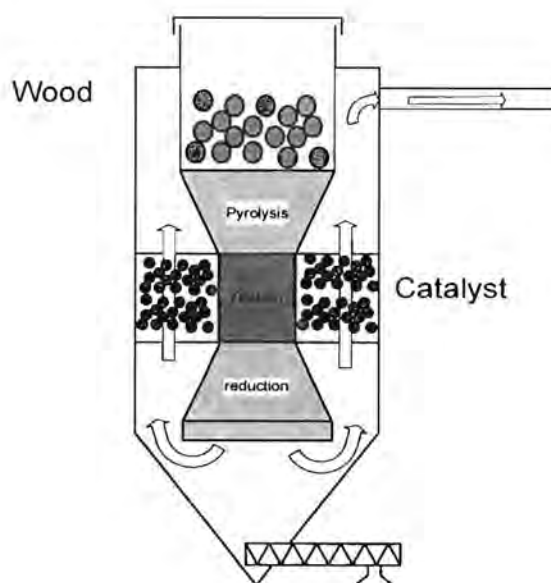


ไฮโดรเจนสูงขึ้นแต่ปฏิกิริยานี้เป็นแบบคายพลังงาน จะเกิดได้ยากที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดลองนี้ S. Koppatz และคณะ (2009) [17] ศึกษาการเพิ่มตัวจับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใน ของเตาผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไธซ์ร่วมกับไอน้ำ โดยใช้ตัวดูดจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพื่อเป็นการรบกวนสมดุลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ได้ผลว่าสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนได้มากถึง 50% โดยปริมาตรและน้ำมันดินลดต่ำลงได้ P. Lv และคณะ (2007) [18] ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ ออกซิเจนและไอน้ำต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสังเคราะห์ ( $H_2$  และ CO) และพลังงานที่ใช้ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของออกซิเจนต่อไอน้ำ คือ 0.7-0.9 ซึ่งจะได้อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ 1.06-1.27 นอกจากนี้จะมีการศึกษาถึงไอน้ำอุณหภูมิสูงแล้วยังมีการศึกษาถึงการใช้ supercritical water ในปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน [19-28] ด้วย Y. Lu และคณะ (2010) [19] ศึกษาการผลิตไฮโดรเจน จากกลูโคสซึ่งใช้แทนชีวมวล ด้วย supercritical water บนตัวเร่งปฏิกิริยา  $Ni/Al_2O_3$  และ  $Ni/GeO_2-Al_2O_3$  สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ความสามารถในการผลิตจะมีค่ามากกว่ามาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกันเองระหว่างสองตัวเร่งปฏิกิริยาข้างต้น  $Ni/GeO_2-Al_2O_3$  จะให้ผลการผลิตไฮโดรเจนดีกว่าเล็กน้อย เนื่องจาก Ge สามารถลดการก่อตัวของคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้โลหะ Ni ที่มีผู้สนใจในการศึกษาเป็นจำนวนมากแล้ว [20-23] ยังมีผู้สนใจถึงโลหะมีตระกูลเช่น Pt Pd Ru Rh [20, 24-25] นอกจากนี้ยังรวมไปถึง Activated Carbon [26-27] และโลหะออกไซด์ [28] มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใน ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วย supercritical water

นอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนด้วยไอน้ำ และไอน้ำยิ่งยวด supercritical water แล้ว ยังมีผู้ศึกษาถึงการเพิ่มความดันในระบบแก๊สซิฟิเคชันด้วย [29-30] J. Feroso [29] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันร่วมกันระหว่างชีวมวลและถ่านหิน โดยการเปลี่ยนชนิดและควบคุมความดัน ได้ผลสรุปว่าปฏิกิริยาร่วมกันนั้นเกิดก๊าซไฮโดรเจนได้ปริมาณมากที่ความดัน 15 atm T.R. McLendon และคณะ (2004) [30] ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงร่วมกัน และใช้ความดันสูงในการดำเนินปฏิกิริยา แก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไดส์เบด โดยใช้ความดันสูงที่ 3.03 MPa

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการลดน้ำมันดิน โดยอาศัยความพลังงานความร้อน ภายในเตาผลิตเชื้อเพลิงนั้น โดยศึกษาปริมาณอากาศที่ใช้ และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับการผลิตไฮโดรเจนและการลดน้ำมันดิน โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะทำการออกแบบเตาผลิตก๊าซ ที่สามารถนำพลังงานความร้อนของส่วนที่ได้จากช่วงออกซิเดชัน มาใช้ประโยชน์

กับการเพิ่มหน่วยเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงและน้ำมันดินให้เป็นไฮโดรเจน โดยลักษณะของเตาที่จะนำมาพิจารณาจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2

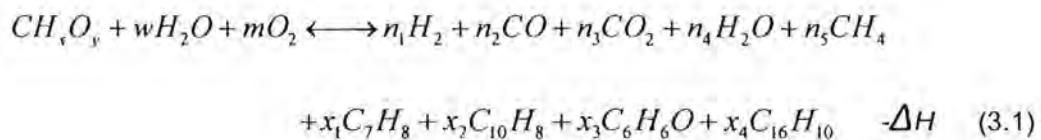


รูปที่ 2.2 รูปแบบเตาผลิตก๊าซที่เสนอในงานวิจัยนี้ซึ่งจะมีการดักเถ้า ลดน้ำมันดิน และเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาทางด้านจำลองสภาวะการณ์ ของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของ สารชีวมวล (Biomass Gasification) (สมการที่ 3.1) และการกำจัดน้ำมันดินด้วยการเกิดปฏิกิริยาการ เปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ (Tar Steam Reforming) (สมการที่ 3.2) เนื่องจากปฏิกิริยาทั้งสองข้างต้นเป็น ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) และปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้ได้อาศัยหลักของความต้องการพลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน มาใช้โดยการ นำทั้งสองปฏิกิริยามาดำเนินการร่วมกัน



โดยชีวมวลที่ใช้ในการพิจารณามีคุณสมบัติตาม ตารางที่ 3.1 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างทาง เคมีอย่างง่าย ได้ดังนี้  $CH_{1.79}O_{0.83}$  (ละ  $N \sim 1.3 \times 10^{-3}$ )

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล

<b>Proximate Analysis</b>	
Volatile Matter	74.76 wt%
Fixed Carbon	13.66 wt%
Ash	4.38 wt%
Moisture Content	5.41 wt%
High Heating Value	18.87 MJ/kg
<b>Ultimate analysis</b>	
Carbon, C	44.24 wt%
Hydrogen, H	6.548 wt%
Nitrogen, N	0.071 wt%
Oxygen, O	49.141 wt%

เมื่อพิจารณา การกำจัดน้ำมันดินด้วยการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ (Tar Steam Reforming) (สมการที่ 3.2) โดยพิจารณาตัวแทนของน้ำมันดินตาม บทความของ D. Singh และคณะ (2005) [8] ที่พิจารณา สารเคมี 4 ชนิดเป็นตัวแทนดังนี้

- โทลูอีน (Toluene:  $C_7H_8$ ) ใช้เป็นตัวแทนสารจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดมีเบนซีนอยู่ 1 วง
- แนฟทาลีน (Naphthalene:  $C_{10}H_8$ ) ใช้เป็นตัวแทนสารจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดมีเบนซีนอยู่ 2 วง
- ไพรีน (Pyrene:  $C_{16}H_{10}$ ) ใช้เป็นตัวแทนสารจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดมีเบนซีนอยู่ 3 วง ขึ้นไป



- ฟีนอล (Phenol:  $C_6H_6O$ ) ใช้เป็นตัวแทนสารจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิด ฟีนอลิก และโซ่ปิดอื่นๆ

โดยสมการทางเคมีของการกำจัดน้ำมันดินด้วยการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ เมื่อพิจารณาใช้สารทั้ง 4 ชนิดนี้แทน (สมการที่ 3.3-3.6) รวมทั้ง ปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำของมีเทน (Methane Steam Reforming) (สมการที่ 3.7) และ ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water-gas Shift Reaction) (สมการที่ 3.8) ดังนี้



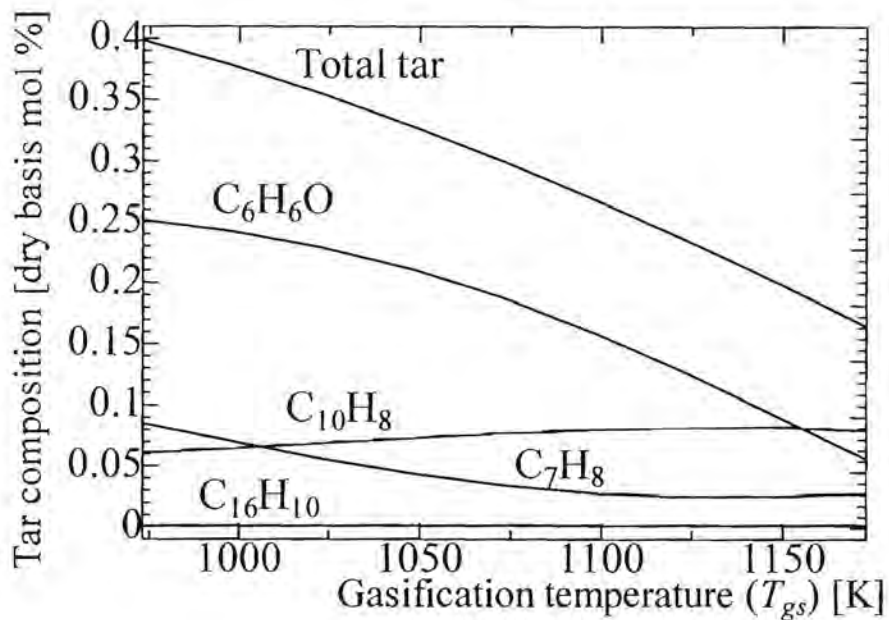
และปริมาณของตัวแทนน้ำมันดินทั้ง 4 ชนิดพิจารณาได้จาก บทความของ C. Brage และคณะ (1996) โดยปริมาณของสารประกอบในน้ำมันดินแสดงดังตารางที่ 3.2 [31]

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของสารต่างๆในน้ำมันดิน ที่อุณหภูมิการดำเนินการ 700-900°C

Analyte	700°C	800°C	900°C
Phenol	1.069	0.941	0.753
<i>o</i> -Cresol	0.929	0.737	0.300
<i>m</i> -Cresol	1.140	0.917	0.503
<i>p</i> -Cresol	0.739	0.545	0.276
2,5-Xylenol	0.340	0.303	0.137
3,4-Xylenol	0.260	0.184	0.077
2,6-Xylenol	0.260	n.d. <sup>a</sup>	0.174
<i>o</i> -Ethylphenol	0.353	0.381	0.240
Toluene	1.125	0.274	0.538
<i>o</i> -Xylene	0.580	0.356	0.653
Indene	0.649	0.628	1.425
Naphthalene	0.345	0.494	1.722
2-Methylnaphthalene	0.242	0.277	0.456
1-Methylnaphthalene	0.164	0.187	0.289
Biphenyl	0.044	0.053	0.125
Acenaphthylene	0.208	0.285	n.d.
Fluorene	0.119	0.149	0.276
Phenanthrene	0.065	0.100	0.368
Anthracene	0.017	0.042	0.107
Pyrene	0.049	0.038	0.140
Pyridine	0.168	n.d.	n.d.
2-Picoline	0.041	n.d.	n.d.
3-Picoline	0.027	n.d.	n.d.
2-Vinylpyridine	0.054	n.d.	n.d.
Quinoline	0.055	n.d.	n.d.
Isoquinoline	0.014	n.d.	n.d.
2-Methylquinoline	0.009	n.d.	n.d.

