อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งเย็นโดยเตาแบบแก๊สหมุนวนปิด
Influence of Temperature to Cold Compressed Cassava Rhizome Sticks Pyrolysis by Closed Flue Gas Circulating Kiln

ปรีชา ขันติโกมล[1*], ไมตรี พลสงคราม[1], ติณกร ภูวดิน[1] และ วิวัฒน์ อภิสิทธิ์ภิญโญ[1]

[1]ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน (RTER) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: E-mail: preecha@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 080-4705287

บทคัดย่อ

เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังมีความหนาแน่นน้อย ไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงนำเสนออิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่มีผลต่อการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งเย็นโดยเตาแบบแก๊สหมุนวนปิด ใช้เหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งเย็นมวล 0.5, 1 และ 1.5 kg ความชื้น 20% เป็นชีวมวลตัวอย่าง ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิแก๊สป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ 300, 350 และ 400 °C อัตราการป้อนแก๊สหมุนวน 0.0137 m^3/s ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิแก๊ส 300 °C ไม่สามารถทำให้เกิดผลผลิตถ่านได้ แต่สามารถทำให้เกิดผลผลิตของเหลวหรือน้ำส้มควันไม้ดิบได้ ผลผลิตถ่านจะเกิดที่อุณหภูมิเกิน 350 °C ขึ้นไป เมื่ออุณหภูมิของแก๊สหมุนวนสูงขึ้นถึง 400 °C ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งเป็นเถ้าได้ในเวลาค่อนข้างเร็ว จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้านต่ำ (LHV) พบว่ามีค่ามากเพียงพอสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

คำหลัก: การไพโรไลซิส; ถ่านอัดแท่ง; น้ำส้มควันไม้; เตาแบบแก๊สหมุนวนปิด

Abstract

Due to low density of the cassava rhizome, it does not suitable to be used as direct fuel. Therefore, the present article would present the influence of temperature to cold compressed cassava rhizome sticks pyrolysis by using the closed flue gas circulating kiln. The compressed cassava rhizome sticks with 20% moisture content amount 0.5, 1.0 and 1.5 kg were examined. The temperature of the circulating flue gas at the inlet of the kiln was varied 300, 350, and 400 °C. The supplying gas flow rate was 0.0137 m^3/s. The result showed the supplying gas temperature 300 °C was not enough to change the biomass to be the charcoal yield, but could produce the raw wood vinegar. The charcoal yield would occur at temperature from 350 °C. When the temperature of the gas circulates rises to 400 °C, it results to decomposition of the cassava rhizome sticks into ash in a relatively fast time. In low heating value (LHV) analysis, it is found that there is enough value for use as fuel.

Keywords: Pyrolysis; Charcoal sticks; Wood vinegar; Closed flue gas circulating.

1. บทนำ

จากข้อมูลการใช้พลังงานของประเทศ ปี พ.ศ. 2558 [1] พบว่ามีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และด้วยนโยบายรัฐบาล สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (ส.ค.ช.) มีปัจจัยสนับสนุนการส่งออกและการท่องเที่ยว คาดว่าเศรษฐกิจจะปรับตัวดีขึ้น ส่งผลให้ความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย คาดว่าจะมีความต้องการใช้น้ำมันเพิ่มขึ้น 2.4% ใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มขึ้น 3.2% ดังนั้นรัฐบาลจึงมีนโยบายให้ใช้พลังงานทดแทน [2] ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ รวมทั้งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีเศษชีวมวลเหลือใช้เป็นจำนวนมากในแต่ละปี สำหรับในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทน 10,077 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็น 12.94% ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยพบว่ามีการใช้พลังงานในรูปความร้อนมากที่สุดคิดเป็น 65.3% ของพลังงานทดแทนทั้งหมด รองลงมาคือ เชื้อเพลิงชีวภาพ (เอทานอลและไบโอดีเซล) และไฟฟ้าคิดเป็น 19.3% และ 15.4% ตามลำดับ โดยพบอีกว่ามีการใช้ความร้อนจากชีวมวลมากที่สุดคิดเป็น 91% รองลงมาคือก๊าซชีวภาพ และพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตาม

ชีวมวลแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรง เช่น กากมันสำปะหลัง และส่าเหล้า เพราะมีความชื้นสูงถึง 80-90% บางชนิดต้องนำมาย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [3] ปี พ.ศ. 2557 พบว่า ประเทศไทยมีเนื้อที่เก็บเกี่ยวมันสำปะหลัง 8.43 ล้านไร่ ผลผลิต 30.02 ล้านตัน เหง้ามันสำปะหลังจะถูกกองทิ้งไว้ในไร่มันสำปะหลังและทำการเผา ทำให้สูญเสียเชื้อเพลิงไปโดยเปล่าประโยชน์ จากการทดสอบทางเคมีพบว่าพลังงานความร้อนจากเหง้ามันสำปะหลัง มีค่าประมาณ 3,500 kcal/kg [4] ซึ่งเหง้ามันสำปะหลังมีค่าความร้อนอยู่ในเกณฑ์ที่จะเป็นเชื้อเพลิงได้ และเป็นวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตรควรนำมาใช้ทำถ่าน แต่ไม่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านโดยตรงได้เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังมีค่าความพรุนสูง และมีความหนาแน่นต่ำ

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าเหง้ามันสำปะหลังสามารถเป็นเชื้อเพลิงได้ แต่มีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการผลิตถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งด้วยเตาไพโรไลซิสแบบแก๊สหมุนวนปิด โดยมุ่งเน้นอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งเย็นโดยเตาแบบแก๊สหมุนวนปิด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลตามอัตราส่วนในแต่ละชนิด อาจทำให้คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงแตกต่างกันได้ จึงจำเป็นต้องนำเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ซึ่งผู้ศึกษาได้ทำการศึกหาค่า ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM มีวิธีการทดสอบครั้งนี้

2.1 การหาปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM E871 [5] โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยให้ความร้อนคงที่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างที่ลดลง เครื่องมือที่ใช้ ตู้อบ, ถ้วยทนไฟ, เครื่องชั่งดิจิตอล ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.) สามารถคำนวณได้จากสมการ (1) ดังนี้

$$MC(\%w.b.) = \frac{w-d}{w} \qquad (1)$$

เมื่อ w คือ ปริมาณมวลของสารก่อนอบ (kg) และ d คือ ปริมาณมวลของสารหลังอบ (kg)

2.2 การหาปริมาณเถ้า (Ash Content)

การหาปริมาณเถ้า ได้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1102 [6] โดยนำตัวอย่างไปเผาให้ความร้อนในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500 °C แล้วค่อยๆ เพิ่มความร้อนเป็น 700-750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้น้ำหนักที่คงที่ของถ้วยทนไฟรวมกับน้ำหนักของเถ้าที่เหลือ จึงนำมาชั่งน้ำหนักเครื่องมือที่ใช้ ถ้วยทนไฟ, เตาเผาแบบ

อุณหภูมิสูง, เครื่องชั่งดิจิตอล สามารถคำนวณได้จากสมการ (2) ดังนี้

$$ASH(\%) = \frac{m_f}{m_i} \qquad (2)$$

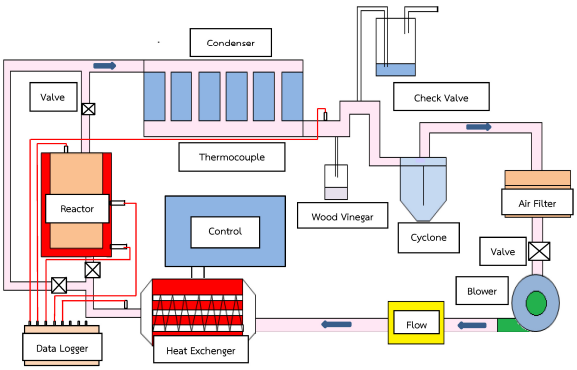
เมื่อ m_i คือ มวลตัวอย่างทดลองก่อนอบ (kg) และ m_f คือ มวลตัวอย่างทดลองหลังอบ (kg)

สำหรับการทดสอบหาปริมาณสารระเหย ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM Standard E872 [7]

