# ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

# Study on combustion behaviors of rubber wood and torrefied bamboo by Thermogravimetric analysis

คีต์ สร้อยทอง , ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู, รังสินันท์ ณ รังษี, จารุวัตร เจริญสุข*

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
*ติดต่อ: jaruwat_ch@kmitl.ac.th, เบอร์โทรศัพท์086-0803407, เบอร์โทรสาร 02 329 8352

***บทคัดย่อ***

บทความนี้เกี่ยวข้องกับผลการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ผสมระหว่างไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเพื่อหาอุณหภูมิติดไฟ อุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้สูงที่สุด(อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด) รวมถึงอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ของทั้งเชื้อเพลิงเดี่ยว และเชื้อเพลิงผสม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จาก TGA พบว่าอุณหภูมิติดไฟของไม้ยางพารา และไม้ไผ่ทอรีไฟด์คือ 262.4 และ 270.6 องศาเซลเซียสตามลำดับ ต่อมาจึงผสมเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์กับไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 90:10 80:20 และ70:30 โดยมีอุณหภูมิติดไฟ 267.2 265.2 และ263.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ การทดสอบนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับลักษณะการเผาไหม้ของหัวเผาที่ใช้เชื้อเพลิงผง ต่อไป

***คำหลัก:*** เชื้อเพลิงชีวมวล, เชื้อเพลิงผสม, เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

***Abstract***

This paper concerns with a study on combustion behaviors of rubber wood, torrefied bamboo, and their blends, by the use of Thermogravimetric analysis (TGA). The propose is to determine the ignition temperature, peak temperature, and burnout temperature of the single fuel and blend fuel. It was found that the ignition temperature of rubber wood and torrefied bamboo were 262.4 and 270.6 degree Celsius respectively. Then the blend fuel of the torrefied bamboo with the rubber wood with the ratio of 90:10, 80:20 and 70:30 provided the ignition temperature of 267.2, 265.2 and 263.5 degree Celsius respectively. The obtained result was useful to improve burner operation with varying ratio of fuel blends.

***Keywords:*** Single fuel, Blends fuel, thermogravimetric analysis

**รายการสัญลักษณ์**

$T_i$ คืออุณหภูมิจุดติด (Ignition Temperature) $t_i$ คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มจนถึงจุดติด

$T_b$ คืออุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ (Burnout Temperature) $t_b$ คือระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการเผาไหม้

$T_m$ คืออุณหภูมิที่มีการเผาไหม้สูงสุด (อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด)

$t_m$ คือระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดที่การเผาไหม้สูงสุด $D$ คือดัชนีของการจุดติด

$R_m$ คืออัตราเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุด

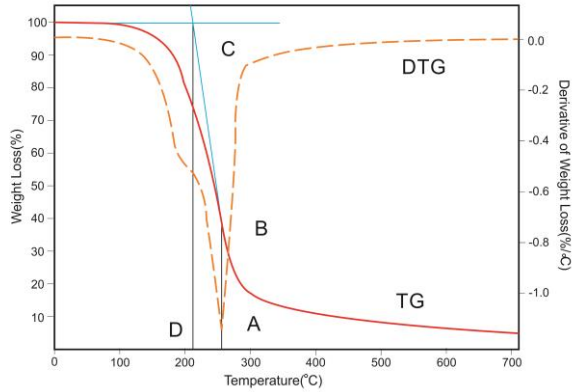
## 1. บทนำ

พลังงานจากสารชีวมวล เป็นพลังงานทดแทนที่กำลังได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากในตอนนี้ เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังตระหนักถึงสภาวะโลกร้อนและปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหันมาสนใจพลังงานหมุนเวียนกันมากขึ้น ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นตัวเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมอาธิเช่น ฟางข้าว แกลบ ขี้เลื่อย และเปลือกไม้ชนิดต่าง ๆ แต่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการอัดแท่งเพื่อให้มีขนาดรูปร่างสม่ำเสมอและความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลผสมด้วยการวิเคราะห์การเผาไหม้ด้วยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเชื้อเพลิง

