



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลโดยใช้กระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

Plasma – Assisted Gasification of Biomass for Syngas Production

นัยวัฒน์ สุขทั้ง^{1*}, วีรชัย อารจหาญ¹, พรรษา ลิปลับ¹ และ ทิพย์สุภินทร์ หินซุย²Naiyawat Sukthang^{1*}, Weerachai Arjarn¹, Pansa Liplap¹ and Thipsuphin Hinsui²¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000² ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000¹ School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000² Center of Excellent in Biomass, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

Received: 2 พ.ย. 59

Accepted: 24 ก.พ. 60

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นสูง ด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน พบว่า ระบบสามารถลดข้อจำกัดด้านความชื้นในวัตถุดิบได้ โดยความชื้นของเชื้อเพลิงอาจทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในเตาปฏิกรณ์ลดลง แต่มีผลต่อการเพิ่มองค์ประกอบของ H_2 ในแก๊สเชื้อเพลิงได้ค่าความร้อนอยู่ในระดับสูง ($> 5 \text{ MJ/N m}^3$) และมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ อีกทั้งยังคงประสิทธิภาพเทียบเคียงได้กับการใช้เชื้อเพลิงที่ระดับความชื้นต่ำ และเมื่อพิจารณาในกรณีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงความชื้น 16% w.b. ซึ่งคิดรวมพลังงานในการอบแห้งด้วย พบว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพได้เปรียบระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบดั้งเดิมถึง 15% แสดงให้เห็นว่าระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน สามารถเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการลดขั้นตอนและพลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง การผลิตพลังงาน ชีวมวลความชื้นสูง

Abstract

The objective of this research was to examine energy production for high-moisture biomass with plasma gasification system. It was found that this system could reduce the limit of biomass in terms of moisture content. The high moisture in the biomass caused a decrease in gasifier temperature in the reactor chamber. However, the derived H_2 in syngas was increased, obtaining high calorific value ($> 5 \text{ MJ/Nm}^3$), which is high enough for use in consecutive applications. The efficiency of plasma gasification system operated with high moisture biomass was found to be more or less the same with that of conventional gasification operated with low moisture biomass. When the drying energy required to achieved 16% w.b. is taken into account for conventional gasification system, the efficiency of the plasma gasification system is 15% higher than convent gasification, indicating that the plasma gasification system can be operated with high-moisture biomass efficiently and reduces the process steps and energy for biomass preparation.

Keywords: Plasma Gasification Downdraft Gasifier Energy Production High-moisture Biomass

*ติดต่อ: อีเมล: naiyawat47@hotmail.com, โทรศัพท์: 044-225-007, 044-225-046

1. บทนำ

ปัจจุบัน การพัฒนาและค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทนทั้งในและต่างประเทศมีความก้าวหน้าไประดับหนึ่ง แต่ยังคงไม่สามารถทดแทนพลังงานจากฟอสซิลได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากปัญหาและอุปสรรคด้านต่างๆ เช่น ปัญหาด้านเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม และสังคม เป็นต้น อย่างไรก็ตามประเทศไทยได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) โดยส่งเสริมพลังงานทดแทนประเภทต่างๆ ประกอบด้วย แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชยะ ก๊าซชีวภาพ และชีวมวล อีกทั้งพลังงานทดแทนรูปแบบใหม่ เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ คลื่นและกระแสน้ำ และไฮโดรเจน แต่หากมองไปถึงสภาพการณ์ปัจจุบันของประเทศไทย

ซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม และมีแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่เอื้อต่อการเกษตรกรรมนั้น ทำให้เห็นว่าประเทศไทยน่าจะมีศักยภาพในการผลิตพลังงานจากชีวมวลได้อย่างมหาศาล อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Green House Gas)

กระบวนการแปรรูปชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานโดยใช้วิธีทางเคมีความร้อน (Thermo-Chemical Process) สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบหลักๆ คือ กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งในส่วนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถือเป็นวิธีการผลิตพลังงานจากชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดอีกวิธีหนึ่ง