<sup>a</sup> Not determined

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาผลรวมของแบ่งกลุ่มตามบทความทั้งสอง กล่าวคือนำผลรวมของสารประกอบที่เป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มี 1 วงของเบนซีนเป็นองค์ประกอบ มาพิจารณาเป็นปริมาณของ โทลูอิน ที่จะนำไปใช้ในแบบจำลองสภาวะการณ ต่อไป โดยการศึกษานี้ได้ศึกษาผลดังแสดงในรูปที่ 3.1

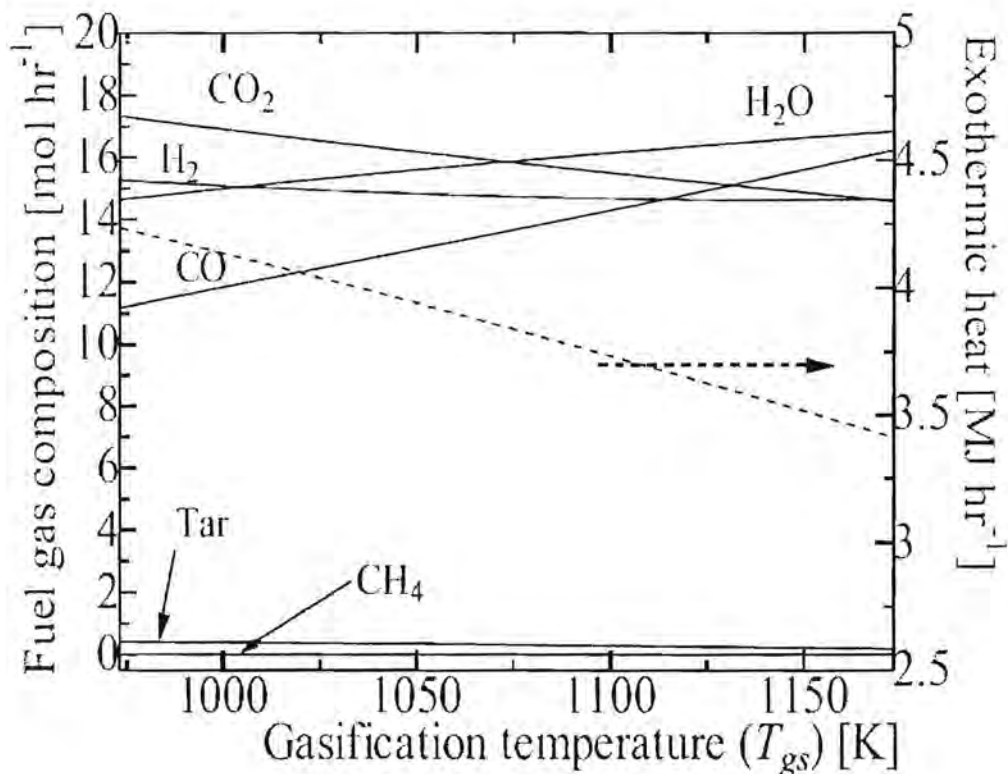


รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของตัวแทนน้ำมันดินที่ได้จากการพิจารณา [8, 31]

ซึ่งผลที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลขาเข้า ในการทำสมดุลมวลสารกับ ปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันของ สารชีวมวลโดยพิจารณาทางอุณหพลศาสตร์ของปฏิกริยา (Thermodynamics Equilibrium) โดย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแก๊สซิฟิเคชัน ดังแสดง



จากการพิจารณาแบบจำลองสภาวะการณของปฏิกริยาโดยใช้ สมการที่ 3.1 และ 3.7 ถึง 3.12 มาพิจารณาหาปริมาณของสารต่างๆ ณ อุณหภูมิต่างๆ โดยสมมติให้ปฏิกริยาทั้งหมดเป็น ปฏิกริยาที่ สมดุล (Equilibrium Reaction) ณ อุณหภูมิต่างๆ และรวมกับตัวแทนน้ำมันดิน ที่ใช้ข้อมูลจากการ ทดลองมาเป็นข้อมูลป้อนเข้า โดยสมการแบบจำลองสภาวะการณทั้งหมดอยู่บนพื้นฐานของการสมดุล พลังงาน (Energy Balance) และสมดุลมวลสาร (Mass Balance) โดยข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ของ สารเคมีต่างๆ พิจารณาได้จาก Perry's Handbook of Chemical ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.2 และค่า มาตรฐานในการดำเนินงานแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของสารต่างๆ และ พลังงานความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยา ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ

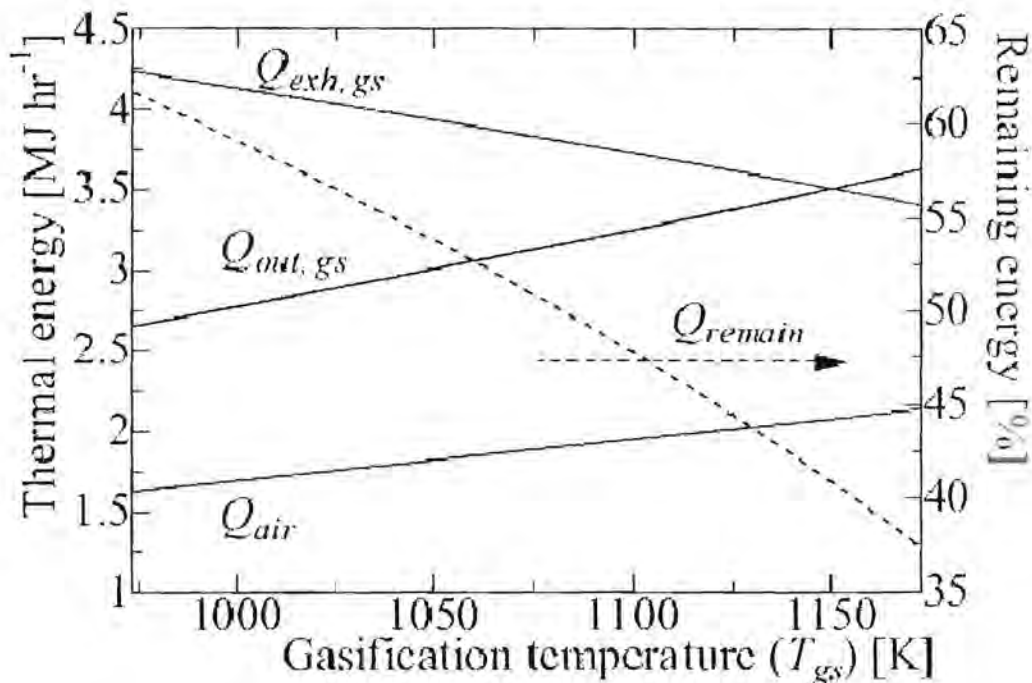
ตารางที่ 3.3 ค่ามาตรฐานในการดำเนินการของแบบจำลอง

ปัจจัย	ค่า [หน่วย]
ชีวมวลป้อนเข้า	1 [kg hr <sup>-1</sup> ]
อุณหภูมิของเตาแก๊สซิฟิเคชัน ( $T_{gs}$ )	973-1173 [K]
อัตราส่วนโดยโมลของ O <sub>2</sub> กับชีวมวล ( $O_2:BM$ )	0.5 [-]
อุณหภูมิของไอน้ำ ( $T_{st}$ )	673-973 [K]

เมื่อพิจารณาผลจากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน สูงขึ้นปริมาณของ CO และ น้ำ สูงขึ้นตามไปด้วยอันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารชีวมวล แต่จะเห็นได้

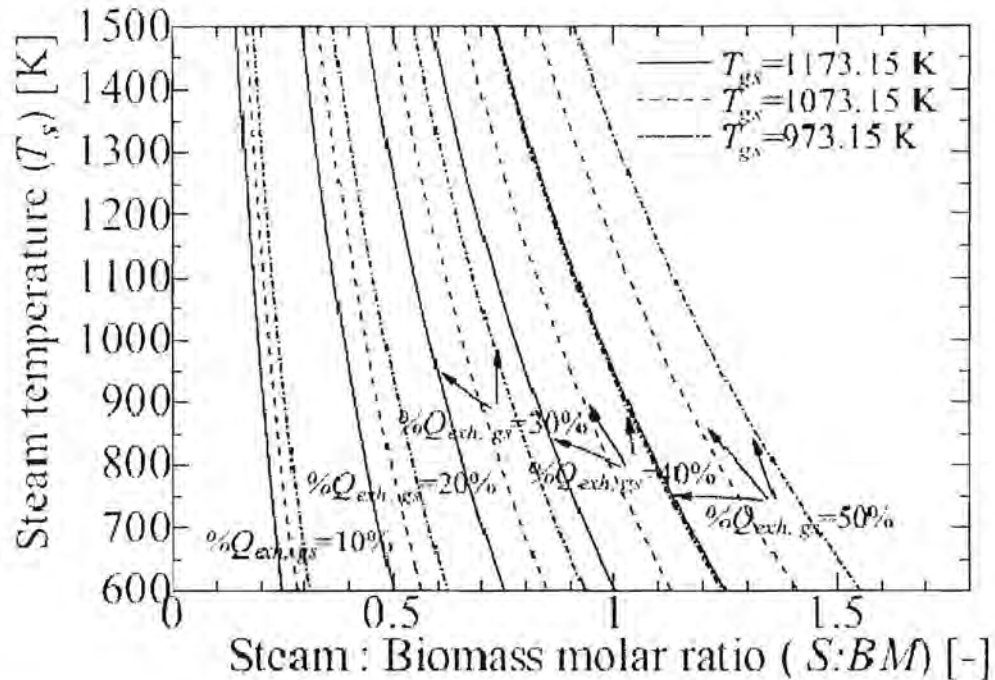
ว่า  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2$  ลดลงอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของ Water-gas Shift Reaction ที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน กล่าวคือ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง ทำให้ปริมาณของ  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2$  ลดลง และเมื่อพิจารณาดูพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเตาแก๊สซิไฟเออร์ จะพบว่า มีพลังงานน้อยลงจากเหตุผลเช่นเดียวกันกับข้างต้น

การพิจารณาพลังงานของระบบทั้งหมดซึ่งประกอบไปด้วย พลังงานความร้อนที่ต้องการของหน่วยแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ ( $Q_{\text{air}}$ ) พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเคชัน ( $Q_{\text{exh, gs}}$ ) และพลังงานที่ออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิง ( $Q_{\text{out, gs}}$ ) เมื่อพิจารณาพลังงานทั้งสามชนิดข้างต้น จะพบว่าพลังงานที่เหลือ ( $Q_{\text{remain}}$ ) ที่สามารถนำไปใช้กับระบบต่างๆ เพิ่มเติมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3



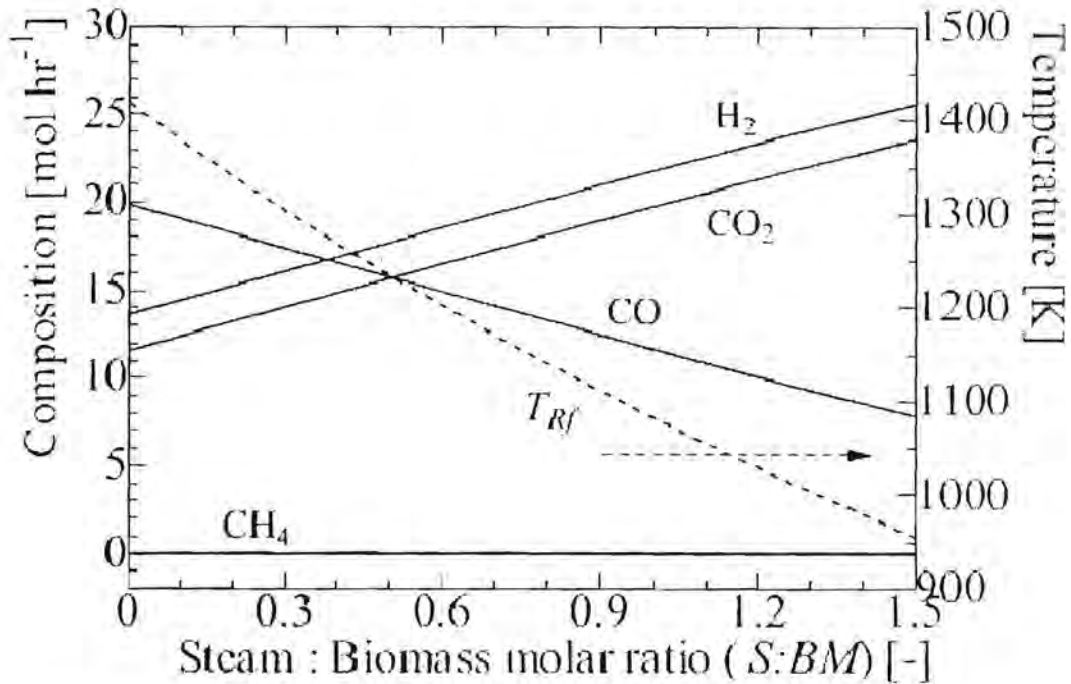
รูปที่ 3.3 พลังงานความร้อนจากเตาแก๊สซิไฟเออร์ และพลังงานที่เหลือสำหรับให้กับหน่วยผลิตไอน้ำและหน่วยเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน

จากรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณาพลังงานที่เหลือเป็นหน่วยร้อยละ ของพลังงานที่ออกมาจากเตาแก๊สซิไฟเคชัน ทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีพลังงานที่เหลือ ลดลง อันเนื่องมาจากต้องใช้พลังงานในการรักษาอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานมากขึ้นจึงทำให้พลังงานที่เหลือนั้นเมื่อเทียบกับทั้งหมดแล้วมีพลังงานที่ลดลง โดยพลังงานที่เหลือนั้นจะนำไปให้กับระบบผลิตไอน้ำ และระบบเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน และเมื่อนำพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งไปให้กับระบบผลิตไอน้ำจะได้ผลตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ ไอน้ำต่อสารชีวมวล (S:BM) ที่มีผลต่ออุณหภูมิ และการใช้พลังงานจากพลังงานที่

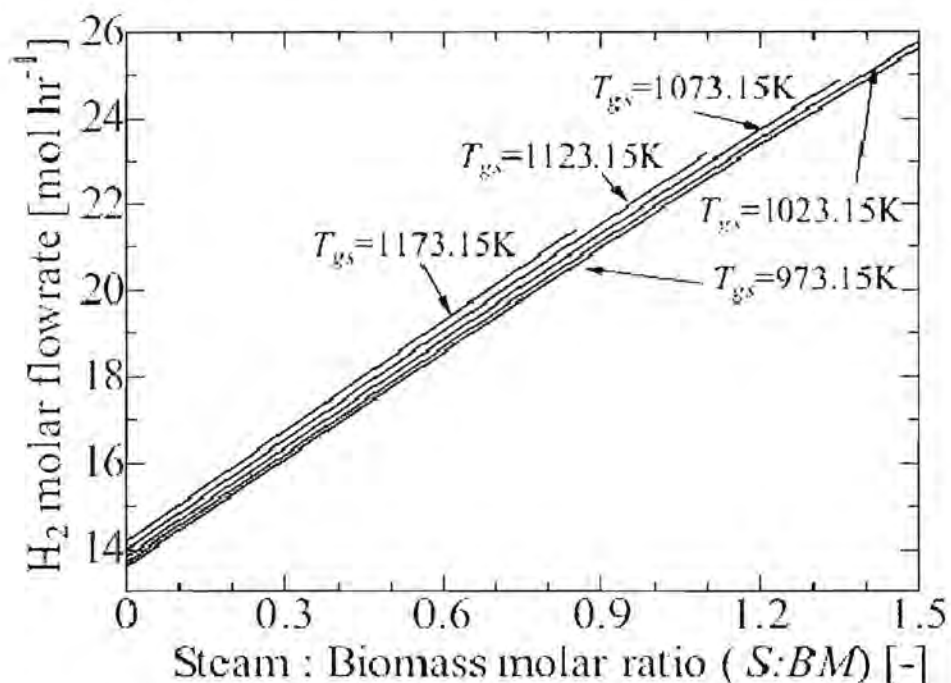
จากรูปที่ 3.4 จะพิจารณาได้ว่า อุณหภูมิที่ได้ของไอน้ำจะลดต่ำลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล และยังเพิ่มสัดส่วนของพลังงานที่เหลือให้แก่วัสดุผลิตไอน้ำก็จะพบว่าจะได้อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวลเพิ่มขึ้น เมื่อให้พลังงานร้อยละ 50 ของพลังงานที่เหลือจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ที่อุณหภูมิดำเนินการของแก๊สซิฟิเคชัน 973.5 เคลวิน และที่ อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล 1.5 จะทำให้ได้อุณหภูมิของไอน้ำประมาณ 650 เคลวิน เป็นต้น และผลของการดำเนินการเปลี่ยนรูปน้ำมันด้วยไอน้ำแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ปริมาณสารต่างๆที่ได้ และอุณหภูมิของระบบแปรรูปน้ำมันดิน ที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล 0-1.5 ที่อุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชัน 973.15 เคลวิน

จากรูปที่ 3.5 หน่วยเปลี่ยนแปลงน้ำมันดินจะใช้พลังงานที่เหลือจากการผลิตไอน้ำ มาให้กับระบบเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน จะเห็นได้ว่าปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จาก 13.61 โมลต่อชั่วโมง ที่ออกมาจากเตาแก๊สซิฟิเคชัน เพิ่มขึ้นเป็น 25.62 โมลต่อชั่วโมง หรือประมาณ 2 เท่า เมื่อเข้าสู่ระบบเปลี่ยนรูปน้ำมันดินด้วยไอน้ำ ที่อัตราส่วนโดยโมลไอน้ำต่อสารชีวมวล 1.5 และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก็เพิ่มขึ้นตามด้วย และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Water-gas Shift Reaction เปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยไอน้ำ ให้กลายเป็น ก๊าซไฮโดรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณของน้ำมันดินที่มีก่อน เข้าสู่ระบบเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน ได้ถูกกำจัดทั้งหมดไม่มีออกมาหลังจาก กระบวนการเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน และผลของอุณหภูมิลดต่ำลง ก็เป็นตัวยืนยัน เพราะทั้งปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน และ Water-gas Shift Reaction เป็นปฏิกิริยาที่ดูดความร้อนทั้งสิ้น และรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิต่อการผลิตไฮโดรเจน





รูปที่ 3.6 ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน ต่ออัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล และ อุณหภูมิของไอน้ำ 673.15 เคลวิน

จากรูป 3.6 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดำเนินการของแก๊สซิฟิเคชัน ณ ที่อัตราส่วนโดยโมลของไอน้ำต่อสารชีวมวล จะสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนได้ แต่มีข้อจำกัดของปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่ไม่ต่อเนื่อง และที่อุณหภูมิดำเนินการของแก๊สซิฟิเคชัน 973.15 เคลวินจะสามารถผลิตไอน้ำได้มากที่สุดเนื่องจากมีพลังงานที่เหลือมากที่สุด



## บทที่ 4

### สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการปรับปรุงระบบก๊าซซิฟิเคชันของสารชีวมวลสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงสะอาด โดยการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล และการเปลี่ยนรูปของน้ำมันดิน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน แล้วจะพบว่าปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำมันดินลดลง แต่ กลับมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Water-gas Shift Reaction ซึ่งจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน องค์ประกอบหลักของน้ำมันดินที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำคือ ฟีนอล ( $C_6H_6O$ ) และสามารถลดปริมาณได้ที่อุณหภูมิสูง และการพิจารณาพลังงานภายในระบบเตาแก๊สซิไฟเออร์พบว่ามีพลังงานเหลือใช้เพียงพอต่อการกำจัด หรือเปลี่ยนรูปน้ำมันดิน ให้ไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน เพิ่มมากขึ้นได้โดยจากผลการศึกษาแบบจำลองพบว่าสามารถกำจัดน้ำมันดินได้ร้อยละ 100 และมีปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า (13.61 โมลต่อชั่วโมง เพิ่มเป็น 25.62 โมลต่อชั่วโมง)

### บรรณานุกรม

- [1] I. Narváez, A. Orío, M.P. Aznar, and J. Corella, Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. Effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas, *Ind. Eng. Chem. Res.* (1996) 35 (7), 2110–2120.
- [2] X. T. Li, J. R. Grace, C. J. Lim, A. P. Watkinson, H. P. Chen, J. R. Kim, Biomass gasification in a circulating fluidized bed, *Biomass and Bioenergy* (2004) 26 (2), 171-193.
- [3] L. Shen, Y. Gao and J. Xiao, Simulation of hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds, *Biomass and Bioenergy* (2008) 32 (2), 120-127.
- [4] Y.H. Lai, M.X. Lu, C.Y. Ma and M.H. Shi, Study on the influence of throat structure on reducing tar content of two-stage biomass gasification reactor, *Acta Energiæ Solaris Sinica* (2004) 25, 547-551.
- [5] A. Olivares, M.P. Aznar, M.A. Caballero, J. Gil, E. Frances and J. Corella, Biomass gasification: produced gas upgrading by in-bed use of dolomite, *Ind. Eng. Chem. Res.* (1997) 36, 5220-6.
- [6] F. Pinto, C. Franco, R.N. Andre, C. Tavares, M. Dias and I. Gulyurtlu, Effect of experimental conditions on co-gasification of coal, biomass and plastics wastes with air/steam mixtures in a fluidized bed system, *Fuel* (2003) 82, 1967-76.
- [7] S. Sun, Y. Zhao, H. Tian, F. Ling and F. Su, Experimental study on cyclone air gasification of wood powder, *Bioresource Technology* (2009) 100, 4047–4049.
- [8] D. Singh, E. Hernández-Pacheco, P. N. Hutton, N. Patel and M.D. Mann, Carbon deposition in an SOFC fueled by tar-laden biomass gas: a thermodynamic analysis, *J. Power Sources*, 142 (2005) 194-199.

- [9] J. Li, R. Yan, B. Xiao, D. Teeliang and L. Du, Development of Nano-NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst to be Used for Tar Removal in Biomass Gasification, *Environ. Sci. Technol.* (2008) 42, 6224–622.
- [10] K.R. Cummer and R.C. Brown, Ancillary equipment for biomass gasification, *Biomass and Bioenergy* (2002) 23, 113-128.
- [11] D.R. McIlveen-Wright, B.C. Williams and J.T. McMullan, Wood gasification integrated with fuel cells, *Renew. Energy* (2000) 19, 223-228.
- [12] H. Morita, F. Yoshiba, N. Woudstra, K. Hemmes and H. Spliethoff, Feasibility study of wood biomass gasification/molten carbonate fuel cell power system-comparative characterization of fuel cell and gas turbine systems, *J. Power Sources* (2004) 138, 31-40.
- [13] C.A.C. Sequeira, P.S.D. Brito, A.F. Mota, J.L. Carvalho, L.F.F.T.T.G. Rodrigues, D.M.F. Santos, D.B. Barrio and D.M. Justo, Fermentation, gasification and pyrolysis of carbonaceous residues towards usage in fuel cells, *Energy Conversion and Management* (2007) 48, 2203–2220.
- [14] Ph. Hofmann, K.D. Panopoulos, L.E. Fryda, A. Schweiger, J.P. Ouweltjes and J. Karl, Integrating biomass gasification with solid oxide fuel cells: Effect of real product gas tars, fluctuations and particulates on Ni-GDC anode, *Int. J. Hydrogen Energy* (2008) 33, 2834-2844.
- [15] Th. Seitarides, C. Athanasiou, A. Zabaniotou, Modular biomass gasification-based solid oxide fuel cells (SOFC) for sustainable development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2008) 12, 1251–1276.
- [16] V. Skoulou, E. Kantarelis, S. Arvelakis, W. Yang and A. Zabaniotou, Effect of biomass leaching on H<sub>2</sub> production, ash and tar behavior during high temperature steam gasification (HTSG) process, *Int. J. Hydrogen Energy* (2009) 34, 5666-5673.