Li Xiang-guo และคณะ[1] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ร่วมของเชื้อเพลิงผสม ระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีเถ้าสูงกับยางเสีย โดยเขาทำการทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ที่สามารถดูน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่หายไป(TG) หรืออัตราการหายไปของน้ำหนักตัวอย่าง(DTG) เทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ภายใต้เงื่อนไขของอัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลและอุณหภูมิ โดยเขาหาได้ว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมของเชื้อเพลิงถ่านหิน มีจุดติดไฟที่อุณหภูมิสูงกว่ายางเสีย ดังนั้นเขาจึงใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเป็นหลักแล้วผสมยางเสียเขาไปตามอัตราส่วน 10 30 50 ตามลำดับ ซึ่งผลที่เขาได้พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการติดไฟต่ำลงและใช้เวลาในการเผาไหม้ลดลงอีกด้วย ต่อมา D. Vamvuka ,N. El Chatib และ S. Sfakiotakis[2] ได้สังเกตจุดติดไฟและพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมกับลิกไนต์ โดยมีการหาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกัน และยังอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดรวมถึงเชื้อเพลิงผสมด้วยกราฟ TG และDTG เทียบอยู่กับอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์TGA โดยจากการทดลองของเขาสรุปได้ว่าอุณหภูมิของการติดไฟและการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นหากอนุภาคของเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงมากขึ้น อีกทั้งยังสรุปว่าเชื้อเพลิงลิกไนต์เมื่อผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ จะสามารถเร่งกระบวนการทางเคมีความร้อนโดยพิสูจน์จากดัชนีการจุดติด จุดที่น้ำหนักลดลงมากที่สุด(จุดที่มีการเผาไหม้มากที่สุด) และเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้ในการเผาไหม้

โดยจะสามารถหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้จากการใช้จุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสารมากที่สุดจากกราฟ(DTG จุดA) แล้วจึงลากตามแนวแกนตั้งไปตัดกับกราฟTG (จุดB) จากนั้นลากตามความชันของกราฟTGเพื่อหาจุดตัดกับเส้นแกนนอนของจุดที่มีการเริ่มปลดปล่อยสารระเหย(จุดC) แล้วจึงลากเส้นตามแนวแกนตั้งอีกครั้งเพื่อดูจุดตัดแกนนอน(จุดD) ทำให้สามารถหา

อุณหภูมิของการติดไฟได้จากกราฟTGและDTGจากการวิเคราะห์ TGA ดังแสดงในรูปที่1




รูปที่ 1 การหาอุณหภูมิติดไฟจากการกราฟวิเคราะการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร(TGA) [2]

เมื่อทราบอุณหภูมิของการติดไฟ ได้มีการเปรียบเทียบการจุดติดไฟในเชิงตัวเลขด้วยดัชนีของการติดไฟซึ่งหาได้จาก อัตราการเผาไหม้ที่มากที่สุด เทียบกับเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนถึงจุดติดไฟและเวลาที่ใช้จนถึงจุดที่มีการเผาไหม้มากที่สุด

Marisamy Muthuraman [3] ศึกษาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ถ่านจากประเทศอินโดนีเซียและถ่านที่มีสัดส่วนเถ้าสูงจากประเทศอินเดียผสมกับขยะมูลฝอยด้วยการวิเคราะห์TGA พบว่าการบำบัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อนทำให้ขยะมูลฝอยเป็นผงเหมือนเชื้อเพลิงแข็งทั่วไป ซึ่งทำให้ง่ายต่อการผสมและเผาไหม้กับถ่าน โดยอุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงถ่านผสมขยะมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่สารระเหยปล่อยออกมา ซึ่งเขาได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิติดไฟ พบว่าขยะมูลฝอยมีการปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิต่ำทำให้อุณหภูมิติดไฟมีค่าต่ำกว่าถ่านจากประเทศอินโดนีเซียและประเทศอินเดีย ซึ่งทำให้เขาสรุปได้ว่าอุณหภูมิติดไฟนั้นจะแปรผันตามอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหย เนื่องจากปริมาณออกซิเจนของขยะมูลฝอยมีมากกว่าถ่านหินที่เป็นส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นเร็วขึ้น เป็นการสนับสนุนการให้ถ่านหินมีอุณหภูมิติดไฟต่ำลงเมื่อนำเชื่อเพลิงขยะมูลฝอยมาเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงถ่าน ดังนั้นการผสมขยะมูลฝอยกับถ่านหินอาจช่วยลดระยะเวลาและปริมาณเชื้อเพลิงในการอุ่นเตาของโรงงาน

