

# การเตรียมถ่านกัมมันต์ราคาถูกโดยการเผาด้วยความร้อนในเครื่องเผาอับอากาศเพื่อกำจัดเหล็ก (III)

## Preparation of Low-Cost Activated Carbon by Carbonization using Muffle Furnace for Iron (III) Removal.

ปัญญา มณีจักร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

E-mail: panya.m@rsu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการผลิตถ่านกัมมันต์ราคาถูก โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือ ผลิตถ่านคาร์บอนจากลูกไม้ที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์เช่น ลูกตีนเป็ด (COG) ลูกหูกวาง (TC) ลูกยางใบซอ (FL) ลูกสาละ (CGA) และลูกยางพารา (HB) และวัตถุดิบจากถ่านหุงต้มจากต้นสะแก (CQ) และ ถ่านหุงต้มจากต้นกระถิน (LL) ในพื้นที่ ลูกไม้นำมาเผาเป็นถ่านคาร์บอนที่ 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 – 3 ชั่วโมง ส่วนถ่านหุงต้มจะนำมากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 – 5 ชั่วโมง ถ่านคาร์บอนจากลูกหูกวางเผา 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (TC501) และถ่านหุงต้มจากต้นกระถินเผากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (LL502) สามารถดูดซับ  $Fe^{3+}$  ได้ 23.67 และ 28.18 mg/g ตามลำดับ นำถ่านคาร์บอนซ้มากระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) อัตราส่วนถ่านต่อกรด/เบส 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 โดยมวล เเผากระตุ้นที่ 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 – 3 ชั่วโมง ศึกษาสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $S_{bet}$ ) ปริมาตรรูพรุนรวม ( $V_r$ ) ชนิดของหมู่ฟังก์ชัน และ  $pH_{pzc}$  พบว่า LL502 ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีดูดซับเหล็กดีที่สุด มีค่า  $S_{bet}$  247.3  $m^2/g$  ปริมาณหมู่กรดเบสรวม 2.2647 mequiv/g และ  $pH_{pzc}$  8.49 นำถ่านไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดเหล็กในน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน พบว่าถ่านกัมมันต์ LL502 สามารถกำจัดเหล็กในน้ำได้สูงถึงร้อยละ 98

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์ราคาถูก เตาเผาอับอากาศ เหล็ก(III)

### ABSTRACT

The aim of this research is to study an alternative approach for carbonizing and activating carbons from plant residues. The carbons are prepared from two sources; inedible fruits (e.g. *Cerbera odollam* Gaertn (COG) *Terminalia catappa* (TC) *Ficus lyrata* (FL) *Couroupita guianensis* Aubl (CGA) and *Hevea brasiliensis* (HB)). And the charcoals from local plants such as *Combretum quadrangulare* (CQ) and *Leucaena Leucocephala* (LL). In carbonization of the fruits, thermal treatment conditions are studied by varying temperature from 400, 450 and 500 °C and operating time from 1 to 3 hrs. Whereas, charcoals from CQ and LL are produced by using pyrolysis reaction at 500 °C for 1 to 5 hrs. Efficiency of prepared carbons is determined with regard to  $Fe^{3+}$  adsorption capacity. The results suggest that TC carbonized at 500 °C for 1 hrs. (TC501) and LL pyrolysed at 500 °C for 2 hrs (LL502) can achieve high level of absorption capacity i.e. 23.67 and 28.18 mg/g, respectively. Next, activated carbon is prepared by using chemical treatment, 30 %w/w phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ) and KOH with

different ratio of carbon to acid/base (e.g. 1:2, 1:3, 1:4 and 1:5 by weight), followed by aforementioned carbonization. Physical properties of carbonized and activated carbons are examined in terms of surface area ( $S_{bet}$ ), total pore volume ( $V_t$ ), functional groups and  $pH_{pzc}$ . It is found that LL502 without the addition of chemical treatment is also the best adsorption capacity, the properties of which are 247.3  $m^2/g$  of  $S_{bet}$ , 2.2647 mequiv./g of total functional groups and 8.49 is  $pH_{pzc}$ . However, activated carbon show remarkable improvement in removing  $Fe^{3+}$  98 folds when it is challenged with real sample from ground/surface water.

