SWU Engineering Journal (2014) 9(1),16-27 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน พ.ศ.2557

การศึกษาสภาวะเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบ โดยผ่านกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน

Experimental Study to Obtain Gas Production Conditions from the Old Landfill Solid Waste by using Gasification Process

สุธินี หิรัญประเสริฐศรี สุเทพ บุตรดี
ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800
E-mail: suthinee_kmut@hotmail.com

บทคัดย่อ

การจัดการของเสียเป็นหนึ่งในปัญหาร้ายแรงที่สุดทั่วประเทศไทย นอกจากนี้วิธีการแปลงของเสียที่จะเพิ่มผลกำไรมากขึ้นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากและซับซ้อน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบ และหาประสิทธิภาพการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มาใช้ประโยชน์ โดยใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) ขนาด 10 kg/hr (ระดับห้องปฏิบัติการ)ในการทดลองนี้ใช้ขยะหลุมฝังกลบเป็นเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ยาว 5 cm โดยปรับอัตราการจ่ายอากาศ 5 สภาวะ คือ 300 L/min, 350 L/min, 400 L/min, 450 L/min, และ 500 L/min พบว่าสภาวะเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงพิจารณาจากประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง คือ อัดแท่งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ยาว 5 cm มีค่าความร้อน 20.581 MJ/kg ความหนาแน่นเชื้อเพลิง 476 kg/m^3 ใช้อัตราการจ่ายอากาศที่สัดส่วนสมมูล 0.53 มีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงประมาณ 1.46 MJ/Nm^3 และมีประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ 36.94% การนำมาใช้งาน พบว่า ขยะอัดแท่ง 1 kg จะทดแทนแก๊สแอลพีจีได้ 0.157 kg

คำสำคัญ: ขยะหลุมฝังกลบ กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

ABSTRACT

Waste management is one of the most serious problems all over Thailand. In addition, how to transform the waste to add more profit is quite difficult and complex. This paper proposes the experimental study in order to obtain appropriate conditions in the aspect of producing gas from the old landfill solid waste by using gasification process. This study is based on the laboratory scale of the KMUTNB, Mechanical Engineering Department. The conditions are as the followings. The downdraft gasify capacity is 10 kg/hr. The old landfill solid waste uses 1 centimeter of diameter and 5 centimeter length. The conditions of research design are varied and are able to adjust within 5 cases; the air flow of 300 L/min, 350 L/min, 400 L/min, 450 L/min and 500 L/min. The result is clearly found that the most appropriate condition for producing fuel from landfill by considering from the effectiveness of the machine is the 1 centimeter diameter and 5 centimeter length of the old landfill solid waste. The heating value can be obtain at 20.581 MJ/kg with 476 kg/m^3 of the heat density It is equivalent to the air flowing 0.53

The heating value of fuel is about 1.46 MJ/Nm^3. The effectiveness of the fuel engine is 36.94%. In addition, it is investigated that the landfill waste of 1 pellet can be used to substitute 0.157 kg. of LPG.

Keyword: Old Landfill Solid Waste, Gasification Process, Downdraft Gasifier

1. บทนำ

ในสภาวะปัจจุบัน ปัญหาทางด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สำคัญ และมีแนวโน้มว่ากำลังส่งผลต่อเนื่องอย่างรุนแรงต่อไปในอนาคต ซึ่งปัจจุบันนี้โลกกำลังถูกคุกคามในเรื่องปัญหาโลกร้อน ทำให้ทุกประเทศตื่นตัวให้ความสำคัญในการรณรงค์ให้ประชาชนช่วยกันลดใช้พลังงานเพื่อลดปัญหาโลกร้อน เพราะส่วนใหญ่มาจากการใช้พลังงานอย่างมหาศาลของมนุษย์

ตั้งแต่ราคาน้ำมันได้ขยับตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดความตื่นตัวอย่างมากในประเทศไทย ในการที่จะหาพลังงานที่จะทดแทนน้ำมัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้ไบโอดีเซล แก๊สโซฮอล์ ก๊าซเอ็นจีวี ที่เป็นพลังงานทดแทนที่เห็นได้ชัดว่า สามารถช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบได้อย่างมหาศาล นอกจากนี้ยังได้มีความตื่นตัวในการที่จะนำพลังงานจากแหล่งอื่นๆ มาใช้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ไม่ว่าจะเป็นพลังงานในรูปแบบใดก็ตาม ก็มีทั้งจุดดี จุดด้อย รวมถึงข้อเสียในตัวเอง อย่างไรก็ตาม ในอนาคตที่ราคาน้ำมันสูงขึ้นมากๆ หรือไม่มีน้ำมันดิบให้ใช้อีกแล้วนั้น จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานหลายประเภทร่วมกันจึงจะทำให้เพียงพอและยั่งยืน