Zhijia Liu และคณะ[4]ค้นคว้าพฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ไผ่ ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ถ่าน และการผสมของเชื้อเพลิงข้างต้นด้วยการวิเคราะห์TGA รวมถึงหาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของเครื่องวิเคราะห์TGA พบว่าอัตราการไหลของอากาศเป็นตัวเพิ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้และสนันสนุนการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังกล่าวว่ากระบวนการทอรีแฟคชั่นทำให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์มีสารระเหยน้อยลงแต่มีค่าความร้อน สัดส่วนของเถ้า และสัดส่วนคาร์บอนที่สูงขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิการติดไฟและการเผาไหม้ขยับสูงขึ้น ซึ่งทำให้พฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของถ่าน ดังนั้นพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านและไม้ไผ่ทอรีไฟด์จึงแสดงที่พฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในภาคอุตสาหกรรมสามารถใช้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ผสมกับถ่านเป็นเชื้อเพลิงได้ โดยไม่ต้องมีการปรับปรุงห้องเผาไหม้เพิ่ม [5]ต่อมาคณะของเขาได้ทำการค้นหาลักษณะเฉพาะของการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอรีไฟด์และไม้สนทอรีไฟด์ ซึ่งเขาพบว่าหลังจากเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (การปลดปล่อยสารระเหย) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความร้อนสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์เถ้าสูงขึ้นและอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนส่วนด้วยออกซิเจนสูงขึ้นอีกด้วย รวมถึงเปอร์เซนความชื้นที่น้อยลงของเชื้อเพลิงทอรีไฟด์ทำให้กระบวนการเผาไหม้เกิดได้ดีมากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ยางพารา ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และการผสมเชื้อเพลิงข้างต้น เพื่อดูลักษณะเฉพาะของกระบวนการเผาไหม้และการสนับสนุนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมด้วยเครื่อง

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเชื้อเพลิง(TGA) ซึ่งจะมีการปรับใช้เชื้อเพลิงผสมที่ได้ทำการสังเกตพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้กับหัวเผาเชื้อเพลิงแบบฝุ่น(Pulverized combustion)ต่อไปในอนาคต

## 2. อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์และวิธีการเตรียมเชื้อเพลิง

บทนี้จะอธิบายถึงอุปกรณ์และวิธีการเตรียมเชื้อเพลิง รวมถึงการผสมเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ที่อัตราตราส่วน 10:90 20:80 30:70 ตามลำดับ อีกทั้งยังบอกถึงองค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้

รูปที่ 2 เชื้อเพลิงไม้ยางพาราผง

รูปที่ 3 เชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ผง

ตารางที่ 1 เป็นการพิสูจจากที่อ้างอิงได้กล่าวไว้ว่าเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นและสารระเหยต่ำ เปอร์เซ็นต์เถ้าสูงและอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่อออกซิเจนสูงขึ้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงผง

| ชนิดเชื้อเพลิงผง | ไม้ยางพารา | ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ | ไม้ไผ่ [1] |
|---|---|---|---|
| 1.ความชื้น (%) | 5.81 | 5.09 | 6.23 |
| 2.สารระเหย (%) | 76.68 | 49.5 | 80.84 |
| 3.เถ้า (%) | 2.28 | 5.19 | 1.66 |
| 4.คาร์บอน (%) | 45.42 | 57.2 | 49.59 |
| 5.ไฮโดรเจน (%) | 6.31 | 5.0 | 5.56 |
| 6.ไนโตรเจน (%) | 0.48 | 0.31 | 0.14 |
| 7.ซัลเฟอร์ (%) | 0 | 0.04 | 0.02 |
| 8.ออกซิเจน (%) | 45.54 | 32.3 | 44.71 |
| 9.ค่าความร้อนแบบกรอส ($MJ/Kg$) | 17.5 | 21.98 | 18.52 |