**KEYWORDS:** Low-Cost Activated Carbon, Muffle Furnace,  $Fe^{3+}$

## บทนำ

เหล็กมีความสำคัญต่อชีวิตมนุษย์เป็นอย่างมาก มนุษย์มีความต้องการเหล็กเพื่อสร้างเมทัลเลอียดต่าง หากขาดธาตุเหล็กจะทำให้เป็นโรคโลหิตจาง แต่เมื่อได้รับธาตุเหล็กในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้เหล็กก่อตัวเป็นตะกอน จะทำลายอวัยวะต่างๆ เช่น ตับ และตับอ่อน เป็นต้น ในภาคอุตสาหกรรม ถ้าในน้ำมีปริมาณเหล็กมากจะทำให้เกิดปัญหา เช่น น้ำจะขุ่น และเกิดตะกรันขึ้นภายในหม้อน้ำ การผลิตน้ำประปาถ้าไม่กำจัดเหล็กออกจะทำให้ท่ออุดตัน โรงงานผลิตกระดาษ เหล็กทำให้กระดาษมีสีเหลือง การผลิตเสื้อผ้า เหล็กทำให้เกิดจุดสีเหลืองบนเสื้อผ้า โรงงานผลิตอาหาร เหล็กทำให้รสชาติของอาหารเปลี่ยนไป เป็นต้น โดยค่ามาตรฐานน้ำบาดาลหรือน้ำบริโภคต้องมีเหล็กไม่เกิน 0.5 mg/L ค่าที่อนุโลมให้มีได้ไม่เกิน 1.0 mg/L การกำจัดเหล็กไอออนมีหลายวิธีเช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี การแยกด้วยไฟฟ้า การเติมอากาศ หรือการเติมออกซิเจน การใช้เยื่อเลือกผ่าน และการแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้มีข้อเสีย เช่น กำจัดโลหะได้ไม่สมบูรณ์ สารเคมีอุปกรณ์และเครื่องมือมีราคาแพง การตรวจสอบระบบยุ่งยาก ก่อให้เกิดสารพิษหรือของเสียอื่นๆ ตกค้างที่ต้องกำจัด กระบวนการดูดซับถูกพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และเชื่อถือได้สำหรับการกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษในน้ำเสีย ปัจจุบันสารดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ถ่านกัมมันต์ มีการพัฒนาการเพิ่มรูพรุนและสภาพพื้นผิวให้มีความสามารถและความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น งานวิจัยนี้เลือกถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับเหล็กไอออน ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมจากวัสดุเหลือใช้ในธรรมชาติ ถ่านกัมมันต์การค้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน

มีราคาสูง เพราะในกระบวนการผลิตต้องเผาที่อุณหภูมิสูง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ทำให้ถ่านกัมมันต์การค้ามีพื้นที่ผิวเป็นคาร์บอนเป็นจำนวนมาก จึงมีขีดจำกัดในการดูดซับ สามารถดูดซับสารโมเลกุลไม่มีขั้ว เช่น สีย้อม ไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น ไบโอฟีนอล เป็นต้น ส่วนความสามารถในการดูดซับสารเป็นโมเลกุลมีขั้ว ไอออนบวกและไอออนลบจะต่ำ (Maneechark & Kamjanakom, 2017) ประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร และเป็นเมืองเกษตรกร มีต้นไม้หลากหลายชนิดเป็นจำนวนมาก ในภาคครัวเรือนมีการนำเศษไม้หรือวัชพืชมาทำเป็นถ่านหุงต้มเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยถ่านหุงต้มมีกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากผลิตได้ในปริมาณมาก ราคาถูก ถ่านหุงต้ม 1 กิโลกรัม ราคา 20 บาท สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ประมาณ 0.8 กิโลกรัม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุดิบในการผลิตถ่านคาร์บอน 2 ชนิด คือ เผาถ่านคาร์บอนจากลูกไม้ที่ไม่ก่อประโยชน์เช่น ลูกหูกวาง ลูกสาระ ลูกยางใยขอ ลูกตีนเป็ด และลูกยางพารา วัตถุประสงค์อีกชนิด คือ ถ่านหุงต้มจากต้นสะแก และต้นกระถิน นำถ่านคาร์บอนมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ใช้การกระตุ้นทางกายภาพด้วยความร้อนโดยใช้ muffle furnace (Nandeshwar et al, 2016) เผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส (ไม่มากกว่าอุณหภูมิในการสันดาป) เพื่อปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวของถ่านให้มีหมู่คาร์บอนิลจำนวนมากขึ้น (Suliman et al., 2016; Zhang et al, 2016) เปรียบเทียบกับการกระตุ้นทางเคมีเพื่อเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Asadullah et al., 2014) กลไกการดูดซับไอออนของถ่านกัมมันต์ ถ่านจะใช้หมู่ฟังก์ชันที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนพื้นที่ผิว ซึ่งทำหน้าที่เป็นเบสลิควิส (Shen et al., 2008) และไอออน

ที่มีประจุบวก จะทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิส เป็นแรงระหว่างไอออนบวกกับลบ (Electrostatic interaction) (Gao et al., 2013) ดึงดูดกันด้วยพันธะโคออดิเนตโคเวเลนต์

งานวิจัยนี้จึงนำถ่านคาร์บอนซ์จากลูกไม้ หรือ ถ่านหุงต้มมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ราคาถูก (Maneechakr & Kamjanakom, 2017; Danish et al., 2013) นำมากระตุ้นด้วยความร้อนโดยใช้เตาเผาแบบอับอากาศ (Gao et al., 2013; Nandeshwar et al., 2016) และกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์การค้า (Fluka 05120, Sigma Aldrich) เพื่อกำจัด  $Fe^{3+}$  และศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของถ่านกัมมันต์ เช่น ปริมาณพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน และค่า  $pH_{pzc}$  (Nieto-Delgado & Rangel-Mendez, 2012) บนพื้นที่ผิว เป็นต้น และนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาการบำบัดเหล็กที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำด้วยวิธีการดูดซับ

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ราคาถูกจากวัสดุเหลือใช้
2. หาประสิทธิภาพในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  สภาวะที่เหมาะสม
3. ศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของถ่านกัมมันต์ เช่น ปริมาณพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน และค่า  $pH_{pzc}$  ของถ่านกัมมันต์
4. นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปกำจัดเหล็กไอออนในแหล่งน้ำ

## ประโยชน์ที่ได้รับ

ผลิตถ่านกัมมันต์ราคาถูกที่สามารถดูดซับเหล็กในแหล่งน้ำได้

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนซ์ คือ ลูกตีนเป็ด (*Cerbera odollam* Gaertn, COG) ลูกหูกวาง (*Terminalia catappa*, TC) ลูกยางใบซอ (*Ficus lyrata*, FL) ลูกสาละ (*Couroupita guianensis* Aubl, CGA) และลูกยางพารา (*Hevea brasiliensis*, HB) ถ่านคาร์บอนซ์จากถ่านหุงต้มจากต้นสะแก (*Combretum*

*quadrangulare*, CQ) และถ่านหุงต้มจากต้นกระถิน (*Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit, LL) สารละลาย  $Fe(III)$  ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ , UNIVAR) ความเข้มข้น 130 ppm สารละลาย  $I_2$  ความเข้มข้น ประมาณ 0.10 N ( $I_2$ , MERCK)  $H_3PO_4$  ความเข้มข้น ร้อยละ 30 โดยมวล ( $H_3PO_4$  65% w/w, MERCK) และ KOH (MERCK)

### 2. การวิเคราะห์คุณสมบัติโดยประมาณ

วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว ของวัตถุดิบทั้ง 5 ชนิด ตามวิธีของ ASTM D2867-95, D2866 -94 (ASTM, 1998)

