

## การประเมินคุณลักษณะทางเคมีความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งจากชุยอ้อย และเส้นใยอ้อยซึ่งผลิตโดยกระบวนการทอรรีแฟกซ์

จารุณี เข้มพิลา<sup>1\*</sup>

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

และ ภูมินทร์ คงโต<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

\* Corresponding Author: jarunee.kh@rmu.ac.th

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

<sup>2</sup> นิสิตปริญญาเอก สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์

### ข้อมูลบทความ

### บทคัดย่อ

#### ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 1 เมษายน 2564

แก้ไข : 10 มกราคม 2565

ตอบรับ : 25 มกราคม 2565

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.4

#### คำสำคัญ :

อ้อย / ชุยอ้อย / เส้นใยอ้อย /

เชื้อเพลิงชีวภาพ / ทอรรีแฟกซ์

การศึกษานี้ใช้ชุยอ้อยและเส้นใยอ้อย ซึ่งเป็นชีวมวลที่เหลือจากการแปรรูปอ้อยในอุตสาหกรรมน้ำตาล ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ โดยให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ภายใต้การป้อนแก๊สไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง ศึกษาสมบัติเชิงเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง และเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลของชีวมวลดิบ โดยวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเส้นใย (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) องค์ประกอบแบบประมาณ (ความชื้น คาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า) องค์ประกอบแบบละเอียด (คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน) และค่าความร้อนสูง ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิทอรรีแฟกซ์มีผลต่อการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในชุยอ้อยมากกว่าเส้นใยอ้อย แต่ไม่มีผลต่อการสลายตัวของลิกนินมากนัก ปริมาณเถ้าของชุยอ้อย (ร้อยละ 13.9) และเส้นใยอ้อย (ร้อยละ 1.8) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 34.6 และ 3.2 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส คาร์บอนคงตัวของชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีปริมาณร้อยละ 20 และ 25.1 ตามลำดับซึ่งมีค่าสูงกว่าชีวมวลดิบร้อยละ 50.4-88.7 ปริมาณออกซิเจนในชุยอ้อยและเส้นใยมีค่าลดลงจากร้อยละ 55.7 เป็น 48.6 และจากร้อยละ 48.5 เป็น 41.6 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 38.1 เป็น 45.8 และจากร้อยละ 44.4 เป็น 52.1 ตามลำดับ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนของชุยอ้อยและเส้นใยจาก 15.5 เป็น 18.1 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และจาก 17.6 เป็น 20.8 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ปริมาณกำมะถันในเส้นใยอ้อยมีค่าต่ำที่สุด บ่งชี้ได้ว่าปริมาณกำมะถันของเส้นใยอ้อยถูกกำจัดด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ได้ดีกว่ากรณีของชุยอ้อย แผนภาพ Van Krevelen แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเส้นใยอ้อยที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์มีแนวโน้มของสมบัติเข้าใกล้ถ่านหิน เนื่องจากการลดลงของอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอน

## Evaluation of Thermochemical Characteristics of Solid Fuels from Sugarcane Pith and Fiber Produced by Torrefaction Process

Jarunee Khempila<sup>1\*</sup>

Rajabhat Mahasarakham University, Talat, Mueang, Maha Sarakham 44000

and Pumin Kongto<sup>2</sup>

Prince of Songkla University, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla 90110

\* Corresponding Author: jarunee.kh@rmu.ac.th

<sup>1</sup> Lecturer, Program of Physics, Faculty of Science and Technology.

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Energy Technology Program, Faculty of Engineering.

### Article Info

#### Article History:

Received: April 1, 2021

Revised: January 10, 2022

Accepted: January 25, 2022

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.4

#### Keywords:

Sugarcane / Pith /

Fiber / Biomass fuel /

Torrefaction

### Abstract

This study focused on the use of sugarcane pith and fiber, which are processing by-products of the sugar industry, as a feedstock for the preparation of biochar fuels by torrefaction at temperatures ranging from 250 to 300 °C with a residence time of 30 minutes under a continuous supply of nitrogen. To determine the thermochemical characteristics of solid products and compare them with the raw biomass, fiber (cellulose hemicellulose and lignin), proximate (moisture content, fixed carbon, volatile matter and ash contents) as well as elemental (carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen and sulfur) analyses were conducted; higher heating values (HHV) were also determined. The results revealed that torrefaction temperature exhibited larger effect on the hemicellulose degradation of the sugarcane pith when compared with the case of sugarcane fiber. Lignin was not significantly affected, however. The ash contents of raw sugarcane pith (13.9%) and fiber (1.8%) increased to 34.6% and 3.2% at 300 °C, respectively. The highest fixed carbon contents of the sugarcane pith and fiber were 20% and 25.1%, respectively, 50.4-88.7% higher than the original values. There was a reduction in the oxygen contents of the sugarcane pith and fiber, from 55.7 to 48.6% and 48.5 to 41.6%, while the carbon contents increased from 38.1 to 45.8% and 44.4 to 52.1 MJ/kg, respectively. These resulted in increased HHV of both sugarcane pith and fiber from 15.5 MJ/kg to 18.1 MJ/kg and 17.6 MJ/kg to 20.8 MJ/kg, respectively. The lowest sulfur content was noted in the torrefied sugarcane fiber, clearly illustrating that sulfur could be more effectively eliminated by the torrefaction process in the case of sugarcane fiber than in the case of sugarcane pith. Van Krevelen diagram clearly showed that torrefied sugarcane fiber had achieved coal characteristics as evidenced from the decrease in O/C and H/C molar ratios.

