

การออกแบบและหาประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟิเออร์แบบไหลลง โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

DESIGN AND EFFICIENCY OF DOWNDRAFT GASIFIER USING WASTE FROM PROCESSING OF CASHEW NUT AS FUEL

พิทักษ์ คล้ายชม^{1*} สิงหเดช แท่งจวง² พรทิพพา พิณญาพงษ์³

Pitak Khlaichom^{1*} Singhadej Tangjuank² Porntippa Pinyaphong³

Received : 14 May 2020

Revised : 30 Jun 2020

Accepted : 30 Jun 2020

^{1*} นักศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

² รองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

* Corresponding author E-mail: pitak.khl@uru.ac.th

บทคัดย่อ

การนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ หากนำไปใช้กับเตาแก๊สซิฟิเออร์จะทำให้ใบพัดของเครื่องเป่าลมและชุดวาล์วต่าง ๆ อุดตันเสียหายได้ง่าย เนื่องจากในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีปริมาณน้ำมัน CNSL จำนวนมาก จึงจำเป็นต้องสกัดน้ำมัน CNSL ออกก่อนจะเหลือเป็นกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและศึกษาประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟิเออร์แบบไหลลงที่เหมาะสมกับการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง โดยใช้หลักการออกแบบเตาแก๊สซิฟิเออร์แบบไหลลงชนิด V-Hearth มีขนาด 130 kW การสร้างและติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชัน ประกอบด้วย เตาแก๊สซิฟิเออร์ ไซโคลนสกรับเบอร์ และหัวเผา อาศัยแรงเหวี่ยงนำของสกรับเบอร์แบบเวนจูรีจำนวน 2 ชุด สร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาทดแทนการใช้เครื่องเป่าลม พร้อมทั้งศึกษาความหนาแน่น องค์ประกอบ ค่าความร้อนของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซิฟิเออร์

ผลการวิจัย พบว่า กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีความหนาแน่นเฉลี่ย 486 kg/m^3 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) มีสัดส่วนร้อยละ 54.09 6.08 38.35 1.38 ตามลำดับ มีค่าความร้อนเท่ากับ $21,217 \text{ kJ/kg}$ ในการศึกษาประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟิเออร์ สามารถวัดความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาได้ 2.6 m/s มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 11.4 kg/hr คิดเป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.22 วัดอัตราการไหลของแก๊สได้ $26.79 \text{ m}^3/\text{hr}$ องค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) มีสัดส่วนร้อยละ 16 9.7 1.5 ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สเท่ากับ 3.605 MJ/Nm^3 และระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 39.92 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: เตาแก๊สซิฟิเออร์แบบไหลลงชนิด V-Hearth, กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

Abstract

Using cashew nut as fuel in gasifier causes air pollution problems. It will easily damage the blower blades and valve sets of the gasifier. Since the cashew nut shell contains a large amount of CNSL oil, it is necessary to firstly extract the CNSL oil so that it still remains as cashew nut shell waste. The objective of this research is to design and study the efficiency of a downdraft gasifier suitable for using cashew nut shell waste as fuel. The principle is to design a V-Hearth downdraft gasifier with a size of 130 kW. Construction and installation of a gasification system consists of gasifier, cyclone, scrubber and burner by adopting the induction force of 2 sets of Venturi scrubber in order to produce air suction to the stove instead of using the blower. This research also studies the density, composition, calorific value of cashew nut shell waste, as well as analyzes the thermal efficiency of the gasifier.

The results significantly show that the cashew nut shell waste density has an average density of 486 kg/m³, with the percentage proportion of elements such as carbon (C), hydrogen (H), oxygen (O) and nitrogen (N) of 54.09, 6.08, 38.35, 1.38, respectively, also calorific value is 21,217 kJ/kg. Furthermore, the outputs also expose the efficiency of the gasifier can be able to measure the speed feeding air to the gasifier which is 2.6 m/s with fuel consumption rate: 1.4 kg/hr, the air to fuel ratio: 2.22, the gas flow rate: 26.79 m³/hr. Compositions of the gas producer are included carbon monoxide (CO), hydrogen (H₂) and methane (CH₄) with 16, 9.7, 1.5 percent respectively. The heat value of the gas producer is 3.605 MJ/Nm³ while the thermal efficiency of the gasification system using cashew nut shell is 39.92 percent.