### 3. การวิเคราะห์ $Fe(III)$

วิเคราะห์ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - visible spectrophotometer, Genesys 20) สำหรับการวิเคราะห์  $Fe(III)$  ใช้วิธีมาตรฐาน 1,10 - Phenanthroline วัดที่ความยาวคลื่น 510 nm

### 4. ศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านคาร์บอนซ์

นำลูกตีนเป็ด (COG) ลูกหูกวาง (TC) ลูกยางใบซอ (FL) และลูกสาละ (CGA) หั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ อบให้แห้งนำไปเผาในเตา muffle furnace ในภาวะอับอากาศภายใต้บรรยากาศ ที่ 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 - 3 ชั่วโมง บดถ่านคาร์บอนซ์ที่ได้ให้มีขนาดน้อยกว่า 400 mesh (COG401-COG503, TC401-TC503, FL401-FL503 และ CGA401-CGA503)

### 5. ศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านคาร์บอนซ์เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์

บดถ่านคาร์บอนซ์ ต้นสะแก (CQ) และต้นกระถิน (LL) ให้มีขนาดน้อยกว่า 400 mesh นำไปเผาในเตา muffle furnace ในภาวะอับอากาศภายใต้บรรยากาศ ที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 - 5 (CQ501-CQ505 และ LL501 - LL505)

**หมายเหตุ** ตัวอักษร คือ ชนิดของไม้ ตัวเลข 2 ตัวแรกคือ อุณหภูมิ ตัวเลขตัวสุดท้าย คือ จำนวนชั่วโมง เช่น FL451 คือ ถ่านคาร์บอนซ์ของลูกยางใบซอเผาที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

## 6. การวิเคราะห์การดูดซับ I<sub>2</sub>

ซั่งถ่านชนิดต่างๆ 0.5 กรัม เติม I<sub>2</sub> เข้มข้น 0.10 N 25 mL เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำมาไทเทรตกับสารละลาย Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> คำนวณปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ

## 7. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ Fe (III)

ปิเปตสารละลาย Fe (III) เข้มข้น 130 ppm 25.00 mL ลงบนถ่านแต่ละชนิด 0.10 กรัม เขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์ปริมาณ Fe (III) ที่เหลือ โดยคำนวณปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q<sub>e</sub>, mg/L) จากสมการที่ (1):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (1)$$

โดย C<sub>e</sub> เป็นความเข้มข้นของ Fe<sup>3+</sup> ที่สมดุล (mg/L), C<sub>0</sub> เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของ Fe<sup>3+</sup> (mg/L), V เป็นปริมาตรของสารละลาย Fe<sup>3+</sup> (L) และ M คือ มวลของถ่านกัมมันต์ (g)

## 8. การกระตุ้นถ่านด้วย H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

ซั่งถ่านชนิดต่างๆ 3 กรัม ผสมกับ H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ในอัตราส่วนของถ่าน : H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 (โดยมวล) กระตุ้นที่ 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ล้างจนเป็นกลาง (ACP401 – ACP503)

**หมายเหตุ:** ตัวเลขสองหลักแรก คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และตัวเลขหลักที่สาม คือ เวลา (ชั่วโมง)

## 9. การกระตุ้นถ่านด้วย KOH

ซั่งถ่านชนิดต่างๆ 3 กรัม กระตุ้นด้วย KOH อัตราส่วนถ่านต่อ KOH (โดยมวล) เป็น 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 ผ่ากระตุ้นที่ 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ล้างและปรับค่า pH ให้เป็นกลางด้วย 6 M HCl (ACK401 – ACK503)

## 10. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน

ศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR, Perkin Elmer spectrum100) นำถ่านกัมมันต์วัดด้วยหัวเพชร