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 แผนผังอุปกรณ์การไพโรไลซิส

รูปที่ 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การไปโรไลซิสด้วยระบบแก๊สหมุนวนปิด ชุดอุปกรณ์ มีส่วนประกอบคือ เครื่องเป่าลม (Blower) มีหน้าที่สำหรับสร้างอัตราการไหลในระบบ ใช้ออริฟิสมิเตอร์ (Orifice meter) สำหรับวัดอัตราการไหลของแก๊ส ใช้ชุดทำความร้อนไฟฟ้า (Electric heater) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สในระบบ ซึ่งมีเตาปฏิกรณ์ (Reactor) ขนาดความจุ 0.018 m^3 เป็นเตาสำหรับป้อนชีวมวลในการทดลอง โดยแก๊สจะเข้าไปสลายโครงสร้างชีวมวลในเตาปฏิกรณ์แล้วจะออกมาควบแน่นที่ อุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) หลังจากควบแน่นจะได้ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ที่อุปกรณ์เก็บน้ำส้มควันไม้ (Wood vinegar) แก๊สส่วนหนึ่งจะถูกผลักดันออกมาทางเช็ควาล์ว (Check valve) และแก๊สอีกส่วนหนึ่งจะผ่านมายังอุปกรณ์ดักฝุ่นละออง (Cyclone) แล้วจะวิ่งผ่านมายังเครื่องกรองอากาศ (Air filter) เพื่อดักฝุ่นละอองที่ปนมากับแก๊สก่อนเข้าเครื่องเป่าลม โดยอุปกรณ์การทดลองมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ นำชีวมวลใส่เตาปฏิกรณ์ จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ สร้างอัตราการไหลในระบบด้วยเครื่องเป่าลมแล้วควบคุมอัตราการไหลด้วยออริฟิสมิเตอร์ จากนั้นจะไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนเข้าไปสลายชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ เมื่อชีวมวลได้รับการไพโรไลซิสแล้วจะเกิดแก๊สของชีวมวลถูกส่งไปที่อุปกรณ์ควบแน่นหลังจากควบแน่นจะได้น้ำส้มควันไม้ที่ถังเก็บน้ำส้มควันไม้แก๊สที่ไม่ถูกควบแน่นในระบบจะถูกดันออกทางเช็ควาล์ว และแก๊สอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปดักฝุ่นละอองที่อุปกรณ์ดักฝุ่นละอองแล้วจะไหลไปเข้าอีกช่องทางของเครื่องเป่าลม จากนั้นทำการไพโรไลซิสตามระยะเวลาที่กำหนดเมื่อถึงเวลาที่ต้องการ ทำการปิดวาล์วเตาปฏิกรณ์เพื่อไม่ให้อากาศเข้าในระบบ ทำการปิดเครื่องรออุณหภูมิลดลงจึงทำการเก็บผลผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

3.2 ชีวมวลตัวอย่าง

รูปที่ 2 แสดงภาพการเตรียมเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง มีขั้นตอนการเตรียมชีวมวลตัวอย่างดังนี้คือ นำเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในเครื่องบดแล้วทำการบดละเอียดจนเป็นผงเหง้ามัน (รูปที่ 2a) ใช้แป้งมันต้มให้เหนียวเป็นกาวแล้วนำไปผสมกับแป้งมันในสัดส่วนผงเหง้ามันต่อแป้งมัน 5:1 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน (รูปที่ 2b) นำผงเหง้ามันที่ผสม ใส่ลงไปในอุปกรณ์อัดแท่งที่ใช้แม่แรงขนาด 1 ton เป็นต้นกำลัง แม่พิมพ์เป็นทรงกระบอกจำนวน 6 กระบอก ใส่เหง้ามันลงไปในกระบอก จำนวน 6 กระบอก แล้วทำการปิดฝาให้สนิท จากนั้นทำการกดแม่แรงอัดเสร็จ ทำการเปิดฝาแล้วกดแม่แรงดันเหง้ามันออกมาแล้วนำไปตากแดด จะได้เหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งที่มีความหนาแน่น 615.38 kg/m^3 (รูปที่ 2c) หลังจากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง

(a)

(b)

(c)

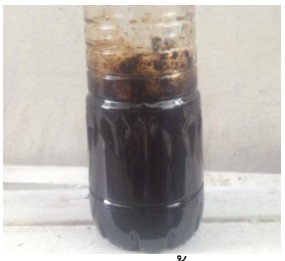
รูปที่ 2 การเตรียมเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งเย็น (a) ผงเหง้ามันแห้ง (b) ผงเหง้ามันผสมตัวประสาน (c) เหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง

4. ผลและการอภิปรายผล

รูปที่ 3 แสดงภาพผลผลิตถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง สังเกตเห็นว่าสีของผลผลิตถ่านเป็นสีดำเข้มและรักษาสภาพของรูปร่างภายนอกไว้ได้เป็นอย่างดี จากผลการศึกษาเชิงทดลองแสดงให้เห็นว่า มวลคงเหลือของชีวมวลหรือผลิตภัณฑ์ของแข็ง (ถ่าน) ที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลของชีวมวลตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความร้อนเข้าไปสลายโครงสร้างของชีวมวลได้ไม่เพียงพอสำหรับระยะเวลา 50 นาที จึงส่งผลให้ยังคงมีสารระเหยในเนื้อไม้บางส่วนที่ยังไม่ถูกสลาย

รูปที่ 3 ภาพผลผลิตถ่าน

รูปที่ 4 แสดงภาพผลผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบมีลักษณะเป็นของเหลวใส สีน้ำตาล มีกลิ่นควันไฟ ได้จากการควบแน่นของสารระเหยที่เกิดจากการไพโรไลซิสชีวมวลให้กลายเป็นถ่านในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนโดยมีอุณหภูมิในเตาอยู่ระหว่าง 300 - 400 °C

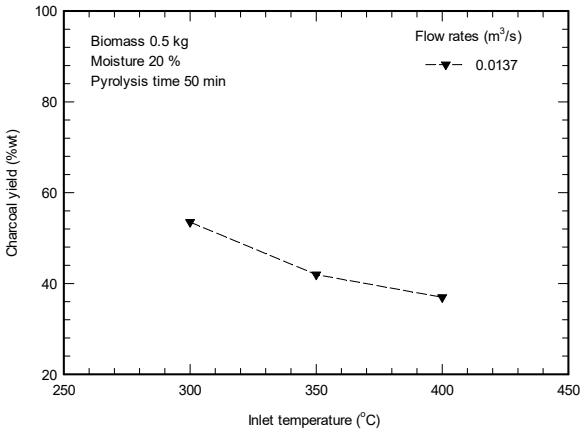


รูปที่ 4 ภาพมวลผลิตน้ำส้มควันไม้ดิบ

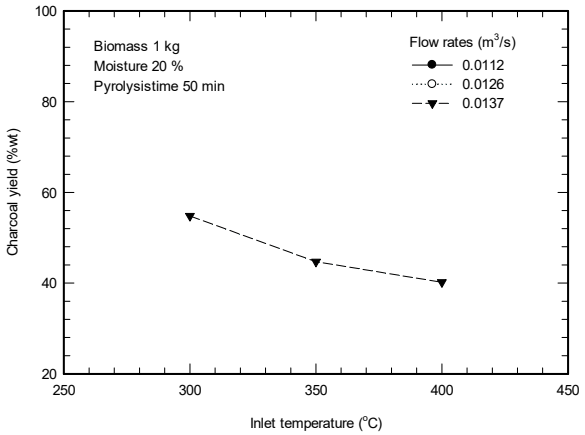
4.1 อิทธิผลของอุณหภูมิแก๊สก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อมวลผลผลิตถ่าน

รูปที่ 5-7 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สร้อนก่อนเข้าเตาปฏิกรณ์ต่อมวลผลผลิตถ่าน จากเหง้ามันสำปะหลังมวล 0.5, 1 และ 1.5 kg ที่ความชื้น 20% ไพโรไลซิสเตาแบบแก๊สหมุนวนปิดเป็นเวลา 50 นาที จากผลการศึกษาเชิงทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิแก๊สก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มวลของถ่านที่ได้มีปริมาณลดลง เนื่องจากในระยะเวลา 50 นาที ที่อุณหภูมิสูง (400 °C) มีค่าสูงเพียงพอที่จะสลายโครงสร้างชีวมวลให้ถ่านได้ และสามารถไล่ความชื้นรวมทั้งสารประกอบอื่นๆ ได้มากจึงส่งผลให้ปริมาณผลผลิตของแข็งหรือถ่านลดลง อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิไพโรไลซิสนี้และเวลา 50 นาที จะมีชีวมวลบางส่วนถูกสลายเป็นเถ้าด้วย โดยเฉพาะเมื่อไพโรไลซิสเหง้ามันอัดแท่งมวลน้อย (0.5 Kg) ดังนั้นเพื่อป้องกันการกลายเป็นเถ้าจึงควรเพิ่มปริมาณชีวมวล ซึ่งสังเกตุได้จากกราฟ รูปที่ 5 และ 6 มีปริมาณมวลถ่านเพิ่มขึ้น โดยปราศจากเถ้าเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำๆ กระบวนการสลายชีวมวลยังไม่สมบูรณ์ จะเป็นเพียงการไล่ความชื้นที่ออกมาในรูปแบบของไอน้ำ และเมื่อพิจารณาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C จะเห็นว่าอัตราการลดลงมวลของถ่านจะลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของปริมาณมวลของถ่านในช่วงอุณหภูมิ 350 – 400 °C จะมีอัตราการลดลงที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสารระเหยในชีวมวลเกือบสลายได้