Keywords: V-Hearth downdraft gasifier, Cashew nut shell waste

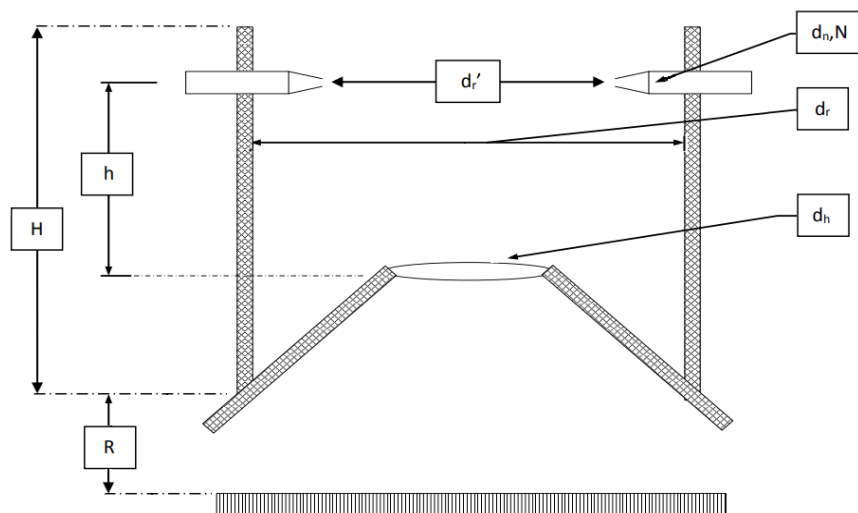
1. บทนำ

ปี 2561ประเทศไทยมีผลผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 21,058 ตันต่อปี [1] เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปจะทำให้เกิดเศษวัสดุที่เหลือทิ้ง คือเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นจำนวนมาก โดยมีสัดส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อปริมาณผลผลิตเท่ากับ 0.74 ตันต่อตันผลผลิต มีค่าความร้อน 5.49 MJ/kg ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานชีวมวลทดแทนการใช้น้ำมันดิบและไฟฟ้าได้ [2] อย่างไรก็ตาม การนำเปลือกมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาตรงจะเกิดปัญหาล้างแวล้อม กลิ่นเหม็นฉุน ฝุ่นละอองและหมอกควันเป็นมลพิษทางอากาศ หากนำไปใช้กับเตาแก๊สชีฟิเออร์ (Gasifier) จะทำให้ชุดวาล์ว ใบพัดของเครื่องเป่าลม และชิ้นส่วนต่าง ๆ อุดตันเสียหาย [3] เนื่องจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Shell Liquid : CNSL) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 35.10 [4] น้ำมัน CNSL มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ เหนียวข้น มีกลิ่นฉุน คุณสมบัติทนความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานถึง 200 °C มีการนำน้ำมัน CNSL ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์อย่างมากในทางการแพทย์และอุตสาหกรรม [5] ดังนั้นจึงควรสกัดแยกน้ำมัน CNSL ออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ก่อน ด้วยเครื่องสกัดน้ำมันแบบเกลียวอัด (Screw Press) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่สกัดได้ 22.08 [6] แล้วจึงนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อไป โดยเทคโนโลยีแก๊สชีฟิเคชัน (Gasification) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer Gas)

เทคโนโลยีแก๊สชีฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่แปลงสภาพชีวมวลของแข็งโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) ที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวมาเป็นโปรดิวเซอร์แก๊สที่ประกอบด้วย CO H₂ และ CH₄ ปฏิกิริยาของกระบวนการแก๊สชีฟิเคชัน เรียกว่า แก๊สชีฟิเออร์ (Gasifier) ซึ่งภายในมีกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ การทำแห้ง (Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) การเผาไหม้ (Combustion /

