

## คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยไม้สน Characterization of Bio-oil Produced from Fast Pyrolysis of Pine Sawdust

สุนทร สุทธิบาก\*

สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี  
64 ถนนทหาร ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000

\*ติดต่อ: E-mail : suntorn\_su@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ : 042-211-040 ต่อ 425, เบอร์โทรสาร : 042-221-978

### **บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยไม้สนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ทำการทดลองที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500°C ใช้ขนาดอนุภาคชีวมวล 250-500  $\mu\text{m}$  คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น ค่า pH ค่าความร้อน ความหนืด และความมีเสถียรภาพ การวิเคราะห์หาชนิดและสารเคมีที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์จะใช้ GC-MS ทำการวิเคราะห์ จากผลการทดลอง พบว่า ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ 58.45 wt%, 21.68 wt% และ 19.87wt% (ฐานแห้ง) ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ พบว่า ไบโอออยล์ที่ได้มีปริมาณน้ำ 27.98 wt% ปริมาณของแข็ง 0.55 wt% ปริมาณเถ้า 0.01 wt% ความหนาแน่น 1,127  $\text{kg/m}^3$  ค่า pH 3.6 ค่าความร้อนต่ำ 23.13 MJ/kg และความหนืด 26.86 cSt

**คำหลัก:** ไพโรไลซิสแบบเร็ว, ขี้เลื่อยไม้สน, ไบโอออยล์, เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

### **Abstract**

This article reports a study of characterization of bio-oil produced from fast pyrolysis of pine sawdust in a fluidized-bed reactor. Fast pyrolysis experiment was conducted at a reaction temperature was 500°C using a biomass particle size of 250-500  $\mu\text{m}$ . The bio-oil produced was analyzed with the aid of a gas chromatography – mass spectroscopy (GC-MS) system. Results showed that the highest bio-oil, char and gas yields were 58.45 wt%, 21.68 wt% and 19.87 wt% on biomass dry basis, respectively. The bio-oil products were also tested for their basic properties. Results showed that the water solids and ash contents of the bio-oil were 27.98 wt%, 0.55 wt% and 0.01 wt%, respectively. Moreover, the density, pH value, low heating value (LHV) and viscosity measured to be 1,127  $\text{kg/m}^3$ , 3.6, 23.13 MJ/kg and 26.86 cSt, respectively.

**Keywords:** Fast pyrolysis, Pine sawdust, Bio-oil, Fluidized-bed reactor

## 1. บทนำ

ปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของโลก แต่อย่างไรก็ตามการใช้ปิโตรเลียมเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ก็ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายประการ เช่น ปัญหามลพิษ ปัญหาโลกร้อน ปัญหาฝนกรด เป็นต้น อีกทั้งปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่ยั่งยืนและเมื่อใช้แล้วย่อมมีวันที่จะหมดไป ดังนั้นการนำเอาพลังงานหมุนเวียนที่ยั่งยืนมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ชีวมวล (Biomass) เป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่มีค่าพลังงานมหาศาล และเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด มีต้นทุนต่ำ มีปริมาณกักเก็บไนโตรเจน และถ้าที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมมาก ชีวมวลสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการผลิตให้ความร้อนหรือกระแสไฟฟ้าและจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกในกรณีที่มีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป และในการนำเอาชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องใช้เทคโนโลยีในการแปรรูป ซึ่งมีหลายเทคโนโลยีด้วยกัน แต่ที่นิยมกันมาก ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) การผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (Gasification) และไพโรไลซิส (Pyrolysis) [1,2] และเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจมากในขณะนี้ คือ ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อน ที่อัตราการให้ความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงอุณหภูมิชีวมวลสูงและรวดเร็ว โดยปราศจากออกซิเจน ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะเป็นของเหลวเรียกว่า ไบโอบอยล์ (Bio-oil) ไบโอบอยล์จะมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลเข้ม มีคุณสมบัติความเป็นกรดสูง สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน การผลิตพลังงานไฟฟ้า และให้ทั้งความร้อนและผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกัน เทคโนโลยีไพโรไลซิสแบบเร็วสามารถผลิตไบโอบอยล์ได้สูงถึง 75 wt% [1] มีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของไบโอบอยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลชนิดต่าง ๆ เช่น ฟางข้าว [3-5] แกลบ [6,7] เหง้ามันสำปะหลัง [8] ชิงข้าวโพด [9] ไม้เนื้อแข็ง [10] เป็นต้น ซึ่งพบว่าไบโอบอยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้สนในต่างประเทศ Kang และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของไบโอบอยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้สนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดและใช้แท่งเซรามิกเป็นวัสดุในการกรองไอร้อนพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 474°C ได้ปริมาณไบโอบอยล์สูงสุดประมาณ 67 wt% (ฐานแห้ง) และผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอบอยล์ พบว่า มีปริมาณของแข็งอยู่ 0.1 wt% ปริมาณน้ำ 27 wt% ค่า pH 2.5 ปริมาณเถ้า 0.01 wt% ความหนาแน่น 1.12 g/ml และค่าความร้อนสูง (HHV) 23 MJ/kg

งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไบโอบอยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยไม้สนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่ได้ทำการศึกษาในประเทศไทย ขี้เลื่อยไม้สนที่นำมาศึกษาเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์และตู้อบสมุนไพรในจังหวัดร้อยเอ็ด ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ให้ความร้อน หรือนำไปผสมกับปุ๋ยคอกเพื่อใช้ในการเกษตร แต่ในแง่ของการนำไปใช้เป็นพลังงานโดยเฉพาะในรูปแบบเชื้อเพลิงเหลว พบว่ายังไม่มีการดำเนินการอย่างจริงจัง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ สำหรับคุณสมบัติของไบโอบอยล์ที่ทำการศึกษา ประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น ค่า pH ค่าความร้อน ความหนืด และความมีเสถียรภาพ สำหรับการวิเคราะห์หาชนิดและสารเคมีที่อยู่ในไบโอบอยล์จะใช้ GC-MS ทำการวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้สนใจที่จะศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลได้เป็นอย่างดี

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 ชีวมวล

ตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา จะใช้ชี้เลื่อยไม้สนซึ่งได้จากโรงงานผลิตตู้อบสมุนไพรในจังหวัดร้อยเอ็ด โดยทำการบดย่อยและคัดแยกขนาดโดยเลือกใช้ขนาดอนุภาค 250-500  $\mu\text{m}$  ก่อนการทดลองจะนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 24 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณความชื้นให้เหลือน้อยที่สุด ตัวอย่างชีวมวลจะทำการวิเคราะห์พื้นฐานประกอบไปด้วย การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์หา ปริมาณความชื้น (Moisture) สารระเหยได้ (Volatile matter) และปริมาณเถ้า (Ash content) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM E1756-01, E872-82 และ E1755-01 ตามลำดับ สำหรับคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) จะคำนวณหาจากค่าความแตกต่าง การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุพื้นฐานในชีวมวล ประกอบไปด้วย คาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) กำมะถัน (Sulfur) และออกซิเจน (Oxygen) โดยทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์เครื่องมือกลางทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (CSTE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และการวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) จะใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมาคำนวณหา ค่าความร้อนสูง (HHV) และค่าความร้อนต่ำ (LHV) โดยพื้นฐานแบบแห้งดังสมการที่ (1) และ (2) ซึ่งคุณลักษณะของชี้เลื่อยไม้สนที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นฐานจะแสดงไว้ในตารางที่ 1

ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) ของชีวมวลจะคำนวณโดยใช้สมการของ Sheng and Azevedo [12] ดังนี้

$$HHV_{dry} (MJ/kg) = -1.3675 + 0.3137C + 0.7009H + 0.0318O^* \quad (1)$$

เมื่อ C และ H คือ เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน และไฮโดรเจน (ฐานแห้ง) ตามลำดับ และ  $O^*$  คือ  $100 - C - H - \text{Ash}$

ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) ของชีวมวลจะคำนวณจาก  $HHV_{dry}$  และปริมาณไฮโดรเจนโดยใช้สมการของ ECN [13] ดังนี้

$$LHV_{dry} (MJ/kg) = HHV_{dry} - 2.442 \times 8.936 \left( \frac{H}{100} \right) \quad (2)$$

### 2.2. การวิเคราะห์ทางความร้อนชีวมวล

การวิเคราะห์ทางความร้อนของชี้เลื่อยไม้สนจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) และการวิเคราะห์ห้อนุพันธ์เชิงความร้อน (Differential thermal analysis, DTA) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ TGA/DSC, SDT 2960 (V3.0F), TA Instruments และใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวกลางในการทำงาน อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ให้ความร้อนจากอุณหภูมิประมาณ 25-800 °C ทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์เครื่องมือกลางทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (CSTE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

### 2.3. หน่วยผลิตไฟโรไลซิสแบบเร็ว

ไฟโรไลซิสแบบเร็วของชี้เลื่อยไม้สนจะทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบไปด้วย ชุดป้อนชีวมวล ชุดอุ่นไนโตรเจน ชุดแยกถ่านชาร์ ชุดควบแน่นและเก็บรวบรวมไบโอออยล์ ไดอะแกรมของหน่วยผลิตจะแสดงไว้ในรูปที่ 1