เนื่องจากระบบไม่มีความยุ่งยากและซับซ้อน โดย แก๊สซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิเคมี (Thermo-Chemical Conversion Process) โดยควบคุมเตาปฏิกรณ์ ให้เกิดการเผาไหม้แบบจำกัดปริมาณอากาศ (Partial Oxidation) ที่อุณหภูมิประมาณ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความร้อน จะเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ ประกอบด้วย แก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และ แก๊สมีเทน (CH_4) [1] แก๊สเชื้อเพลิงนี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยตรง โดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาป ภายใน (Internal Combustion Engine) เพื่อผลิต ไฟฟ้า หรือป้อนแก๊สเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า หรือนำความร้อนของไอน้ำไปใช้ประโยชน์อื่น

อย่างไรก็ดีเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพหาก วัตถุดิบมีความแปรปรวนของคุณสมบัติสูง อีกทั้งแก๊ส ซิวมวลที่ได้ยังคงมีปริมาณทาร์สูง ซึ่งส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานโดยตรง เนื่องจากแก๊ส ที่มีปริมาณทาร์สูงทำให้ค่าความร้อนลดลง และยัง ก่อให้เกิดการอุดตันในท่อส่งแก๊สหรือเครื่องยนต์ ได้ [2] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย โดย [3] ที่สนับสนุนว่า การผลิตพลังงานต้นแบบโรงไฟฟ้าเทคโนโลยีแก๊ส ซิฟิเคชันแบบ Fixed Bed Downdraft Gasification ขนาด 100 kW ยังมีข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงเกิน $15\%\text{ w.b.}$ ไม่ สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง การนำเชื้อเพลิง ซิวมวลเหล่านี้มาใช้กับระบบ จึงจำเป็นต้องมี กระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงหลายขั้นตอน ส่งผลต่อ ต้นทุนการผลิตพลังงานที่สูง ทั้งนี้หากไม่ควบคุม

คุณภาพของเชื้อเพลิงก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของ ระบบต่ำลง

แนวทางแก้ไขปัญหาคือ การศึกษาและพัฒนา เทคโนโลยีที่เหมาะสม ที่นำมาใช้เป็นแหล่งความร้อน เสริมให้กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะเพิ่มทางเลือกใน การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์ได้กว้างขวาง ขึ้น ทั้งนี้มีงานวิจัยที่สนับสนุนว่า การนำเทคโนโลยี พลาสมาเข้ามาใช้เป็นแหล่งความร้อนเสริมใน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะสามารถแก้ปัญหา ความแปรปรวนด้านกายภาพในชีวมวลที่มีความชื้น สูงได้ เนื่องจากพลาสมาสามารถสร้างอุณหภูมิได้ มากกว่า $1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้ช่วยในการรักษาอุณหภูมิสูง ไว้ได้ และยังช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา อีกทั้ง ช่วยลดเชื้อความร้อนที่สูญเสียไปจากระบบ [4] และสามารถลดปริมาณทาร์ในแก๊สชีวมวล [5] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพสูงในการสลายองค์ประกอบ ของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเราเรียกว่าเทคโนโลยี พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification) ทั้งนี้ เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คกับการนำมาประยุกต์ใช้ใน กระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตพลังงานสำหรับ ระบบแก๊สซิฟิเคชัน ยังถือเป็นเทคโนโลยีใหม่ และยังเป็น การวิจัยและพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการ [5],[6] อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้ก็ได้สนับสนุนว่า การนำพลาสมาเข้ามาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน มีความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ในการนำมาประยุกต์ใช้กับ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง และยังสามารถเพิ่มผลผลิต แก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในแก๊ส เชื้อเพลิงได้ และมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาและ นำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม

การศึกษาในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้พลาสติกช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่มีความชื้นสูง (>15% w.b.) ซึ่งการเลือกกระถินยักษ์ในการทดสอบ เนื่องจากเป็นไม้โตเร็วที่มีศักยภาพในการปลูกทดแทนและใช้เป็นเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ได้ โดยการประเมินสมรรถนะของระบบพลาสติกแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งประกอบด้วย คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ซึ่งผลการศึกษาที่น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวลในอนาคตได้

2. วิธีการวิจัย

2.1 ตัวอย่างเชื้อเพลิง

งานวิจัยนี้ จะใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นเชื้อเพลิง โดยผ่านกระบวนการลดขนาด โดยใช้เครื่องเลื่อยไม้ที่พัฒนาขึ้นสำหรับเตรียมไม้ท่อนโดยเฉพาะ และทำการลดความชื้นด้วยวิธีการตากลาน เพื่อให้ได้ความชื้นในระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ในการสับท่อนไม้กระถินยักษ์ซึ่งมีขนาดลำต้นแตกต่างกัน ซึ่งจะเลือกเอาท่อนไม้กระถินยักษ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงประมาณ 25-60 mm และเลื่อยเป็นท่อนขนาดความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 50-70 mm ทั้งนี้เพื่อให้ได้ท่อนเชื้อเพลิงที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน

สำหรับการปรับระดับความชื้นของเชื้อเพลิง จะใช้วิธีการตากลานหลังจากสับเป็นท่อนแล้ว โดยเชื้อเพลิงความชื้นต่ำ (16% w.b.) ได้จากการตากลานเป็นระยะเวลาประมาณ 1 สัปดาห์ ส่วนที่ระดับความชื้นปานกลาง ได้จากการเตรียมไม้สดและตากจนเหลือความชื้นประมาณ 28% w.b. และเชื้อเพลิงที่ระดับความชื้นสูงสุด จะใช้ไม้ที่ได้จากการตัดต้นสดและหั่นเป็นท่อน แต่เนื่องจากกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงในปริมาณมาก จำเป็นต้องใช้เวลา ทำให้ความชื้นบางส่วนหายไป จึงทำให้การเตรียมเชื้อเพลิงที่ระดับความชื้นสูงสุด มีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 34% w.b.

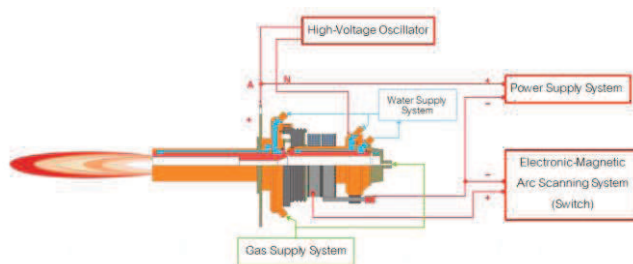
การหาองค์ประกอบประมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ความชื้นเถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile mater) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 และ การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77

ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS-932 EDXRF (เครื่องมือวิเคราะห์นี้มีค่า Limit of Detection 5 ppm) ณ ห้องปฏิบัติการของอาคารศูนย์เครื่องมือ 1 (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ส่วนธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ

2.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ อาศัยหัวพลาสมาแบบกระแสตรง (DC Plasma Torch) ภายใต้การพัฒนาโดย บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนเสริมในกระบวนการผลิตแก๊สจากชีวมวล ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วย หัวพลาสมาขนาด 50 kW, High Voltage Oscillator, High Power Supply และระบบน้ำหล่อเย็น โดยอาร์คไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำจากทั้งสเตนเลสและขั้วอะโนดซึ่งทำจากทองแดง การเดินระบบพลาสมาจะใช้ความต่างศักย์

300 V และกระแสไฟฟ้า 120 A แก๊สดั่วกลางจะใช้อากาศที่แรงดัน 700 kPa ไหลผ่านไปยังระหว่างขั้วทั้งสองซึ่งเกิดอาร์คไฟฟ้าอยู่ ทำให้อากาศเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาอุณหภูมิสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณชุดหัวพลาสมาจะใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 °C ในการหล่อเย็น และควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาออกไม่ให้เกิน 50 °C เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนอุปกรณ์หัวพลาสมา แผนผังของหัวพลาสมาและคุณลักษณะเฉพาะของหัวพลาสมาแสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 2 แผนผังของหัวพลาสมา

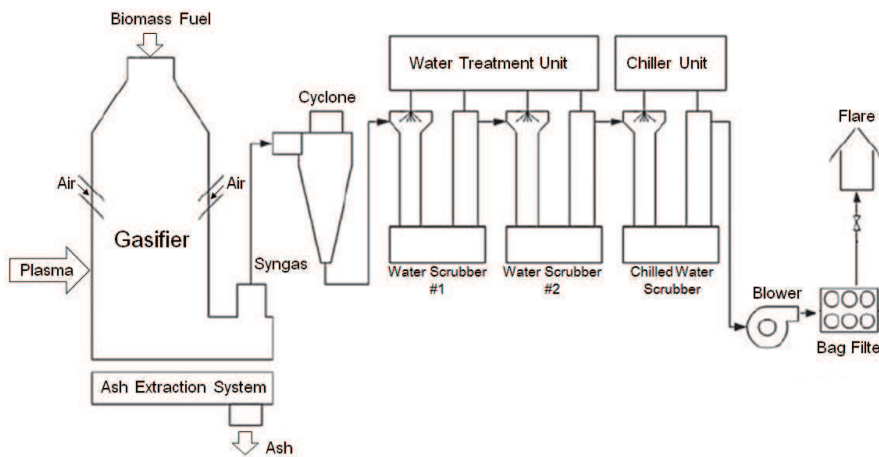
ตารางที่ 1 ลักษณะเฉพาะของหัวพลาสมา (Model: Gas Plasma Arc Torch AK-1-50DC)