## 1. บทนำ

แผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 ตั้งเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลให้ได้ 5,570 เมกะวัตต์ ภายใน พ.ศ. 2579 ซึ่งมากกว่าเมื่อสิ้น พ.ศ. 2557 ถึงร้อยละ 127 [1] เพื่อให้สอดคล้องกับแผนฯ ดังกล่าว กระทรวงพลังงานจึงปรับแผนการเพิ่มพลังงานทดแทนจากชีวมวลด้วยการส่งเสริมให้ปลูกพืชพลังงานประเภทไม้โตเร็วที่มีศักยภาพ เช่น ไม้สกุลยูคาลิปตัส สกุนทรธิน สนประดิพัทธ์ เสม็ดขาว และไผ่ [2] เสริมกับการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจอันได้แก่ ฟางข้าว เหนียงมันสำปะหลัง แกลบ ใบอ้อย ยอดอ้อย ชานอ้อยหรือกากอ้อย ชังข้าวโพด และลำต้น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น จึงจะเพียงพอต่อการเพิ่มสัดส่วนพลังงานจากชีวมวลเพื่อบ่มุงไปสู่เป้าหมายการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน ฯลฯ ที่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลนับเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงต่อระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศให้เพิ่มขึ้นจากเดิมชีวมวลชานอ้อยเป็นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติประเภทที่สร้างทดแทนใหม่ได้เป็นประจำทุกปี ในช่วง 7 ปี ที่ผ่านมาปริมาณการผลิตอ้อยของประเทศไทยมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มเฉลี่ยร้อยละ 6.20 ต่อปี โดยเป็นการขยายตัวตามพื้นที่ปลูก ที่ขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 4.56 ต่อปี ทั้งนี้ในปี 2560/61 มีพื้นที่ปลูกอ้อย จำนวน 11.54 ล้านไร่ สามารถผลิตอ้อยได้ 134.93 ล้านตัน มีกากน้ำตาลและชานอ้อยเป็นผลพลอยได้ที่ 5.49 และ 37.78 ล้านตัน ตามลำดับ [3] จากข้อมูลการผลิตไฟฟ้าและจำหน่ายไฟฟ้าตามสัญญาขายไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน (Independent Power Producer : IPP) ประจำปี 2563 ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล 4 ชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย เศษไม้ยางพารา ทะลายปาล์ม และชีวมวลอื่น ๆ รวม 788.72 เมกะวัตต์ พบว่าในปริมาณนี้เป็นกำลังการผลิตจากกากอ้อยจำนวน 593.3 เมกะวัตต์ หรือคิดเป็นร้อยละ 75.22 ของกำลังผลิตทั้งหมดจากพลังงานหมุนเวียนประเภทชีวมวล [4] จากข้อมูลพยากรณ์ปริมาณชานอ้อยรวมทั้งปริมาณการผลิตไฟฟ้าและจำหน่ายไฟฟ้าที่จะเกิด

ขึ้นตามยุทธศาสตร์ ทั้งหมดสรุปได้ว่าชานอ้อยนับเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกที่มีศักยภาพอย่างยิ่ง ภายหลังจากกระบวนการหีบอ้อย ชานอ้อยที่ออกจากลูกหีบชุดสุดท้ายจะเป็นกากที่ส่วนใหญ่ถูกส่งไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้และใช้เพื่อการผลิตกระดาษ ชานอ้อยประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ขุยอ้อย (Pith) เนื้ออ้อย (Fiber of the rind) และเปลือกอ้อย ในส่วนของเนื้ออ้อยจะประกอบด้วยมัดเส้นใย ในปริมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง (หมายรวมถึงเปลือกอ้อย) มัดเส้นใยมีลิกนินเป็นองค์ประกอบ ซึ่งลิกนินมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 23.26-25.58 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [5] ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของถ่านหิน 29.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [6] ดังนั้นการมีเนื้ออ้อยผสมอยู่มากในชานอ้อยจึงส่งผลต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อพิจารณาส่วนของขุยอ้อยซึ่งมีปริมาณคิดเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง [7] พบว่าขุยอ้อยไม่มีลักษณะของเส้นใยจึงมีองค์ประกอบของลิกนินอยู่ในขุยอ้อยเพียงเล็กน้อย อีกทั้งขุยอ้อยมีสมบัติดูดซับความชื้นได้สูงกว่าเส้นใย [8] การใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงโดยมีขุยอ้อยผสมอยู่ประมาณ 1 ใน 3 ส่วนนั้นอาจจะส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อนของชานอ้อย ที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งประกอบทั้งการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงยังมีข้อจำกัดอยู่บ้างเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือชีวมวลบางประเภท เช่น ความหนาแน่นต่ำ ค่าความร้อนต่ำ ซึ่งการลดข้อจำกัดเหล่านี้สามารถทำได้ด้วยการปรับปรุงชีวมวลด้วยวิธีทางความร้อน เช่น กระบวนการทอริรีแฟกชัน ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มสมบัติของชีวมวลให้มีคุณภาพสูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะที่ไม่มีหรือจำกัดออกซิเจน ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการนี้จะอยู่ในรูปของแข็ง มีความเปราะและมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้ของชีวมวลหลังจากปรับสภาพแล้วนั้น มีค่าเพิ่มขึ้น [9-10] ผู้วิจัยมองเห็นปัญหาในการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เหลือน้อยในปัจจุบันและจะหมดไปในอนาคต และเห็นความสำคัญของชานอ้อยซึ่งเป็นแหล่งพืชพลังงานทดแทนที่สำคัญและมีศักยภาพชนิดหนึ่งของประเทศไทย แต่เนื่องด้วยชานอ้อยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ขุยอ้อยและ

เส้นใยอ้อย การนำมาใช้ร่วมกันเพื่อผลิตเชื้อเพลิงแข็ง อาจกระทบโดยตรงต่อสมบัติด้านเชื้อเพลิงของชานอ้อย เนื่องจากความแตกต่างทางโครงสร้างของชีวมวลทั้งสอง ส่วน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติด้านเชื้อเพลิงของชุยอ้อยและเส้นใยอ้อย อีกทั้งปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน

## 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาคือ ลำต้นอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกจากอ้อยแล้ว เป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรจากโรงงานน้ำตาลวังขนาย อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม โดยผ่านการร่อนแยกชุย ได้ลักษณะของวัสดุชีวมวลดังรูปที่ 1 แล้วอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนบรรจุเก็บในถุงกันความชื้น

### 2.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะอับอากาศ การทดลองปฏิบัติในระดับห้องปฏิบัติการมีขั้นตอนเริ่มจากการชั่งชีวมวลตัวอย่าง 20 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลซึ่งมี

ความละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้นเติมชีวมวลลงในปฏิกรณ์ทรงกระบอก (ซึ่งมีท่อเข้าของ แก๊ส ไนโตรเจนและท่อออกของแก๊สที่เกิดจากกระบวนการทอรรีแฟกชัน) แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ควบคุมอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนได้ โดยต่อท่อไนโตรเจนเข้ากับปฏิกรณ์ซึ่งควบคุมอัตราการไหล 1 ลิตรต่ออนาทีเพื่อแทนที่อากาศที่อยู่ภายใน กำหนดการทำงานของเตาเผาอุณหภูมิสูงเพื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อยู่ในปฏิกรณ์ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที [11] ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาคือ 250 องศาเซลเซียส เตาเผายังคงให้ความร้อนแบบอัตโนมัติเพื่อคงอุณหภูมิให้คงที่จนกระทั่งครบ 30 นาที [12] ปิดเตาเผาแล้วปล่อยให้ปฏิกรณ์เย็นตัวลงภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างบรรจุลงในถุงกันความชื้นเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไป ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองเป็น 300 องศาเซลเซียส