ขยะก็เป็นอีกหนึ่งประเภทของแหล่งพลังงาน การนำขยะที่โดยปกติแล้วเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม และส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนนั้น มาใช้ผลิตพลังงานในรูปแบบต่างๆ เป็นการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่า ถือว่าเป็นการแก้ทั้งปัญหาสิ่งแวดล้อม ปัญหาสภาวะโลกร้อน และปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงานไปในเวลาเดียวกัน

สำหรับการนำขยะไปเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานมีหลายวิธี เช่น การเผาโดยตรง (Direct Combustion) กระบวนการเกิดแก๊สหรือก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถนำก๊าซที่ผลิตได้มาใช้งานได้โดยตรง และเกิดมลพิษทางอากาศต่ำ กระบวนการก๊าซซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสภาพก๊าซเชื้อเพลิง โดยเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด มีกลไกการทำงานไม่ยุ่งยาก โดยการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศอุณหภูมิอยู่ในช่วง 700-1,200 องศาเซลเซียส ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ได้ โดยหากเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (เครื่องเบนซิน) สามารถที่จะใช้ก๊าซดังกล่าวเป็นเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องผสมเชื้อเพลิงอื่น [1]

ทิพย์สุภินทร์ [2] ทำการศึกษาเรื่อง “การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชัน : กรณีศึกษากากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม” เป็นการศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงแบบป้อนต่อเนื่อง ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 100 kW โดยใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นเชื้อเพลิงทดสอบ ซึ่งพบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงเท่ากับ 100 Nm^3/hr จะมีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงประกอบไปด้วย H_2 16.38%, CO 14.66%, และ CH_4 2.3% โดยก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนเท่ากับ 5.03 MJ/Nm^3 มีปริมาณฝุ่นและสารทาร์น้อยมากคือ 10.45 mg/Nm^3

A. Midilli [3] ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากตะกอนน้ำเสียโดยใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง สำหรับในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Gas) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า

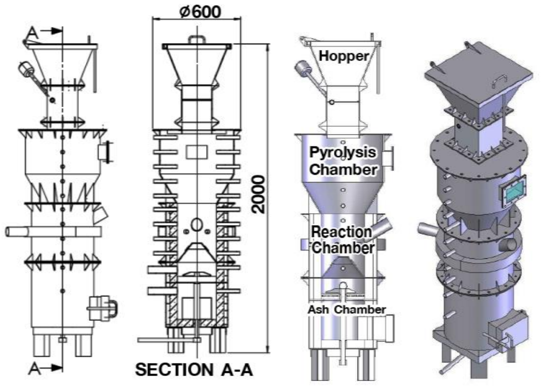
องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ประกอบด้วย H_2, CO, CH_4, C_2H_2 และ C_2H_6 โดยคิดเป็น 19-23% ของปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ทั้งหมด และมีค่าความร้อนระหว่าง 2.55-3.2 MJ/Nm^3 องค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้มีผลมาจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนเข้า ปริมาณของน้ำและความชื้น อุณหภูมิในโซนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ของก๊าซที่ได้จากการกลั่นระเหยของเชื้อเพลิง (Pyrolysis Product)

T.H. Jayah [4] ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ขนาด 20 kg/hr โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองใช้ไม้ยางเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้สำหรับคำนวณในคอมพิวเตอร์ การวิจัยได้ใช้แบบจำลองสองส่วน คือ ส่วนของโซนไพโรไลซิส และโซนการเผาไหม้ จากการจำลองระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงต้องใช้ไม้ขนาด 3-5 cm ความชื้นของเชื้อเพลิงไม่ควรเกิน 15%

Z.A. Zainal [5] ได้ศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงโดยใช้เศษไม้จากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และเศษไม้ทั่วไปเป็นเชื้อเพลิงทดลอง โดยได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง ค่าความร้อน และอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วย 1.69% O_2, 43.62% N_2, 14.05% CO, 14.66% CO_2 และ 2.02% CH_4 ซึ่งองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสมมูล และจากการประเมินประสิทธิภาพพบว่าเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.287 สำหรับกรณีใช้เศษไม้ทั่วไป และที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.438 สำหรับกรณีใช้เศษไม้จากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ผสมรวมกับถ่านหิน

M. Dogru [6] ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเปลือกถั่วฮาเซล (Hazelnut Shell) ด้วยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 5 kW เพื่อหาจุดเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเปลือกถั่วฮาเซล โดยใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงระหว่าง 1.7-5.5 kg/hr จากการทดลองพบว่า ที่จุดเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงระหว่าง 1.44-1.47 Nm^3/kg และอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงระหว่าง 4.06-4.48 kg/hr ส่วนเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 5 MJ/Nm^3 มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรระหว่าง 8-9 Nm^3/hr และมีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงดังนี้ 2.47% CH_4, 19.89% CO, 11.86% H_2 และมีค่าความร้อนค่าสูงเท่ากับ 5.15 MJ/Nm^3