## 11. วิเคราะห์พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุน (Specific surface areas, pore volumes และ pore size) ของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ด้วยการดูดซับและการคายออกของก๊าซ N<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Quantachrome Autosorb 1 ที่ -196 องศาเซลเซียส ภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์โดย scanning electron microscope (SEM S-4800; Hitachi) ต่อกับ X-ray spectrometer สำหรับ energy dispersive spectroscopy (EDS)

## 12. ศึกษาการหาประจุบนพื้นที่ผิว (pH<sub>pzc</sub>)

ซั่งถ่าน 0.10 กรัม ปิเปตสารละลาย pH Buffer 1 - 9 ในสารละลาย 0.10 N NaCl 25.00 mL เขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที วัดค่า pH ด้วยเครื่องวัดค่า pH (pH Eutech instruments, pH 700)

## 13. ศึกษาปริมาณหมู่ฟังก์ชันกรดรวมและเบสรวมด้วยวิธี Boehm Titration

ซั่งถ่าน 0.50 กรัม ปิเปตสารละลาย 0.10 N NaOH 0.1 N HCl 0.1 N NaHCO<sub>3</sub> และ 0.1 N Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ปริมาตรชนิดละ 25.00 mL เขย่า 150 รอบต่อนาที 24 ชั่วโมง กรอง NaOH NaHCO<sub>3</sub> และ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ที่เหลือไทเทรตกับสารละลาย HCl (วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันกรดรวม หมู่คาร์บอกซิลิก แลคโตนิก และฟีนอลิก ตามลำดับ) ซั่งถ่านอีก 0.50 กรัม ปิเปต 0.10 N HCl ปริมาตร 25.00 mL เขย่า 150 รอบต่อนาที 24 ชั่วโมง กรองและไทเทรตกับสารละลาย NaOH (วิเคราะห์หมู่เบสรวม)

## 14. วิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและน้ำผิวดินก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่าน LL502

ซั่งถ่าน LL502 4 กรัม เติมน้ำบาดาลปริมาตร 500 มิลลิลิตร ลงในถ่าน เขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที กรอง ทำซ้ำโดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็นน้ำผิวดิน นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านและที่ไม่ผ่านการดูดซับไปวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (III) รวมทั้งค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำ ค่า pH ค่าความกระด้าง (Hardness) และ คลอไรด์ (Cl<sup>-</sup>) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Methods Water and Waste Water 18<sup>th</sup> Edition 1992

## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 1. ผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ

จากตารางที่ 1 พบว่าลูกไม้ทั้ง 5 ชนิดมีความชื้นค่อนข้างมาก สารระเหยซึ่งมีปริมาณมากที่สุด แสดงว่ามีสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยที่อุณหภูมิสูงอยู่มาก ปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาจากลักษณะ

ภายนอกของลูกไม้ทั้ง 5 ชนิด พบว่า ลูกหูกวางและลูกยางใบซอจะคล้ายกัน คือ เปลือกนอกนิ่มแต่ข้างในแข็ง ส่วนลูกตีนเป็ดและลูกสาละจะคล้ายกัน คือ ลักษณะลูกใหญ่กว่าลูกหูกวาง แต่โครงสร้างคล้ายๆ กับลูกหูกวาง ซึ่งต่างจากลูกยางพาราจะมีเปลือกนอกแข็งแต่ข้างในจะค่อนข้างนิ่ม

ตารางที่ 1 แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของลูกไม้ต่างๆ แบบประมาณ

สมบัติทางกายภาพ	COG %w/w	TC %w/w	FL %w/w	CGA %w/w	HB %w/w
% ความชื้น	18.88	17.25	17.35	18.75	15.25
% เถ้า	4.65	3.46	3.55	4.23	2.76
% สารระเหย	50.83	59.65	59.1	52.87	63.74
% คาร์บอนคงตัว	25.64	19.64	20.00	24.15	18.25