### 2.3 การวิเคราะห์สมบัติ

#### 2.3.1 องค์ประกอบของเส้นใย

วิเคราะห์องค์ประกอบเส้นใยที่สำคัญได้แก่



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) เส้นใยอ้อย และ (ข) ชุยอ้อย



เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกลาง (Neutral detergent fiber, NDF) เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (Acid detergent fiber, ADF) และ ลิกนิน (Acid detergent lignin, ADL) ตามวิธีการของ Georing และ Van Soest [13] , Van Soest และ คณะ [14] และ AOAC (2000) [15] ดังสมการ (1) และ (2)

$$\% \text{Hemicellulose} = \% \text{NDF} - \% \text{ADF} \quad (1)$$

$$\% \text{Cellulose} = \% \text{ADF} - \% \text{ADL} \quad (2)$$

### 2.3.2 องค์ประกอบแบบประมาณ

วิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) โดยใช้เทคนิค thermogravimetry ด้วยเครื่อง macro thermogravimetric analyzer รุ่น TGA 701 (LECO, USA) ตามมาตรฐาน ASTM D7582 จำนวนการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่างทดสอบโดยกำหนดสภาวะที่ใช้ทดสอบคือให้ความร้อน ตั้งแต่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นด้วยอัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาทีภายใต้สภาวะไนโตรเจน จนถึง 107 องศาเซลเซียสและคงที่ไว้ 15 นาที (การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง ในขั้นตอนนี้นำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น) จากนั้นให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 107 จนถึง 950 องศาเซลเซียส (การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างในขั้นตอนนี้นำไปวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย) ด้วยอัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ไว้ 7 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไนโตรเจน จึงให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 600 จนถึง 750 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ไว้ 15 นาทีภายใต้สภาวะออกซิเจนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส (การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างในขั้นตอนนี้นำไป วิเคราะห์ปริมาณเถ้า) ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวได้จากการคำนวณตามสมการ (3)

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{ความชื้น} + \% \text{ปริมาณสารระเหย} + \% \text{ปริมาณเถ้า}) \quad (3)$$

### 2.3.3 องค์ประกอบแบบละเอียดและค่าความร้อน

องค์ประกอบแบบละเอียดประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN Analyser ตามมาตรฐาน ASTM D 5373 จำนวนการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยการเผาสารตัวอย่างในบรรยากาศของออกซิเจน ซึ่งจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์และน้ำ โดยที่แก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะถูกรีดิวส์เป็น แก๊สไนโตรเจน จากนั้น ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำจะถูกคำนวณเป็นปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมีหัววัด Infrared cells เพื่อนำค่าไปคำนวณเป็นปริมาณไนโตรเจน ในขณะที่ปริมาณของออกซิเจน คำนวณได้จากสมการ (4)

$$\% \text{O} = 100 - (\% \text{C} + \% \text{H} + \% \text{S} + \% \text{N}) \quad (4)$$

ผลการวิเคราะห์แบบละเอียด สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าความร้อนสูงในหน่วยของกิโลจูลต่อกิโลกรัม จากสมการเอมพิริคัล (Empirical) ของ Fried และคณะ [16] ดังสมการ (5)

$$\text{HHV} = 3.55\text{C}^2 - 232\text{C} - 2230\text{H} + 51.2\text{C} * \text{H} + 131\text{N} + 20600 \quad (5)$$

### 2.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PSPP และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของชุดการทดลองจากชีวมวลดิบชนิดเดียวกันแต่ดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิ ทอร์รีแฟกชันที่ต่างกัน ด้วยวิธี Least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

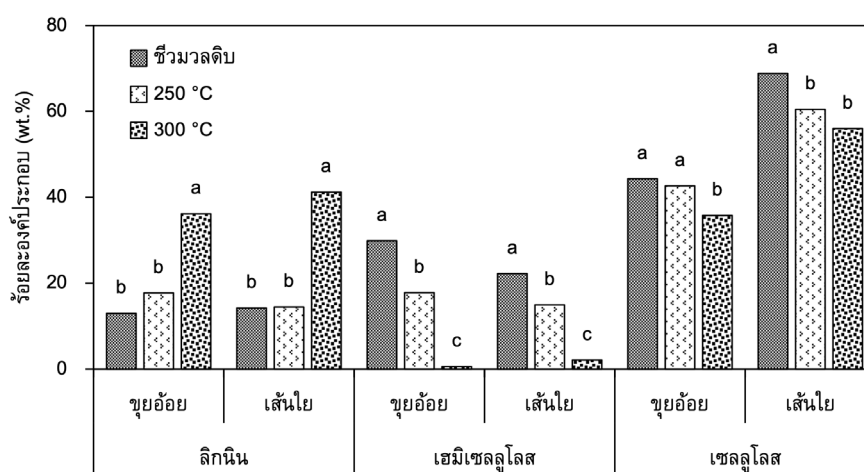
## 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

### 3.1 ผลการศึกษาขององค์ประกอบของเส้นใย

สารอินทรีย์ในชีวมวล ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิดคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซานอ์ยังมีส่วนประกอบเป็นซุ่ยอ์อ์และเส้นใยอ์อ์ ซึ่งล้วน

มีลักษณะความเป็นเส้นใยและความแข็งแรงที่ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารอินทรีย์ในชีวมวลดิบอีกทั้ง ศึกษาแนวโน้ม การสลายตัวของสารอินทรีย์เหล่านี้ จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเส้นใยตั้งในรูปที่ 2 ซึ่ง แสดงร้อยละ ปริมาณลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ในชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ ทางความร้อน พบว่าเส้นใยอ้อยมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินร้อยละ  $60.50 \pm 0.46$ ,  $22.25 \pm 0.65$  และ  $14.46 \pm 0.16$  ตามลำดับ ส่วนชุยอ้อย มีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินร้อยละ  $42.63 \pm 0.69$ ,  $29.88 \pm 0.12$  และ  $12.97 \pm 0.69$  ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณลิกนินของเส้นใยที่สูงกว่าชุยอ้อยยัง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sanjuán และคณะ [17] ที่ ศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยและ ชุยจากชานอ้อยเม็กซิกันพบว่าเส้นใยอ้อยและชุยอ้อยมี ลิกนินเป็นองค์ประกอบในปริมาณ ร้อยละ 17.7 และ 16.1 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า หลังการ ปรับสภาพทางความร้อนด้วยเทคโนโลยีเทอร์รีแพกชัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ ประกอบอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งชุยอ้อยและเส้นใย โดยเฉพาะ

