

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงขยะโดยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง
The syngas production from refuse-derived fuel (RDF)
in a fixed-bed downdraft gasifier

ทิพย์สุภินทร์ หินซุย¹ กฤษกร รัปสมบัติ¹, พรรษา ลิบลับ¹ และ วีรชัย อางหาญ^{1*}

^{1*} ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

* E-mail: arjharh@g.sut.ac.th, โทรศัพท์: 0-4422-5007 0-4422-5045 โทรสาร: 044-225046

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (Fixed-bed downdraft gasifier) โดยระบบมีกำลังผลิตขนาด 20 kW_e หรือ 360 kW_{th} ผลการศึกษาพบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ประกอบด้วย CO, H₂ และ CH₄ ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 18.37 %, 11.92 % และ 2.87% ตามลำดับ มีค่าความร้อนเท่ากับ 4.81 MJ/Nm³ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (g) สูงสุด คือที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 116.7 Nm³/hr โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงขยะเท่ากับ 63 kg/hr ให้ g เท่ากับ 46.25% และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 167.39 kW_{th} ปริมาณทาร์และฝุ่นปนเปื้อนประมาณ 40.4 mg/Nm³ โดยสรุปแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางความร้อนและผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

คำหลัก: เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง, เชื้อเพลิงขยะ, แก๊สสังเคราะห์

Abstract

In the present study, the energy production from refuse-derived fuel (RDF) using gasification technology in fixed-bed downdraft gasifier was studied. The gasification system had a capacity of 20 kW_e or 360 kW_{th}. Results showed that syngas CO, H₂ and CH₄ occurred in an average concentration (v/v) of 18.37%, 11.92% and 2.87%, respectively, and the syngas calorific value was 4.81 MJ/Nm³. The maximum gasification efficiency (g) achieved was 46.25% at the syngas flow rate of 116.7 m³/hr. The average fuel consumption was 63 kg/hr, and thermal energy production was 167.39 kW_{th}. The total tar and dust was 40.4 mg/Nm³. Overall, the syngas obtained in this study can be used for thermal application and used to generate electricity by internal combustion engine.

Keywords: Fixed-bed downdraft gasifier, Refuse-derived Fuel (RDF), Syngas

1. บทนำ

การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยเทคโนโลยีความร้อนจัดเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถกำจัดขยะมูลฝอยได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในเวลาอันรวดเร็ว ลดมวลและปริมาตรของขยะมูลฝอยได้ถึงร้อยละ 70-90 ยิ่งไปกว่า

นั้นยังสามารถเก็บคืนพลังงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนได้ ทั้งนี้เทคโนโลยีทางความร้อนในปัจจุบันที่มีการพัฒนาเพื่อการจัดขยะมูลฝอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถูกยอมรับว่ามีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสามารถเก็บคืน

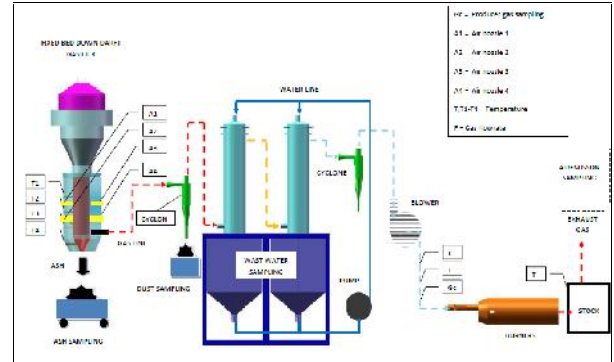
พลังงานที่มีอยู่ในขยะไปใช้ได้สะดวก มีประสิทธิภาพสูง นั่นคือเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน [1]

โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-chemical Conversion Process) โดยควบคุมเตาปฏิกรณ์ ให้เกิดการเผาไหม้แบบ Partial Oxidation ที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,000 °C ความร้อนจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สสังเคราะห์ที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) [2] แก๊สสังเคราะห์นี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยตรงโดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือป้อนแก๊สเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า หรือนำความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์ในรูปพลังงานความร้อนโดยตรง ซึ่งระบบนี้จะมีจุดเด่นด้านการปลดปล่อยมลพิษสิ่งแวดล้อมที่ต่ำกว่า ถ้าเปรียบเทียบกับระบบผลิตพลังงานจากการเผาไหม้โดยตรง [3] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน โดยมีขั้นตอนการศึกษา คือ 1) พัฒนาดันแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงที่มีกำลังการผลิตขนาด 360 kWth 2) ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ 3) ทดสอบประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะสามารถนำไปใช้เพื่อพัฒนาและปรับปรุงระบบผลิตแก๊สสังเคราะห์ของเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสำหรับเชื้อเพลิงขยะได้ ตลอดจนเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีการนำขยะมูลฝอยมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทนของประเทศต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

1) **อุปกรณ์ในการวิจัย** ได้แก่ เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง (Fixed-bed downdraft gasifier) มีกำลังการผลิตขนาด 20 kWth หรือ 360 kWth โครงสร้างทำจากวัสดุเหล็กเหนียวหนา 5 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 300

mm ภายในหล่อด้วยปูนทนไฟทนความร้อนได้ 1,500 มีอุปกรณ์ประกอบและระบบควบคุมต่างๆ โดยมีการจัดวางระบบ คือ เตาปฏิกรณ์ ชุดไซโคลน ชุดสกริวเบอร์ ระบบกรอง และหัวเผาไหม้แก๊สสังเคราะห์ ดังแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง

2) ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ

เตรียมเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเภท 5 (RDF-5) โดยนำขยะชุมชนมาผ่านกระบวนการปรับเสถียรภาพด้วยเทคโนโลยี MBT (Mechanical and Biological Treatment) หรือเทคโนโลยีการหมักแบบ Composting Plant ร่วมกับการใช้เครื่องจักรในหน่วยต่างๆ ที่เหมาะสมจากกระบวนการนี้จะทำให้ได้ขยะที่เสถียรเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ ในระยะเวลาเพียง 20-30 วัน ช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่น และสามารถลดความชื้นของขยะเหลือไม่เกิน 30% (จากเดิมความชื้นประมาณ 55-65 %) ผลผลิตที่ได้มี 2 ส่วน คือ 1) อินทรีย์วัตถุที่เกิดจากการย่อยสลายขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหาร นำไปใช้เป็นสารปรับปรุงดินได้ 2) ขยะที่เผาไหม้ได้ (พลาสติก กระดาษ) สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับระบบผลิตพลังงานแต่ละประเภท

โดยการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) จะนำขยะใน ส่วนที่ 2 นี้ ไปบดละเอียดโดยใช้เครื่องบดละเอียดประเภท Hammer mill จากนั้นนำไปอัดเป็นแท่ง โดยใช้เครื่อง Pellet Machine ได้ RDF-5 ขนาด ϕ 15 mm x L 40-60 mm ความชื้นมีค่าไม่เกิน 15 % wb ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5)

การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของ เชื้อเพลิงขยะ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของเชื้อเพลิง ในการผลิตแก๊สสังเคราะห์ โดยวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดง ใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ

พารามิเตอร์	เครื่องมือวัด
1. Proximate Analysis	ASTM D5142 – 04 และ ASTM D5865-04
2. Ultimate Analysis	CHNS Elemental Analyzer (LECO, CHNS-932)
3. Trace Element	Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (Model ED 2000)
4. Thermal decomposition	Thermogravimetric Analysis (TGA) TGA/DSC-1, Mettler Toledo

3) ทดสอบระบบ และการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของ

การเดินระบบ และประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. การศึกษาอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio : ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier โดยหาความสัมพันธ์ของอัตราการใช้อากาศต่ออัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่สภาวะต่างๆ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) [4]

$$ER = [AF\text{-ratio}_{\text{measured}}] / [AF\text{-ratio}_{\text{stoichiometric}}] \quad (1)$$

เมื่อ ER คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดจริง ต่อสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีในทางทฤษฎี

$AF\text{-ratio}_{\text{measured}}$ คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดจริง

$AF\text{-ratio}_{\text{stoichiometric}}$ คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีตามทฤษฎี

โดยในทางทฤษฎี หรือ Theoretical Combustion สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [5]



ในที่นี้ CH_xO_y คือ สูตรทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในตัวของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 และ m คือปริมาณของออกซิเจนที่เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ต้องการเพื่อให้เกิดการเผาไหม้พอดี โดยที่ $m = 1 + 0.25x - 0.5y$

โดยที่ค่า ER ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่สภาวะสมดุลจะต้องมีค่าประมาณ 0.3 และในทางเดียวกัน Stoichiometric value ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะมีค่าเป็น ¼ ของ Theoretical Combustion

2. ประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ ที่ความสัมพันธ์ของอัตราการใช้อากาศต่ออัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่สภาวะต่างๆ โดยศึกษาพารามิเตอร์ ดังแสดงใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงถึงพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

พารามิเตอร์	เครื่องมือวิเคราะห์
1.องค์ประกอบของแก๊ส สังเคราะห์ (%v/v)	Gas Chromatography (Shimazu GC-14B) Column :Molecular sieve 5A
2.ปริมาณคาร์บอนและฝุ่น (mg/Nm ³)	ปั๊มดูด ชุดกรองและควบแน่น
3. อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)	ตาชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง
4. Temperature Profile	Thermocouple Type K

จากนั้นนำข้อมูลมาประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ของระบบ อ้างอิงตาม [6] ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$y_g = [V_g * LHV_g] / [m_{Fuel} * LHV_{Fuel}] \quad (3)$$

$$kW_{th, Output} = [V_g \times LHV_g] * [10^3 / 3600] \quad (4)$$

เมื่อ

y_g คือ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (%)

kW_{th} คือ กิโลวัตต์ (ความร้อน)

m_{Fuel} คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง RDF-5 (kg/hr)

V_g คือ อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์ (m³/hr)

LHV_{Fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง RDF-5 (MJ/kg)

LHV_g คือ ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ (MJ/Nm³)

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณและแบบแยกองค์ประกอบของธาตุ ของเชื้อเพลิง RDF-5 ดังแสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก คือ 33.5% และ 3.33 % ตามลำดับ บ่งชี้ถึงศักยภาพที่จะนำมาผลิตพลังงานได้ ปริมาณของธาตุในกลุ่มโลหะอัลคาไลน์ที่ตรวจพบอยู่ในระดับที่ต่ำ และไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตราย สำหรับผลวิเคราะห์อัตราการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermal decomposition) ของ

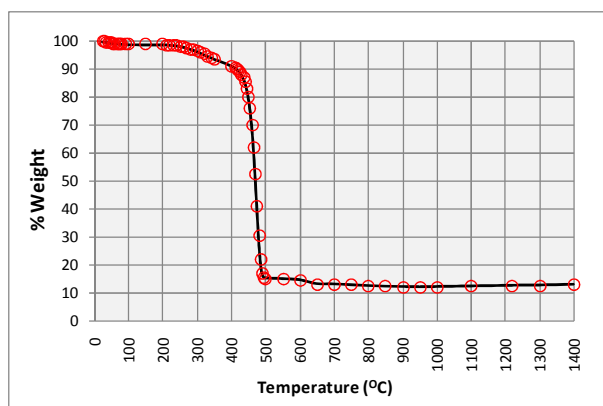
เชื้อเพลิง RDF-5 ในสภาวะบรรยากาศ ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ด้วยเครื่อง TGA แนวโน้มของกราฟ ดังแสดงใน รูปที่ 3 ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C เชื้อเพลิงยังมีน้ำหนักเหลือ (%Weight) อยู่ค่อนข้างมาก (98.96%) หรือเริ่มมีการสูญเสียน้ำหนัก (%Weight loss) เล็กน้อย (1.04%) ตั้งข้อสังเกตว่าน้ำหนักที่หายไป คือ การสูญเสียความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง RDF-5 สำหรับอุณหภูมิที่เริ่มมีการสลายตัวของเชื้อเพลิง RDF-5 คือ ที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C โดยสังเกตได้ว่าเริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C จะเห็นได้ชัดเจนว่ามี %Weight ประมาณ 15.2% และมี %Weight loss เท่ากับ 84.8% ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีการสลายตัวสูงที่สุด ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของสารระเหยสูง สามารถเผาไหม้และสลายตัวได้สูงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 400-500 °C จะมีพลาสติกและกระดาษเป็นองค์ประกอบหลัก [7], [8] ซึ่งเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้มีองค์ประกอบของสารที่เผาไหม้ได้หลักคือพลาสติกและกระดาษ ผลการวิเคราะห์ Thermal decomposition ในงานวิจัยนี้จึงมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ

นอกจากนี้ ในช่วงอุณหภูมิ 500-700 °C พบว่าน้ำหนักจะลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง RDF-5 มีการสลายตัวด้วยความร้อนไปเกือบหมด และที่ระดับอุณหภูมิมากกว่า 700 °C สังเกตได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก มี %Weight คงที่ประมาณ 13% ซึ่งแสดงว่าปริมาณที่เหลืออยู่นี้คือสารอนินทรีย์ ดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณ %ซีเถ้า ของเชื้อเพลิง RDF-5 (13.08%) ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมากกว่า 1,100 °C ค่า %Weight จะเพิ่มสูงขึ้น นั้นหมายความว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้ต้ององค์ประกอบของสารใหม่เกิดขึ้น ทั้งนี้ องค์ประกอบของซีเถ้าในเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 จะถูกนำไปใช้เพื่อพิจารณาหาสัดส่วนการดึงซีเถ้าออกจากเตาแก๊สซิฟิเออร์ที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้มีปัญหาซีเถ้าหลอมในเตาปฏิกรณ์

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์
Bulk density (kg/m ³)	497.00
HHV (kJ/kg)	24,268
LHV (kJ/kg)	20,680
Inherent Moisture Content	14.07
Proximate analysis (%w/w)	
Fixed Carbon	21.49
Volatile Content	61.36
Ash	13.08
Element (%w/w)	
C	33.5
H	3.33
N	1.02
S	0.13
O	46.96
Element (%w/w)	
Alkali	0.58
Al	0.93
Ca	4.73
Cu	0.05
Fe	0.86
Mg	0.43
Si	2.02
Generic formula	CH ₂ O

หมายเหตุ : ไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตราย As, Ba, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Ti, V

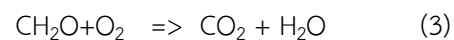


รูปที่ 3 Thermogravimetric Analysis (TGA)

3.2 1. การศึกษาอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio: ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) การเผาไหม้ในเตาปฏิกรณ์จะมีอยู่ 4 สภาวะหลักคือ Drying Zone, Pyrolysis zone, Oxidation Zone และ Reduction Zone ทั้งนี้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดในเตาปฏิกรณ์จะเกิดในสภาวะ Partial Oxidation หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน

ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องควบคุมสภาวะให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์เพียงบางส่วนในเตาปฏิกรณ์ โดยที่ Stoichiometric value ของระบบ Gasification process จะมีค่าเป็น ¼ ของ Theoretical Combustion จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางด้านเคมีของเชื้อเพลิง RDF-5 (CH₂O) สามารถนำมาวิเคราะห์ค่า Theoretical Combustion ได้ดังสมการที่ (3)