- [17] S. Koppatz, C. Pfeifer, R. Rauch, H. Hofbauer, T. Marquard-Moellenstedt and M. Specht, H<sub>2</sub> rich product gas by steam gasification of biomass with in situ CO<sub>2</sub> absorption in a dual fluidized bed system of 8 MW fuel input, *Fuel Processing Tech.* (2009) 90, 914-921.
- [18] P. Lv, Z. Yuan, L. Ma, C. Wu, Y. Chen and J. Zhu, Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier, *Renewable Energy* (2007) 32, 2173-2185.
- [19] Y. Lu, S. Li, L. Guo and X. Zhang, Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water over Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni/CeO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts, *Int. J. Hydrogen Energy* (2010) 35, 7161-7168.
- [20] D.C. Elliott, L.J. Sealock and E.G. Baker, Chemical processing in high pressure aqueous environments 2 Development of catalyst of gasification, *Ind. Eng. Chem. Res.* (1993) 32(8), 1542–1548.
- [21] T. Minowa and T. Ogi, Hydrogen production from cellulose using a reduced nickel catalyst, *Catalyst Today* (1998) 45(4), 411–416.
- [22] T. Minowa, F. Zhen and T. Ogi, Cellulose decomposition in hot compressed water with alkali or nickel catalys, *J. Supercritical Fluids* (1998) 13 (2), 253–259.
- [23] T. Minowa and S. Inoue, Hydrogen production from biomass by catalytic gasification in hot compressed water, *Renewable Energy* (1999) 16, 1114–1117.
- [24] Y.J. Lu, H. Jin, L.J. Guo, X.M. Zhang, C.Q. Cao and X. Guo, Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water with a fluidization bed reactor, *Int. J. Hydrogen Energy* (2008) 33, 6066–6075.
- [25] A Yamaguchi, N. Hiyoshi, O. Sato, K. Bando, M. Osada and M. Shirai, Hydrogen production from woody biomass over supported metal catalysts in supercritical water, *Catalyst Today* (2009)146, 192–205.

- [26] X. Xu, Y. Matsumura, J. Stenberg and J.M. Antal, Carbon-catalyzed gasification of organic feedstocks in supercritical water, *Ind. Eng. Chem. Res.* (1996) 35(8), 2522–2530.
- [27] J.M. Antal, S.G. Allen, D. Schulman, X. Xu and R.J. Divilio, Biomass gasification in supercritical water, *Ind. Eng. Chem. Res.* (2000) 39(11), 4044–53.
- [28] K.C. Park, H. Tomiyasu, Gasification reaction of organic compounds catalyzed by RuO<sub>2</sub> in supercritical water. *Chem Commun* 2003:694–705.
- [29] J. Feroso, B. Arias, M.V. Gil, M.G. Plaza, C. Pevida, J.J. Pis and F. Rubiera, Co-gasification of different rank coals with biomass and petroleum coke in a high-pressure reactor for H<sub>2</sub>-rich gas production, *Bioresource Technology* (2010) 101, 3230-3235.
- [30] T.R. McLendon, A.P. Lui, R.L. Pineault, S.K. Beer and S.W. Richardson, High-pressure co-gasification of coal and biomass in a fluidized bed, *Biomass and Bioenergy* (2004) 26, 377-388.
- [31] C. Brage, Q. Yu and K. Sjöström, Characteristics of evolution of tar from wood pyrolysis in a fixed-bed reactor, *Fuel*, 75(2) (1996) 213-219.

## INTEGRATED TAR REFORMER WITH BIOMASS GASIFICATION SYSTEM: THERMODYNAMIC ANALYSIS.

S. Vivatpatarakij<sup>1</sup>, S. Awabumrungrat<sup>2</sup> and N. Laositrojana<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Energy Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

<sup>2</sup>Center of Excellence in Catalysis and Catalytic Reaction Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

<sup>3</sup>The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

Integrated tar reformer with biomass gasification system was investigated in producing  $H_2$  and energy term. This study was determined thermodynamic equilibrium. Gasification was operated at gasification temperature ( $T_{gr}$ ) 973.15-1173.15K and  $O_2$ - $BM$ -0.5. Represented tar, toluene, phenol, naphthalene and pyrene, can reduce by increasing  $T_{gr}$ . The released energy was split for supply steam generator and tar reformer. Generating steam was restricted by exhaust energy at high  $T_{gr}$  can producing lower steam biomass ( $S$ - $BM$ ). And  $S$ - $BM$  has been mainly affected on producing  $H_2$ . Consequently at high  $T_{gr}$ , low steam potential affects to low producing  $H_2$ .

**Keywords:** biomass gasification, tar reformer,  $H_2$ .

### INTRODUCTION

The renewable energy has been considerable in fossil fuel crisis and environment concern. Biofuels as well as renewable energy source are widely studied in biogas, biomass, bioethanol and biodiesel. The most of biofuels production still retain the biomass residue, so consideration on biomass to energy is magnitude for improved overall efficiency of biofuels. Gasification technology applies usually to convert biomass to fuel gas. Biomass gasifier produces  $H_2$  and CO (syngas) used for produce electricity by generator or fuel cells. But the major problem of biomass gasification is tar (high molecular weight hydrocarbons) [1-7].

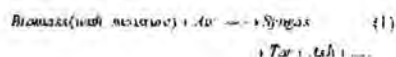
Tar in fuel gases condense at low temperature, and lead to clog and block in pipe lines, valves, filters, engines and cell stacks. Tar were removed by physical process, and reduced by thermal or catalytic reformer. Tar can reduce by increase gasifier temperature [2-5]. The catalytic tar reformer was studied in types of catalyst and operating condition [1, 6]. The tar reformer efficiency is nearly 100%, at 800°C and 12 wt%. Exceptionally, benzene, toluene and cyclic hydrocarbon compound were used as tar destruction model compound for study experiment tar reforming catalyst [7-9]. Theoretical analysis of tar reformer was considered by D. Singh *et al.* (2005) [2], tar reforming on carbon deposition in anode SOFC, D. Xu *et al.* (2009) [10] studied in supercritical steam gasification on  $Na_2CO_3$  catalytic reformer of glycine and glycerol, used as tar model. Gasifier efficiency on 0.1 wt%  $Na_2CO_3$  can be increased up to 95.8% and 98%, and hydrogen yield is 4.14 and 5.08 mol  $hr^{-1}$ , respectively. In-situ steam reforming in biomass gasification was investigated on tar decomposition and coke formation on mesoporous alumina catalyst [11]. Mesoporous alumina particle would form coke about 10-20%, but it still can convert tar component to syngas.

This study, biomass gasification was investigated on suitable operating temperature; both of gasifier and tar reformer. And volume of air and steam was considered for self supply energy and high produced  $H_2$ . Thermodynamic equilibrium was used for calculated composition form chemical reactions.

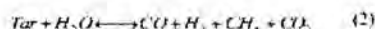
### THEORY

#### Biomass gasification

Gasification technology produced syngas from hydrocarbon compound source, such as coal, wood and MSW. Biomass gasification was considered as well as renewable energy source. Biomass reacted with partial oxidation by air to syngas (Eq.1).



Furthermore, syngas, tar and ash were byproduct of biomass gasification. The reduction of tar can use steam reformer, syngas will be increased by Eq.2



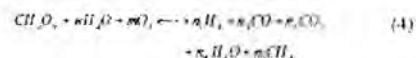
The Schematic of biomass gasification incorporated with tar steam reformer illustrate Fig. 1. Downdraft biomass gasification and tar reformer were considered in term of high produced hydrogen and self supply energy (Eq. 3).

$$H_{\text{gasifier}} + H_{\text{tar}} + H_{\text{steam}} + H_{\text{air}} - H_{\text{air}} \leq 0 \quad (3)$$

The tar compositions were investigated and listed by C. Brage *et al.* (1996) [13] on wood gasification by various operating temperature 700-900°C. D. Singh *et al.* (2005) [2]



used toluene ( $C_7H_8$ ) represent all the one-ring compounds, naphthalene ( $C_{10}H_8$ ) represent two-rings compounds, phenol ( $C_6H_6O$ ) represent phenolic and other heterocyclic compounds and pyrene ( $C_{16}H_{10}$ ) representing three-rings and higher compounds for reduced parameters of tar reforming. These results were analyzed for assumed compositions of tar, Fig. 2. This results use for example of tar composition on biomass gasification. Overall reaction of biomass gasification show in Eq. 4.



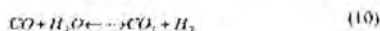
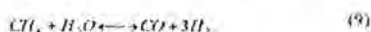
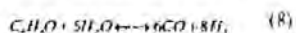
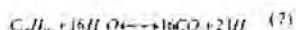
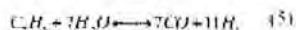
This work, wood use for represent biomass. The wood properties give details in Table 1. The chemical formula of wood is  $CH_{1.5}O_{0.81}$  (neglect  $N = -1.3 \times 10^{-3}$ ).

Table 1. Wood properties analysis

Proximate Analysis	
Volatile Matter	
Fixed Carbon	13.66 %wt
Ash	4.38 %wt
Moisture Content	5.41 %wt
High Heating Value	18.87 MJ/kg
Ultimate analysis	
Carbon, C	44.24 %wt
Hydrogen, H	6.548 %wt
Nitrogen, N	0.071 %wt
Oxygen, O	49.141 %wt

#### Tar steam reforming

Represented tar is composed toluene, naphthalene, phenol and pyrene. The tar steam reforming (TSR), methane steam reforming (MSR) and water gas-shift reaction (WGSR) were considered (Eq. 5-10).



Heat of tar reformer is calculated by summation of formation heat Eq. 5-10.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

The diagram of integrated tar reformer on biomass gasification system was shown on Fig. 1. This illustration was compromised between exothermic reaction zone (gasification) with endothermic reaction zone (tar reformer) to utilized thermal energy for supply by themselves (not

need external energy). Energy management composes of heat up air, generate steam and tar reforming reaction by altered gasification temperature (973.15-1173.15 K) and standard operation of biomass gasification show on Table 2.

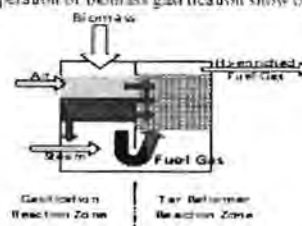
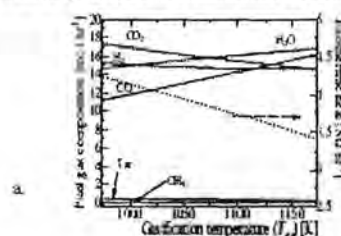


Fig. 1. Scheme of integrated tar reformer on gasification system

Table 2. Standard operation of biomass gasification

Parameter	Value
Biomass	1 [kg hr <sup>-1</sup> ]
Gasification Temperature ( $T_{gr}$ )	973.15-1173.15 [K]
Oxygen : Biomass mole ratio ( $O_2/BM$ )	0.5 [-]
Steam Temperature ( $T_{st}$ )	673.15-973.15 [K]

Tar data was reported by C. Brage *et al.* [13], at 973.15-1173.15 K of gasification temperature. Composition of gasification was based on tar data and thermodynamic equilibrium. These results illustrate in Fig. 2.a (fuel gas composition and exothermal energy) and Fig. 2.b (tar composition) at various  $T_{gr}$ . Fig. 2.a shows fuel gas composition and exothermal energy of gasification. Hydrogen slightly drops from 15.3 to 14.6 mol hr<sup>-1</sup> and carbon dioxide downward from 17.3 to 14.6 mol hr<sup>-1</sup>, CO and H<sub>2</sub>O rise from 11.2 to 16.2 mol hr<sup>-1</sup> and 14.7 to 18.8 mol hr<sup>-1</sup>, respectively. Methane is close to zero (0.002-0.0001 mol hr<sup>-1</sup>). Water gas shift reaction (WGSR) is mainly reason of fuel gas composition results, because WGSR is exothermic reaction at higher temperature production be reduced. This figure illustrates that CO increased and H<sub>2</sub> decreased by elevated operating temperature. And exothermic energy drop from 4.2 to 3.1 MJ hr<sup>-1</sup>. Because of assumption is isothermal reaction. Energy balance was calculated  $Q_{in,gr}$  at room temperature,  $Q_{out,gr}$  at gasification temperature ( $T_{gr}$ ),  $Q_{gr,gr}$  computed by total of overall heat reaction in equilibrium of gasification and  $Q_{tar,gr}$  determined by energy balance ( $\Sigma Q=0$ ). Tar was presented by  $C_7H_8$ ,  $C_{10}H_8$ ,  $C_6H_6O$  and  $C_{16}H_{10}$  [2]. Fig. 2.b shows tar composition determined by tar composition data [13] and represented tar composition [2]. Operating temperature range is 973.1-1173.15 K (700-900°C). Tar is about 0.42-0.17 mol hr<sup>-1</sup>, respectively. At lower operating temperature,  $C_6H_6O$  is major tar component about 0.27 mol hr<sup>-1</sup> (~63% tar component), otherwise phenol is reduced to 0.06 mol hr<sup>-1</sup> at 1173.15 K. These results show the same previous results, tar be reduced by increase gasification temperature.