อย่างยิ่งปริมาณเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลทั้งสองชนิดลดลง เป็นอย่างมากเนื่องจากเฮมิเซลลูโลส จะเกิดการสลาย ตัว ที่อุณหภูมิต่ำคือ ในช่วง 220-315 องศาเซลเซียส คิดเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในชุยอ้อยและเส้นใย อ้อยถึงร้อยละ 40.5 และ 33.2 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และสลายตัวมากขึ้นเป็นร้อยละ 97.9 และ 57.3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การปรับสภาพ ส่งผลต่อ เซลลูโลสเช่นกันแต่มีความรุนแรงของปฏิกิริยาน้อยกว่า เนื่องจากเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวที่ อุณหภูมิสูงคือใน ช่วง 315-400 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีเซลลูโลสเพียง บางส่วนที่เกิดการสลายตัว ส่งผลให้ปริมาณเซลลูโลสใน ชีวมวลทั้งสองชนิดมีค่าลดลงไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณา ปริมาณลิกนิน พบว่ามีสัดส่วนที่สูงขึ้นเนื่องจากการสลาย ตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส อีกทั้งลิกนินมีช่วงการ สลายตัว ที่กว้างคือ 160-900 องศาเซลเซียส [18] จึงมี เพียงบางส่วนที่เกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการ เมื่อเทียบสัดส่วนการสลายตัวของลิกนินกับองค์ประกอบ อื่น ๆ จึงส่งผลให้สัดส่วนของลิกนินภายหลังการปรับ สภาพมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2 ปริมาณลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสในชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ หมายเหตุ ตัวอักษร (a, b, c) ที่แตกต่างกันแสดงถึงชุดข้อมูลที่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

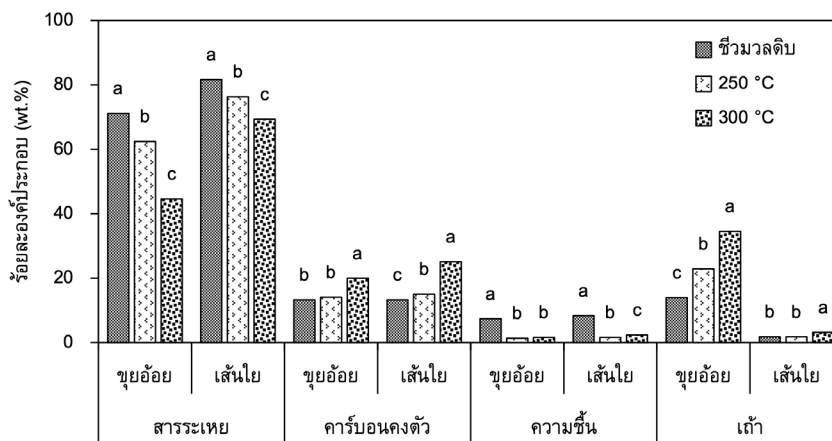
### 3.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ

เนื่องจากการปรับสภาพทางความร้อนของชีวมวลชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยในงานวิจัย มีเป้าประสงค์หลักเพื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณเพื่อศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะที่กำหนดตามกระบวนการวิเคราะห์ อันได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัวและเถ้า ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าหลังการปรับสภาพทางความร้อนด้วยเทคโนโลยีเทอร์รีแฟกชัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้น และสารระเหยอย่างมีนัยสำคัญทั้งชุยอ้อยและเส้นใย ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวและเถ้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ความชื้นของชีวมวลชุยอ้อยและเส้นใยอ้อย มีค่าใกล้เคียงกันคือมีค่าร้อยละ 7.4 และ 8.4 ตามลำดับ ภายหลังจากการปรับสภาพพบว่า ปริมาณความชื้น มีค่าลดลง

เถ้าคือส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในชีวมวลที่ถูกออกซิไดซ์สมบูรณ์ [19] จากผลการวิเคราะห์พบว่า เส้นใยมีปริมาณเถ้าเพียงร้อยละ 1.8 ส่วนชุยอ้อยมีปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 13.9 ปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้ชุยอ้อยมีปริมาณเถ้าสูงกว่าเส้นใยอ้อยเนื่องจากชุยอ้อยเป็น

เนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำ และแร่ธาตุต่าง ๆ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ [20] และเนื่องจากเถ้าเป็นสารอนินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังนั้นหากเถ้ามีปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เมื่อนำไปใช้ในการผลิตพลังงานความร้อน

คาร์บอนคงตัวและสารระเหยเป็นองค์ประกอบในชีวมวลที่เผาไหม้ได้ จากผลการวิเคราะห์ที่ชีวมวลดิบและชีวมวลภายหลังจากการปรับสภาพพบว่า ชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีองค์ประกอบซึ่งเป็นคาร์บอน คงตัวใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 13.27 และ 13.31 ตามลำดับ ส่วนสารระเหย มีสัดส่วนร้อยละ 65.9 และ 81.7 ตามลำดับ ภายหลังจากการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าสูงขึ้นส่วนสารระเหยมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการปรับสภาพมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวลไปในรูปของสารระเหยได้มากขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จึงส่งผลกระทบต่อปริมาณสารระเหยที่ลดลงมากที่สุด ข้อได้เปรียบของเส้นใยอ้อยคือมีปริมาณสารระเหยมากกว่าชุยอ้อย ดังนั้นเมื่อนำเส้นใยอ้อยไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อการเผาไหม้จะเกิดการลุกติดไฟได้ง่ายกว่า [21]



รูปที่ 3 ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยความชื้นและเถ้าในชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ หมายเหตุ ตัวอักษร (a, b, c) ที่แตกต่างกันแสดงถึงชุดข้อมูลที่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