Oxidation) และการรีดักชัน (Reduction) [7] สำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้กับกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง (Imbert Downdraft Gasifier) ชนิด V-Hearth ซึ่งเป็นเตาที่ออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตา ไหลผ่านวงแหวนเพื่อกระจายอากาศให้หัวฉีดโดยรอบในโซนเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่าง และผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรง ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้ จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน และไอของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันดินแตกตัวเป็นแก๊ส [7] โดยจุดเด่นของเตาแก๊สซิไฟเออร์ชนิด V-Hearth จะออกแบบเป็นเหล็กรูปวงแหวนรูปตัว V คว่ำลง ดังรูปที่ 1 โดยบริเวณระหว่างระนาบของหัวฉีดและวงแหวนเหล็กจะมีถ้ำก่อดักขึ้น ช่วยเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อนทำให้เตาแก๊สซิไฟเออร์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น ในการออกแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth จะต้องคำนวณขนาดต่าง ๆ ตามตารางที่ 1

จากข้อมูลด้านชีวมวลและเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและศึกษาประสิทธิภาพเตาแก๊สซิไฟเออร์ที่เหมาะสมกับการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง เป็นการเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์จากวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป และลดต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้อย่างยั่งยืน



รูปที่ 1 แก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth และตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ [8]

ตารางที่ 1 ตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
d_n	ขนาดของคอขวด (Throat) ที่เล็กที่สุดของเตา
d_r	ขนาดของโซนเผาไหม้
d_r'	ขนาดของเส้นรอบวงของปลายหัวฉีด (Nozzle)
H	ขนาดความสูงของโซนเผาไหม้
h	ความสูงของหัวฉีดวัดจากคอขวดที่เล็กที่สุด
R	ขนาดความสูงของโซนรีดักชัน
d_N	ขนาดรูหัวฉีด
N	จำนวนหัวฉีด

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างเตาแก๊สซีฟเอร์ที่เหมาะสมกับการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง และศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซีฟเอร์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาและออกแบบเตาแก๊สซีฟเอร์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบแก๊สซีฟเอร์ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ในการออกแบบใช้หลักการออกแบบแก๊สซีฟเอร์แบบไหลดชนิด V-hearth ตามทฤษฎีของ [9] โดยได้ดำเนินการสร้างและทดลองหาประสิทธิภาพของระบบแก๊สซีฟเอร์ด้วย

3.1 คุณสมบัติของชีวมวลวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้คือ กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งเป็นชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการบีบน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ หรือ CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ดังรูปที่ 2 มีความหนาแน่นเฉลี่ย 486 kg/m^3 มีค่าความร้อนเท่ากับ $5,071.10 \text{ kcal/kg}$ หรือ $21,217 \text{ kJ/kg}$ โดยได้ส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (ข) กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis)		
Moisture content (%)	37.50	9.09
Volatile matter (%)	59.57	88.28
Fixed carbon (%)	1.10	0.24
Ash (%)	1.83	2.39
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)		
Carbon (%)	53.93	54.09
Hydrogen (%)	6.07	6.08
Oxygen (%)	38.79	38.45
Nitrogen (%)	1.21	1.38
Heating value (kcal/kg)	5,458.20	5,071.10

3.2 การออกแบบเตาแก๊สซีฟเอร์ ในงานวิจัยนี้ มีความต้องการพลังงานความร้อนไปต้มน้ำปริมาณ 300 ลิตร เพื่อใช้ในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยกำหนดให้เตาแก๊สซีฟเอร์มีขนาด 130 kW ใช้อากาศเป็นตัวกลางทำปฏิกิริยา โดยปกติค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สจะอยู่ระหว่าง 4,000 – 6,000 kJ/m³ จึงกำหนดให้ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สที่คาดว่าจะได้รับเท่ากับ 5,000 kJ/m³

3.2.1 การคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราการไหลของโปรดิวเซอร์แก๊ส ระบบแก๊สซีฟเอร์โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพประมาณ 80% เนื่องจากระบบที่ออกแบบมีการสูญเสียความร้อนบางส่วน งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซีฟเอร์ที่คาดว่าจะได้รับเท่ากับ 70 % ซึ่งต้องสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นไปอีก โดยสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราค่าความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุด} &= \frac{\text{กำลังความร้อนที่ต้องการ}}{\text{ประสิทธิภาพเตาผลิตก๊าซ}} \\ &= \frac{130}{0.7} \\ &= 185.71 \text{ kW} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง} &= \frac{\text{อัตราค่าความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุด}}{\text{ความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล}} \\ &= \frac{185.71}{22,217} \\ &= 0.00836 \text{ kg/s} \\ \text{หรือ} &= 30.09 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของโปรดิวเซอร์แก๊ส} &= \frac{\text{กำลังความร้อนที่ต้องการ}}{\text{ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส}} \\ &= \frac{130}{5,000} \\ &= 0.026 \text{ Nm}^3/\text{s} \\ \text{ดังนั้น อัตราการไหลของโปรดิวเซอร์แก๊ส} &= 93.6 \text{ Nm}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (3)$$