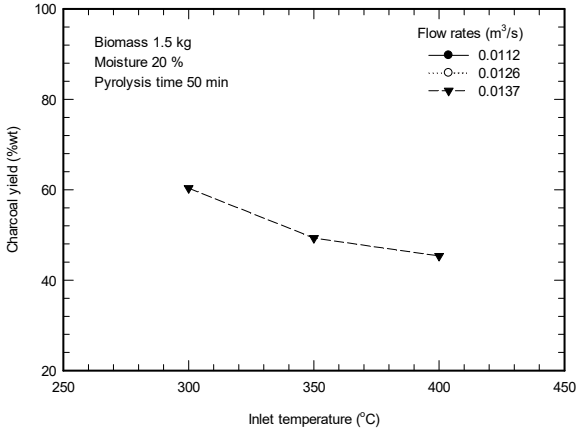
หมดแล้ว ซึ่งจะยังคงเหลือเฉพาะปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) และ ปริมาณเถ้า (Ash)



รูปที่ 5 อิทธิพลของอุณหภูมิก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อปริมาณผลผลิตถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง 0.5 kg



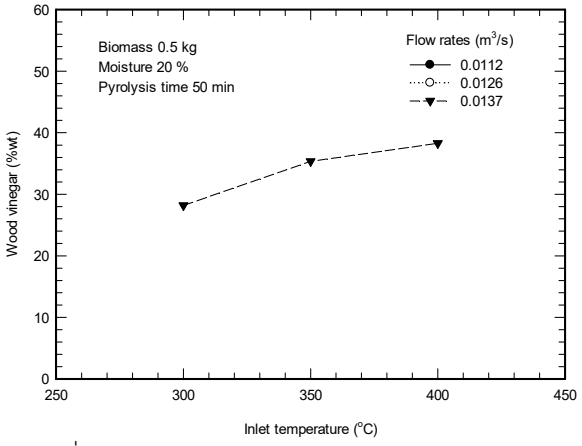
รูปที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อปริมาณผลผลิตถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง 1 kg



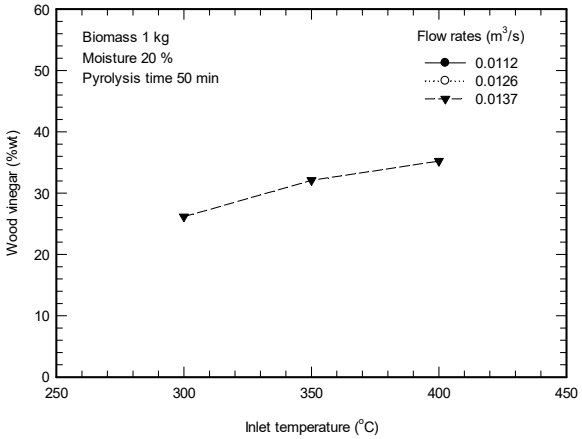
รูปที่ 7 อิทธิพลของอุณหภูมิก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อปริมาณผลผลิตถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง 1.5 kg

4.2 อิทธิพลผลของอุณหภูมิแก๊สก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อปริมาณน้ำส้มควันไม้