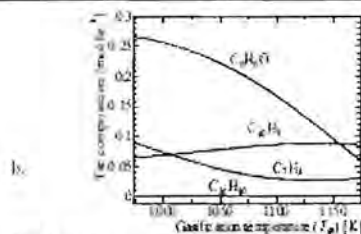


Fig. 2. a. Fuel gas composition [mol ltr<sup>-1</sup>] and exothermic energy [kJ ltr<sup>-1</sup>] (dash line), b. Tar composition on various gasification temperature ( $S:BM = 1.2$  and moisture content = 5.41%).

Energy analysis of gasification for incorporated tar reformer with gasification system show on Fig. 3. This figure illustrates  $Q_{exh, g}$ ,  $Q_{exh, p}$ ,  $Q_{air}$  (energy for heat up air) and  $\%Q_{remain}$  (remaining energy for producing steam and supplying tar reformer). In this study, the exhaust energy ( $Q_{exh, p}$ ) used to determine for supply steam generator and tar reformer only. As a result, the remaining energy ( $\%Q_{remain}$ ) decreases from 61.66% to 37.30% when increasing gasification temperature ( $T_g$ ), but the energy (enthalpy) of fuel gas still higher at low temperature. The exhaust energy ( $Q_{exh, p}$ ) is split to 10%-50% for producing steam (Fig. 4). The maximum steam flow rate (steam: biomass ratio) depends on steam temperature ( $T_s$ ) and amount of energy ( $\%Q_{exh, p}$ ), low energy can be produced low steam temperature and/or  $S:BM$  ratio. Diagnose results between Fig. 3 ( $\%Q_{remain}$ ) with Fig. 4 ( $\%Q_{exh, p}$ ) can illustrate the potential of  $S:BM$  ratio and steam temperature. For example, producing steam cannot more over than  $S:BM = 1$  and  $T_s = 600$  K, at operating gasification temperature  $T_g = 1173.15$  K.

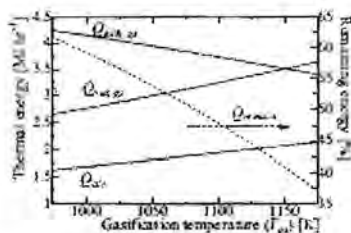


Fig. 3. Thermal energy of gasification, air and fuel gas out from gasification on operated gasification temperature, and remaining energy for supply steam generator and tar reformer.

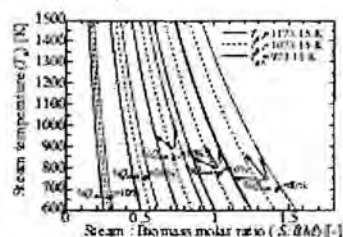


Fig. 4. Effect of Maximum steam: biomass ( $S:BM$ ) on steam temperature and percentage of gasification exothermic energy ( $\%Q_{exh, p}$ ), (at  $T_g = 973.15, 1073.15$  and  $1173.15$  K).

Results of tar reformer show fuel gas composition ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  and  $CH_4$ ) and output reformer temperature on various  $S:BM = 0-1.5$  [-] and steam temperature ( $T_s$ ) (Fig. 6). The steam temperature ( $T_s$ ) do not affect on fuel gas composition and output temperature. Because of the assumption not heat loss, so energy input to tar reformer not different. The major parameter of tar reformer is amount of steam. Increasing  $S:BM$ ,  $H_2$  increases from 13.61 mol ltr<sup>-1</sup> at not add steam to 25.62 mol ltr<sup>-1</sup> at  $S:BM = 1.5$ . And the most significance is tar completely eliminated by tar steam reforming reaction. Output temperature is dropped by adding steam and major reaction is WGSR, reduced  $CO$  and increased  $H_2$  and  $CO_2$ .

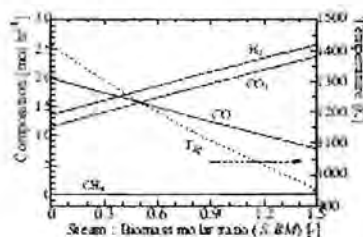


Fig. 5. Effect of composition and temperature of fuel gas out from tar reformer ( $T_g$ ) on steam: biomass molar ratio (at  $T_g = 973.15$  K,  $T_g = 673.15-973.15$  K and).

Fig. 6 show effect of gasification temperature ( $T_g$ ), steam temperature ( $T_s$ ) and steam: biomass ( $S:BM$ ) on producing  $H_2$ . At higher steam temperature, steam temperature ( $T_s$ ) has an effect on producing steam, automatically to reduced  $H_2$ . These results illustrate at low operating gasification reaction ( $T_g = 973.15$  K) can produce steam more than at high operating gasification reaction ( $T_g = 1173.15$  K).

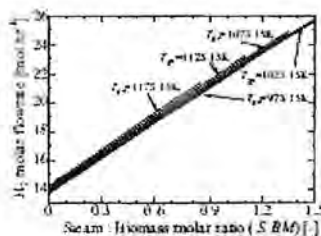


Fig. 6. Produced hydrogen from tar reformer on steam: biomass molar ratio ( $S:BM$ ) ( $T_g = 673.15$  K).

## CONCLUSION

Compositions of fuel gas depend on gasification temperature, when increasing gasification temperature ( $T_g$ ) then  $H_2$ ,  $CO_2$  and tar reduced,  $CO$  and  $H_2O$  increase when rising gasification temperature ( $T_g$ ).  $C_6H_6O$  is major tar component at low gasification temperature ( $T_g$ ), and it can reduce by increasing gasification temperature ( $T_g$ ). Exhaust energy from gasification ( $Q_{exh, p}$ ) drop at high operating gasification temperature ( $T_g$ ). Consequently, energy for supply steam generator and tar reformer is down too. Operating gasification temperature ( $T_g$ ) involves exhaust energy ( $Q_{exh, p}$ ) in term of generating steam and reforming tar potential. This study shows capability of tar eliminated



by steam reforming, and higher producing  $H_2$  (25.62 from 15.28 mol  $l^{-1}$ ), compared with non-integrated tar reformer.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The supports from The Jharkhand Research Fund and Commission on Higher Education are gratefully acknowledged.

#### REFERENCE

- [1] C. Li and K. Suzuki, Tar property, analysis, "Reforming mechanism and model for biomass gasification An overview", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2009, pp.594-604.
- [2] D. Singh *et al.*, "Carbon deposition in an SOFC fueled by tar-laden biomass gas: a thermodynamic analysis", *J. Power Sources*, 142, 2005, pp.194-199.
- [3] M.P. Houben *et al.*, "Tar reduction through partial combustion of fuel gas", *Fuel*, 84, 2005, pp.817-824.
- [4] P. Gilbert *et al.*, "Tar reduction in pyrolysis vapours from biomass over a hot char bed", *Bioresource Technology*, 100, 2009, pp.6045-6051.
- [5] J. Han and H. Kim, "The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2008, pp.397-416.
- [6] J. Li *et al.*, "Development of Nano-NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst to be Used for Tar Removal in Biomass Gasification", *Environ. Sci. Technol.*, 42, 2008, pp.6224-6229.
- [7] C. Li *et al.*, "Steam reforming of biomass tar producing  $H_2$ -rich gases over Ni/MgOx/CaO1-x catalyst", *Bioresource Technology*, 101, 2010, pp.97-100.
- [8] H.J. Park *et al.*, "Steam reforming of biomass gasification tar using benzene as a model compound over various Ni supported metal oxide catalysts", *Bioresource Technology*, 101, 2010, pp.101-103.
- [9] T. Furusawa and A. Tsutsumi, "Development of cobalt catalysts for the steam reforming of naphthalene as a model compound of tar derived from biomass gasification", *Applied Catalysis A: General*, 278, 2005, pp.195-205.
- [10] D. Xu *et al.*, Catalytic gasification of glycine and glycerol in supercritical water, *Inter. J. hydrogen energy* 34, 2009, pp.5357-5364.
- [11] S. Hosokai *et al.*, "Spontaneous generation of tar decomposition promoter in a biomass steam reformer", *Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, 83(A9), 2005, pp.1093-1102.
- [12] J. Gil *et al.*, "Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed. Effect of the type of gasifying agent on the product distribution", *Biomass and Bioenergy*, 17, 1999, pp.389-403.
- [13] C. Brage *et al.*, "Characteristics of evolution of tar from wood pyrolysis in a fixed-bed reactor", *Fuel*, 75(2), 1996, pp.213-219.

## ประวัตินักวิจัยและคณะ

## ประวัติหัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) (นาย,นาง,นางสาว)\_สุภาวัฒน์ วีวรรณภัทรกิจ\_\_\_\_\_
   
(ภาษาอังกฤษ) (Mr.,Mrs.,Miss)\_Supawat Vivanpatarakij\_\_\_\_\_
2. เพศ\_\_\_\_\_ชาย\_\_\_\_\_สถานะทางการสมรส\_\_\_\_\_โสด\_\_\_\_\_
3. วัน เดือน ปีเกิด\_\_\_\_\_5 มีนาคม 2525\_\_\_\_\_อายุ\_\_\_\_\_28\_\_\_\_\_ปี
4. ตำแหน่งปัจจุบัน (อาจารย์,ผศ.,รศ.,ศ.)\_ไม่มี\_\_\_\_\_
5. เงินเดือน (ไม่รวมตำแหน่งวิชาการ)\_18,300\_\_\_\_\_
6. สถานที่ทำงาน\_สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
   
จังหวัด\_\_\_\_\_กรุงเทพมหานคร\_\_\_\_\_รหัสไปรษณีย์\_\_\_\_\_10330\_\_\_\_\_
   
โทรศัพท์\_\_\_\_\_022188087\_\_\_\_\_โทรสาร\_\_\_\_\_022188087\_\_\_\_\_
7. ที่อยู่ (ที่บ้าน) 115/1 ซ.พระปิ่นเกล้า9 ถ.สมเด็จพระปิ่นเกล้า แขวงอรุณอมรินทร์ เขตบางกอกน้อย
   
จังหวัด\_\_\_\_\_กรุงเทพมหานคร\_\_\_\_\_รหัสไปรษณีย์\_\_\_\_\_10700\_\_\_\_\_
   
โทรศัพท์\_\_\_\_\_028839236\_\_\_\_\_โทรสาร\_\_\_\_\_028839237\_\_\_\_\_
8. E-mail Address \_supawat@eri.chula.ac.th\_\_\_\_\_โทรศัพท์มือถือ\_\_\_\_\_0818204580\_\_\_\_\_
9. ประวัติการศึกษา
  - 9.1 ปริญญาตรีสาขา\_วิศวกรรมเคมี\_\_\_\_\_สถาบัน\_มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์\_\_\_\_\_
   
ปีที่สำเร็จ\_\_\_\_\_2547\_\_\_\_\_คะแนนเฉลี่ยสะสม\_\_\_\_\_3.32\_\_\_\_\_
  - 9.2 ปริญญาโทสาขา\_\_\_\_\_สถาบัน\_\_\_\_\_
   