3.2.2 การคำนวณหาขนาดของเตาแก๊สซีฟเอร์สำหรับเตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลงชนิด V-hearth ค่า Heart load (B_g) มีหน่วยเป็น m³/ cm²/ h มีค่าอยู่ในช่วง 0.3 – 0.9 ในงานวิจัยนี้กำหนดค่า B_g เท่ากับ 0.7 พื้นที่หน้าตัดของ Throat คำนวณได้จากสมการที่ 4

$$B_g = \frac{Q}{A} = 0.7 \quad (4)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการไหลของโปรดิวเซอร์แก๊ส (Nm³/h)

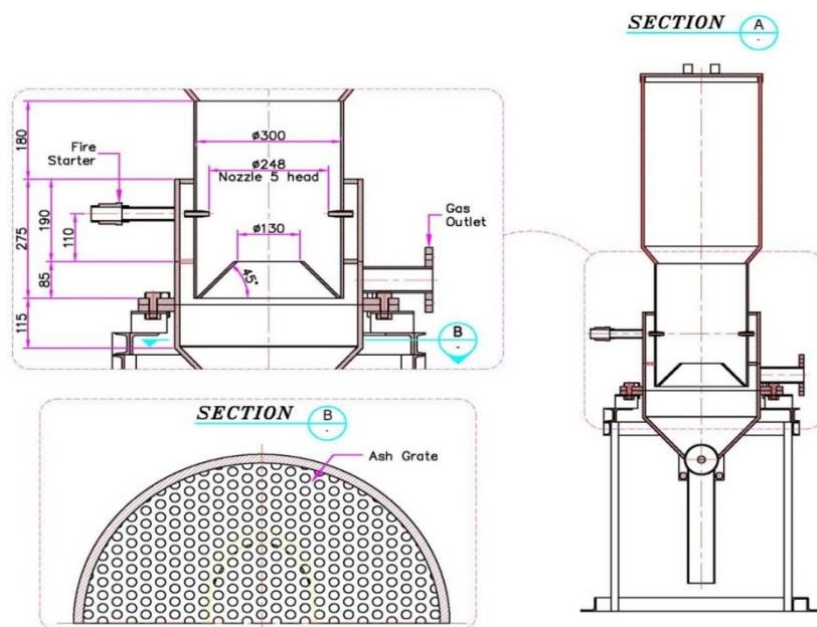
A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอคอดหรือ Throat (cm²)

จากค่า $Q = 93.6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ คำนวณพื้นที่หน้าตัดของ Throat ได้เท่ากับ 133.71 cm² มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Throat เท่ากับ 13 cm หรือ 130 mm

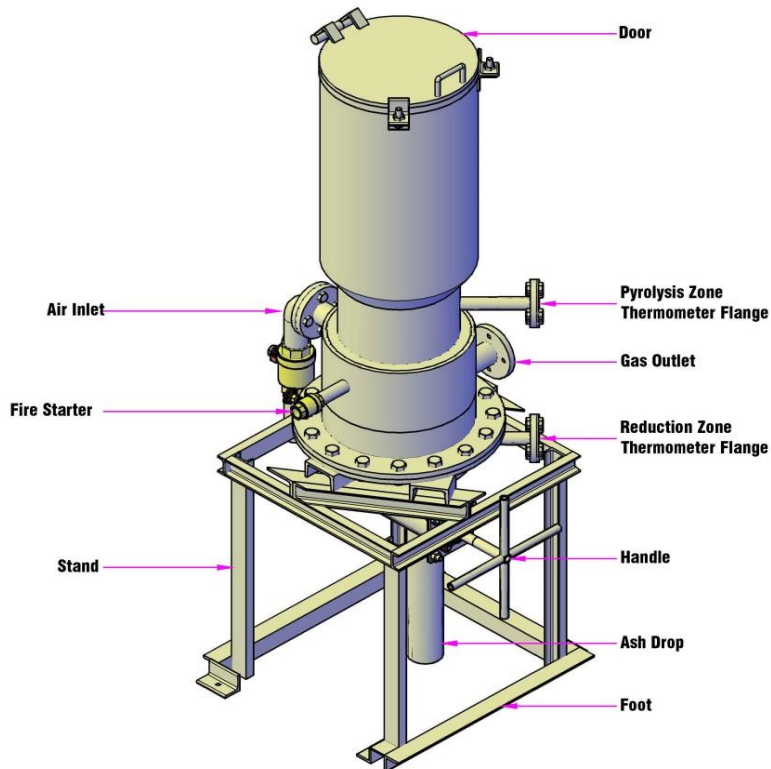
ตารางที่ 2 ขนาดต่าง ๆ ของเตาแก๊สซิฟิเคชัน