### 2. ศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านคาร์บอน

จากตารางที่ 2 พบว่าถ่าน TC501 มีความสามารถในการดูดซับ  $I_2$  สูงสุด คือ 552.93 mg/g และมีค่าการดูดซับ  $Fe^{3+}$  สูงสุดโดยมีค่า  $q_e$  ของ  $Fe^{3+}$  เท่ากับ 23.67 mg/g รองลงมา คือ ถ่าน COG501 ดูดซับไอโอดีน 537.22 mg/g และดูดซับ  $Fe^{3+}$  21.25 mg/g ดังนั้นในลูกไม้จากทั้ง 5 ชนิดจึงเลือกถ่าน TC501 เพื่อใช้ในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ต่อไป

### 3. ศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านคาร์บอนเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์

เนื่องจากถ่านหุงต้มที่ได้ผ่านการเผาเป็นถ่านคาร์บอนแล้วจึงบดให้มีขนาดน้อยกว่า 400 mesh ในเบื้องต้นพบว่าถ่านจากต้นสะแก (CQ) ซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็งกว่าถ่านจากต้นกระถิน (LL) บดยากกว่า แสดงว่าจำนวนคาร์บอนในองค์ประกอบอยู่กันแน่นกว่า เมื่อหาความหนาแน่นของผงถ่านคาร์บอนพบว่า ถ่าน CQ มีความหนาแน่นมากกว่าถ่าน LL (0.47 และ 0.42 g/mL ตามลำดับ) ถ่าน CQ จึงมีความสามารถในการดูดซับทั้ง  $I_2$  และ  $Fe^{3+}$  น้อยกว่าถ่าน LL จากตารางที่ 3 พบว่าร้อยละการสูญเสียของถ่านจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ข้อมูลนี้นำมาพิจารณาถึงการสูญเสียวัตถุดิบถ่านไปเมื่อ

เวลาที่ใช้เผาขึ้น และความสามารถในการดูดซับที่มากขึ้น ถึงจุดคุ้มค่าต่อการผลิตหรือไม่

ถ่านคาร์บอนที่เผาที่ 500 องศาเซลเซียส 2-5 ชั่วโมง สามารถดูดซับ  $I_2$  และ  $Fe^{3+}$  ได้ไม่แตกต่างกัน ถ่าน LL503 สามารถดูดซับ  $I_2$  และ  $Fe^{3+}$  สูงสุด คือ 561.39 และ 28.91 mg/g ตามลำดับ แต่เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานจะเลือกถ่าน LL502 แทนซึ่งดูดซับได้น้อยลงเล็กน้อย เมื่อนำสารละลายที่ผ่านการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ของถ่านทุกชนิดมาทดสอบด้วย  $SCN^-$  และ  $[Fe^{III}(CN)_6]^{3-}$  ได้ผลการทดลองเหมือนกัน คือ ไม่ได้สารละลายสีแดงของ  $Fe(SCN)^{2+}$  และไม่ได้สารละลายสีน้ำเงินของ  $Fe^{3+}[Fe^{III}(CN)_6]$  แสดงว่า  $Fe^{3+}$  ถูกออกซิไดซ์ไปเป็น  $Fe^{2+}$  ดังนั้น  $Fe^{3+}$  ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์พื้นที่ผิวของถ่านให้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนมากขึ้นด้วย

ถ่านกัมมันต์การค้า (ACC) มีค่าไอโอดีนสูงสุด แสดงว่าถ่าน ACC มีพื้นที่ผิวและรูพรุนในการดูดซับมากที่สุด ส่วนถ่านคาร์บอนที่เผากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 - 5 ชั่วโมง มีค่าไอโอดีนต่ำกว่า แต่มีค่าความสามารถในการดูด  $Fe^{3+}$  สูงกว่า สรุปได้ว่าสภาพพื้นที่ผิวของถ่าน ACC มีความเข้มข้นต่ำกว่าสภาพพื้นที่ผิวของถ่านคาร์บอนที่เผากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 1 - 5 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 ความสามารถในการดูดซับ I<sub>2</sub> และ Fe<sup>3+</sup> ของถ่านคาร์บอนที่ผลิตจากผลของต้นไม้ต่างๆ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 -3 ชั่วโมง