ปีที่สำเร็จ\_\_\_\_\_คะแนนเฉลี่ยสะสม\_\_\_\_\_
- หัวข้อวิทยานิพนธ์\_\_\_\_\_

9.3 ปริญญาเอกสาขา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมเคมี \_\_\_\_\_ สถาบัน \_\_\_\_\_ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย \_\_\_\_\_

ปีที่สำเร็จ \_\_\_\_\_ 2551 \_\_\_\_\_ คะแนนเฉลี่ยสะสม \_\_\_\_\_ 3.43 \_\_\_\_\_

หัวข้อวิทยานิพนธ์ Improvement of solid oxide fuel cell fed by methane

9.4 อื่น ๆ (ระบุ) \_\_\_\_\_

## 10. ผลงานวิจัยย้อนหลังตั้งแต่ปี ค.ศ.2005 ถึงปัจจุบัน

### 10.1 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

- **S. Vivanpatarakij**, S. Assabumrungrat and N. Laosiripojana, Improvement of solid oxide fuel cell performance by using non-uniform potential operation, Journal of Power Sources, Volume 167, Issue 1, 1 May 2007, Pages 139-144.

impact factor = 3.792 (ที่มา : Journal Citation Reports, 2009)

- W. Sangtongkitcharoen, **S.Vivanpatarakij**, N. Laosiripojana, A. Arpornwichanop and S. Assabumrungrat, Performance analysis of methanol-fueled solid oxide fuel cell system incorporated with palladium membrane reactor, Chemical Engineering Journal, Volume 138, Issues 1-3, 1 May 2008, Pages 436-441.

impact factor = 2.816 (ที่มา : Journal Citation Reports, 2009)

- **S. Vivanpatarakij**, S. Assabumrungrat, N. Laosiripojana and A. Arpornwichanop, Performance improvement of solid oxide fuel cell system using palladium membrane reactor with different operation modes, Chemical Engineering Journal, Volume 146, Issue 1, 15 January 2009, Pages 112-119.

impact factor = 2.816 (ที่มา : Journal Citation Reports, 2009)

- S. Assabumrungrat, N. Ruangrassamee, **S. Vivanpatarakij**, N. Laosiripojana, A. Arpornwichanop, Influence of stack arrangement on performance of multiple-stack solid oxide fuel cells with non-uniform potential operation, Journal of Power Sources, Volume 187, Issue 1, 1 February 2009, Pages 1-7.

impact factor = 3.792 (ที่มา : Journal Citation Reports, 2009)

- **S. Vivanpatarakij**, N. Laosiripojana, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, A. Soottitantawat, S. Assabumrungrat , Simulation of solid oxide fuel cell systems integrated with sequential CaO–CO<sub>2</sub> capture unit, Chemical Engineering Journal, Volume 147, Issues 2-3, 15 April 2009, Pages 336-341.

impact factor = 2.816 (ที่มา : Journal Citation Reports, 2009)

## ประวัตินักวิจัยที่ปรึกษา

## 1. นักวิจัยที่ปรึกษา

ชื่อ สุตติชัย อัสสะบารุงรัตน์

Suttichai Assabumrungrat

เพศ ....ชาย ..... อายุ ....40 ..... ปี

สถานะภาพสมรส  โสด  สมรส

## 2. การทำงาน

ตำแหน่งปัจจุบัน ศาสตราจารย์

สถานที่ทำงาน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนน พญาไท กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 0-2218-6878-82

โทรสาร 0-2218-6877

e-mail: Suttichai.A@chula.ac.th

3. ที่อยู่(ที่บ้าน) 50/15 หมู่ 5 ถนนบางกรวยไทรน้อย ตำบลบางสีทอง อำเภอบางกรวย

จังหวัด นนทบุรี 11130

โทรศัพท์ 0-24466-987

e-mail: Suttichai.A@chula.ac.th

## 4. ประวัติการศึกษา

4.1 ปริญญาตรีสาขา วิศวกรรมเคมี (เกียรตินิยมอันดับ 1 เหรียญทอง)

สถาบัน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีที่จบ 2535

4.2 ปริญญาโทสาขา Advanced in Chemical Engineering ( M.Sc. with distinction)

สถาบัน Imperial College, London, UK

ปีที่จบ 2536

4.3 ปริญญาเอกสาขา Chemical Engineering ( Ph.D.)

สถาบัน Imperial College, London, UK

ปีที่จบ 2539

5. สาขาวิชาที่เชี่ยวชาญ (ตอบได้มากกว่า 1) Chemical Reaction Engineering, Multifunctional Reactor, Hydrogen, Fuel Cell

6. ผลงานวิจัย (ปี 2005-ปัจจุบัน)

- 1) **S. Assabumrungrat**, N. Laosiripojana, V. Pavarajarn, W. Sangtongkitcharoen, A. Tangjitmatee and P. Praserthdam, "Thermodynamic Analysis of Carbon Formation in Solid Oxide Fuel Cells with a Direct Internal Reformer Fueled by Methanol", Journal of Power Sources, 139 (1-2) (2005) 55-60. (IF-2005 = 2.770)
- 2) Worapon Kiatkittipong, Tomohiko Tagawa, Shigeo Goto, **Suttichai Assabumrungrat** and Piyasan Praserthdam "Oxygen transport through LSM/YSZ/LaAlO system for the use of fuel cell type reactor" Chemical Engineering Journal, 106 (1) (2005), 35-42. (IF-2005 = 2.034).
- 3) **S. Assabumrungrat**, V. Pavarajarn, D. Wongwattanasate, P. Praserthdam, and S. Goto, "Simulation of ethyl tert-butyl ether production from tert-butyl alcohol and ethanol in reactive distillation", Asian Journal of Chemical Engineering 5 (2005) 16-21 (IF-2005 = -).

- 4) W. Sangtongkitcharoen, **S. Assabumrungrat**, V. Pavarajarn, N. Laosiripojana, and P. Praserthdam, "Comparison of Carbon Formation Boundary for Different Modes of Solid Oxide Fuel Cells Fuelled by Methane", *J. Power Sources*, 142/1-2 (2005) 75-80. (IF-2005 = 2.770).
- 5) U. Sahapatsombud, A. Arpornwichanop, **S. Assabumrungrat** P. Praserthdam and S. Goto "Simulation of Reactive Distillation for Synthesis of tert-Amyl Ethyl Ether" *Korean J. Chem. Eng.*, 22 (2005) 387-392 (IF-2005 = 0.750).
- 6) **S. Assabumrungrat**, W. Sangtongkitcharoen, N. Laosiripojana, A. Arpornwichanop, Sumittra Charojrochkul and P. Praserthdam, "Effects of Electrolyte Type and Flow Pattern on Performances of Methanol-Fueled Solid Oxide Fuel Cells", *J. Power Sources* 148 (2005) 18-23. (IF-2005 = 2.770).
- 7) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "Catalytic Dry Reforming of Methane over High Surface Area Ceria", *Appl. Cat.-B*, 60 (2005) 107-116 (IF-2005 = 3.809).
- 8) Worapon Kiatkittipong, Tomohiko Tagawa, Shigeo Goto, **Suttichai Assabumrungrat** and Piyasan Praserthdam "Simulation of Oxidative Coupling of Methane in Solid Oxide Fuel Cell Type Reactor for C<sub>2</sub> Hydrocarbon and Electricity Co-Generation" *J. Chem. Eng. Japan* 38 (2005) 841-848 (IF-2005 = 0.519).
- 9) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "Methane steam reforming over Ni/Ce-ZrO<sub>2</sub> catalyst: Influences of Ce-ZrO<sub>2</sub> support on reactivity, resistance toward carbon formation, and intrinsic reaction kinetics", *Appl. Cat.-A*, 290 (2005) 200-211 (IF-2005 = 2.728).
- 10) N. Laosiripojana, W. Sutthisripok and **S. Assabumrungrat**, "Synthesis gas production from dry reforming of methane over CeO<sub>2</sub> doped Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Influence of the doping ceria on the resistance toward carbon formation", *Chem. Eng. J.*, 112 (2005) 13-22 (IF-2005 = 2.034).
- 11) Worapon Kiatkittipong, Tomohiko Tagawa, Shigeo Goto, **Suttichai Assabumrungrat**, Kampol Silpasup and Piyasan Praserthdam "Comparative Study of Oxidative Coupling of Methane Modeling in Various Types of Reactor" *Chemical Engineering Journal*, 115/1-2 (2005) 63-71 2005. (IF-2005 = 2.034).
- 12) N. Laosiripojana, W. Sangtongkitcharoen and **S. Assabumrungrat**, "Catalytic steam reforming ethane and propane over CeO<sub>2</sub>-doped Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at SOFC temperature:



- Improvement of resistance toward carbon formation by the redox properties of doping CeO<sub>2</sub>", Fuel 85 (2006) 323-332 (IF-2006 = 1.358).
- 13) W. Jamsak, **S. Assabumrungrat**, P.L. Douglas, N. Laosiripojana and S. Charojrochkul, "Performance Analysis of Ethanol-Fueled Solid Oxide Fuel Cells with Different Electrolytes", Chemical Engineering Journal 119 (2006) 11–18. (IF-2006 = 1.594).
- 14) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "The effect of specific surface area on the activity of nano-scale ceria catalysts for methanol decomposition with and without steam at SOFC operating temperatures", Chem. Eng. Sci., 61(2006) 2540-2549 (IF-2006 = 1.629).
- 15) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "Catalytic steam reforming of ethanol over high surface area > CeO<sub>2</sub>: the role of CeO<sub>2</sub> as an internal pre-reforming catalyst" Applied Catalysis B, vol. 66/1-2 (2006) 29-39 (IF-2006 = 3.942).
- 16) Patthaveekongka Weerawat, Ramakul Prakorn, **Assabumrungrat Suttichai**, and Pancharoen Ura, "Transport of Cerium, Lanthanum, Neodymium and Palladium via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane Based on Equilibrium Theory", Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, vol. 37 No. 3 (2006) 1-11 (IF-2006 = 0.979).
- 17) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "Hydrogen production from the steam and autothermal reforming of LPG over high surface area ceria at SOFC temperature", J. Power Sources, vol. 158 (2006) 1348-1357 (IF-2006 = 3.521).
- 18) **S. Assabumrungrat**, N. Laosiripojana and P. Piroonlerkgul, "Determination of Boundary of Carbon Formation for Dry Reforming of Methane in Solid Oxide Fuel Cell", Journal of Power Sources, vol. 159 (2006) 1274-1282 (IF-2006 = 3.521).
- 19) Watcharapong Khaodee, Bunjerd Jongsomjit, **Suttichai Assabumrungrat**, Piyasan Prasertthdam, and Shigeo Goto, "Investigation of isosynthesis via CO hydrogenation over ZrO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub> catalysts: effects of crystallite size, phase composition and acid-base sites" Catal. Commu., vol. 8 (2007) 548-556 (IF-2007 = 2.394).
- 20) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "Catalytic steam reforming of Ni/YSZ fueled by methane, methanol, and ethanol: the possible use of these fuels in internal reforming operation SOFC", Journal of Power Sources, 163 (2007) 943-951 (IF-2007 = 2.809).