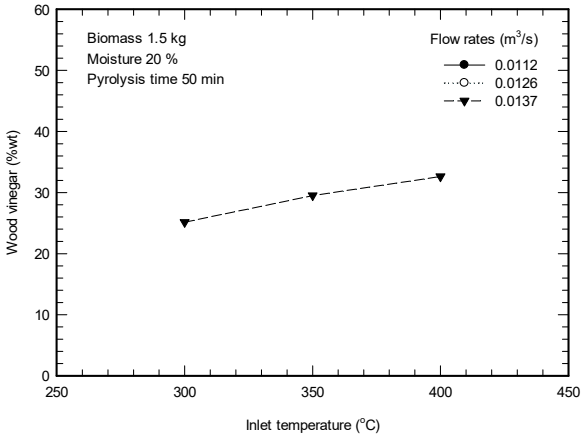
รูปที่ 8-10 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สร้อนก่อนเข้าเตาปฏิกรณ์ต่อปริมาณ ผลผลิตน้ำส้มควันไม้ จากผลการศึกษาเชิงทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณผลผลิตน้ำส้มควันไม้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ 300 °C ที่มีปริมาณผลผลิตน้ำส้มควันไม้น้อยกว่าอุณหภูมิที่ 400 °C เนื่องจากอุณหภูมิที่ 300 °C มีอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะสลายโครงสร้างชีวมวล เป็นเพียงการอบแห้งไล่ความชื้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ 350 และ 400 °C ปริมาณผลผลิตน้ำส้มควันไม้มากกว่าที่ 300 °C เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นจะสลายโครงสร้างชีวมวลหรือขับไล่สารระเหยในชีวมวลได้มากขึ้นนั้นเอง จึงทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้ำส้มควันไม้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 8 อิทธิพลของอุณหภูมิก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อปริมาณน้ำส้มควันไม้จากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง 0.5 kg



รูปที่ 9 อิทธิพลของอุณหภูมิก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อปริมาณน้ำส้มควันไม้จากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง 1 kg



รูปที่ 10 อิทธิพลของอุณหภูมิก่อนเข้าเตาไพโรไลซิสต่อปริมาณน้ำส้มควันไม้จากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่ง 1.5 kg

5. สรุป

จากการศึกษาการผลิตถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งด้วยเตาไพโรไลซิสแบบหมุนวนปิด ใช้เหง้ามันสำปะหลังอัดแท่งมวล 0.5, 1 และ 1.5 kg ที่ความชื้น 20% เป็นชีวมวลตัวอย่างในการทดลอง สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) ที่อุณหภูมิการป้อนแก๊สหมุนวนในระบบการไพโรไลซิสแบบแก๊สหมุนวนปิด 300 °C มีค่าสูงไม่เพียงพอสำหรับการสลายโครงสร้างชีวมวล จึงไม่สามารถเกิดผลผลิตถ่านได้

2) ผลผลิตถ่านจะเกิดขึ้นได้เมื่อป้อนแก๊สร้อนเข้าเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 °C ซึ่งจะมีปริมาณลดลงตามอุณหภูมิและอัตราการป้อนแก๊สร้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูง (400 °C) อัตราการไหลของแก๊สร้อนแทบจะไม่มีผลต่อผลผลิตถ่าน

3) ผลผลิตน้ำส้มควันไม้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและอัตราการป้อนแก๊สร้อน ซึ่งผลผลิตน้ำส้มควันไม้จะมีค่าโดยเฉลี่ยมากที่สุด ที่อัตราการป้อนแก๊ส 0.0137 m^3/s สำหรับทุกอุณหภูมิการไพโรไลซิส

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (2558). มติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ (1/2558). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www2.eppo.go.th/nepc/kpc/kpc-N1.html (วันที่สืบค้นข้อมูล:15/04/2559)

[2] กระทรวงพลังงาน. (2557). นโยบายด้านพลังงานของรัฐบาล. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://energy.go.th/2015/government-energy-policy/ (วันที่สืบค้นข้อมูล:18/04/2559)

[3] สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2556). การผลิตมันสำปะหลังของไทย. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www3.rdi.ku.ac.th/?p=17882 (วันที่สืบค้นข้อมูล:18/04/2559)

[4] รุ่งโรจน์ พุทธีสกุล. (2553). การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเหง้ามันสำปะหลัง. ปริญญานิพนธ์ กศ.ม (อุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

[5] ASTM Standard E871. (2013). Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample. American Society for Testing and Materials, U.S.A.

[6] ASTM Standard D1102. (2013). Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample. American Society for Testing and Materials, U.S.A.

[7] ASTM Standard E872. (2013). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample. American Society for Testing and Materials, U.S.A.