Parameter	Value
Power	50 kW
Voltage (max)	300 V
Current (max)	250 A
Air	2.8 g s ⁻¹
Water (max)	500 g s ⁻¹
Life time of electrodes	200 h
Efficiency	65 %
Diameter of nozzle	25 mm
Sizes	30 × 60 mm
Weight	10 kg

ในการพัฒนาเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ จะใช้ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ที่พัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ Satake corporation Co., Ltd., ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นเตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed-bed Downdraft Gasifier) ตัวเตามีขนาดความสูง 3.11 m และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.75 m ทำจากเหล็กกล้าและภายในติดตั้งฉนวนความร้อนซึ่งทำจากเซรามิคทนความร้อนสูง หัวพลาสมาถูกติดตั้งบริเวณโซนเผาไหม้

(Combustion Zone) หรือที่ตำแหน่งประมาณ 2.28 m จากด้านบนสุดของตัวเตา ด้านล่างสุดของตัวเตามีชุดสกรู สำหรับลำเลียงถ่านออก รอบตัวเตาบริเวณโซนการเผาไหม้มีท่ออากาศขนาด 10 cm จำนวน 9 ท่อ

ระบบทำความสะอาดแก๊สและลดอุณหภูมิแก๊ส ประกอบด้วย Cyclone, Water Scrubber, Chilled Water Scrubber, และ Bag Filter โดยรูปที่ 3 แสดงผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 3 ผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

2.3 วิธีการทดลอง

เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อนจะถูกป้อนทางด้านบนของเตาจนถึงระดับที่กำหนดไว้ วาล์วที่ท่ออากาศจะถูกเปิดทั้งหมดเพื่อให้อากาศไหลเข้าไปในเตา เปิดระบบสกรูเบอร์เพื่อเริ่มต้นเดินระบบ เชื้อเพลิงจะถูกจุดติดด้วยหัวพลาสมาที่ติดตั้งบริเวณโซนเผาไหม้ เมื่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว จะทำให้เกิดแก๊สสังเคราะห์หรือออกมาจากเตาและไหลผ่านไปยังระบบทำความสะอาดและลดความร้อน โดยฝุ่นและทาร์ รวมถึงไอน้ำที่ปนเปื้อนอยู่ในแก๊สสังเคราะห์จะถูกกำจัดออกโดยไซโคลนตามด้วยชุด Water Scrubber และ Chilled Water Scrubber จากนั้นแก๊สสังเคราะห์จะไหลผ่านถุงกรองเพื่อดักอนุภาคต่างๆ ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.1 mm

เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะไหลไปยังชุดทดสอบการลุกไหม้ อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์สำหรับการศึกษานี้ยึดตามความสามารถสูงสุดของ Blower ซึ่งมีค่าประมาณ $220 \text{ m}^3/\text{hr}$ โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Model : DIG-SIDO-O, Nippon Flow Cell Co., Ltd, Tokyo, Japan) ซึ่งจะติดตั้งระหว่างชุดถุงกรองและชุดทดสอบการลุกไหม้ การทดสอบเดินระบบแต่ละครั้งจะใช้เวลา 4 ชั่วโมง อัตราการใช้เชื้อเพลิงสามารถวัดได้จากปริมาณเชื้อเพลิงที่เติมเข้าในเตาเทียบกับเวลา และทำการควบคุมการดึงแก๊สออกอยู่ที่ประมาณ 5% ในทุกๆ การทดลอง

สำหรับการวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ จะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Typ K) ซึ่งติดตั้งที่ระดับ

ความสูง 0.66 m, 1.06 m, 1.46 m, 1.86 m, 2.28 m, และ 2.70 m จากด้านบนสุดของเตา ค่าของอุณหภูมิภายในเตาจะถูกบันทึกทุกๆ 10 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของโซนปฏิกิริยาต่างๆ คือ Drying, Pyrolysis, Combustion, and Reduction