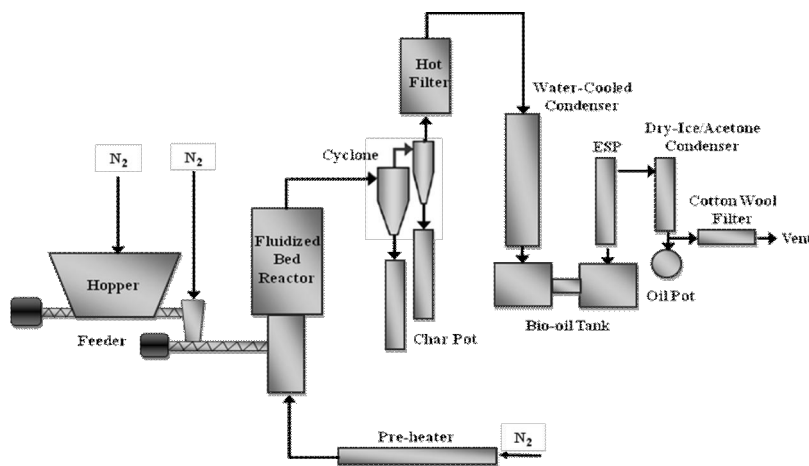
2.4. การออกแบบการทดลอง

การทดลองไพโรไลซิสแบบเร็วของชี้เลี้ยงไม้สนจะทำการทดลองที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500°C เลือกใช้ขนาดอนุภาคของชี้เลี้ยง 250-500 μm อัตราป้อนชี้เลี้ยงประมาณ 200 g/hr อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนร้อนประมาณ 7 L/min ใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายโอนความร้อน และเวลาที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของชี้เลี้ยงไม้สน

| การวิเคราะห์  | ชี้เลี้ยงไม้สน                       |
|---|--------------------------------------|
| <i>การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt%)</i>                        |                                      |
| ความชื้น (ฐานเปียก)                                       | 9.20                                 |
| สารระเหยได้ (ฐานแห้ง)                                     | 82.80                                |
| คาร์บอนคงตัว* (ฐานแห้ง)                                   | 14.70                                |
| เถ้า (ฐานแห้ง)  | 2.50                                 |
| <i>การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt%, ฐานแห้งและไม่คิดเถ้า)</i> |                                      |
| คาร์บอน   | 46.82                                |
| ไฮโดรเจน  | 6.31                                 |
| ไนโตรเจน  | 0.55                                 |
| กำมะถัน   | 0.08                                 |
| ออกซิเจน*   | 46.24                                |
| อัตราส่วน H/C   | 1.62                                 |
| อัตราส่วน O/C   | 0.74                                 |
| สูตรโมเลกุล   | CH <sub>1.62</sub> O <sub>0.74</sub> |
| <i>ค่าความร้อน (MJ/kg, ฐานแห้ง)</i>                       |                                      |
| ค่าความร้อนสูง (HHV)                                      | 19.10                                |
| ค่าความร้อนต่ำ (LHV)                                      | 17.80                                |

\*คำนวณจากค่าความแตกต่าง



รูปที่ 1 ไดอะแกรมหน่วยผลิตไพโรไลซิสแบบเร็ว

## 2.5. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

### 2.5.1. การวิเคราะห์ไบโอออยล์

คุณสมบัติของไบโอออยล์ที่ทำการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น ค่า pH ค่าความร้อน ความหนืด ความมีเสถียรภาพ และชนิดและสารเคมีที่อยู่ในไบโอออยล์

#### 2.5.1.1. องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน

องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน (Elemental composition) ในไบโอออยล์เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุพื้นฐานที่อยู่ในไบโอออยล์ ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจน โดยใช้เทคนิคเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างชีวมวล

#### 2.5.1.2. ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำ (Water content) ในไบโอออยล์จะทำการวิเคราะห์หาโดยใช้เทคนิค Karl-Fischer titration

#### 2.5.1.3. ปริมาณของแข็ง

ปริมาณของแข็ง (Solids content) ในไบโอออยล์จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการกรองสุญญากาศ ดูดของเหลวผ่านกระดาษกรอง และใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายไบโอออยล์เพื่อให้สามารถดูดผ่านกระดาษกรองได้ ส่วนที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองได้จะเป็นปริมาณของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์