รูปที่ 4 เครื่องบดเชื้อเพลิง

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 5 เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์ผง/ไม้ยางพารา (ก)90:10 (ข)80:20 และ(ค)70:30

จากรูปที่ 2และ3 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเชื้อเพลิงผง ที่มาจากการบดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล

ตารางที่ 2 ขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านเครื่องวัดขนาดอนุภาค

| เบอร์ตะแกรง | ขนาดรูตะแกรง (มิตลเมตร) | ร้อยละน้ำหนักที่ติดอยู่ในตะแกรง |
|---|---|---|
| 10 | 2 | 0.0135 |
| 20 | 0.85 | 0.0631 |
| 30 | 0.6 | 0.0500 |
| 40 | 0.425 | 0.1164 |
| 50 | 0.3 | 0.1572 |
| 100 | 0.15 | 0.3237 |
| 200 | 0.075 | 0.1676 |
| ต่ำกว่า200 | เล็กกว่า0.075 | 0.1084 |

**2.2 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (Thermogravimatric analysis :TGA)**

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร ซึ่งเครื่อง TGA ที่ใช้วิเคราะห์เป็นของยี่ห่อ Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องแสดงในอ้างอิง[6] โดยเครื่อง TGA นี้ได้รับการรับรองจากมาตราฐาน ISO 9000

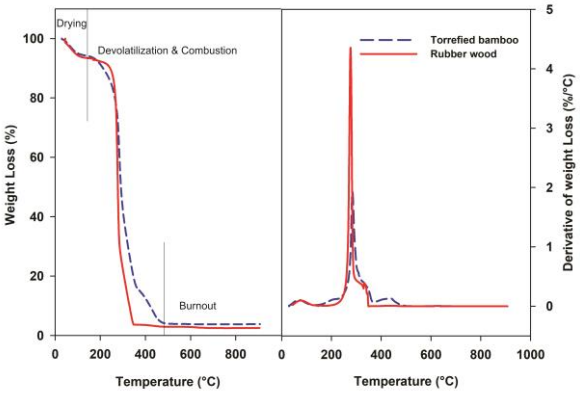
มีการควบคุมน้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ที่ 23.5 มิลลิกรัม และเป็นเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 2 อีกทั้งยังมีการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 60 มิลลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อนของห้องเผาไหม้ที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยจะใช้ค่านี้เป็นค่าเริ่มต้นในทุก ๆ เชื้อเพลิงที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะสามารถนำผลของการวิเคราะห์ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน

รูปที่ 6 เครื่อง Thermogravimatric analysis

ผลที่ได้จากเครื่อง TGA จะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักมวลสาร(TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก(DTG) ต่ออุณหภูมิ ซึ่งเราสามารถนำผลจากการลดลงของมวลสารมาวิเคราะห์จุดวิกฤตต่าง ๆ ที่เป็นตัวแปรของพฤติกรรมการเผาไหม้ต่อไป

## 3. วิเคราะห์ผลการทดลอง

**3.1 ผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเดี่ยว**



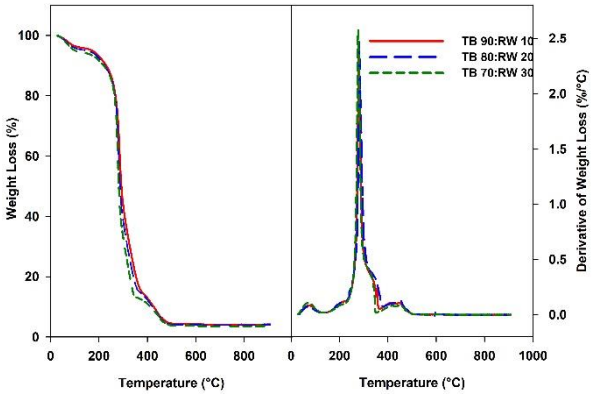

รูปที่ 7 กราฟน้ำหนัก(TG)และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก(DTG)ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์