ตัวแปร	ขนาด (มิลลิเมตร)
d_h	130
d_r	300
d_v	248
H	275
h	110
R	115
d_N	12.5
N	5 หัว

การหาขนาดต่าง ๆ ของแก๊สซิฟิเคชัน ใช้วิธีการเปิดตารางตามทฤษฎีของ [9] ได้ค่าตามตารางที่ 2 และแสดงขนาดของแก๊สซิฟิเคชันในส่วนที่สำคัญดังรูปที่ 3 ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคออด (Throat) ที่เล็กที่สุด (d_h) โชนเผาไหม้ (d_r) และเส้นรอบวงของปลายหัวฉีด (d_v) มีขนาด 130, 300 และ 248 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความสูงของโชนเผาไหม้ (H) ระยะของระนาบหัวฉีดจาก Throat ที่เล็กที่สุด (h) ความสูงของโชนรีดักชัน (R) มีค่าเท่ากับ 275, 110 และ 115 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีหัวฉีด (Nozzle) จำนวน 5 หัว แต่ละหัวมีรูขนาด 12.5 มิลลิเมตร มุมเอียงของคอคออด (V-hearth) เท่ากับ 45 องศา โดยภาพรวมของแก๊สซิฟิเคชันที่ออกแบบได้แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ขนาดที่สำคัญของเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงชนิด V-hearth



รูปที่ 4 รูปแบบเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงชนิด V-hearth

3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ ค่าพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาแก๊สที่ระบบสามารถผลิตได้ เทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในระบบ [10] สามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$\eta_{th} = \frac{HV_{gas} \times Q_{gas}}{HV_{fuel} \times FCR_{fuel}} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่	η_{th}	คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน (%)
	HV_{gas}	คือ ค่าความร้อนของปฏิกิริยาแก๊ส (MJ/Nm^3)
	Q_{gas}	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของปฏิกิริยาแก๊สที่ออกจากระบบ (Nm^3/hr)
	HV_{fuel}	คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)
	FCR_{fuel}	คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของปฏิกิริยาแก๊ส [11] มีหน่วยเป็น (MJ/Nm^3) ซึ่งประกอบด้วย แก๊ส CO H_2 และ CH_4 สามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$HV_{gas} = (X_{CO} \times 12.63) + (X_{H_2} \times 10.78) + (X_{CH_4} \times 35.88) \quad (6)$$

โดยที่	X_{CO}	คือ สัดส่วนโดยปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์
	X_{H_2}	คือ สัดส่วนโดยปริมาณของไฮโดรเจน
	X_{CH_4}	คือ สัดส่วนโดยปริมาณของมีเทน

อัตราการไหลของแก๊ส (Gas Flow Rate) มีหน่วยเป็น m^3/s ในห้องสั้งโปรติวเซอร์แก๊ส สามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$Q_{\text{gas}} = A \times V \quad (7)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)
 V_{gas} คือ ความเร็วของแก๊ส (m/s)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption Rate) มีหน่วยเป็น kg/s สามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$\text{FCR}_{\text{fuel}} = \frac{m_{\text{fuel}}}{t} \quad (8)$$

โดยที่ m_{fuel} คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด (s)

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air Fuel Ratio) สามารถหาได้จากสมการที่ 9

$$\text{A/F}_{\text{ratio}} = \frac{m_{\text{air}}}{\text{FCR}_{\text{fuel}}} \quad (9)$$