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาความเหมาะสมของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบโดยผ่านกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification Process) จากนั้นนำผลที่ได้ทางด้านเทคนิคไปหาประสิทธิภาพการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มาใช้ประโยชน์



รูปที่ 1 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft Gasifier)

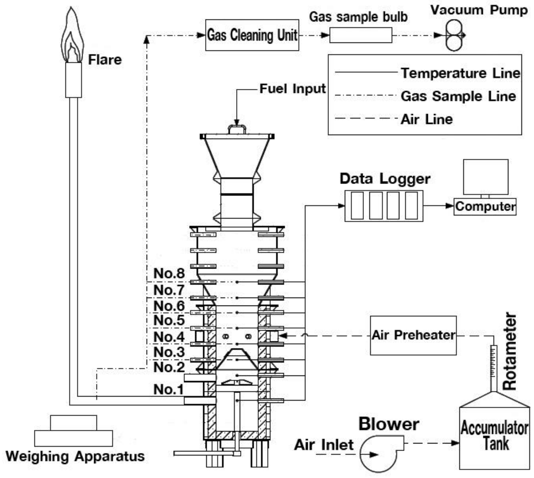
2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

การทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบนี้ใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) ระดับห้องปฏิบัติการขนาด 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 1 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มม. และสูง 2,000 มม. และมีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วนคือ ช่องป้อนเชื้อเพลิง (Hopper) ห้องไพโรไลซิส (Pyrolysis Chamber) ห้องปฏิกิริยา (Reaction Chamber) และห้องถ่ายเถ้า (Ash Chamber) โดยการ

เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศ

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีช่องอากาศที่เชื่อมต่อกับเครื่องเป่าอากาศ (Blower) และท่อทางออกก๊าซเชื้อเพลิง นอกจากนี้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงยังมีการเชื่อมต่อกับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) สำหรับการบันทึกค่าอุณหภูมิระหว่างการทดลองจำนวน 8 ตำแหน่ง ซึ่งประมวลผลตามเวลาจริงแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2

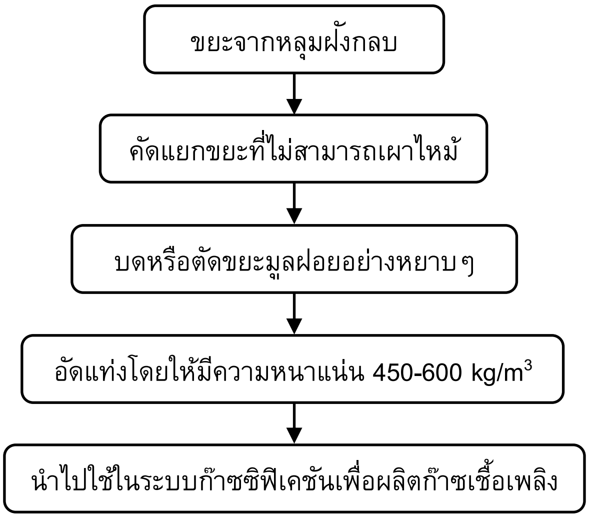


รูปที่ 2 การทำงานของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

2.2 เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบ (Refuse Derived Fuel : RDF)

ในการศึกษานี้ใช้เชื้อเพลิงขยะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบอำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ซึ่งผ่านกระบวนการคัดแยกเอาวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ออก แล้วนำมาตากลดความชื้น ซึ่งความชื้นที่เหลือจะต้องไม่เกิน 15% จากนั้นนำมาสับย่อยเพื่อลดขนาดและอัดแท่งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1 เซนติเมตร และความยาวเฉลี่ย 5 เซนติเมตร (แสดงดังรูปที่ 3) เชื้อเพลิง RDF ที่นำมาทดสอบนี้ เรียกว่า RDF7 : RDF Syn-gas ตามมาตรฐาน ASTM E-75 [7] ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในระบบก๊าซซิฟิเคชันเพื่อใช้ผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยขั้นตอนการเตรียมเชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 4 และคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 1

รูปที่ 3 เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบ



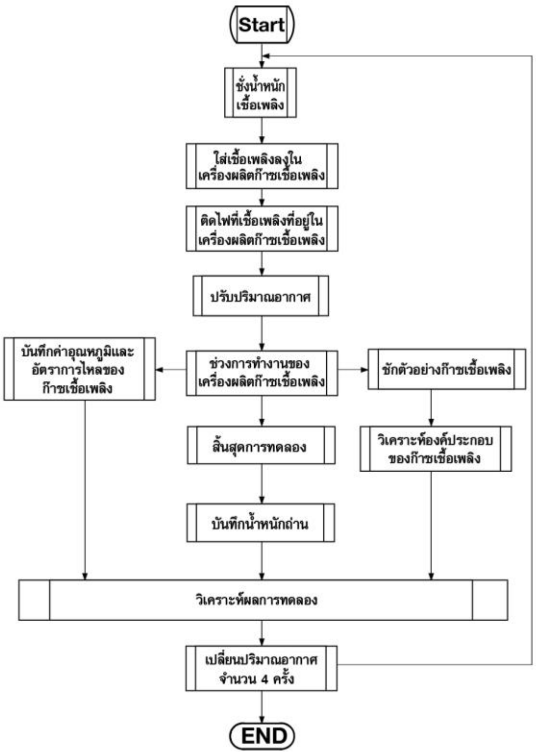
รูปที่ 4 กระบวนการเตรียมเชื้อเพลิง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบ

คุณสมบัติทางกายภาพ	
High heating value (MJ/kg)	20.58
Bulk density (kg/m^3)	476
Moisture (% as receive)	1.5
Ash (% at dry basis)	56.58
Volatile matter (% at dry basis)	41.89
Fixed carbon (% at dry basis)	1.53
คุณสมบัติทางเคมี	
Carbon (% at dry basis)	45
Hydrogen (% at dry basis)	6.86
Nitrogen (% at dry basis)	2.1
Sulfur (% at dry basis)	0.19
Oxygen (% at dry basis)	45.85

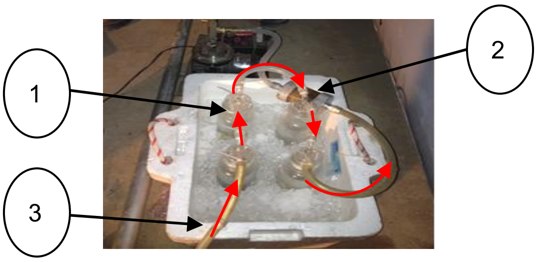
2.3 ขั้นตอนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

เริ่มจากป้อนเชื้อเพลิงด้านบนเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงประมาณ 20 กิโลกรัม ปิดประตูป้อนและจุดไฟที่ช่องจุดไฟ รอจนเชื้อเพลิงบางส่วนเริ่มติดไฟ จึงปิดฝาครอบช่องจุดไฟและจ่ายอากาศเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยปรับปริมาณอากาศเริ่มต้นที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรให้อยู่ในช่วงระหว่าง 300-500 L/min. โดยเพิ่มครั้งละ 50 L/min. เพื่อหาอัตราการจ่ายอากาศที่ดีที่สุด หลังจากนั้นจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิในตำแหน่งที่มีการติดตั้งเทอร์โมคับเปิ้ล ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

ในส่วนของการเก็บก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อนำไปทดสอบจะเริ่มเก็บเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงอยู่ในสภาวะคงที่ โดยใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยอิมพิงเจอร์จำนวน 4 ขวด บรรจุไอโซโพรพานอลจำนวน 3 ขวด เพื่อกำจัดทาร์ป้องกันไม่ให้ทาร์ปะปนก๊าซเชื้อเพลิงเข้าไปในถุงเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง และขวดที่ 4 เป็นขวดเปล่าสำหรับควบแน่นสารระเหยออกจากก๊าซเชื้อเพลิงก่อน ต่อจากนั้นก๊าซเชื้อเพลิงจะไหลผ่านกรองละเอียดอีกครั้งก่อนที่จะไหลเข้าปั๊มสุญญากาศ ดูดก๊าซเชื้อเพลิงเข้าถุงเก็บก๊าซ ส่วนก๊าซเชื้อเพลิงส่วนที่เหลือจากที่ผลิตได้จะถูกเผาทิ้งที่ทางออกของปล่องระบาย กระบวนการทดลองจะสิ้นสุดลงเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมด



รูปที่ 6 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิง

(1) อิมพิงเจอร์

(2) กรองละเอียด

(3) ทิศทางการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง

2.4 พารามิเตอร์ในการคำนวณ

2.4.1 ความหนาแน่นเชื้อเพลิง

การวัดความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทำโดยนำเชื้อเพลิงบรรจุลงในภาชนะตวงขนาด 20 ลิตร ให้เต็มพอดีโดยไม่มีการกดทับให้แน่นใดๆ ทั้งสิ้น แล้วยกภาชนะตวงให้ก้นภาชนะสูงจากพื้นประมาณ 30 เซนติเมตร จากนั้นปล่อยมือให้ภาชนะกระแทกกับพื้นอย่างอิสระ เชื้อเพลิงจะยุบตัวลงเล็กน้อย แล้วจึงเติมเชื้อเพลิงลงในภาชนะตวงให้เต็มพอดี จากนั้นจึงยกถังให้สูงขึ้นอีก 30 เซนติเมตร ทำซ้ำ 3 ครั้งแล้วนำมาชั่ง [8] แสดงดังรูปที่ 7 และคำนวณค่าความหนาแน่น แสดงดังสมการที่ 1

$$D = m / V \tag{1}$$

เมื่อ D = ความหนาแน่นเชื้อเพลิง (kg/m^3)

m = มวลของเชื้อเพลิง (kg)