รูปที่ 7 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการลดลงของกราฟTG เป็นการระเหยของความชื้นที่อยู่ในอนุภาคซึ่งมวลของไม้ยางพาราลดลงมากกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟด์ซึ่งตรง

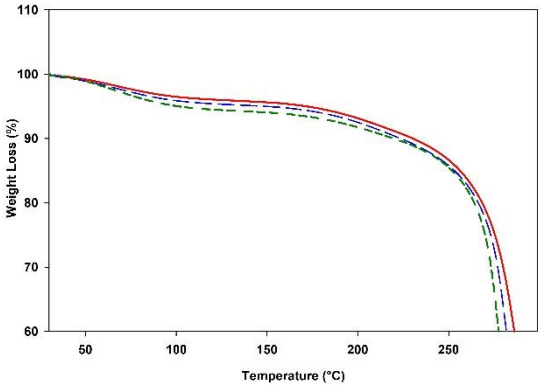
กับข้อมูลจากตารางที่ 1 ที่แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มีมากกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ต่อมามวลจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสหรือการปลดปล่อยสารระเหยจนกระทั่งเกิดการวาปไฟ โดยพลังงานความร้อนจากเปลวไฟนั้นจะเป็นส่วนช่วยให้กระบวนการเผาไหม้เร็วมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากจุดที่มีการลดลงของมวลมากที่สุดในกราฟTGหรือสังเกตจุดยอดของจากกราฟDTG ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุดหรือเรียกได้ว่าเป็นจุดที่มีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุด โดยจุดที่มีอัตราการเผาของไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์มากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 276.9 และ 284.5 องศาเซลเซียส และมีอัตราการลดลงของน้ำหนักอยู่ที่ 4.35 และ1.93 เปอร์เซ็นน้ำหนักต่อองศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งระหว่างกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยและกระบวนการเผาไหม้นั้นสารระเหยของอนุภาคเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับอากาศทำให้เกิดเปลวไฟ โดยเราสามารถหาอุณหภูมิติดไฟได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งจุดติดไฟของไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์อยู่ที่ 262.47 และ 270.62 องศาเซลเซียสตามลำดับ ต่อมาอุณหภูมิที่สิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้จะสังเกตได้จากเส้นของDTGจะไม่มีอัตรการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 498.8 และ 529.72 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยจากตารางที่ 1 ที่แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่าสัดส่วนเถ้าของเชื้อเพลิงยางพาราอยู่ที่ 2.28 ซึ่งน้อยกว่าสัดส่วนเถ้าของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่มีค่าอยู่ที่ 5.19 ซึ่งสอดคล้องกันกับเส้นTGจากรูปที่ 7 ที่น้ำหนักของไม้ยางพาราอยู่ต่ำกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟด์หลังจากสิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้

### 3.2 ผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม

จะเห็นได้ว่าการผสมกันของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์และไม้ยางพาราที่สัดส่วนต่าง ๆ ส่งผลต่อพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 8




รูปที่ 8 กราฟน้ำหนัก(TG)และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก(DTG)ของเชื้อเพลิงผสม