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง Online Infrared Gas Analyzer (Model Gasboard-3100, Wuhan Cubic Optoelectronics Co., Ltd., Wuhan, China) ซึ่งจะวัดที่ตำแหน่งหลังจากแก๊สออกจากชุดอุปกรณ์ทุกๆ 10 นาที สำหรับปริมาณทาร์และฝุ่น จะทำการตรวจวัดทุกๆ 30 นาที โดยการสุ่มตัวอย่างแก๊สประมาณ 300 L ด้วยการดูดแก๊สผ่านกระดาศกรอง (GF/B) และนำไปวิเคราะห์ [7]

สมรรถนะของระบบแก๊สซิฟิเคชันจะถูกประเมินโดยใช้สมการของ [8]

$$\eta_{cg} = (V_g \times LHV_g) / (m_{fuel} \times LHV_{fuel}) + P_{torch} \quad (1)$$

η_{cg} = the cold-gas efficiency (%)

m_{fuel} = the waste reject consumption rate (kg/h)

LHV_g = the calorific value of the gas produced (MJ/Nm³)

LHV_{fuel} = the low heating value of the rejected waste (MJ/kg)

V_g = the volume flow rate of the gas produced (Nm³/h)

P_{torch} = the power input for the plasma torch

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 คุณสมบัติของไม้กระถินยักษ์

ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมป์แคลอรีมิเตอร์ของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ที่ระดับความชื้น 16%w.b., 28%w.b. และ 34%w.b. พบว่ามีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value) เท่ากับ 16.02, 13.73 และ 12.59 MJ/kg ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value) เท่ากับ 14.54, 12.12 และ 10.92 MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนต่ำนี้สามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนสูงโดยใช้ความสัมพันธ์ $LHV = HHV - 0.02395(9H + MC_p)$ [9] จากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ดังกล่าวถือว่ามีความเทียบเคียงและสอดคล้องกับรายงานของ [10],[11] ซึ่งได้รายงานค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ว่ามีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value) อยู่ในช่วง 17.92-19.67 MJ/kg (น้ำหนักมวลแห้ง) จากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลง เมื่อเชื้อเพลิงมีความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของ [12] ว่าในเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง จะมีน้ำอยู่ในส่วนประกอบของเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่สูงขึ้น จึงทำให้องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ (Combustible Matter) ในเชื้อเพลิงมีสัดส่วนลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนลดลงตามไปด้วย

จากการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ ซึ่งเป็น ค่าสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วยปริมาณสารระเหย (Volatile Matter),

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และปริมาณเถ้า (Ash) เท่ากับ 80.94%, 17.53% และ 1.53% ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบได้กับข้อมูลของ [13]

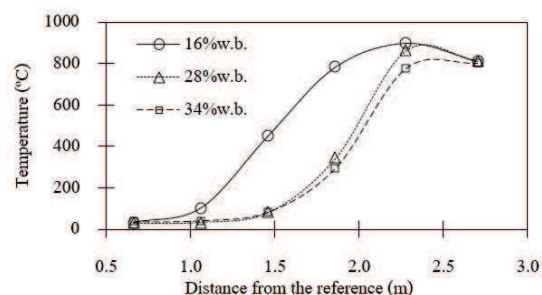
ส่วนการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) ของเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง (ไม่คิดรวมปริมาณเถ้า) ประกอบด้วย คาร์บอน (C) 49.2%, ไฮโดรเจน (H) 6.05%, ไนโตรเจน (N) 0.47%, ซัลเฟอร์ (S) 0.03% และ ออกซิเจน (O) 42.74% ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่ามีค่าสอดคล้องกับ [12]

3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา

จากการเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ สับท่อนที่ความชื้น 16% w.b., 28% w.b. และ 34% w.b. พบว่าระบบสามารถเดินได้ปกติและต่อเนื่อง โดยลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งยังคงรูปแบบเหมือนกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไป และสามารถอธิบายขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาในเตาตามตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิได้ดังนี้ คือ ตำแหน่ง 0.66 - 1.46 m ช่วงนี้มีอุณหภูมิน้อยกว่า 200 °C ซึ่งแสดงถึงช่วงการอบแห้ง ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนพาและระเหยออกไปในโซนนี้ หลังจากนั้นอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากตำแหน่ง 1.46 - 2.28 m จะเป็นการกลั่นสลายของเชื้อเพลิงแข็งหรือกระบวนการไพโรไลซิสในโซนนี้ และมีการปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น กลุ่มแก๊สไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ และทาร์ เหลือไว้เฉพาะ