V = ปริมาตรภาชนะ (m^3)

รูปที่ 7 การวัดความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

2.4.2 อัตราการใช้เชื้อเพลิง

อัตราการใช้เชื้อเพลิงจะคำนวณได้จากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในช่วงเวลา โดยการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนการใช้งานแล้วใช้การบันทึกเวลา โดยเริ่มตั้งแต่ไฟที่ทางออกของปล่องระบายก๊าซติด จนไฟที่ทางออกปล่องระบายก๊าซดับ แล้ววัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากความสูงอ้างอิง จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด และอัตราการใช้เชื้อเพลิง แสดงดังสมการที่ 2

$$m^{\circ} = m / t \quad (2)$$

เมื่อ m° = อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)
m = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg)
t = ระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิง (ชั่วโมง)

2.4.3 อัตราการไหลก๊าซเชื้อเพลิง

อัตราการไหลก๊าซเชื้อเพลิงในท่อทำโดยการใช้ปิโตทิว (Pito Tube) วัดความเร็วการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงในท่อ วัดอุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิง และบันทึกความดันจลน์ของการไหล (Dynamic Pressure) จากนั้นนำมาคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง แสดงดังสมการที่ 3

$$Q = A \times v \quad (3)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลก๊าซเชื้อเพลิงในท่อที่ปล่อยทิ้ง (m^3/s)
v = ความเร็วก๊าซเชื้อเพลิง (m/s)
A = พื้นที่หน้าตัดท่อการไหล (m^2)

2.4.4 อัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิง

อัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดของท่อก๊าซ และความเร็วของก๊าซเชื้อเพลิงร้อน จากนั้นนำมาคำนวณอัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงโดยใช้นิยามที่สภาวะปกติที่อุณหภูมิ 25 °C แสดงดังสมการที่ 4

$$Q_{gas} = Q_1 \times (T_1 / T_2) \quad (4)$$

เมื่อ Q_{gas} = อัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงที่ 25°C (Nm^3/hr)
Q_1 = อัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงร้อน (m^3/hr)
T_1 = อุณหภูมิที่ 25°C = 273+25 = 298 K
T_2 = อุณหภูมิก๊าซร้อนออกจากปลายท่อ

2.4.5 ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อก๊าซเชื้อเพลิง 1 ลูกบาศก์เมตรที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อเชื้อเพลิงนั้นถูกเผาไหม้ องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่พิจารณา คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) โดยสามารถหาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหล่านี้ได้ตามมาตรฐานของ ASTM โดยจะใช้ข้อมูลองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องทดสอบแล้วนำมาคูณด้วยค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซแต่ละชนิดแล้วนำมารวมกันเป็นค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง ค่าความร้อนที่คำนวณได้นี้จะเป็นค่าความร้อนแบบต่ำ โดยคิดที่สภาวะปกติ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$G_{LHV} = \frac{(CO\% \times 12.63) + (CH_4\% \times 35.88) + (H_2 \times 10.78)}{100} \quad (5)$$

เมื่อ ค่าความร้อนจำเพาะของ(CO) = 12.63 MJ/Nm^3

ค่าความร้อนจำเพาะของ(CH_4) = 35.88 MJ/Nm^3

ค่าความร้อนจำเพาะของ(H_2) = 10.78 MJ/Nm^3

3. ผลการวิจัย

3.1 อุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

เทอร์โมคัปเปิลถูกติดตั้ง 8 ตำแหน่งที่ระดับความสูงอ้างอิงของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่นำมาวิเคราะห์นี้เป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง ณ สภาวะคงที่จากการบันทึกข้อมูลของเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) ซึ่งโซนปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง แบ่งได้ 4 โซนคือ โซนอบแห้ง (Drying) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis) โซนเผาไหม้ (Oxidation) และโซนรีดักชัน (Reduction) แต่ละโซนแบ่งแยกได้ตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใน แสดงดังตารางที่ 2

อุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจากการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศในแต่ละค่าแสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละกรณีจะอยู่ในช่วงโซนเผาไหม้ซึ่งมีการจ่ายอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากนั้นอุณหภูมิจะลดต่ำลง เนื่องจากปฏิกิริยาดูดความร้อนที่เกิดขึ้นในโซนลดลง ในรูปที่ 8 มีการจัดตำแหน่งโดยประมาณและช่วงอุณหภูมิสำหรับโซนปฏิกิริยาที่แตกต่างกันระหว่างการทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาดูดพลังงานหลัก คือปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard Reaction) ดังสมการที่ 6 และปฏิกิริยาวอเตอร์ก๊าซ (Water Gas Reaction) ดังสมการที่ 7 [10-11]

ปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard Reaction)

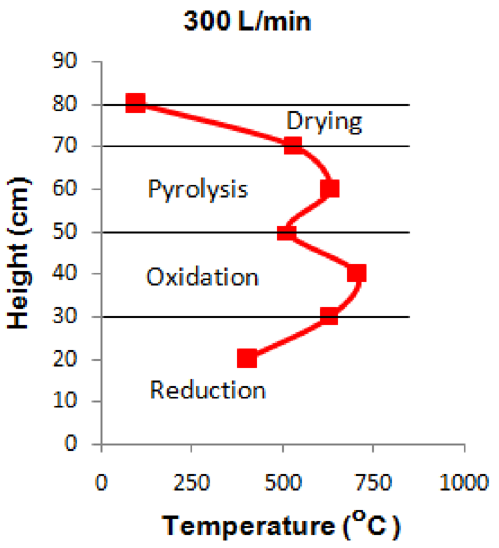
$C+CO_2 \longrightarrow 2CO \quad \Delta H$ 298 K = -172 kJ/mol (6)

ปฏิกิริยาวอเตอร์ก๊าซ (Water Gas Reaction)

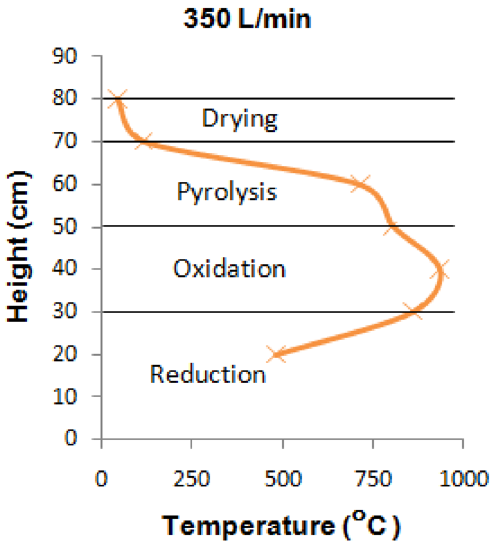
$C+H_2O \longrightarrow CO+H_2 \quad \Delta H$ 298 K = -131 kJ/mol (7)

ตารางที่ 2 ช่วงอุณหภูมิสำหรับโซนปฏิกิริยาในระหว่างขั้นตอนการผลิตก๊าซ [9]

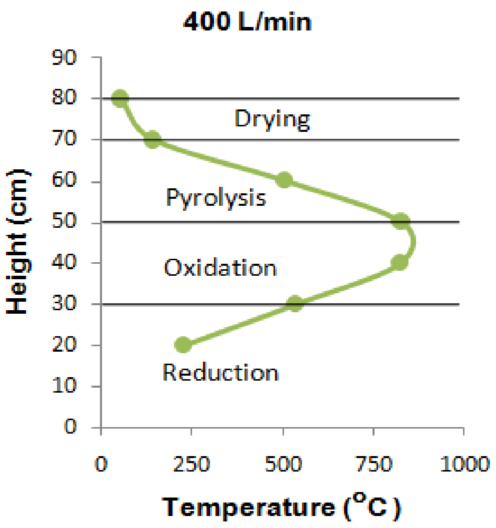
Reaction zone	Temperature (°C)	Experiment (°C)
Drying	< 200	47-98
Pyrolysis	200-700	119-717
Oxidation	750-1000	514-939
Reduction	600-900	227-896



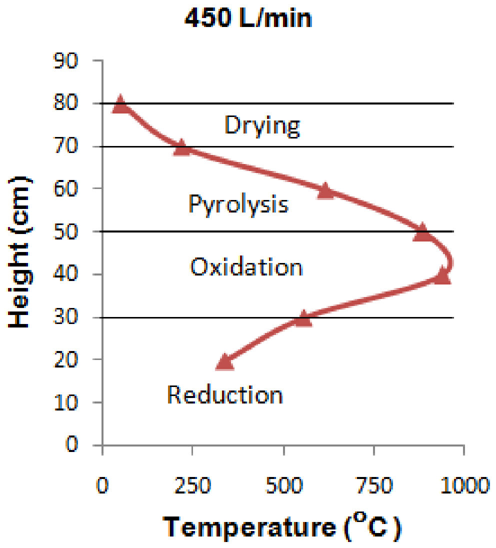
(ก)



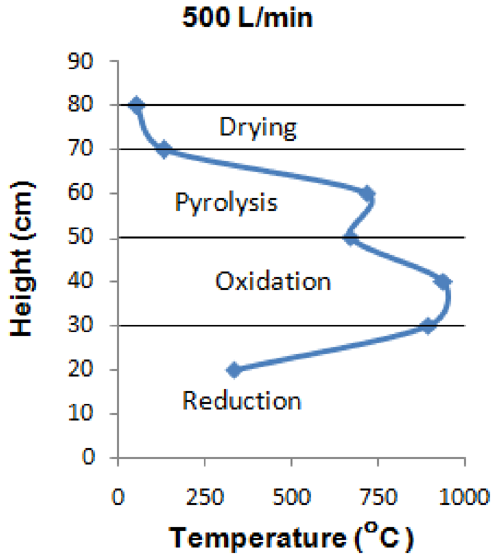
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 8 อุณหภูมิที่ระดับความสูงอ้างอิงภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

(ก) อุณหภูมิที่การปรับอัตราการการจ่ายอากาศ 300 L/min.