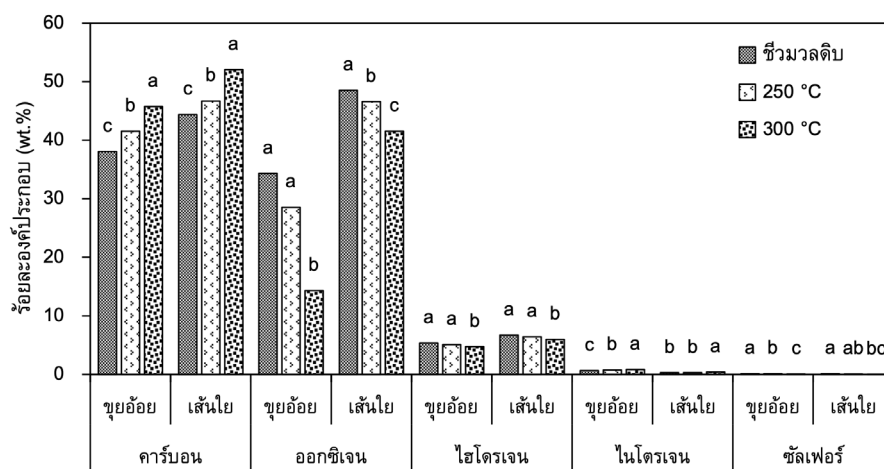
### 3.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบละเอียดและค่าความร้อน

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติขององค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ในขุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อยพบว่าหลังการปรับสภาพทางความร้อนด้วยเทคโนโลยีเทอร์รีแฟกชัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบอย่างมีนัยสำคัญทั้งขุ่ยอ้อยและเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเส้นใยอ้อยและขุ่ยอ้อยก่อนปรับสภาพมีองค์ประกอบธาตุคาร์บอนร้อยละ 38.1 และ 44.4 ตามลำดับ และปริมาณไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.4 ถึง 6.7 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ David และคณะ [22] ที่ทำการปรับสภาพขานอ้อยด้วยกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน ซึ่งพบว่าขานอ้อยก่อนปรับสภาพมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 42.5 และไฮโดรเจนร้อยละ 5.4 จะสังเกตเห็นว่า ขานอ้อยมีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่างขุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อย โดยภายหลังการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เส้นใยอ้อยมีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 52.1 ในขณะที่ขุ่ยอ้อยมีค่าเพียงร้อยละ 45.8 ซึ่งการมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากส่งผลต่อค่าความร้อนเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการ

เผาไหม้เนื่องจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเมื่อเกิดการสันดาปกับแก๊สออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นค่าความร้อนจึงมีค่าสูงขึ้น

ออกซิเจนที่พบในชีวมวลอยู่ในรูปของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยทั่วไปพบในรูปของน้ำ ซิลิเกต คาร์บอเนตและกลุ่มของสารคาร์บอนิล (Carbonyl) ผลการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนในขุ่ยอ้อย และเส้นใยอ้อย ดังรูปที่ 4 พบว่าเส้นใยอ้อยมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าขุ่ยอ้อยทั้งก่อนและหลังปรับสภาพ ซึ่งนับได้ว่าเป็นข้อได้เปรียบของเส้นใยอ้อยเนื่องจากการมีปริมาณออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณน้อยส่งผลต่อค่าความร้อนของชีวมวลที่สูงขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของพันธะออกซิเจนในผลิตภัณฑ์จะใช้พลังงานความร้อน (Endothermic reaction) เพื่อทำให้เกิดการแตกตัว (Decomposition) ดังนั้นในขณะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียไปกับการใช้เพื่อสลายตัวของออกซิเจน [23]

ไฮโดรเจนในชีวมวลพบอยู่ในรูปของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เป็นส่วนหนึ่งของความชื้น เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ ไฮโดรเจนจะเกิดเป็นไอน้ำ ปริมาณไฮโดรเจนในขุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีสัดส่วน



รูปที่ 4 ปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถันและไนโตรเจนในขุ่ยอ้อยและเส้นใย อ้อยทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ หมายเหตุ ตัวอักษร (a, b, c) ที่แตกต่างกันแสดงถึงชุดข้อมูลที่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05)



น้อยมากเมื่อเทียบกับคาร์บอนและออกซิเจนอีกทั้งมีการแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อผ่านการปรับสภาพทางความร้อน การลดลงของไฮโดรเจนเกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่ -COOH ออกจาก ลิกนินทำให้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง การลดลงของร้อยละองค์ประกอบของไฮโดรเจนและออกซิเจนในชีวมวลภายหลังปรับสภาพส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ขององค์ประกอบในชีวมวลที่ระเหยได้ในระหว่างการทำปฏิกิริยา [24]

เมื่อพันธะในไฮโดรคาร์บอนแตกตัว ไฮโดรเจนจะรวมกับออกซิเจนก่อตัวเป็นไอน้ำ จากนั้นคาร์บอนจะรวมตัวกับออกซิเจนที่เหลือซึ่งจะก่อตัวเป็นคาร์บอนแข็ง หรือ กลายเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นแก๊สพิษที่ไม่มีสีและกลิ่น สามารถเข้าไปเกาะแน่นกับฮีโมโกลบินในเลือดแทนที่ออกซิเจน หากสูดดมเข้าสู่ร่างกายจำนวนมากเป็นอันตรายแก่ชีวิตเนื่องจากขาดออกซิเจนในการหายใจ มลพิษนี้สามารถลดลงได้ด้วยการปรับสภาพทางความร้อนด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน เนื่องจากเมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดออกซิเจนในชุยอ้อย และเส้นใยอ้อย มีค่าสูงขึ้นเป็นร้อยละ 12.73 และ 14.36 ตามลำดับเมื่อเทียบกับก่อนปรับสภาพ บ่งชี้ได้ว่าออกซิเจนจำนวนมากในชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยเกิดการสลายตัวไปในรูปของแก๊สไอเสีย (Fuel gas) ซึ่ง เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของกำมะถันและไนโตรเจน กับคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ดังรูปที่ 4 พบว่าเป็นองค์ประกอบที่มีน้อยในชีวมวลชุยอ้อยและเส้นใยอ้อย แต่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นสาเหตุ ที่ก่อให้เกิดสารพิษขณะเผาไหม้เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และกำมะถันที่เผาไหม้ในออกซิเจนจะได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นผลิตภัณฑ์หลักและเป็นสาเหตุของฝนกรด อีกทั้งการเผาไหม้ไนโตรเจนเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) การปรับสภาพด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันส่งผลให้ปริมาณ

กำมะถันในชีวมวลชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีปริมาณลดลงจากร้อยละ 0.13 เป็น 0.08 และ 0.10 เป็น 0.01 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดกำมะถันทั้งในเส้นใยอ้อยและชุยอ้อย แต่ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนให้หมดไปได้เนื่องจากไนโตรเจนที่พบในชีวมวลอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรภาพสูงจึงแยกหรือสลายตัวได้น้อยเมื่อทำการปรับสภาพด้วยความร้อน แม้ว่าจะคงพบสัดส่วนของกำมะถันและไนโตรเจนในชีวมวลภายหลังการปรับสภาพ แต่องค์ประกอบเหล่านี้ยังคงมีค่าต่ำกว่าถ่านหินอยู่มากเมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการเผาไหม้จึงส่งผลต่อการเกิดมลพิษ NO<sub>x</sub> และ SO<sub>2</sub> ในไอเสียต่ำกว่าการใช้ถ่านหิน [25]

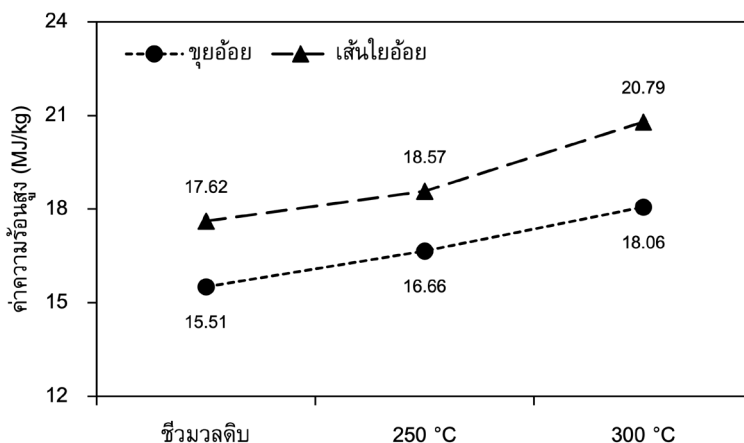
ผลการคำนวณค่าความร้อนสูงของชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยทั้งก่อนและหลังปรับสภาพทางความร้อนแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าค่าความร้อนสูงของชุยอ้อยและเส้นใยอ้อย มีค่าเป็น 15.51 และ 17.62 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อทำการทอรรีไฟต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงมีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 16.67 และ 18.57 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 18.06 และ 20.79 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผลการศึกษาของ Wenfei Cai และคณะ [26] ที่พบชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับแกลบคือ 18.68 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าชีวมวลประเภทขี้เลื่อยที่มีค่าความร้อนเป็น 22.38 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อผ่านการปรับสภาพในช่วงอุณหภูมิ 280-300 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน

### 3.4 ผลการศึกษาแผนภาพเทอร์นารี

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดด้วยแผนภาพเทอร์นารีของธาตุคาร์บอน-ไฮโดรเจน-ออกซิเจน ช่วยศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุของชีวมวลทั้งก่อนและภายหลังการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียสได้ชัดเจนมากขึ้น ดังรูปที่ 6 พบว่าแนวโน้มของทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างขนาน

ไปกับแกนคาร์บอนและเข้าใกล้ถ่านหินมากขึ้น บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนในขณะที่ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนมีค่าลดลง [27] ชูยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 38.1 และ 44.4 ตามลำดับ ภายหลังจากปรับปรุงสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ

250 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 9.18 และ 5.23 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความรุนแรงของการปรับปรุงสภาพเป็น 300 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณคาร์บอนมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนคิดเป็นร้อยละ 20.23 และ 17.32 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ค่าความร้อนสูงของชูยอ้อยและเส้นใยอ้อยทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพ

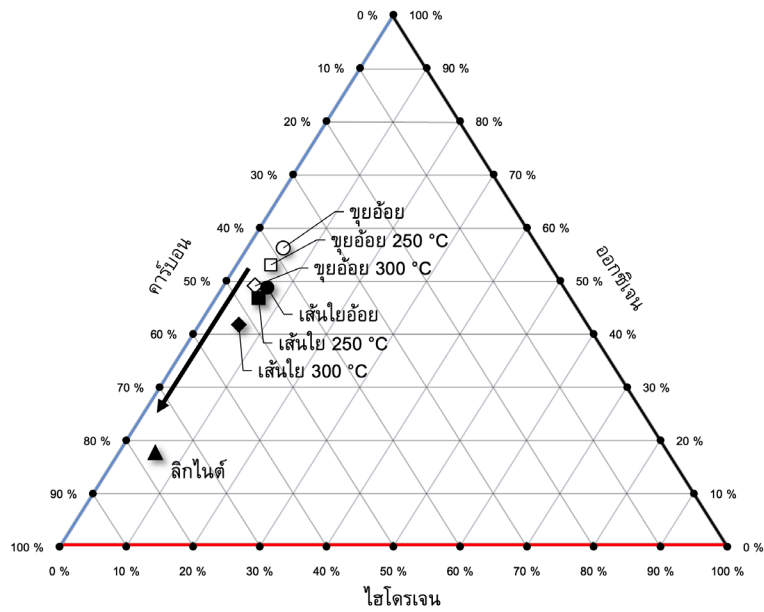
### 3.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอะตอม

การวิเคราะห์แบบละเอียดของชีวมวลชูยอ้อยและเส้นใยอ้อยด้วยแผนภาพ Van Krevelen สื่อได้ถึง การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนอะตอมหลัก ได้ชัดเจนมากขึ้นดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงอัตราส่วนอะตอมของ H/C และ O/C ของชูยอ้อยและเส้นใยอ้อยทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพด้วยกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่าชูยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีสัดส่วนอะตอม H/C ลดลง จาก 1.69 เป็น 1.24 และจาก 1.68 เป็น 1.23 ตามลำดับ และมีสัดส่วนอะตอม O/C ของชูยอ้อยและเส้นใยอ้อยลดลงจาก 1.10 เป็น 0.80 และจาก 0.70 เป็น 0.20 ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนอะตอมทั้งสองมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ภายหลังจากปรับปรุงสภาพมีศักยภาพในการเป็นถ่านหินลิกไนต์ได้มากขึ้น การลดลงของ H และ O ในกระบวนการเทอร์รีแฟกชันส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ร่วมกับปฏิกิริยาดีออกซิเจนชัน (Deoxygenation) [28] ซึ่ง