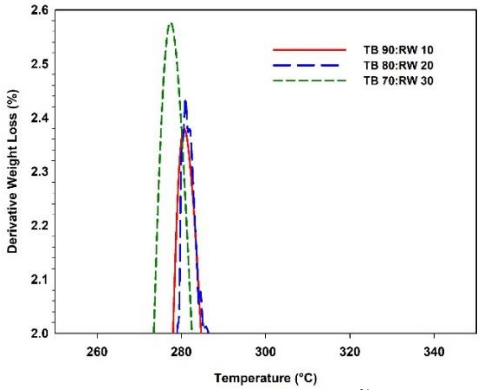



รูปที่ 9 กราฟน้ำหนัก(TG)ของเชื้อเพลิงผสมในช่วงแรกของกระบวนการเผาไหม้

กราฟน้ำหนัก(TG) ที่แสดงในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าในช่วงของการระเหยของความชื้นนั้นเชื้อเพลิงผสมของไม้ไผ่ทอรีไฟด์และไม้ยางพารา สัดส่วน90:10 น้ำหนักลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่เป็นส่วนหลักในการผสมมีปริมาณความชื้นอยู่น้อยซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 1 ที่แสดงถึงองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นของไม้ยางพาราสูงกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ส่งผลให้การลดลงของน้ำหนักจากการสูญเสียความชื้นจะมากขึ้นที่สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มากขึ้น รวมถึงเปอร์เซ็นต์ของสารระเหยของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มีมากกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ซึ่งสอดคล้องกับเส้นDTGที่แสดงการลดลงของ

สัดส่วนน้ำหนักมากที่สุด ที่สัดส่วนการผสมไม้ยางพารามากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 10

โดยจากรูปที่ 7-10 ทำให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วยจุดวิกฤต่าง ๆ ของกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3 ต่อไป




รูปที่ 10 กราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก(DTG)ของเชื้อเพลิงผสมในช่วงแรกของกระบวนการเผาไหม้

ตารางที่ 3 อุณหภูมิ เวลา และอัตรการลดลงของน้ำหนักที่จุดวิกฤตต่าง ๆ

| ตัวอย่าง | $T_i$ (°C) | $t_i$ (min) | $T_b$ (°C) | $t_b$ (min) | $R_m$ | $T_m$ (°C) | $t_m$ (min) | $D$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ | 270.6 | 12.0 | 524.4 | 24.2 | 1.93 | 284.5 | 12.7 | 0.013 |
| 90%ทอรีไฟด์ | 267.2 | 11.9 | 524.2 | 24.0 | 2.35 | 283.1 | 12.7 | 0.016 |
| 80%ทอรีไฟด์ | 265.2 | 11.8 | 524.2 | 23.8 | 2.44 | 281.0 | 12.5 | 0.017 |
| 70%ทอรีไฟด์ | 263.5 | 11.7 | 524.1 | 23.2 | 2.58 | 277.8 | 12.4 | 0.018 |
| ไม้ยางพารา | 262.4 | 11.6 | 351.23 | 16.1 | 4.35 | 276.9 | 12.3 | 0.030 |

จากอ้างอิง[2] $D = R_m / t_m t_i$

จากตารางที่ 3 พบว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์กับเชื้อเพลิงไม้ยางพารามีอุณหภูมิติดไฟอยู่ที่270.6 และ 262.4 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งทำให้อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วนการผสม90:10 80:20 และ 70:30 อยู่ที่ 267.2 265.2 และ 263.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงผสมมีอุณหภูมิติดไฟลดลง 3.4 5.4และ 7.2 องศาเซลเซียสตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่ต้นถึงจุดติดไฟจะลดลงตามสัดส่วนผสมของไม้ยางพารามีเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยสามารถหาดัชนีการติดไฟจากสูตร[2] ซึ่งเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ไม้ยางพารา และเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วน 90:10 80:20 70:30 มีค่าดัชนีการติดไฟเท่ากับ 0.013 0.03 0.016 0.017 และ0.018 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าดัชนีของการจุดติดไฟเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมของไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิสิ้นสุดของการเผาไหม้ของทั้งเชื้อเพลิงไม้ยางพารา ไม้ไผ่ทอรีไฟด์และเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วน 90:10 80:20 และ70:30 มีค่า 498.8 529.72 524.2 524.16และ 524.14 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลงผสมมีค่าอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ที่คล้ายคลึงกับอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ แต่แตกต่างกันที่ระยะเวลาที่ใช้ โดยจะใช้ระยะเวลาน้อยลงที่สัดส่วนการผสมของไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น