โดยที่ m_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ มีหน่วยเป็น kg/s สามารถหาได้จากสมการที่ 10

$$m_{\text{air}} = \rho \times A \times V_{\text{air}} \quad (10)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้อง (kg/m^3)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)
 V_{air} คือ ความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตา (m/s)

3.4 ขั้นตอนการทดลองขั้นตอนการทดลองในแต่ละครั้ง เริ่มจากการเติมเชื้อเพลิงให้เต็มแล้วปิดฝาให้แน่น เติมน้ำให้เต็ม เปิดวาล์วควบคุมอากาศเข้าและวาล์วควบคุมการจ่ายโปรติวเซอร์แก๊ส จากนั้นเปิดปั๊มน้ำทั้ง 2 ตัว แล้วจุดไฟที่ช่องจุดไฟ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลติดไฟแล้ว ให้ทดสอบการจุดติดไฟของโปรติวเซอร์แก๊สบริเวณหัวเผา เมื่อแก๊สติดไฟแล้วให้รอประมาณ 15 นาที แล้วเริ่มทำการวัดความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาแก๊สซีฟเอร์และวัดอัตราการไหลของโปรติวเซอร์แก๊สด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด และใช้ชุดปั๊มดูดโปรติวเซอร์แก๊สเข้าสู่ถุงเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร ส่งตัวอย่างไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อครบเวลา 1 ชั่วโมง นับตั้งแต่โปรติวเซอร์แก๊สเริ่มจุดไฟติด ให้ปิดเตารอให้เตาเย็นลงแล้วทำการวัดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการสร้างเตาแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 5 การสร้างและการติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชัน

หลังจากที่ได้ออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชันแล้ว จึงทำการสร้างและติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยมีการจัดวางส่วนประกอบดังรูปที่ 5 ประกอบด้วย เตาแก๊สซิฟิเคชัน ไซโคลน สกรับเบอร์ และหัวเผา โดยแก๊สซิฟิเคชันทำจากเหล็กหนา 10 มิลลิเมตร มีผนังรูปและประกอบตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ มีถังสำหรับบรรจุเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 65 เซนติเมตร สามารถบรรจุเชื้อเพลิงได้ 40 กิโลกรัม ควบคุมปริมาณอากาศเข้าสู่เตาด้วยวาล์ว ใช้ท่อเหล็กขนาด 2 นิ้วป้อนอากาศให้ไหลผ่านห้องลมรอบ ๆ โชนเผาไหม้เพื่อเตรียมอากาศให้กระจายเข้าสู่หัวฉีดจำนวน 5 หัว อย่างสม่ำเสมอรอบทิศทาง มีช่องสำหรับจุดไฟซึ่งตรงกับตำแหน่งของหัวฉีด มีช่องสำหรับติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของโชนต่าง ๆ มีมีมหมุนสำหรับระบายซีเถ้าที่ลอดผ่านตะแกรงลงสู่ถังพัก โปรติวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จะถูกส่งออกจากเตาด้วยท่อเหล็กขนาด 2 นิ้ว เข้าสู่ไซโคลนประสิทธิภาพสูงเพื่อดักฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นส่งแก๊สเข้าสู่สกรับเบอร์แบบเวนจูรี จำนวน 2 ชุด เพื่อกำจัดน้ำมัน CNSL น้ำมันดิน ฝุ่นละเอียดและกลิ่น โดยแต่ละชุดใช้ปั๊มน้ำแรงดันสูง (Multistage Centrifugal Pump) ขนาด 800 วัตต์ ต่อกับท่อน้ำขนาด 1 นิ้ว หมุนเวียนน้ำจากถังพักเพื่อทำความสะอาดโปรติวเซอร์แก๊สตลอดเวลา ซึ่งการทำงานของสกรับเบอร์แบบเวนจูรีนี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของโปรติวเซอร์แก๊ส และสร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาแก๊สซิฟิเคชันให้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องเป่าลม (Blower) โปรติวเซอร์แก๊สที่สะอาดแล้วจะถูกส่งไปที่หัวเผาเพื่อใช้งานต่อไป ลดปัญหาการเกาะตัวของคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกที่ใบพัดของเครื่องเป่าลม