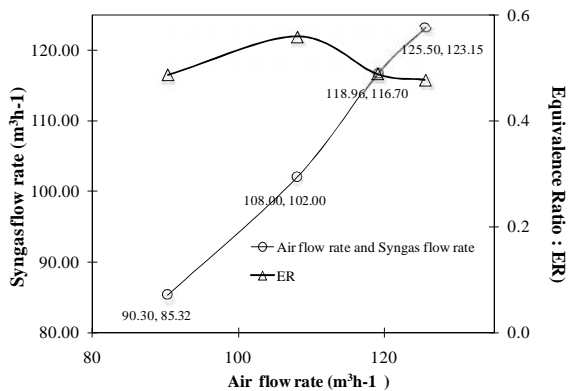
ตามสมการที่ (3) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง RDF-5 สมบูรณ์ต้องใช้ ออกซิเจน 32 กรัม ต่อ เชื้อเพลิง 30 กรัม หรือมีค่าสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีตามทฤษฎี (AF-ratio stoichiometric) คือ 1.07 ดังกล่าว ถ้าพิจารณา ในทางทฤษฎี Stoichiometric value ของระบบ Gasification ที่ควรจะเป็น ¼ ของ Theoretical Combustion จะต้องมีค่าประมาณ 0.27

ทั้งนี้ ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio : ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier ใน 4 สภาวะที่ทำการทดสอบเดินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่า ER ใน 3 สภาวะ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 0.48-0.49 ทั้งนี้ในสภาวะที่ 2 จะมี ER สูงมากกว่าทุกสภาวะ คือมีค่า 0.56 ในทางทฤษฎี ค่า ER สูง จะเป็นตัวชี้วัดว่าในสภาวะที่เดินระบบนั้นมีการป้อนออกซิเจนเข้าระบบมากกว่าความต้องการของการเผาไหม้สำหรับ Gasification Process ซึ่งหากมีปริมาณออกซิเจนมากเกินไปในสัดส่วนของแก๊ส

สังเคราะห์ที่ผลิตได้ จะส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ลดต่ำลง

อย่างไรก็ดี ค่า ER ก็เป็นตัวบ่งชี้ว่าเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ใน Oxidation Zone สูง โดยค่า ER ที่เพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่าอุณหภูมิใน Oxidation Zone สูงขึ้น ซึ่งส่งผลดีคือความร้อนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถกำจัดและลดปริมาณทาร์ (Tar) ที่เกิดมาจาก Pyrolysis zone ได้ [9] ทั้งนี้ค่า ER ต้องมีค่าไม่เกิน 1 เนื่องจากค่า ER เท่ากับ 1 คือการเผาไหม้ในสภาวะ Complete combustion)

จากผลการทดลองทั้ง 4 สภาวะเปรียบเทียบกับค่าในทางทฤษฎี แล้วจะเห็นได้ว่าในการเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ ยังเป็นสภาวะของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation)



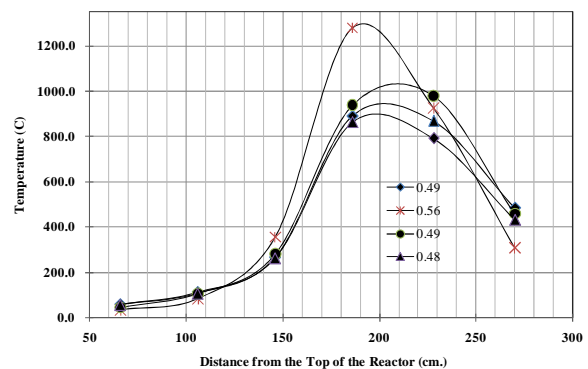
รูปที่ 4 อัตราส่วนสมมูล (ER) ทั้ง 4 สภาวะ

3.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์ (Temperature Profile)

การศึกษาลักษณะของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์ ของการเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio: ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier คือ ที่สภาวะการเดินระบบที่ 2 มีค่า ER สูงกว่าทุกสภาวะ คือ 0.56 ซึ่งการเพิ่มสูงขึ้นของค่า ER มีผลให้อุณหภูมิในช่วง Oxidation zone เพิ่ม

สูงขึ้นเนื่องจากการป้อนปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นใน Oxidation Zone นั้นเอง

นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะที่ 2 ซึ่งอุณหภูมิที่ Oxidation Zone มีค่าสูงกว่า 1,200°C ทำให้เกิดปัญหาการหลอมตัวของซีเมนต์ระหว่างการเดินระบบ ดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ Thermal decomposition ของเชื้อเพลิง RDF-5 โดยใช้เครื่อง TGA จะพบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 1,100 °C ขึ้นไป สารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้ไปทั้งหมด และพบว่า %Weight จะมีค่าเพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้ได้ออกประกอบของสารใหม่เกิดขึ้น อาทิ องค์ประกอบของอัลคาไลโลหะดังกล่าวสรุปได้ว่าการเดินระบบอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงกว่า 1,000 °C จะส่งผลให้เกิดการหลอมตัวของซีเมนต์ (Slag Melting) ซึ่งเป็นปัญหาที่จำเป็นต้องทำการ Shut Down ระบบในที่สุด



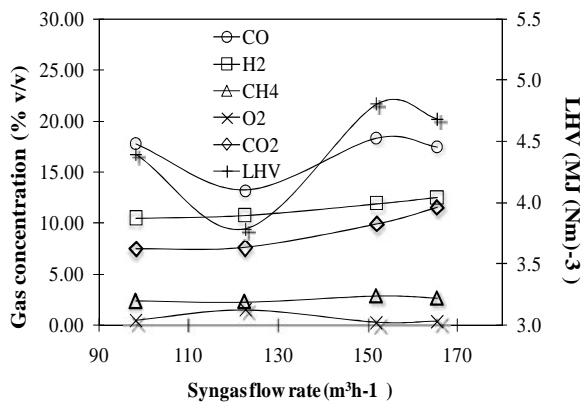
รูปที่ 5 Temperature Profile ทั้ง 4 สภาวะ

3.3 การศึกษาปริมาณของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้

ในการเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ พบองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่เผาไหม้ได้ (Combustible Gas) คือ H₂, CO และ CH₄ ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 10-12%, 27-30% และ 2.2-3.1% ดังแสดงใน รูปที่ 6 ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.4 MJ/Nm³ ซึ่งจัดเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานความร้อนได้ [10] ทั้งนี้ที่สภาวะทดสอบที่ 2 เห็นได้ว่ามีองค์ประกอบของ H₂ และ CO ต่ำกว่าที่สภาวะอื่นๆ สาเหตุอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไม่



สมบูรณ์ใน Reduction Zone ซึ่งเป็นผลมาจากในปฏิกิริยาการเผาไหม้ใน Oxidation Zone มีการป้อนออกซิเจนสูงมีผลให้เกิดการเผาไหม้มากขึ้นและสูญเสียองค์ประกอบของ C ที่จะมาทำปฏิกิริยากับ CO₂ และ H₂O ใน Reduction Zone เพื่อให้เกิด H₂ และ CO จึงลดลงทั้งนี้สอดคล้องกับ %O₂ ในองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่มีปริมาณสูง และค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าสภาวะอื่นๆ คือ 3.79 MJ/Nm³



รูปที่ 6 องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ทั้ง 4 สภาวะ

3.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบในการทดสอบเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าที่อัตราการไหลหรือที่อัตราการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลให้มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มากขึ้น แต่ที่อัตราการไหลสูงสุดคือ 123.15 m³/hr ให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (g) ต่ำกว่าที่การเดินระบบที่ให้อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์เท่ากับ 116.70 m³/hr ในการเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ มีปริมาณของทาร์และฝุ่นในแก๊สสังเคราะห์ต่ำกรณีดังกล่าวนี้สามารถนำแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ [11] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากข้อมูลทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า ในสภาวะที่ 3 เป็นสภาวะของการเดินระบบที่เหมาะสมมากที่สุด คือ ที่ค่า ER เท่ากับ 0.49 โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 63 kg สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้เท่ากับ 116.7 m³/hr

และคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ [3] โดยมีองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ ประกอบด้วย CO, H₂ และ CH₄ ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 18.37 %, 11.92 % และ 2.87% ตามลำดับ ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.81 MJ/Nm³ คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ เท่ากับ 46.25% ประเมินเป็นค่าพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 167.39 kWth ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้นี้สามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานได้ ทั้งในรูปการผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในและพลังงานความร้อน ซึ่งในกรณีของการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าควรจะมีค่าความร้อนมากกว่า 4.2 MJ/Nm³ การนำเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทดแทนในรูปแก๊สสังเคราะห์โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าชีวมวลประเภทไม้โตเร็วและเศษวัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรเพียงเล็กน้อย ซึ่งในกลุ่มชีวมวลประเภทดังกล่าวนี้จะมี g อยู่ในช่วง 53.8-79.3 % [12]