#### 2.5.1.4. ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้า (Ash content) ในไบโอออยล์จะเป็นการวัดสิ่งที่เหลืออยู่จากการนำไบโอออยล์ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 775°C นาน 24 ชั่วโมง โดยเริ่มต้นอบไล่ความชื้นที่ 105°C แล้วให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 775°C [14]

#### 2.5.1.5. ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (Density) ของไบโอออยล์จะทำการหาโดยใช้ขวดวัดความหนาแน่นทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

#### 2.5.1.6. ค่า pH

ค่า pH (pH value) ของไบโอออยล์จะทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดค่า pH (pH meter) ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการปรับเทียบที่ค่า pH 4 และ 7 กับของเหลวมาตรฐานก่อนการวัดทุกครั้ง

#### 2.5.1.7. ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) ของไบโอออยล์จะทำการคำนวณหาโดยใช้ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐานของไบโอออยล์ ค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์โดยพื้นฐานแบบแห้ง ( $HHV_{dry}$ ) จะทำการคำนวณหาโดยใช้สมการของ Channiwala and Parikh [15] ดังสมการที่ (3) ค่าความร้อนต่ำของไบโอออยล์โดยพื้นฐานแบบแห้ง ( $LHV_{dry}$ ) จะทำการคำนวณหาตามสมการที่ (2) [13] สำหรับการคำนวณโดยพื้นฐานแบบเปียก ค่าความร้อนสูง ( $HHV_{wet}$ ) และค่าความร้อนต่ำ ( $LHV_{wet}$ ) จะคำนวณหาตามสมการที่ (4) และ (5) [13] โดยนำข้อมูลของปริมาณน้ำในไบโอออยล์มาใช้ในการคำนวณ

$$HHV_{dry} (MJ/kg) = 0.3491C + 1.1738H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211A \quad (3)$$

เมื่อ C, H, S, O, N และ A ในสมการที่ (3) คือ เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน และเถ้าในไบโอออยล์ (ฐานแห้ง)

$$HHV_{wet} (MJ / kg) = HHV_{dry} \left( 1 - \frac{H_2O}{100} \right) \quad (4)$$

$$LHV_{wet} (MJ / kg) = LHV_{dry} \left( 1 - \frac{H_2O}{100} \right) - 2.442 \left( \frac{H_2O}{100} \right) \quad (5)$$

#### 2.5.1.8. ความหนืด

ความหนืด (Viscosity) ของไบโอดีเซลจะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือทดสอบความหนืด (Cannon-Fenske Routine Viscometer) ที่อุณหภูมิ 40°C ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D445 หน่วยของความหนืดไบโอดีเซลจะเป็น mm<sup>2</sup>/s (cSt)

#### 2.5.1.9. ความมีเสถียรภาพ

ความมีเสถียรภาพ (Stability) ของไบโอดีเซลจะทำการวัดตัวบ่งชี้ความมีเสถียรภาพ (Stability index) ซึ่งเป็นการหาความหนืดของไบโอดีเซลเปลี่ยนไปตามระยะเวลาการเก็บรักษา ( $V_{stored}$ ) เทียบกับความหนืดของไบโอดีเซลเริ่มต้น ( $V_{fresh}$ ) ดังสมการที่ (6) [14]

$$Stability\ index = \frac{V_{stored} - V_{fresh}}{V_{fresh}} \quad (6)$$

เมื่อ  $V_{stored}$  คือ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ทำการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C นาน 24 ชั่วโมง ซึ่งจะเทียบเท่ากับไบโอดีเซลที่เก็บไว้นาน 1 ปี [16] ส่วน  $V_{fresh}$  คือ ความหนืดของไบโอดีเซลที่เก็บไว้หลังจากผลิตไม่เกิน 24 ชั่วโมง

#### 2.5.1.10 ชนิดและปริมาณสารเคมี

ชนิดและปริมาณสารเคมีในไบโอดีเซล จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค GC/MS (Gas chromatography – mass spectroscopy) โดยทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์กลางทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (CSTE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