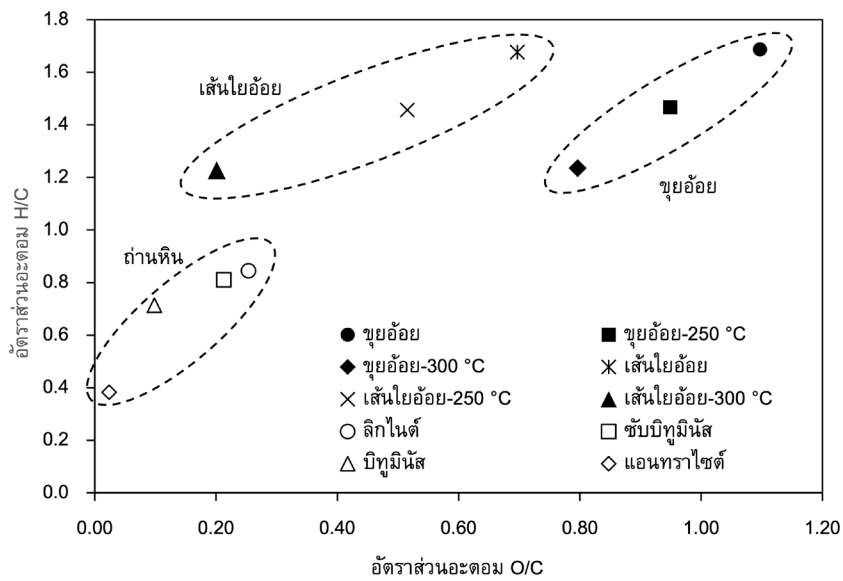
ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน เป็นปฏิกิริยาขจัดน้ำและน้ำอิสระในโครงสร้างชีวมวล และปฏิกิริยาดีออกซิเจนชันช่วยกำจัดอะตอมของออกซิเจนหรือโมเลกุลออกจากชีวมวลในรูปของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เป็นไอน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลต่อการลดลงของควีน [29] และไอน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้

### 3.6 แนวทางการแยกส่วนประกอบของชานอ้อย เพื่อใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน

จากผลการวิจัยนี้พบว่า เส้นใยอ้อยมีสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดีกว่าชูยอ้อย ดังนั้น การแยกชูยอ้อยออกจากชานอ้อยจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญ ด้านอุตสาหกรรมพบวิธีการแยกชูยอ้อยได้ 3 แนวทาง [30] คือ การแยกแบบแห้ง (Dry process) เป็นวิธีการแยกชูยอ้อยหลังจากอบชานอ้อยแล้ว การแยกแบบเปียก (Wet process) เป็นวิธีการแยกชูยอ้อยจากชานอ้อยที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยเจือจาง และวิธีการแยกแบบชื้น (Moist process) เป็นวิธีการแยกขณะที่ยังคงมี



รูปที่ 6 แผนภาพเทอร์นารีของธาตุคาร์บอน-ไฮโดรเจน-ออกซิเจน ในขุยมั้ยและเส้นใยอ้อย ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ



รูปที่ 7 แผนภาพ Van Krevelen ของขุยมั้ยและเส้นใยอ้อยทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ

ความชื้น วิธีนี้จึงนิยมใช้ในโรงงานน้ำตาลที่ภายหลังการหีบอ้อย ชานอ้อยยังคงมีความชื้นสูงโดยมีค่าประมาณร้อยละ 49 ซึ่งเป็นข้อดีในการแยกชุยอ้อยเนื่องจากในสภาวะที่มีความชื้นสูง ชุยอ้อยจะขยายตัวทำให้ผนังเซลล์บางจึงสามารถตีแยกชุยออกได้ง่าย ส่วนกลไกที่นำมาช่วยในการแยกชุยอ้อย ประกอบด้วย 2 แนวทาง คือ การแยกชุยอ้อยเชิงกลและเชิงเคมี ซึ่งกลไกเชิงเคมีนั้น ต้องอาศัยการเติมสารเคมี เช่น กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxides) ทำให้เกิดเป็นต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น เนื่องจากชุยอ้อยจะดูดซึ่มสารเคมีในปริมาณมากทำให้เกิดความสิ้นเปลือง ดังนั้นกลไกเชิงกลจึงเป็นที่นิยมในโรงงานน้ำตาล โดยกลไกการแยกเชิงกลเริ่มต้นจากกระบวนการทุบชานอ้อย (Hammer mill) แล้วนำเข้าสู่เครื่องแยกชุยแบบปั่นเหวี่ยง (Centrifugal Separator) [31] หรือเครื่องแยกชุยแบบตะแกรงสั่น (Vibrating Screen)

#### 4. สรุป

การประเมินคุณลักษณะทางเคมีความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งจากชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยที่ได้จากกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าได้ผลิตถ่านแข็งที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงชัน ความชื้นลดลงนำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน ภายหลังจากปรับปรุงสภาพส่งผลให้ชุยอ้อยมีร้อยละปริมาณเถ้ามากกว่าเส้นใยอ้อย ถึงร้อยละ 71.1 การที่ปริมาณเถ้าในเส้นใยอ้อยมีค่าน้อยบ่งบอกถึงแนวโน้มการก่อตัวของเถ้าที่ต่ำและอาจช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาในระบบเผาไหม้เมื่อใช้เส้นใยอ้อยเป็นเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณธาตุคาร์บอนมีค่าสูงชันในขณะที่ออกซิเจนมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญส่งผลให้อัตราส่วนอะตอมคาร์บอนต่อออกซิเจนและคาร์บอนต่อไฮโดรเจนมีค่าลดลงและเข้าใกล้สมบัติของถ่านหิน เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์แข็งที่ได้จากชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยพบว่า เส้นใยอ้อยมีค่าความร้อนสูงกว่าชุยอ้อย อีกทั้งยังมีปริมาณเถ้าต่ำกว่าส่งผลให้เส้นใยอ้อยมีสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดีกว่าชุยอ้อย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่การทำวิจัยในครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