ตารางที่ 4 ข้อมูลผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

Gas flow rate (m ³ /hr)	ER	m _{fuel} (kg/hr)	m _{gas} (kg/hr)	g (%)	kWth	Tar and Dust (mg/m ³)
85.32	0.49	48	6.5	40.46	111.55	30.5
102.00	0.56	50	6.5	40.41	116.07	32.1
116.70	0.49	63	8.5	46.25	167.39	40.4
123.15	0.48	68	8.5	44.21	172.69	43.5

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (Fixed-bed downdraft gasifier) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักสามารถเปลี่ยนรูปเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ การเดินระบบที่ Equivalence Ratio : ER เท่ากับ 0.49 โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 เท่ากับ 63 kg สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้เท่ากับ 116.7 m³/hr เป็นสภาวะที่เหมาะสมของการเดินระบบมากที่สุด โดยมีองค์ประกอบ

ของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ ประกอบด้วย CO, H₂ และ CH₄ ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 18.37 %, 11.92 % และ 2.87% ตามลำดับ ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.81 MJ/Nm³ คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ เท่ากับ 46.25% ประเมินเป็นค่าพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 167.39 kWth มีปริมาณของทาร์และฝุ่นปนเปื้อนต่ำเท่ากับ 40.4 mg/Nm³ ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปของการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายใน และการผลิตความร้อน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Marrero, T.W., McAuley, B.P., Sutterlin, W.R., Steven Morris, J., Manahan, S.E., 2004. Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge. Waste Manag. 24(2), 193-198
- [2] Reed TB, Das A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine system. Golden, CO: SERI, 1988
- [3] Martinez, J.D., Mahkamov, K., Andrade, R.V., Silva Lora, E.E., 2012. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engine.
- [4] Bridgwater, A. V., 1995,. The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation. Fuel, Vol. 74, pp. 631-653.
- [5] Babu, B.V. and Pratik N.Sheth. 2005. Modeling & Simulation of Biomass Gasifier: Effect of Oxygen Enrichment and Steam-to-air Ratio” Proceedings of International Congress on Renewable Energy (ICORE-2005), Pune, January 20-22, , Paper No.30, pp. 194-204.
- [6] Bhattacharya, S. C., Hla, S. S., Pham, H. L., 2001. A Study on a Multistage Hybrid Gasifiers-Engine System. Biomass and Bioenergy, Vol. 21, pp. 445-460.
- [7] Narukawa K, Goto H, Chen Y, Mori S, Combustion characteristics of RDF. Kagakukoguko Ronbunshu 1996;22(3):560-5.
- [8] Piao, G., Aona, S., Kondoh, M., Yamazaki, R. and Mori, S. 2000. Combustion test of refuse derived fuel in a fluidized bed. Waste management. (20) 443-447.
- [9] Phuphuakrat, T., Nipattummaku, N., Namioka, T., Kerdsuwan, S. Yoshikawa, K., 2010. Characterization of tar content in the syngas produced in a downdraft type fixedbed gasification system from dried sewage sludge. Fuel. 89 (2010) 2278–2284
- [10] Z.A.Zainal, Ali Rifau, G.A. Quadir, K.N. Seetharamu. . 2002. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. biomass and bioenergy 23 283-289
- [11] P. Quakk, H. Knoef and H. Stassen, Energy from biomass: a review of combustion and gasification technology. World Bank Technical Paper no. 422, (1999).
- [12] Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G.S.V. Raghavan. 2012. Evaluation of Energy Production from Different Biomass Feedstock Using a Pilot Scale Downdraft Gasifier. Biobase Materials and Bioenergy. Vol 6, 1-11, 2012