#### 2.5.2. การวิเคราะห์ถ่านชาร์

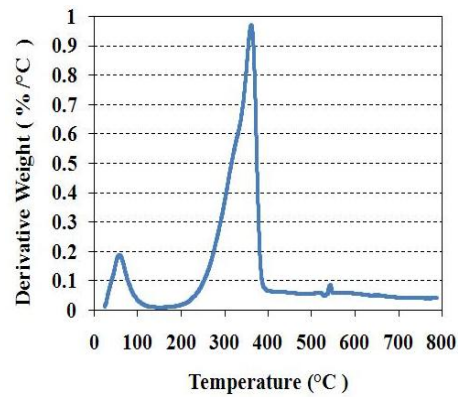
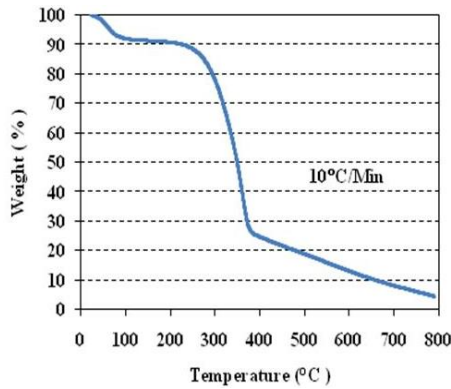
คุณสมบัติของถ่านชาร์ที่ทำการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ค่าความร้อน และปริมาณเถ้า โดยองค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐานจะทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ชีวมวลและไบโอดีเซล ค่าความร้อนจะทำการคำนวณหาโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐานมาคำนวณหาค่าความร้อนต่ำ (LHV) และค่าความร้อนสูง (HHV) โดยพื้นฐานแบบแห้งตามสมการที่ (2) และ (3) สำหรับปริมาณเถ้าจะทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ชีวมวล

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 3.1. ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนชีวมวล

รูปที่ 2 (a) และ (b) เป็นกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) และการวิเคราะห์ห้อนุพันธ์เชิงความร้อน (Differential thermal analysis, DTA) ตามลำดับ ของซีลี้อยไม้สน จากกราฟจะเห็นว่า

การสูญเสียน้ำหนักเริ่มต้นของซีลี้อยไม้สนจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 25-120°C เนื่องจากการระเหยของน้ำในชีวมวล สำหรับการสูญเสียน้ำหนักหลักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 200-400°C เนื่องจากการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของชีวมวล และการสูญเสียน้ำหนักช่วงสุดท้ายจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 400-800°C ซึ่งเป็นการย่อยสลายลิกนิน สิ่งที่เหลืออยู่หลังจากไพโรไลซิสแบบช้าของซีลี้อยไม้สนที่อุณหภูมิ 800°C คือ ปริมาณเถ้า จะมีค่าประมาณ 4 wt% ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเถ้าของซีลี้อยไม้สนที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ในตารางที่ 1 ซึ่งมีปริมาณเถ้าประมาณ 2.5 wt% (ฐานแห้ง)



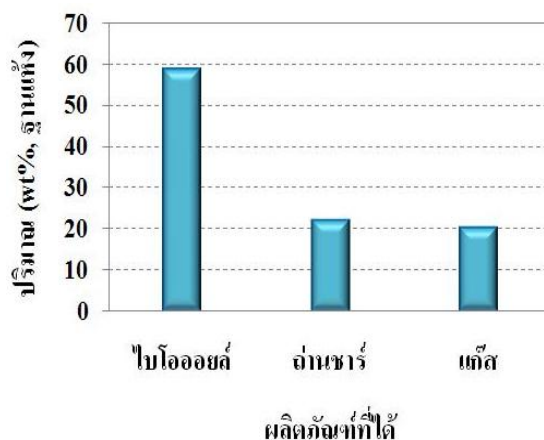
(a)

(b)

รูปที่ 2 (a) กราฟ TGA และ (b) DTA ของซีลี้อยไม้สน

### 3.2. ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้

รูปที่ 3 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีลี้อยไม้สน ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500°C จากผลการทดลองพบว่า ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ อ่านซาร์ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ 58.45 wt%, 21.68 wt% และ 19.87wt% (ฐานแห้ง) ตามลำดับ



รูปที่ 3 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีลี้อยไม้สน

### 3.3. ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้

#### 3.3.1. ไบโอดีเอส

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเอสที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื่อยไม้สน ซึ่งประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น ค่า pH ค่าความร้อน ความหนืด และความมีเสถียรภาพ

##### 3.3.1.1. องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน

ตารางที่ 2 จะแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน อัตราส่วน H/C อัตราส่วน O/C ของไบโอดีเอสที่ได้จากไพโรไลซิสของซีเลื่อยไม้สน จากผลการวิเคราะห์จะพบว่า มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 63.4 wt% ซึ่งปริมาณคาร์บอนนี้จะมีผลโดยตรงกับค่าความร้อนของไบโอดีเอส ปริมาณคาร์บอนที่สูงจะทำให้ค่าความร้อนของไบโอดีเอสมีค่าสูงตามไปด้วย ปริมาณไนโตรเจนและกำมะถันในไบโอดีเอสจะมีค่าต่ำมาก เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณไนโตรเจนและกำมะถันที่ต่ำจึงทำให้ไบโอดีเอสที่ได้มีปริมาณแร่ธาตุดังกล่าวต่ำ ซึ่งจะเป็นผลต่อสิ่งแวดล้อมในกรณีที่นำไบโอดีเอสไปใช้งาน อัตราส่วน H/C และ O/C มีค่าเท่ากับ 0.85 และ 0.38 ตามลำดับ