ส่วนที่เป็นถ่านแข็ง หรือ (Char) ไว้ [14] ส่วนที่ตำแหน่ง 1.86 - 2.28 m ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศและความร้อนจากพลาสมาอาร์คเพิ่มเข้าไป จะเป็นโซนการเผาไหม้ หรือ Combustion Zone จากนั้นช่วงสุดท้ายของเตาเป็นช่วงที่อุณหภูมิลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งเป็นช่วงที่มีการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สที่ผลิตจากโซนด้านบนกับถ่านที่เหลือ หรือที่เรียกว่า Reduction Zone ทำให้มีการผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ (H₂) โดยทั่วไปอุณหภูมิในช่วงนี้ควรที่จะสูงกว่า 500 °C [15]

ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile) พบว่า ความชื้นมีผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ระดับของอุณหภูมิภายในเตาลดลง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ระบบสามารถดำเนินต่อไปได้ ซึ่งในความเป็นจริง การป้อนวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงแทบจะเป็นไปไม่ได้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยนํ้ามากเกินไป จนทำให้อุณหภูมิไม่สูงเพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้แหล่งความร้อนภายนอกจากพลาสมาทำให้ข้อจำกัดด้านความชื้นของวัตถุดิบลดลงได้



รูปที่ 4 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ

3.3 คุณสมบัติของแก๊สสังเคราะห์

จากผลการทดสอบ พบว่า ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง คือ CO , H_2 และ CH_4 โดยปริมาณ CO จะมีค่าลดลง อยู่ในช่วงประมาณ 3.83% และ 5.5% เมื่อเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงขึ้นเป็น 28% w.b. และ 34% w.b. ตามลำดับ

สำหรับปริมาณ H_2 พบว่า จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ เนื่องจากมีน้ำมากพอสำหรับกระบวนการผลิต H_2 โดยพบว่าปริมาณของ H_2 เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วงประมาณ 2.41% และ 3.53% เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นสูงขึ้นเป็น 28% w.b. และ 34% w.b. ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติองค์ประกอบของ H_2 ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้น 15% w.b. จะมีค่าไม่เกิน 20% [3] การเพิ่มขึ้นและลดลงของ H_2 และ CO สอดคล้องกับผลการทดลองของ [16] และ [17] ดังกล่าว จะเห็นว่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีความแปรปรวนตามความชื้น ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อน (Calorific Value: LHV) ของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังสูงเพียงพอสำหรับนำไปใช้กับเครื่องยนต์แก๊ส ซึ่งต้องการค่าความร้อนอย่างน้อยประมาณ 4.2 MJ/Nm^3 [12] ซึ่งคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงความชื้นสูง ยังคงอยู่ในระดับที่ดีได้นั้น น่าจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เป็นหลัก เนื่องจากการใช้พลาสมาทำให้สามารถรักษาระดับอุณหภูมิภายในเตาไม่ให้อุณหภูมิเกินไป อีกทั้งการใช้พลาสมาอุณหภูมิสูงสามารถทำลายพันธะทางเคมีของ

เชื้อเพลิงทำให้เกิดปริมาณอิเล็กตรอน ไอออน และโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นและผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ [8]

3.4 ปริมาณทาร์และฝุ่น

ปริมาณของทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดสอบเชื้อเพลิงชีวมวลความชื้นสูง พบว่าปริมาณทาร์มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง $2.97\text{--}3.32 \text{ mg/Nm}^3$ ในทุกระดับความชื้นเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณฝุ่นพบว่ามีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับรายงานของ [3] แต่หากพิจารณาปริมาณทาร์และฝุ่นรวม ในทุกระดับความชื้นเชื้อเพลิง พบว่ายังคงมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณทาร์และฝุ่นที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงจะมีค่าเท่ากับ $50\text{--}500 \text{ mg/Nm}^3$ [18] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบ การออกแบบสภาวะการทำงาน และวิธีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ [19] อีกทั้งประสิทธิภาพการกำจัดทาร์และฝุ่น ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่เลือกใช้งาน [20] โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิง

MC (%w.b.)	Impurity (mg/Nm^3)		
	Tar	Dust	Total
16	3.11	85.27	88.38
28	2.97	62.56	65.53
34	3.32	68.88	72.20

3.5 การประเมินสมรรถนะของระบบ

จากการทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์สับท่อน ที่ความชื้นเฉลี่ย 16% w.b., 28% w.b. และ 34% w.b. ด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน และได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-Gas Efficiency: η_{cg}) แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า เมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้นเป็น 28% w.b. ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สจะมีค่าลดลง 9.03% แต่เมื่อเพิ่มระดับความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวลเป็น 34% w.b. พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับที่

16% w.b. คือมีค่าประมาณ 71.34% ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่อน้ำหนักเปียกที่ใส่เข้าไปในระบบน้อยกว่า เนื่องจากมีส่วนประกอบของความชื้นหรือน้ำเป็นจำนวนมาก อีกทั้งน้ำในเชื้อเพลิงยังมีส่วนในการเพิ่มองค์ประกอบของแก๊ส H_2 ในแก๊สเชื้อเพลิง จึงทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ยังคงอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงอยู่ ($>5 \text{ MJ/Nm}^3$) ทำให้ระบบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงความชื้นสูงด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันยังคงประสิทธิภาพอยู่ในระดับเดียวกันกับที่ความชื้น 16% w.b. ได้

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเดินระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

Parameter	Unit	%MC of Fuel (% w.b.)		
		16	28	34
Syngas flow rate	Nm^3/h	216.40	215.50	218.00
LHV of Fuel	MJ/kg	14.54	12.12	10.92
Consumption rate	kg/h	109.90	132.35	129.60
Ash discharge rate	kg/h	5.52	5.53	5.51
	%	5.02	4.17	4.25
CO	%	19.34	14.51	13.84
H_2	%	20.30	22.71	23.83
CH_4	%	3.30	2.37	2.08
O_2	%	0.61	0.48	0.63
CO_2	%	13.03	15.10	14.80
LHV	MJ/Nm^3	5.80	5.12	5.05
Plasma Power Input	MJ/h	129.60	129.60	129.60
Cold-gas efficiency (η_{cg})	%	72.66	63.63	71.34

นอกจากนั้น หากทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตพลังงานเชิงเปรียบเทียบ ระหว่างระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้น 34% w.b. กับระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบเดิมซึ่งใช้

เชื้อเพลิงชีวมวลความชื้น 16% w.b. แต่ทำการวิเคราะห์รวมพลังงานในการอบแห้งด้วย โดยค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งชีวมวลที่จะนำมาวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลจากรายงานการวิจัยของ [21] ที่ได้มี

การศึกษาเรื่องการอบแห้งเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ สับท่อน โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี ซึ่งทำการทดสอบอบแห้งไม้กระถินยักษ์สับท่อนที่ระดับความชื้นเริ่มต้น 42% w.b. ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 15% w.b. โดยใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (Specific Energy Consumption, SEC) เท่ากับ 13.89 MJ/kg_{evaporated water}

จากผลการวิเคราะห์สมรรถนะของทั้ง 2 ระบบ จะเห็นได้ว่า หากมีการคิดรวมพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลด้วย จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันได้เปรียบระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด คือ 71.34% (สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน) และ 55.62% (สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบเดิม) ดังนั้น การใช้ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล จะช่วยลดขั้นตอนและพลังงานในกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลได้

4. สรุป

การศึกษานี้ใช้ไม้กระถินยักษ์สับท่อนความชื้นสูงเป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ผลการทดสอบทำให้เห็นว่าความชื้นส่งผลต่ออุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ คือ เมื่อความชื้นเชื้อเพลิงสูงขึ้นทำให้ระดับอุณหภูมิในเตาลดลง นอกจากนั้นความชื้นในเชื้อเพลิงยังมีผลต่อคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบของ H_2 ในแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงสูงขึ้น และได้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงอยู่ในระดับ $>5 \text{ MJ/Nm}^3$ ส่วน

ปริมาณทาร์และฝุ่นอยู่ในระดับมาตรฐาน สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์แก๊สได้ สำหรับสมรรถนะของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ในแง่ของประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานพบว่า ที่ระดับความชื้นของเชื้อเพลิงเท่ากับ 34% w.b. สามารถคงประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับที่ระดับความชื้น 16% w.b. แสดงให้เห็นว่าระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสามารถลดข้อจำกัดด้านความชื้นของเชื้อเพลิง อีกทั้งเป็นการช่วยลดขั้นตอนและพลังงานในกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2557