1. Alternative Energy Development Plan: AEDP2015, 2015, Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency [Online], Available: <http://www.eppo.go.th>. [17 January 2020] (In Thai)
2. Fast Growing Trees for Energy Production in Power, 2020, Thailand Science Research and Innovation [Online], Available: <https://research-cafe.org/biomass-plant>. [17 January 2020] (In Thai)
3. Electricity and Steam Generation of the Cane and Sugar Industry, 2018, Office of the Cane and Sugar Board [Online], Available: <http://www.ocsb.go.th>. [17 January 2020] (In Thai)
4. Power Generation (Independent Power Producer), 2020, Electricity Generating Authority of Thailand [Online], Available: <https://www.egat.co.th>. [17 January 2020] (In Thai)
5. Demirbaş, A., 2001, "Relationships between Lignin Contents and Heating Values of Biomass," *Energy Conversion and Management*, 42 (2), pp. 183-188.
6. Bin-Hai, C., Bao-Cheng, H., Rui, Z., Ya-Li, C., Shun-Feng, J., Yan, L., Xue-Song, Z., Hong, J. and Han-Qing, Y., 2020, "Bio-coal: A Renewable and Massively Producing Fuel from Lignocellulosic Biomass," *Science Advances*, 6, pp. 1-8.
7. Clementine, L.C., Thandeka, Y.M., Prashant, R., Agnieszka, B., Nirmala, D., Paul, S.F. and Jason, P.H., 2018, "Pretreatment of South African

Sugarcane Bagasse using a Low-Cost Protic Ionic Liquid: A Comparison of Whole, Depithed, Fibrous and Pith Bagasse Fractions," *Biotechnol Biofuels*, 11, p. 247.

8. Lois-Correa, J.A., 2012, "Depithers for Efficient Preparation of Sugar Cane Bagasse Fibers in Pulp and Paper Industry," *Ingeniería e Investigación y Tecnología*, 13, pp. 417-424.

9. Nhuchhen, D., Basu, P. and Acharya, B., 2014, "A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction," *International Journal of Engineering and Bioscience*, pp. 1-56.

10. Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, J., Wright, C. and Boardman, R., 2011, "A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties for Energy Applications," *Industrial Biotechnology*, 7, pp. 384-401.

11. Granados, D.A., Velásquez, H.I. and Chejne, F., 2014, "Energetic and Exergetic Evaluation of Residual Biomass in a Torrefaction Process," *Energy*, 74, pp. 181-189.

12. Xiaopeng, B., Guanghui, W., Chunxiao, G., Yong, Y., Weinan, L. and Decheng, W., 2017, "Co-pelletizing Characteristics of Torrefied Wheat Straw with Peanut Shell," *Bioresource Technology*, 233, pp. 373-381.

13. Goering, H.K. and Van Soest, P.J., 1970, Forage Fiber Analysis: Apparatus, Reagents, Procedures and some Applications, Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 20 p.

14. Van Soest, P.J., Robertson, J.B. and Lewis, B.A., 1991, "Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition," *Journal of Dairy Science*, 74, pp. 3583-3597.

15. The Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2000, Official Methods of Analysis, 17 th ed., Gaithersburg, MD.

16. Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H. and Varmuza, K., 2005, "Prediction of Heating Values of Biomass Fuel from Elemental Composition," *Analytica Chimica Acta*, 544, pp. 191-198.

17. Sanjuán, R., Anzaldo, J., Vargas, J., Turrado and Patt, R., 2001, "Morphological and Chemical Composition of Pith and Fibers from Mexican Sugarcane Bagasse," *European Journal of Wood and Wood Products*, 59, pp. 447-450.

18. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. and Zheng, C., 2007, "Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis," *Fuel*, 86, pp. 1781-1788.

19. Legemza, J., Fröhlichová, M. and Findorák, R., 2019, Biomass and Carbon Fuels in Metallurgy, CRC Press, Boca Raton.

20. Anukam, A., Mamphweli, S., Okoh, O. and Reddy, P., 2017, "Influence of Torrefaction on the Conversion Efficiency of the Gasification Process of Sugarcane Bagasse," *Bioengineering*, 4, p. 22.

21. Wu, K.T., Tsai, C.J., Chen, C.S. and Chen, H.W., 2012, "The Characteristics of Torrefied Microalgae," *Applied Energy*, 100, pp. 52-57.

22. Granados, D.A., 2017, Study of the Torrefaction of Sugarcane Bagasse and Poplar Wood, Doctoral of Engineering Thesis, National University of Colombia, Colombia.

23. Garba, M.U., Gambo, S.U., Musa, U., Tauheed, K., Alhassan, M. and Adeniyi, O.D., 2012, "Impact of Torrefaction on Fuel Property of Tropical Biomass Feedstocks," *Biofuels*, pp. 1-9.



24. Muhammad, S., Anam, A., Naveed, R., Umair, A. and Mustapha, M.B., 2020, "Impacts of Non-Oxidative Torrefaction Conditions on the Fuel Properties of Indigenous Biomass (Bagasse)," *Waste Management and Research*, 38, pp. 1284-1294.
25. Rokni, E., Ren, X., Panahi, A. and Levendis, Y.A., 2017, "Emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and HCl from Co-firing of Coals with Raw and Torrefied Biomass Fuels," *Fuel*, 211, pp. 363-374.
26. Cai, W., Fivga, A., Kaario, O. and Liu, R., 2017, "Effects of Torrefaction on the Physicochemical Characteristics of Sawdust and Rice Husk and Their Pyrolysis Behavior by Thermogravimetric Analysis and Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry," *Energy Fuels*, 31, pp. 1544-1554.
27. Basu, P., 2018, Biomass Characteristics. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Academic press, United Kingdom, p. 66.
28. Kamonwat, N., Jiaranai, P., Wasawat, K., Pongtanawat, K. and Bunyarit, P., 2019, "Torrefaction of Agricultural Wastes: Influence of Lignocellulosic Types and Treatment Temperature on Fuel Properties of Biochar," *International Energy Journal*, 19, pp. 253-266.
29. Prachwittawin, L., Krongkaew, L. and Somrat, K., 2017, "In-depth Study of Fuel Properties of Corn Residue (Cob, Stems/Leaves, and Husks) through the Torrefaction Process," *Energy Procedia*, 138, pp. 662-667.
30. Chambon, C.L., Mkhize, T.Y., Reddy, P., Talbot, A.B., Deenadayalu, N., Fennell, P.S. and Hallett, J.P., 2018, "Pretreatment of South African Sugarcane Bagasse using a Low-cost Protic Ionic Liquid: A Comparison of Whole, Depithed, Fibrous and Pith Bagasse Fractions," *Biotechnology for Biofuels*, 11 (247), pp. 1-16.
31. Prachi, S., Sayali, T., Priyanka, S. and Siddhi, S., 2018, "Design and Analysis of a Centrifugal Separator for the Separation of Pith from Bagasse," *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 5 (3), pp. 165-170.