(ข) อุณหภูมิที่การปรับอัตราการการจ่ายอากาศ 350 L/min.

(ค) อุณหภูมิที่การปรับอัตราการการจ่ายอากาศ 400 L/min.

(ง) อุณหภูมิที่การปรับอัตราการการจ่ายอากาศ 450 L/min.

(จ) อุณหภูมิที่การปรับอัตราการการจ่ายอากาศ 500 L/min.

3.2 องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง ได้จากการเก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิง โดยเลือกเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่สภาวะภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคงที่จำนวน 3 ตัวอย่าง และเว้นช่วงเวลาการเก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิง 5 นาที ทั้งนี้ช่วงสภาวะคงที่สังเกตได้จากค่าอุณหภูมิที่แสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์แบบประมวลผลตามเวลาจริง (Real Time) เมื่อได้ก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง จะนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิง ก๊าซที่ผ่านการวิเคราะห์จะประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซไนโตรเจน โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่ามีการแกว่งของค่าองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง เนื่องจากการเลื่อนลงของเชื้อเพลิงที่ไม่ต่อเนื่อง การทดลองนี้ใช้วิธีการป้อนแบบครั้งเดียวต่อการเผา 1 ครั้ง (Batch Type) ซึ่งไม่สามารถกำหนดการไหลลงของเชื้อเพลิงให้เกิดความสม่ำเสมอได้ ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิบางช่วงขณะที่เก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงไปบ้าง ดังการศึกษาของ A. Midilli กล่าวว่า “องค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้มีผลมาจากอุณหภูมิในโซนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ของก๊าซที่ได้จากการกลั่นระเหยของเชื้อเพลิง”

3.3 ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง จะมีผลมาจากองค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน ที่มีอยู่ในก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากตารางที่ 3 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พบมากที่สุดที่อัตราการไหลเชิงปริมาณของอากาศเท่ากับ 450 L/min. และก๊าซไฮโดรเจนพบมากที่สุดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 450 L/min. จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตก๊าซแบบไหลลง จะมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 1.26-1.78 MJ/Nm^3 และมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 450 L/min. ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน เป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้

3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Cold Gas Efficiency : CE)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงสุดที่อัตราการจ่ายอากาศ 300 L/min. หรือสัดส่วนสมมูลเท่ากับ 0.53 มีค่าเท่ากับ 36.94% และประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าต่ำสุดที่อัตราการจ่ายอากาศ 500 L/min. หรือสัดส่วนสมมูลเท่ากับ 0.32 มีค่าเท่ากับ 16.53%

4. วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองสังเกตได้ว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ทุกกรณีมีค่าความร้อนใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากไม้ที่มีค่าความร้อนประมาณ 3.27-4.15 MJ/Nm^3 [9] สาเหตุที่การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบอัดแท่งมีค่าความร้อนน้อยนั้นเป็นเพราะว่าเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของคาร์บอนคงที่ปริมาณน้อย เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบมีพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วพลาสติกจะระเหยเป็นก๊าซอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงควรปรับปรุงค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงด้วยการลดส่วนผสมของพลาสติก และเพิ่มสัดส่วนของไม้แทน

จากการทดลองเมื่อนำค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบซึ่งมีค่าระหว่าง 16.53-36.94% มาเทียบกับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากไม้สับของ Z. A. Zainal พบว่าการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบมีค่าประสิทธิภาพต่ำ เนื่องมาจากค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบมีค่าต่ำกว่าค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงจากไม้นั่นเอง

ประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง [5] แสดงดังตารางที่ 5

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะอัดแท่งจากหลุมฝังกลบพบว่าสภาวะเหมาะสมคือ เชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร พิจารณาจากประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง คือ ที่อัตราการจ่ายอากาศ 300 L/min. มีค่าสัดส่วนสมมูล 0.53 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 20.581 MJ/kg ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง 1.46 MJ/Nm^3 และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ 36.94%

การนำมาใช้งาน เมื่อนำขยะหลุมฝังกลบอัดแท่งมาใช้เผาไหม้ให้ความร้อนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาของหม้อไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม หรือในงานอบแห้งจำพวกเตาอบโดยอาศัยการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงแล้วถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ แล้วนำอากาศร้อนไปใช้อบแห้งต่อไป เช่น การอบลำไย อบกล้วยตาก อบขนมปัง พบว่า ขยะอัดแท่ง 1 kg จะทดแทนแก๊สแอลพีจีได้ 0.157 kg.

6. ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบอัดแท่ง พบว่าค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงยังมีค่าประมาณ 1.46 MJ/Nm^3 ซึ่งควรปรับปรุงให้มีค่าสูงขึ้นประมาณ 5 MJ/Nm^3 [2] โดยการผสมชีวมวลลงในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มาใช้งานกับเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าได้ต่อไป

ควรศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น

หลังการทดลองจะมีขี้เถ้าที่เหลือจากกระบวนการ จึงควรศึกษาวิธีนำขี้เถ้าที่เหลือไปใช้ประโยชน์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ บุตรดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึง Tabitha G. Etutu. และ คุณสมโภชน์ เชิดพงษ์ ผู้ร่วมทำการทดลอง และศูนย์วิจัยการเผากากของเสีย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดลองงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3 องค์ประกอบและค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง

การทดลองครั้งที่	อัตราการจ่ายอากาศ (L/min)	องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง (%-Vol.)				ค่าความร้อน (MJ/Nm^3)
		CO	CH_4	H_2	N_2	
1	300	2.78	2.12	4.22	54.11	1.57
2	300	2.07	1.55	3.29	56.31	1.17
3	300	2.92	2.17	4.48	56.39	1.63
เฉลี่ย	300	2.59	1.95	4.00	55.61	1.46
1	350	2.80	1.85	4.42	56.52	1.49
2	350	2.90	1.94	3.95	54.56	1.49
3	350	3.87	1.97	3.97	54.14	1.62
เฉลี่ย	350	3.19	1.92	4.11	55.07	1.53
1	400	3.41	1.66	3.28	61.14	1.38
2	400	2.90	1.57	3.30	58.36	1.28
3	400	2.63	1.35	2.86	56.13	1.13
เฉลี่ย	400	2.98	1.53	3.15	58.54	1.26
1	450	3.48	2.21	7.52	57.82	2.04
2	450	3.41	2.08	5.19	57.13	1.74
3	450	3.33	1.78	4.62	55.40	1.56
เฉลี่ย	450	3.41	2.03	5.78	56.79	1.78
1	500	4.56	1.07	5.57	54.72	1.56
2	500	2.92	0.83	1.86	60.06	0.87
3	500	4.55	1.19	6.14	54.39	1.66
เฉลี่ย	500	4.01	1.03	4.52	56.39	1.36

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

อัตราการจ่ายอากาศ (L/min)	สัดส่วนสมมูล (ER)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง MJ/kg	อัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)	ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง (MJ/Nm^3)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
500	0.32	23.09	20.581	57.75	1.36	16.53
450	0.36	16.48	20.581	47.80	1.78	25.09
400	0.40	12.77	20.581	52.95	1.26	25.39
350	0.44	10.51	20.581	36.49	1.53	25.81
300	0.53	7.50	20.581	39.05	1.46	36.94

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง [5]

Run	Density (kg/m^3)	Calorific value (MJ/m^3)	Power output from the gasifier (kW)	Cold gas efficiency (%)	Mass conversion efficiency (%)	Equivalence ratio	Remark
12	1.11	4.65	49.81	67.65	98.83	0.268	Wood chips
15	1.1	4.77	65.04	68.37	98.39	0.259	Wood chips
16	1.13	5.19	44.93	76.68	90.12	0.287	Wood chips

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ศิริรัตน์ จิตการค้า. *จากขยะสู่น้ำมัน : เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม.* พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2551).

[2] ทิพย์สุภินทร์ หินซุย. *การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น.* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, (2550).

[3] A. Midilli, et al. “Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier,” *Enerngy Conversion & Management,* vol. 42, pp. 157-172, 2001.

[4] T. H. Jayah, et al. “Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying,” *Biomass and Bioenergy,* vol. 25, pp. 459-469, 2003.

[5] Z. A. Zainal, et al. “Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier,” *Biomass and Bioenergy,* vol. 23, pp. 283-289, 2002.

[6] M. Dogru, et al. “Gasification of hazelnut shells in downdraft gasifier,” *Energy,* vol. 27, pp. 415-427, 2002.

[7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *เชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel : RDF).* กรุงเทพฯ : (2547).

[8] ธเรศ ศรีสถิตย์. *วิศวกรรมการจัดการมูลฝอยชุมชน.* พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2553).

[9] นิมิต นิพัทธ์ธรรมกุล. *ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย.* วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, (2549).

[10] Basu, P., “Combustion and Gasification in Fluidized Beds,” *CRC Press*, USA, pp. 66, 2006.

[11] Higman, C., “Gasification,” Elsevier, Burlington, 2^{nd} Ed., pp. 11-12, 2008.