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Higman C, Van der Burgt M. Gasification. 2nd ed. Oxford: Elsevier; 2008.
- [2] Han J, Kim H. The Reduction and Control Technology of Tar During Biomass Gasification/Pyrolysis: An Overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008; 12(2): 397-416.
- [3] Arjhan W, Hinsui T, Liapl P, Raghavan GSV. Evaluation of Energy Production from Different Biomass Feedstock Using a Pilot

- Scale Downdraft Gasifier. *Biobase Materials and Bioenergy*. 2012; 6: 1-11.
- [4] Rutberg PHG, Bratsev AN, Kuznetsov VA, Popov VE, Ufimtsev AA, Shtengel SV. On Efficiency of Plasma Gasification of Wood Residues. *Biomass and Bioenergy*. 2011; 35(1): 495-504.
- [5] Hlina M, Hrabovsky M, Kopecky V, Konrad M, Kavka T. Plasma Gasification of Wood and Production of Gas with Low Content of Tar. *Czechoslovak Journal of Physics*. 2006; 56: 1179-84.
- [6] Zhang L, Xu CC, Champagne P. Overview of Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass. *Energy Conversion and Management*. 2010; 51(5): 969-82.
- [7] Bhattacharya SC, Hla SS, Pham HL. A Study on a Multi-Stage Hybrid Gasifier-Engine System. *Biomass and Bioenergy*. 2001; 21(6): 445-60.
- [8] Janajreh I, Raza SS, Valmundsson AS. Plasma Gasification Process: Modeling, Simulation and Comparison with Conventional Air Gasification. *Energy Conversion and Management*. 2013; 65: 801-9.
- [9] Nakorn T. *Biomass Conversion Technology. Thailand-Japan*. Bangkok: 2010.
- [10] Chotchutima S, Tudsri S, Kangvansaichol K, Sripichitt P. Effects of Sulfur and Phosphorus Application on the Growth, Biomass Yield and Fuel Properties of *Leucaena* (*Leucaena Leucocephala* (Lam.) de Wit). as Bioenergy Crop on Sandy Infertile Soil. *Agriculture and Natural Resources*. 2016; 50: 54-9.
- [11] Rengsirikul K, Kanjanakuha A, Ishii Y. Potential Forage and Biomass Production of Newly Introduced Varieties of *Leucaena* (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit). *Grassland Science*. 2011; 57: 94-100.
- [12] Quaak P, Knoef H, Stassen H. *Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technology*. Washington DC: The World Bank; 1999.
- [13] Reed TB, Das A. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*. Colorado: Solar Energy Research Institute; 1988.
- [14] Rajvanshi AK. Biomass Gasification. In: Goswami YD, editor. *Alternative Energy in Agriculture*. Boca Raton: CRC Press; 1986. p. 83-102.
- [15] Kirubakaran V, Sivaramakrishnan V, Nalini R, Sekar T, Premalatha M, Subramanian P. A Review on Gasification of Biomass. *Renewable and Sustainable Energy/Review*. 2009; 13(1): 179-86.
- [16] Zainal ZA, Rifau A, Quadir GA, Seetharamu KN. Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier. *Biomass and Bioenergy*. 2002; 23(4): 283-9.

- [17] Sharma AK. Equilibrium Modeling of Global Reduction Reactions for a Downdraft (Biomass) Gasifier. *Energy Conversion and Management*. 2008; 49(4): 832-42.
- [18] Kaupp A, Goss JR. State of Art for Small Scale (50 kW) to Gas Producer-Engine Systems. Final Report to the USDA USFS, University of California; 1981. Contract No.: 53-319R-0-141.
- [19] Devi L, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. A Review of the Primary Measures for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes. *Biomass and Bioenergy*. 2003; 24(2): 125-40.
- [20] Phuphuakrat T, Nipattummakul N, Namioka T, Kerdsuwan S, Yoshikawa K. Characterization of Tar Content in the Syngas Produced in a Downdraft Type Fixed Bed Gasification System from Dried Sewage. *Fuel*. 2010; 89: 2278-84.
- [21] Weerachai A. Study of a Small-Scale Biomass Power Plant for Rural Communities (phase II). Final Report. National Research Council of Thailand; 2007.