การที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มีสัดส่วนออกซิเจนที่มากกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟด์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้อย่างรวดเร็วที่เป็นส่วนช่วยในการปลดปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการสนับสนุนให้อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้ดีมากขึ้น แต่เนื่องจากไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่เรานำมาการใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟชันมาในระยะเวลาสั้นทำให้ความชื้นและสารระเหยลดลงไม่มากเท่าที่ควร ซึ่งทำ

ให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากมีพฤติกรรมการเผาไหม้ที่คล้ายคลึงกัน โดยจะสังเกตได้จากอุณหภูมิการสันดาป อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้และอุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้มากที่สุดจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

## 4. สรุปผลการทดลอง

1. อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และไม้ยางพาราจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารระเหยในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอุณหภูมิในการเริ่มต้นการปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งการผสมกันของเชื้อเพลิงเป็นการช่วยให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่มีสารระเหยน้อยกว่าสามารถจุดติดไฟที่อุณหภูมิต่ำลงเนื่องจากได้รับพลังงานจากสารระเหยของไม้ยางพาราที่มีสารระเหยมากกว่า ทำให้อุณหภูมิติดไฟต่ำลง

2. อัตราการลดลงของน้ำหนักที่มากที่สุด ( $R_m$ ) ของเชื้อเพลิงผสมพิสูจย์ถึงการสนับสนุนกันของการเผาไหม้ โดยอัตราการเผาไหม้จะแปรผันตามสัดส่วนของผสมไม้ยางพาที่มากขึ้น เพราะพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของไม้ยางพาราเป็นตัวเร่งให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่ผสมอยู่เผาไหม้ได้เร็วมากขึ้นส่งผลให้อัตราการลดลงของน้ำหนักมากขึ้นด้วย

3. อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมจะมีค่าใกล้เคียงกับไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ซึ่งจะมีความเชื่อมโยงกับเปอร์เซ็นคาร์บอนคงตัวของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่มีสูงกว่าและค่าความร้อนสูงกว่า แต่จะใช้เวลาในการเผาไหม้น้อยลงตามสัดส่วนของการผสมไม้ยางพารา

## 5 เอกสารอ้างอิง

**5.1 บทความจากวารสาร (Journal)**

[1] Li Xiang-guo, Ma Bao-guo, Xu Li, Hu Zhen-wu and Wang Xin-gang “Thermogravimetric analysis of the co-combistion of the blend with high ash coal and waste tyres”, Thermochimica Acta 441, January 2006, 79-83

[2] D.Vamvuka, N.El Chatib and S.Sfakiotakis “Measurements of Ignition Point and Combustion Characteristics of Biomass Fuels and their Blends with Lignite”, Conference Paper, January 2011

[3] Marisamy Muthuraman, Tomoaki Namioka and Kunio Yoshikawa ”A comparative study on co-combustion performance of munipal solid waste and Indonesian coal with high ash coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis”, Fuel Prossing Technology 91, December 2009, 550-558

[4] Zhijia Liu, Wanhe Hu, Zehui Jiang, Bingbing Mi and Benhua Fei “Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis”, Renewable Energy 87, October 2015, 346-352

[5] Bingbing Mi, Zhijia Liu, Wanhe Hu, Penglian Wei, Zehui Jiang and Benhua Fei “Investigating pyrolysis and combustion characteristics of torrefied bamboo, torrefied wood and their blends”, Bioresoure Tecnology 209, March 2016, 50-55

**5.2 เว็บไซต์**

[6] Pyris 1 TGA Thermogravimetric Product Note, PerkinElmer Life and Analytical Sciences, 710 Bridgeport Avenue Shelton, CT 06484-4794 USA, Phone: (800) 762-4000 or (+1) 203-925-4602, www.perkinelmer.com