ถ่านคาร์บอน	I <sub>2</sub> No. mg/g	ถ่านคาร์บอน	I <sub>2</sub> No. mg/g	Q <sub>s</sub> of Fe <sup>3+</sup> mg/g	ถ่านคาร์บอน	I <sub>2</sub> No. mg/g	Q <sub>s</sub> of Fe <sup>3+</sup> mg/g	ถ่านคาร์บอน	I <sub>2</sub> No. mg/g	Q <sub>s</sub> of Fe <sup>3+</sup> mg/g			
COG	316.33	TC	262.49	13.42	FL	295.14	10.52	CGA	222.56	7.95			
COG401	418.34	TC401	498.63	15.65	FL401	442.31	12.26	CGA401	420.91	12.63			
COG402	406.92	TC402	508.65	16.55	FL402	439.26	13.57	CGA402	404.37	15.65			
COG403	283.11	TC403	514.35	17.21	FL403	491.12	15.55	CGA403	443.64	16.66			
COG451	420.35	TC451	491.49	18.21	FL451	398.25	14.11	CGA451	398.33	15.23			
COG452	452.67	TC452	517.92	18.50	FL452	388.14	14.23	CGA452	375.56	15.04			
COG453	444.17	TC453	502.92	18.96	FL453	355.12	14.65	CGA453	366.99	15.35			
COG501	537.22	TC501	552.93	23.67	FL501	298.94	13.33	CGA501	372.09	14.22			
COG502	491.74	TC502	514.35	22.65	FL502	262.33	13.65	CGA502	386.59	14.36			
COG503	409.65	TC503	461.49	22.55	FL503	283.69	13.45	CGA503	372.96	13.99			
ความแม่นยำ													
(n=3, α =0.95)	<±2.17	-	<±3.56	<±0.58	-	<±4.23	<±0.74	-	<±3.38	<±0.89	-	<±4.44	<±0.62

ตารางที่ 3 ความสามารถในการดูดซับ  $I_2$  และ  $Fe^{3+}$  ของถ่านคาร์บอนซี Q และ LL ที่เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 – 5 ชั่วโมง

ถ่านคาร์บอนซี	Burn Loss (%)	$I_2$ No. (mg/g)	$q_e$ of $Fe^{3+}$ (mg/g)	ถ่านคาร์บอนซี	Burn Loss (%)	$I_2$ No. (mg/g)	$q_e$ of $Fe^{3+}$ (mg/g)
CQ	-	307.82± 1.25	15.61± 0.85	LL	-	484.17± 0.21	25.32± 0.22
CQ501	15.22	380.01± 2.25	20.23± 0.65	LL501	18.60	498.76± 0.08	25.60± 0.21
CQ502	20.45	397.98± 2.03	20.15± 0.55	LL502	21.17	505.69± 0.07	28.18± 0.23
CQ503	22.33	580.33± 3.25	21.01± 0.47	LL503	23.39	561.39± 0.15	28.91± 0.19
CQ504	23.35	590.56± 1.78	20.47± 0.65	LL504	25.00	512.17± 0.22	28.35± 0.19
CQ505	24.67	535.88± 1.56	19.35± 0.56	LL505	29.20	500.55± 0.19	28.04± 0.18
ACC	-	1057.55 ± 0.11	11.93± 0.25				
ความแม่นยำ							
(n=3,	<±1.25	<±3.25	<±0.85	-	<±1.78	<±0.22	<±0.23
$\alpha = 0.95$ )							