- 21) N. Laosiripojana, W. Sutthisripok and **S. Assabumrungrat**, "Reactivity of high surface area CeO<sub>2</sub> toward ethanol decomposition with and without steam at SOFC temperature", Chem. Eng. J. 127 (2007) 31-38 (IF-2007 = 1.707).
- 22) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "Catalytic steam reforming of dimethyl ether (DME) over ceria-zirconia at SOFC operating temperature: The use of ceria-zirconia as an internal pre-reforming catalyst", Appl. Cat.-A, 320 (2007)105-113 (IF-2007 = 3.166).
- 23) S. Rimdusit, W. Benjapan, **S. Assabumrungrat**, T. Takeichi and R. Yokota, "Processing Induced Layered Phase Separation of Poly(imide-siloxane) and s-BPDA/ODA Polyimide Blends", Polymer Engineering and Science, 47 (2007) 489-498 (IF-2007 = 1.272).
- 24) Eakkapon Promaros, **Suttichai Assabumrungrat**, Navadol Laosiripojana, Piyasan Prasertdam, Tomohiko Tagawa and Shigeo Goto, "Carbon dioxide reforming of methane under periodic operation", Korean Journal of Chemical Engineering, 24 (2007) 41-50 (IF-2007 = 0.747).
- 25) Garun tanarungsun, Worapon Kiatkittipong, **Suttichai Assabumrungrat**, Hiroshi Yamada, Tomohiko Tagawa and Piyasan Prasertdam, "Fe (III), Cu (II), V (V)/TiO<sub>2</sub> for hydroxylation of benzene to phenol with hydrogen peroxide at room temperature", J. Chem. Eng. Japan, vol. 40 (2007) 415-421 (IF-2007 = 0.594).
- 26) S. Vivanpatarakij, **S. Assabumrungrat**, and N. Laosiripojana, "Improvement of SOFC performance by using non-uniform cell potential operation", Journal of Power Sources, vol. 167 (2007) 139-144 (IF-2007 = 2.809).
- 27) W. Jamsak, **S. Assabumrungrat**, P.L. Douglas, N. Laosiripojana, R. Suwanwarangkul, S. Charojrochkul and E. Croiset "Performance Assessment of Bioethanol-Fed Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with a Distillation Column", ECS Transactions - Solid Oxide Fuel Cells vol. 7 (2007)1475-1482 (IF-2007 = -).
- 28) N. Laosiripojana, **S. Assabumrungrat**, and S. Charojrochkul, "Steam reforming of ethanol over Ni on high surface area ceria support: Influence of redox properties on catalyst stability and product selectivities", ECS Transactions - Solid Oxide Fuel Cells vol. 7 (2007)1717-1724 (IF-2007 = -).
- 29) Garun tanarungsun, Worapon Kiatkittipong, **Suttichai Assabumrungrat**, Hiroshi Yamada, Tomohiko Tagawa and Piyasan Prasertdam, "Liquid phase hydroxylation of benzene to

- phenol with hydrogen peroxide catalyzed by Fe (III)/TiO<sub>2</sub> catalysts at room temperature", J. Ind. Eng. Chem., vol. 13 (2007) 444-451 (IF-2007 = 1.57).
- 30) W. Jamsak, **S. Assabumrungrat**, P.L. Douglas, N. Laosiripojana, R. Suwanwarangkul, S. Charojrochkul and E. Croiset "Performance of Ethanol-Fueled Solid Oxide Fuel Cells: Proton and Oxygen Ion Conductors", Chem. Eng. J., vol. 133/1-3 (2007) 187-194 (IF-2007 = 1.707).
- 31) N. Laosiripojana, **S. Assabumrungrat**, and S. Charojrochkul, "Steam reforming of ethanol with co-fed oxygen and hydrogen over Ni on high surface area ceria support", Applied Catalysis A: General, Vol. 327 (2007) 180-188 (IF-2007 = 3.166).
- 32) Garun tanarungsun, Worapon Kiattkittipong, **Suttichai Assabumrungrat**, Hiroshi Yamada, Tomohiko Tagawa and Piyasan Prasertdam, "Multi transition metal catalysts supported on TiO<sub>2</sub> for hydroxylation of benzene to phenol with hydrogen peroxide", J. Ind. Eng. Chem., vol. 13 (2007) 870-877 (IF-2007 = 1.57).
- 33) W. Jamsak, **S. Assabumrungrat**, P.L. Douglas, E. Croiset, N. Laosiripojana, R. Suwanwarangkul and S. Charojrochkul, "Thermodynamic Assessment of Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with Bioethanol Purification Unit", J. Power Sources, vol. 174 (2007) 191-198 (IF-2007 = 2.809).
- 34) Watcharapong Khaodee, Bunjerd Jongsomjit, Piyasan Prasertdam, Shigeo Goto and **Suttichai Assabumrungrat**, "Impact of temperature ramp during calcination on characteristics of nano-ZrO<sub>2</sub> and its catalytic activity for isosynthesis" J. Mol. Cat. A, vol. 208 (2008) 35-42 (IF-2008 = 2.814).
- 35) Hiroshi YAMADA, Tomoaki MIZUNO, Tomohiko TAGAWA, Garun TANARUNGSUN, Piyasan PRASERTHDAM and **Suttichai ASSABUMRUNGRAT** "Catalyst Regenerator for Partial Oxidation of Benzene in Reaction-Extraction System" Journal of the Japan Petroleum Institute, vol. 51 (2008), 114-117. (IF-2008 = 0.591)
- 36) N. Laosiripojana, D. Chadwich and **S. Assabumrungrat**, "Effect of high surface area CeO<sub>2</sub> and Ce-ZrO<sub>2</sub> supports over Ni catalyst on CH<sub>4</sub> reforming with H<sub>2</sub>O in the presences of O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub>", Chem. Eng. J., vol. 138 (2008) 264-273 (IF-2008 = 2.813).
- 37) W. Sangtongkitcharoen, S.Vivanpatarakij, N. Laosiripojana, A. Arpornwichanop and **S. Assabumrungrat**, "Performance analysis of methanol-fueled solid oxide fuel cell system

- incorporated with palladium membrane reactor", Chem. Eng. J., vol. 138 (2008) 436-441 (IF-2008 = 2.813).
- 38) Amornchai Arpornwichanop, Ukrit Sahapatsombud, Yaneeporn Patcharavorachot and **Suttichai Assabumrungrat**, "Hybrid Process of Reactive Distillation and Pervaporation for the Production of Tert-Amyl Ethyl Ether", Chinese Journal of Chemical Engineering, vol. 16 (2008) 100-103 (IF-2008 = 0.572).
- 39) Garun tanarungsun, Worapon Kiatkittipong, Hiroshi Yamada, Tomohiko Tagawa, Piyasan Prasertdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Hydroxylation of benzene to phenol on Fe/TiO<sub>2</sub> catalysts loaded with different types of second metal", Catal. Commu. Vol. 9 (2008) 1886-1890 (IF-2008 = 2.791).
- 40) P. Piroonlerkgul, **S. Assabumrungrat**, N. Laosiripojana and A.A. Adesina, "Selection of appropriate fuel processor for biogas-fuelled SOFC system", Chem. Eng. J., vol. 140 (2008) 241-351 (IF-2008 = 2.813).
- 41) Shivanahalli K Rajesh, Navadol Laosiripojana, **Suttichai Assabumrungrat**, "High temperature desulphurization using nano-sized ceria adsorbent for SOFC applications", Korean J. of Chemical Engineering, vol.25 (2008) 223-230 (IF-2008 = 0.83).
- 42) N. Laosiripojana and **S. Assabumrungrat**, "Kinetic dependencies and reaction pathways in hydrocarbon conversions catalyzed by ceria-based materials", Applied Catalysis B, Vol. 82 (2008) 103-113 (IF-2008 = 4.853).
- 43) Garun Tanarungsun, Worapon Kiatkittipong, Hiroshi Yamada, Tomohiko Tagawa, Piyasan Prasertdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Ternary metal oxide catalysts for selective oxidation of benzene to phenol", J. Ind. Eng. Chem., 14 (2008) 596-601 (IF-2008 = 1.235).
- 44) Amornchai Arpornwichanop, Kittipong Koomsup and **Suttichai Assabumrungrat**, "Hybrid Reactive Distillation Systems for n-Butyl Acetate Production from Dilute Acetic Acid", J. Ind. Eng. Chem., vol. 14 (2008) 796-803 (IF-2008 = 1.235).
- 45) Amornchai Arpornwichanop, Chantarawadee Wiwattanaporn and **Suttichai Assabumrungrat**, "The Use of Dilute Acetic Acid for Butyl Acetate Production in a Reactive Distillation: Simulation and Control Studies", Korean J. Chem. Eng., vol. 25 (2008) 1252-1266 (IF-2008 = 0.83).



- 46) Worapon Kiatkittipong, Piyaporn Thipsunet, Piyasan Prasertthdam, Shigeo Goto and **Suttichai Assabumrungrat**, "Simultaneous enhancement of ethanol supplement in gasoline and its quality improvement", *Fuel Processing and Technology*, vol. 89 (2008) 1365-1370 (IF-2008 = 2.066).
- 47) S. Vivanpatarakij, N. Laosiripojana, A. Arpornwichanop and **S. Assabumrungrat**, "Performance improvement of solid oxide fuel cell system using palladium membrane reactor with different operation modes", *Chem. Eng. J.*, 146 (2009) 112–119 (IF-2009 = 2.816).
- 48) P. Piroonlerkgul, N. Laosiripojana, A.A. Adesina and **S. Assabumrungrat**, "Performance of biogas-fed solid oxide fuel cell systems integrated with membrane module for CO<sub>2</sub> removal", *Chem. Eng. Process.*, vol. 48 (2009) 672-682 (IF-2009 = 1.742).
- 49) **S. Assabumrungrat**, N. Ruangrassamee, S. Vivanpatarakij, N. Laosiripojana and A. Arpornwichanop, "Influence of stack arrangement on performance of multiple-stack solid oxide fuel cells with non-uniform potential operation" *J. Power Sources*, vol. 187 (2009) 1-7 (IF-2009 = 3.792).
- 50) A. Shotipruk, **S. Assabumrungrat**, P. Pavasant, and N. Laosiripojana, "Reactivity of CeO<sub>2</sub> and Ce-ZrO<sub>2</sub> toward steam reforming of palm fatty acid distillate (PFAD) with co-fed oxygen and hydrogen", *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64 (2009) 459-466 (IF-2009 = 2.136).
- 51) W. Jamsak, P.L. Douglas, E. Croiset, R. Suwanwarangkul, N. Laosiripojana, S. Charojrochkul and **S. Assabumrungrat**, "Design of a Thermally Integrated Bioethanol-Fueled Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with a Distillation Column", *J. Power Sources*, vol. 187 (2009) 190-203 (IF-2009 = 3.792).
- 52) P. Dokmaingam, **S. Assabumrungrat**, A. Soottitantawat, I. Sramala, N. Laosiripojana, "Modeling of SOFC with Indirect Internal Reforming Operation: Comparison of Conventional Packed-Bed and Catalytic Coated-Wall Internal Reformer", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34 (2009) 410-421 (IF-2009 = 3.945).
- 53) Watcharapong Khaodee, Nicha Tangchupong, Bunjerd Jongsomjit, Piyasan Prasertthdama and **Suttichai Assabumrungrat**, "Investigation of isosynthesis via CO hydrogenation over ZrO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> mixed oxide catalysts" *Catal. Commu.*, vol. 10 (2009) 494-501 (IF-2009 = 3).

- 54) Amornchai Arpornwichanop, Kittipong Koomsup, Worapon Kiatkittipong, Piyasan Prasertthdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Production of n-butyl acetate from dilute acetic acid and n-butanol using different reactive distillation systems: Economic analysis", J. Taiwan Inst. Chem. Engrs., vol. 40 (2009) 21-28 (IF-2008 = 1.114).
- 55) S. Vivanpatarakij, N. Laosiripojana, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, A. Soottitantawat and **S. Assabumrungrat**, "Simulation of solid oxide fuel cell systems integrated with sequential CaO-CO<sub>2</sub> capture unit", Chem. Eng. J., vol. 147 (2009) 336-341 (IF-2009 = 2.816).
- 56) Worapon Kiatkittipong, Khamron Yoothongkham, Choowong Chaisuk, Piyasan Prasertthdam, Shigeo Goto and **Suttichai Assabumrungrat**, "Self-etherification process for cleaner fuel production", Catalysis Letters., Vol. 128 (2009) 154-163 (IF-2009 = 2.021).
- 57) P. Piroonlerkgul, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, A. Soottitantawat, W. Wiyatn, N. Laosiripojana, A.A. Adesina and **S. Assabumrungrat**, "Integration of solid oxide fuel cell and palladium membrane reactor: Technical and economic analysis", Int. J. Hydrogen Energy, 37 (2009) 3894-3907 (IF-2009 = 3.945).
- 58) P. Dokmaingam, **S. Assabumrungrat**, A. Soottitantawat and N. Laosiripojana, "Effect of Operating Conditions and Gas Flow Patterns on the System Performances of IIR-SOFC Fueled by Methanol" Int. J. Hydrogen Energy, 34 (2009) 6415-6424 (IF-2009 = 3.945).
- 59) **Suttichai Assabumrungrat**, Salinee Charoenseri, Navadol Laosiripojana, Worapon Kiatkittipong, and Piyasan Prasertthdam, "Effect of oxygen addition on catalytic performance of carbon dioxide reforming of methane under periodic operation", Int. J. Hydrogen Energy, 34 (2009) 6211-6220 (IF-2009 = 3.945).
- 60) Amornchai Arpornwichanop, Nuttapong Chalermpanchai, Yaneeporn Patcharavorachot, **Suttichai Assabumrungrat**, and Moses Tade, "Performance of an Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cell with Direct Internal Reforming of Ethanol", Int. J. Hydrogen Energy, 34 (2009) 7780-7788 (IF-2009 = 3.945).
- 61) O. Boonthamtirawuti, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, P. Prasertthdam, **S. Assabumrungrat**, "Kinetics of Liquid Phase Synthesis of *tert*-Amyl Ethyl Ether from *tert*-Amyl Alcohol and Ethanol over Amberlyst 16", J. Ind. Eng. Chem., 15 (2009) 451-457 (IF-2009 = 1.752).