##### 3.3.1.2. ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำในไบโอดีเอสจะมาจากสองประการหลัก คือ ปริมาณความชื้นในชีวมวลเริ่มต้น และการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ในกระบวนการ [1] ปริมาณน้ำในไบโอดีเอสที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื่อยไม้สนจะมีค่าประมาณ 27.98 wt% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kang และคณะ [11] ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเอสจากไม้สนในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเดียวกัน (27 wt%) และถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเอสที่ยอมรับได้ [17]

##### 3.3.1.3. ปริมาณของแข็ง

ปริมาณของแข็งในไบโอดีเอสจะมีค่าประมาณ 0.55 wt% เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Kang และคณะ [11] จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย (0.1 wt%) เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบกรองไอร้อน แต่ก็ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั่วไปของไบโอดีเอสที่ยอมรับได้ [17]

##### 3.3.1.4. ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้าในไบโอดีเอสจะมีผลมาจากปริมาณของแข็ง มีค่าประมาณ 0.01 wt% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kang และคณะ [11] ที่ทำการศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลชนิดเดียวกันและใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเดียวกันแต่ใช้วัสดุในการกรองไอร้อนต่างกัน

##### 3.3.1.5. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของไบโอดีเอสมีค่าประมาณ  $1,127 \text{ m}^3/\text{kg}$  ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั่วไป (1.1-1.3 g/ml) [17]

##### 3.3.1.6. ค่า pH

ค่า pH ของไบโอดีเอสมีค่าประมาณ 3.6 ซึ่งถือว่ามีความเป็นกรดสูง ดังนั้นในการนำเอาไบโอดีเอสไปใช้งานควรคำนึงถึงด้านการกัดกร่อนเป็นพิเศษ

##### 3.3.1.7. ค่าความร้อน

ค่าความร้อนของไบโอดีเอสจะมีผลมาจากปริมาณคาร์บอน ในการวิเคราะห์โดยพื้นฐานแบบแห้ง พบว่าไบโอดีเอสที่ได้มีค่าความร้อนต่ำประมาณ 23 MJ/kg



**3.3.1.8. ความหนืด**

จากตารางที่ 2 แสดงค่าความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลที่ทำการวัดหลังจากผลิตไม่เกิน 24 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 26.9 cSt ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลทั่วไป [17]

**3.3.1.9. ความมีเสถียรภาพ**

ความมีเสถียรภาพของไบโอดีเซลจะเป็นตัวชี้วัดถึงคุณภาพของไบโอดีเซลที่ได้ ถ้าตัวชี้วัดดัชนีความมีเสถียรภาพ (Stability index) ของไบโอดีเซลมีค่าต่ำแสดงว่า ไบโอดีเซลที่ได้มีความเสถียรภาพดี ในงานวิจัยนี้ค่าดัชนีความมีเสถียรภาพของไบโอดีเซลที่ทดสอบโดยการวัดความหนืดจลน์มีค่าประมาณ 1.2 ความมีเสถียรภาพของไบโอดีเซลนอกจากจะทำการวิเคราะห์หาโดยวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดแล้วยังสามารถวิเคราะห์หาโดยวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำด้วยเทคนิค Karl-Fischer titration และวิธีการหาโดยน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

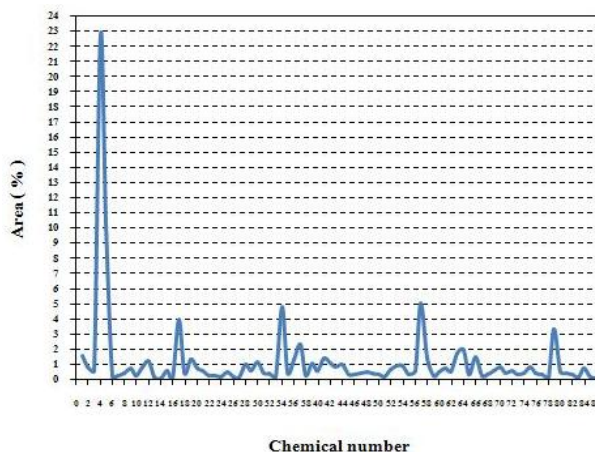
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลียมไขมัน

| การวิเคราะห์                            | ซีเลียมไขมัน                         |
|---|--------------------------------------|
| องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน (wt%, ฐานแห้ง) |                                      |
| คาร์บอน                                 | 63.39                                |
| ไฮโดรเจน                                | 4.49                                 |
| ไนโตรเจน                                | 0.36                                 |
| กำมะถัน                                 | <0.01                                |
| ออกซิเจน*                               | 31.75                                |
| อัตราส่วน H/C                           | 0.85                                 |
| อัตราส่วน O/C                           | 0.38                                 |
| สูตรโมเลกุล                             | CH <sub>0.85</sub> O <sub>0.38</sub> |
| ปริมาณน้ำ (wt%)                         | 27.98                                |
| ปริมาณของแข็ง (wt%)                     | 0.55                                 |
| ปริมาณเถ้า (wt%)                        | 0.01                                 |
| ความหนาแน่น (m <sup>3</sup> /kg)        | 1,127                                |
| ค่า pH                                  | 3.60                                 |
| ค่าความร้อน (MJ/kg)                     |                                      |
| ค่าความร้อนสูง (HHV, ฐานแห้ง)           | 24.11                                |
| ค่าความร้อนสูง (HHV, ฐานเปียก)          | 17.36                                |
| ค่าความร้อนต่ำ (LHV, ฐานแห้ง)           | 23.13                                |
| ค่าความร้อนต่ำ (LHV, ฐานเปียก)          | 15.98                                |
| ความหนืดจลน์ ที่ 40°C (cSt)             |                                      |
| ไบโอดีเซลผลิตใหม่ (fresh)               | 26.86                                |
| ไบโอดีเซลผลิตเทียบเท่า 1 ปี (stored)    | 57.98                                |
| ค่าดัชนีความมีเสถียรภาพ                 | 1.16                                 |

\*คำนวณจากค่าความแตกต่าง

3.3.1.10. ชนิดและปริมาณสารเคมี

รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารเคมีในไบโอดีเซล จากกราฟจะเห็นว่าไบโอดีเซลที่ได้มีสารเคมีผสมอยู่หลายชนิด และสารเคมีที่พบมากที่สุด คือ กรดอะซิติก (Acetic acid) รองลงมาจะเป็นพวก 2-Propanone, 1-hydroxy- Furfural 2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl Phenol และ 1,2-Benzenediol



รูปที่ 4 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารเคมีในไบโอดีเซลโดยเทคนิค GC-MS

3.3.2. ผลการวิเคราะห์ถ่านชาร์

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื่อยไม้สน ประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ค่าความร้อน และปริมาณเถ้า จากผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าความร้อนต่ำของถ่านชาร์ที่ได้จะมีค่าประมาณ 24 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kang และคณะ [11]

ตารางที่ 3 คุณลักษณะของถ่านชาร์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื่อยไม้สน

| การวิเคราะห์                            | ซีเลื่อยไม้สน                        |
|---|--------------------------------------|
| องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน (wt%, ฐานแห้ง) |                                      |
| คาร์บอน                                 | 65.31                                |
| ไฮโดรเจน                                | 3.63                                 |
| ไนโตรเจน                                | 1.13                                 |
| กำมะถัน                                 | 0.03                                 |
| ออกซิเจน*                               | 15.37                                |
| อัตราส่วน H/C                           | 0.67                                 |
| อัตราส่วน O/C                           | 0.18                                 |
| สูตรโมเลกุล                             | CH <sub>0.67</sub> O <sub>0.18</sub> |
| ปริมาณเถ้า (wt%)                        | 14.53                                |
| ค่าความร้อน (MJ/kg, ฐานแห้ง)            |                                      |
| ค่าความร้อนสูง (HHV)                    | 25.16                                |
| ค่าความร้อนต่ำ (LHV)                    | 24.37                                |