4.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ในการทดลองประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่สร้างขึ้นนี้ อาศัยแรงเหนี่ยวนำของ สกรับเบอร์แบบเวนจูรี จำนวน 2 ชุด สร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตา ทดแทนการใช้เครื่องเป่าลม พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศเข้าเท่ากับ 0.002325 m^2 วัดความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาได้ 2.6 m/s คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้เท่ากับ 0.007039 kg/s อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 11.4 kg/h หรือ 0.003167 kg/s อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.22

4.3 องค์ประกอบและค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สมีผลต่อการคำนวณหาความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส โดยได้ส่งตัวอย่างไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งองค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สประกอบด้วย มีเทน คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊ส	สัดส่วนของแก๊ส (%)
H ₂	9.7
CO	16
CH ₄	1.5
N ₂	61
O ₂	4.7
CO ₂	10

องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้เชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตามตารางที่ 3 มีสัดส่วนของแก๊สติดไฟเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ CO H₂ และ CH₄ โดยมีสัดส่วนของแก๊สร้อยละ 16 9.7 และ 1.5 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าสัดส่วนของแก๊สในสมการที่ 6 แล้ว สามารถคำนวณหาความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้เท่ากับ 3.605 MJ/Nm³

4.4 ประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน จากการทดลองประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน มีพื้นที่หน้าตัดของท่อส่งโปรตีนเซอร์แก๊สเท่ากับ 0.002325 m² วัดความเร็วของแก๊สได้ 3.2 m/s จากสมการที่ 7 สามารถคำนวณอัตราการไหลของแก๊สได้เท่ากับ 0.007441 m³/s ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สเท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ คิดเป็นพลังงานความร้อน 26.82 kW และจากการคำนวณในสมการที่ 5 พบว่า ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงเป็นเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 39.92 %

5. อภิปรายผล

ผลของวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พบว่ามีธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ C H O และ N สัดส่วนร้อยละ 53.93, 6.07, 38.79 และ 1.21 ตามลำดับ มีค่าความร้อน 22.84 MJ/kg เปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ของ [12] ซึ่งมีสัดส่วนร้อยละ 63.20, 6.74, 21.9 และ 0.69 ตามลำดับ มีค่าความร้อน 24.2 MJ/kg เมื่อสกัดแยกน้ำมัน CNSL ออกแล้วจะเหลือกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ C H O และ N พบว่ามีสัดส่วนร้อยละ 54.09, 6.08, 38.45 และ 1.38 ตามลำดับ มีค่าความร้อน 21.22 MJ/kg เปรียบเทียบกับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความหนาแน่นเฉลี่ย 486 kg/m³

การออกแบบเตาแก๊สซีฟเอร์ที่เหมาะสมกับการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง กำหนดขนาดอัตรากำลังความร้อนสูงสุด 130 kW คำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊สได้เท่ากับ 30.09 kg/h และ 93.6 Nm³/h ตามลำดับ การสร้างและติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชันประกอบด้วย เตาแก๊สซีฟเอร์ ไฮโคลน สกรีนเบอร์ และหัวเผา ในการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน พบว่ามีประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ 39.92 % ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 2.22 ต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่กำหนดในการออกแบบซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 70 % องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้มีสัดส่วนของแก๊ส CO H₂ และ CH₄ คิดเป็นร้อยละ 16, 9.7 และ 1.5 ตามลำดับ มีค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สเท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ และมีค่าคุณสมบัติต่าง ๆ

ดังตารางที่ 4 สอดคล้องกับงานวิจัย [13] ซึ่งพบว่า โปรตีนเซอร์แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงไม้ลำไยมีค่าความร้อนเท่ากับ 3.441 MJ/Nm³ และมีสัดส่วนของแก๊ส CO H₂ และ CH₄ คิดเป็นร้อยละ 17.53, 9.29 และ 0.90 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชันและคุณสมบัติต่าง ๆ

V_{air} (m/s)	FCR_{fuel} (kg/h)	A/F_{ratio}	Q_{gas} (m ³ /h)	HV_{gas} (MJ/Nm ³)	n_{th} (%)
2.6	11.4	2.22	26.79	3.605	39.92