- 62) Boonrat Pholjaroen, Navadol Laosiripojana, Piyasan Prasertthdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Reactivity of Ni/SiO<sub>2</sub>.MgO toward carbon dioxide reforming of methane under steady state and periodic operations" J. Ind. Eng. Chem., 15 (2009) 488-497 (IF-2009 = 1.752).
- 63) P. Piroonlerkgul, W. Wiyaratn, A. Soottitantawat, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, N. Laosiripojana, and **S. Assabumrungrat**, "Operation viability and performance of SOFC fuelled by different feeds", Chem. Eng. J., 155 (2009) 411-418 (IF-2009 = 2.816).
- 64) N. Laosiripojana, W. Wiyaratn, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, A. Soottitantawat, and **S. Assabumrungrat**, "Reviews on Solid Oxide Fuel Cell Technology", Engineering Journal 13 (2009) 73-90.
- 65) Garun Tanarungsun, Hiroshi Yamada, Tomohiko Tagawa, Worapon Kiatkittipong, Piyasan Prasertthdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Reaction-Extraction-Regeneration System for Highly Selective Oxidation of Benzene to Phenol" Chemical Engineering Communications, 197 (2010) 1140-1151 (IF-2009 = 0.586).
- 66) Amornchai Arpornwichanop, Yaneeporn Patcharavorachot, and **Suttichai Assabumrungrat**, "Analysis of a proton-conducting SOFC with direct internal reforming", Chem. Eng. Sci., 65 (2010) 581-589 (IF-2009 = 2.136)
- 67) P. Dokmaingam, **S. Assabumrungrat**, A. Soottitantawat and N. Laosiripojana, "Modeling of tubular-designed SOFC with Indirect Internal Reforming operation (IIR-SOFC) fed by different primary fuels", Journal of Power Sources, 195 (2010) 69-78 (IF-2009 = 3.792).
- 68) Nicha Tangchupong, Watcharapong Khaodee, Bunjerd Jongsomjit, Navadol Laosiripojana, Piyasan Prasertthdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Effect of calcination temperature on characteristics of sulfated zirconia and its application as a catalyst for isosynthesis" Fuel Proc. Tech., 91 (2010) 121-126 (IF-2009 = 2.321).
- 69) Watcharapong Khaodee, Nicha Tangchupong, Bunjerd Jongsomjit, Navadol Laosiripojana, Piyasan Prasertthdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Isosynthesis via CO hydrogenation over SO<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub> catalysts", J. Ind. Eng. Chem., 16 (2010) 411-418 (IF-2009 = 1.752).



- 70) Worapon Kiatkittipong, Sirima Suwanmanee, Navadol Laosiripojana, Piyasan Praserthdam and **Suttichai Assabumrungrat**, "Cleaner gasoline production by using glycerol as fuel extender", *Fuel Proc. Tech.*, 91 (2010) 456-460 (IF-2009 = 2.321).
- 71) Yaneeporn Patcharavorachot, Woranee Paengjuntuek, **Suttichai Assabumrungrat** and Amornchai Arpornwichanop, "Performance evaluation of combined solid oxide fuel cells with different electrolytes", *Int. J. Hydrogen Energy*, 35 (2010) 4301-4310 (IF-2009 = 3.945).
- 72) Issara Choedkiatsakul, Kanokporn Sintawarayan, Tanya Prawpipat, Apinan Soottitantawat, Wisitsree Wiyaratn, Worapon Kiatkittipong, Amornchai Arpornwichanop, Navadol Laosiripojana, Sumittra Charojrochkul and **Suttichai Assabumrungrat**, "Performance assessment of SOFC systems integrated with bio-ethanol production and purification processes", *Engineering Journal* 13 (2010) 1-14.
- 73) P. Dokmaingam, N. Laosiripojana, A. Soottitantawat and **S. Assabumrungrat**, "Alternative concept for SOFC with direct internal reforming: Benefits from inserting catalyst rod", *AIChE J.*, 56 (2010) 1639-1650 (IF-2009 = 1.955).
- 74) N. Laosiripojana, W. Sutthisripok, K.P. Lohsoontorn, **S. Assabumrungrat**, "Reactivity of Ce-ZrO<sub>2</sub> (doped with La-, Gd-, Nb-, and Sm-) toward partial oxidation of liquefied petroleum gas: Its application for sequential partial oxidation/steam reforming", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (2010) 6747-6756 (IF-2009 = 3.945).
- 75) N. Laosiripojana, W. Kiatkittipong, W. Sutthisripok, **S. Assabumrungrat**, "Synthesis of methyl esters from relevant palm products in near-critical methanol with modified-zirconia catalysts: Effects of catalyst, co-solvent and water formation", *Bioresource Technology*, 101 (2010) 8416-8423 (IF-2009 = 4.253).
- 76) Suthida Authayanun, Amornchai Arpornwichanop, Woranee Paengjuntuek and **Suttichai Assabumrungrat**, "Thermodynamic Study of Hydrogen Production from Crude Glycerol Autothermal Reforming for Fuel Cell Applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, 13 (2010) 6617-6623 (IF-2009 = 3.945).
- 77) **S. Assabumrungrat**, P. Sonthisanga, W. Kiatkittipong, N. Laosiripojana, A. Arpornwichanop, A. Soottitantawat, W. Wiyaratn, P. Praserthdam, "Thermodynamic analysis of calcium oxide assisted hydrogen production from biogas", *J. Ind. Eng. Chem.*, 16 (2010) 785-789 (IF-2009 = 1.752).

- 78) P. Piroonlerkgul, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, W. Wiyaratn, A. Soottitantawat, N. Laosiripojana, A.A. Adesina and **S. Assabumrungrat**, "Technical and economic study of the integrated system of solid oxide fuel cell, CaO-CO<sub>2</sub> acceptor and palladium membrane reactor", Chem. Eng. Process., in press (IF-2009 = 1.742).
- 79) Navadol Laosiripojana, Worapon Kiatkittipong, **Suttichai Assabumrungrat**, "Effects of support and co-fed elements on steam reforming of palm fatty acid distillate (PFAD) over Rh-based catalysts", Applied Catalysis A: General, accepted May 2010 (IF-2009 = 3.564).
- 80) Unalome Wetwatana, Pattaraporn Kim-Lohsoontorn, **Suttichai Assabumrungrat**, Navadol Laosiripojana, "Catalytic Steam and Autothermal Reforming of Used Lubricating Oil (ULO) over Rh- and Ni-based Catalysts", Industrial & Engineering Chemistry Research, accepted June 2010 (IF-2009 = 1.758).
- 81) Chatsak Chettapongsaphan, Sumittra Charojrochkul, **Suttichai Assabumrungrat**, Navadol Laosiripojana, "Synthesis and testing of highly active La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>Cr<sub>0.9</sub>Ni<sub>0.1</sub>O<sub>3</sub> toward H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub>: Effect of co-reactant/CH<sub>4</sub> on its reforming characteristic", Applied Catalysis A: General, accepted July 29, 2010 (IF-2009 = 3.564).
- 82) Thirasak Pairojpiriyakul, Worapon Kiatkittipong, Amornchai Arpornwichanop, Apinan Soottitantawat, Wisitsree Wiyaratn, Navadol Laosiripojana, Eric Coiset and **Suttichai Assabumrungrat**, "Effect of operation modes on hydrogen production from glycerol at energy self-sufficient conditions: Thermodynamic analysis", submitted to International Journal of Hydrogen Energy, accepted July, 2010 (IF-2009 = 3.945)
- 83) Navadol Laosiripojana, Weerawan Sutthisripok, Sumittra Charojrochkul, **Suttichai Assabumrungrat**, "Steam reforming of LPG over Ni- and Rh- supported by CGO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Effects of support and co-fed element", Fuel, accepted 29 July 2010. (IF-2009 = 3.179).
- 84) N. Laosiripojana<sup>1</sup>, S.Charojrochkul, P. Lohsoontorn and **S. Assabumrungrat**, "Contradictory Behavior of H<sub>2</sub>S and its Advantages on Steam Reforming of CeO<sub>2</sub>-based Catalysts", J. Catalysis, accepted August 15, 2010. (IF-2009 = 5.288)

## 7. ผลงานวิชาการอื่นๆ

Book chapter/Reviews: Chapter "Fuels - Autothermal reforming" in Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (S. Assabumrungrat and N. Laosiripojana)

## 8. รางวัลที่เคยได้รับ (ด้านวิชาการโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวกับงานวิจัย)

- 1) Outstanding Paper Award from Journal of Chemical Engineering of Japan, 2002.
- 2) รางวัลนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ ประจำปี 2546 จากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในพระบรมราชูปถัมภ์
- 3) รางวัลผลงานวิจัยดีเด่น ประจำปี 2548 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย – ดร. นวดล เหล่าศิริพจน์ (นักวิจัยที่ปรึกษา - Mentor)
- 4) รางวัลผลงานวิจัยดีเด่นสำหรับนิสิตชั้นดุษฎีบัณฑิต ปีการศึกษา 2548 กองทุนรัชดาภิเษก สมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ของ ดร.วรพล เกียรติ กิตติพงษ์)
- 5) รางวัลชมเชยวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบัณฑิต ปีการศึกษา 2548 คณะ วิศวกรรมศาสตร์ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ของ นายวิบูลย์ แสงทองกิจเจริญ)
- 6) รางวัลผลงานวิจัยดีเด่นสำหรับนิสิตชั้นมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2549 กองทุนรัชดาภิเษก สมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ของ นายวิบูลย์ แสงทอง กิจเจริญ)
- 7) เมธีวิจัยอาวุโสสกว. ปี 2551 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- 8) นักวิจัยดีเด่นแห่งชาติ ปี 2551 สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ
- 9) รางวัลชมเชยผลงานวิจัย ปี 2551 สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ
- 10) รางวัล คักดีอินทาทเนีย (ผู้ทำชื่อเสียงให้คณะ) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ประจำปี 2552
- 11) รางวัลการนำเสนอแบบบรรยายดีเด่นในการประชุมทางวิชาการ The 19th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, October 26-27, 2009, Kanchanaburi, Thailand (อาจารย์ที่ปรึกษาของนายธีรศักดิ์ ไพโรจน์พิริยะกุล)

- 12) รางวัลการนำเสนอแบบโปสเตอร์ดีเด่นในการประชุมทางวิชาการ The 19th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, October 26-27, 2009, Kanchanaburi, Thailand (อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของนายปริญญา อินทรเจริญ)
- 13) รางวัลวิทยานิพนธ์ประจำปี 2552 (ประเภทดี) สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของนางสาววาสนา แจ่มศักดิ์)
- 14) รางวัล ศักดิ์อินทามณี (งานวิจัยอ้างอิงสูงสุด) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปี 2553