\*คำนวณจากค่าความแตกต่าง

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาคูณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของชี้เลี้ยงไม้สนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบด ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500°C และใช้ขนาดอนุภาคชีวมวล 250-500  $\mu\text{m}$  พบว่า ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ 58.45 wt%, 21.68 wt% และ 19.87wt% (ฐานแห้ง) ตามลำดับ และจากผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่า ไบโอออยล์ที่ได้มีปริมาณน้ำ 27.98 wt% ปริมาณของแข็ง 0.55 wt% ปริมาณเถ้า 0.01 wt% ความหนาแน่น 1,127  $\text{kg/m}^3$  ค่า pH 3.6 ค่าความร้อนต่ำ 23.13 MJ/kg และความหนืด 26.86 cSt สำหรับการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารเคมีที่อยู่ในไบโอออยล์โดยเทคนิค GC/MS พบว่ามีสารเคมีที่ผสมอยู่ในไบโอออยล์หลายชนิด และสารเคมีที่พบมากที่สุด คือ กรดอะซิติก และจากผลการศึกษานี้จะเห็นไบโอออยล์ที่ได้จะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของไบโอออยล์ที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามในการที่จะนำไบโอออยล์ไปใช้งานจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของไบโอออยล์ เช่น การลดปริมาณน้ำ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และห้องปฏิบัติการศูนย์กลางทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (CSTE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์สำหรับใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bridgwater, A.V., Meier, D. and Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass, *Organic Geochemistry*, vol. 30(12), pp. 1479-1493.
- [2] Bridgwater, A.V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, *Biomass and Bioenergy*, vol. 38(0), March 2011, pp. 68-94.
- [3] Lee, K.H., Kang, B.S., Park, Y.K. and Kim, J.S. (2005). Influence of reaction temperature, pretreatment, and a char removal system on the production of bio-oil from rice straw by fast pyrolysis, using a fluidized bed, *Energ Fuel*, vol. 19(5), April 2005, pp. 2179-2184.
- [4] Jung, S.H., Kang, B.S. and Kim, J.S. (2008). Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system, *J Anal Appl Pyrol*, vol. 82(2), April 2008, pp. 240-247.
- [5] Pattiya, A. and Suttibak, S. (2012). Influence of a glass wool hot vapour filter on yields and properties of bio-oil derived from rapid pyrolysis of paddy residues, *Bioresource Technology*, vol. 116(0), April 2012, pp. 107-113.
- [6] Zheng, J.L. (2007). Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system, *J Anal Appl Pyrol*, vol. 80(1), January 2007, pp. 30-35.

- [7] Chen, T., Wu, C., Liu, R., Fei, W. and Liu, S. (2011). Effect of hot vapor filtration on the characterization of bio-oil from rice husks with fast pyrolysis in a fluidized-bed reactor. *Bioresource Technology*, vol. 102(10), March 2011, pp. 6178-6185
- [8] Suttibak, S., Sriprateep, K. and Pattiya, A. (2012). Production of bio-oil via fast pyrolysis of cassava rhizome in a fluidised-bed reactor, *Energy Procedia*, vol. 14(0), February 2012, pp. 668-673.
- [9] Liu, R, Deng, C. and Wang, J. (2010). Fast pyrolysis of corn straw for bio-oil production in a bench-scale fluidized bed reactor, *Energy Source Part A*, vol. 32(1), January 2010, pp. 10-19.
- [10] Cao, J.P., Xiao, X.B., Zhang, S.Y., Zhao, X.Y., Sato, K., Ogawa, Y., Wei, X.Y. and Takarada, T. (2011). Preparation and characterization of bio-oils from internally circulating fluidized-bed pyrolyses of municipal, livestock, and wood waste, *Bioresource Technol*, vol. 102(2), September 2010, pp. 2009-2015.
- [11] Kang, B.S., Lee, K.H., Park, H.J., Park, Y.K. and Kim, J.S. (2006). Fast pyrolysis of radiata pine in a bench scale plant with a fluidized bed: Influence of a char separation system and reaction conditions on the production of bio-oil, *J Anal Appl Pyrol*, vol. 76(1-2), August 2005, pp. 32-37.
- [12] Sheng, C.D. and Azevedo, J.L.T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass Bioenergy*, vol. 28(5), November 2004, pp. 499-507.
- [13] ECN. (2012). Phyllis, database for biomass and waste, Energy research Centre of the Netherlands. Energy research Centre of the Netherlands [database on the internet], Energy research Centre of the Netherlands. URL: <http://www.ecn.nl/phyllis>, access on 2/03/2012.
- [14] Oasmaa, A. and Peacocke, C. (2010). Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids: A guide, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo 2010. p. 134.
- [15] Channiwala, S.A. and Parikh, P.P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels, *Fuel*, vol. 81(8), August 2001, pp. 1051-1063.
- [16] Oasmaa, A. and Kuoppala, E. (2003). Fast pyrolysis of forestry residue. 3. Storage stability of liquid Fuel, *Energy & Fuels*, vol. 17(4), May 2003, pp. 1075-1084.
- [17] Oasmaa, A., Elliott, D.C. and Muller, S. (2009). Quality control in fast pyrolysis bio-oil production and use, *Environ Prog Sustain*, vol. 28(3), August 2009, pp. 404-409.