เนื่องจากระบบแก๊สซิฟิเคชันที่สร้างขึ้น อาศัยการเหนี่ยวนำของสกริปเบอร์แบบเวนจูร์สร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาทดแทนการใช้เครื่องเป่าลม จึงมีอัตราการไหลของอากาศน้อย ทำให้เตาแก๊สซิฟิเคชันมีอัตราการกำลังความร้อน อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊ส มีค่าเท่ากับ 26.82 kW 11.4 kg/h และ 26.79 m³/h ตามลำดับ ต่ำกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชัน ดังนั้นหากต้องการเพิ่มอัตราการกำลังความร้อนของเตาแก๊สซิฟิเคชัน จำเป็นต้องเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตา โดยติดตั้งเครื่องเป่าลมต่อท่อเข้ากับวาล์วควบคุมอากาศเข้าของเตา และในการวิจัยครั้งต่อไปควรทดลองหาค่าความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาที่เหมาะสม ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชันมีค่าสูงสุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สิงห์เดช แดงจวง ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพพา พิณญาพงษ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สัทธยา ทองสาร ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณวิสาหกิจชุมชนบ้านหาดไเก้ด้อย อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่ให้ข้อมูลการวิจัย และให้ความอนุเคราะห์เปลื้องมะม่วงหิมพานต์สำหรับการวิจัย และขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟิเคชันไฟเบอร์แบบไหลลงชนิด V-hearth

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ระบบสารสนเทศการผลิตทางการเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร. (2561, พฤษภาคม. 3). ฐานข้อมูลผลผลิตมะม่วงหิมพานต์ พ.ศ. 2561, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://production.doae.go.th>
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2559, พฤษภาคม. 3). ข้อมูลสัดส่วนพลังงานชีวมวลต่อผลผลิต, [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html
- [3] S.C. Bhattacharya, San Shwe Hla, Hoang-Luang Pham, "A study on a multi-stage hybrid gasifier-engine system", *Biomass and Bioenergy*, 21(6), pp. 445-460, 2001.
- [4] J. G. Ohler, *Cashew*, Amsterdam: Department of Agricultural Research, Koninklijk Institute voor de Tropen, Netherlands, 1979.
- [5] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดระยอง, แผนพัฒนาการเกษตรรายสินค้ามะม่วงหิมพานต์จังหวัดระยอง (พ.ศ.2562-2564), สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดระยอง, ระยอง, 2562

[6] พัทธ์ชัย คล้ายชม กัณฑ์ อินทวงศ์ และไพโรจน์ นะเที่ยง. “การถ่ายทอดเทคโนโลยีแบบมีส่วนร่วมการสกัดน้ำมัน CNSL เพื่อเพิ่มมูลค่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป”. รายงานสืบเนื่องจากการประชุมทางวิชาการ ระดับชาติ “Proceedings Thailand Symposium 2017”. 23 – 27 สิงหาคม 2560. โรงแรมทارا แกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพมหานคร: 271-279, 2560.

[7] นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. (พิมพ์ครั้งที่ 1), สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร, หน้า 77-86, 2553.

[8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. คู่มือฝึกอบรมหลักสูตร ภาควิชาปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน แก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพมหานคร, หน้า 104, 2561.

[9] T.B. Reed, A. Das, *Handbook of biomass downdraft gasifier engine*, Solar Energy Research Institute, Colorado, pp. 32-38. 1988.

[10] Food and Agriculture Organization of The United Nations, *Wood Gas as Engine Fuel*, Mechanical Wood Products Branch Forest Industries Division FAO Forestry Department, Rome Italy, page 18, 1986.

[11] P. Basu. (2010, May, 5). Gasification theory and modeling of gasifiers, [Online], Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00005-2>

[12] Miguel M. Uamusse, Kenneth M. Persson, Alberto J. Tsamba. (2014, May, 5). Gasification of Cashew Nut Shell Using Gasifier Stove in Mozambique. *Journal of Power and Energy Engineering*, [Online], Available: <http://www.scrip.org/journal/jpee> <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.27002>

[13] ปัญญพร ขนาดคำ, นิกราน หอมดวง, กิตติกร สาสุจิตต์ และอัศรินทร์ อินทนิเวศน์. “การประเมินสมรรถนะของแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงเมื่อใช้เชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร”. การประชุมสัมมนาทางวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8. 4-6 พฤศจิกายน 2558. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร: 109-113, 2558.