#### 4. ผลการกระตุ้นทางเคมีของถ่านด้วย $H_3PO_4$ และ KOH

การกระตุ้นถ่านคาร์บอนซี ด้วยกรด  $H_3PO_4$  ความเข้มข้น ร้อยละ 30 โดยมวล ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า ถ่าน TC501 กระตุ้นที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส 1 - 3 ชั่วโมง (ตารางที่ 4) ทุกอัตราส่วนถ่านต่อกรดโดยมวล 1:2 - 1:5 ให้ค่า  $I_2$  No. ในช่วง 501.93- 560.89 mg/g ซึ่งให้ค่าไม่ต่างจาก TC501 (552.93 mg/g ในตารางที่ 2) จึงไม่คุ้มค่าต่อการกระตุ้น ส่วนถ่าน LL502 กระตุ้นที่ 400 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อกรดโดยมวล 1:5 ให้ค่า  $I_2$  No. 752.00 mg/g ซึ่งให้ค่ามากกว่า LL502 (505.69 mg/g ในตารางที่ 3) ส่วนการกระตุ้นด้วย KOH ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าที่ถ่านคาร์บอนซีจากลูกหูกวาง TC501 กระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อเบสโดยมวล 1:3 ให้ค่า  $I_2$  No. สูงสุด 548.02 mg/g แต่ก็น้อยกว่า TC501 (552.93 mg/g) จึงไม่คุ้มค่าต่อการกระตุ้น ส่วนถ่าน LL502 กระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อเบสโดยมวล 1:3 ให้ค่า  $I_2$  No. 522.78 mg/g ซึ่งให้ค่ามากกว่า LL502 (505.69 mg/g) จากการกระตุ้นถ่านคาร์บอนซี ด้วยกรด  $H_3PO_4$  เข้มข้น ร้อยละ 30 โดยมวล ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าที่ถ่าน TC501 กระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อเบสโดยมวล 1:5 ให้ค่า  $q_e$  ของ  $Fe^{3+}$  24.66 mg/g ซึ่งมีค่ามากกว่า TC501 (23.67 mg/g)

ส่วน LL502 กระตุ้นที่ 400 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อกรดโดยมวล 1:5 ให้ค่า  $q_e$  ของ  $Fe^{3+}$  28.35 mg/g ซึ่งมีค่ามากกว่า LL502 (28.18 mg/g) และจากการกระตุ้นถ่านคาร์บอนซี ด้วยกรด KOH ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าที่ถ่านคาร์บอนซีจากลูกหูกวาง TC501 กระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อเบสโดยมวล 1:4 ให้ค่า  $q_e$  ของ  $Fe^{3+}$  25.03 mg/g ซึ่งมีค่ามากกว่า TC501 (23.67 mg/g) ส่วนถ่าน LL502 กระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อเบสโดยมวล 1:5 ให้ค่า  $q_e$  ของ  $Fe^{3+}$  28.55 mg/g ซึ่งมีค่ามากกว่า LL502 (28.18 mg/g) สรุปการกระตุ้นด้วยกรด  $H_3PO_4$  เข้มข้น ร้อยละ 30 โดยมวล และ KOH สามารถหาอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะทำให้ความสามารถในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ได้มากขึ้น แต่ค่าความสามารถในการดูดซับมากกว่าถ่านคาร์บอนซีที่ไม่ถูกกระตุ้นเพียงเล็กน้อย จึงไม่คุ้มค่าในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางเคมี ดังนั้นจึงเลือกถ่าน LL502 ในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ต่อไป ทั้งนี้การกระตุ้นด้วยกรด  $H_3PO_4$  และ KOH ที่อัตราส่วนอื่นๆ มีค่าการดูดซับ  $Fe^{3+}$  น้อยกว่าถ่านไม่กระตุ้น อาจเป็นเพราะปริมาณกรด/เบสอาจจะน้อยเกินไปไม่เพียงพอให้เกิดการกัดกร่อน หรือปริมาณกรด/เบสมากเกินไปอาจจะไปทำลายพื้นที่ผิวทั้งหมดไม่เกิดรูพรุน อีกเหตุผลน่าจะเกิดจากการที่ต้องล้างถ่านให้มีสภาพเป็นกลางอาจจะทำให้ถ่านที่ขนาดเล็กมากๆ หลุดไป

ตารางที่ 4 ความสามารถในการดูดซับ  $I_2$  และ  $Fe^{3+}$  ของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 – 3 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนถ่านต่อ  $H_3PO_4$  และ KOH ต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณถ่าน: กรด/เบส	$I_2$ No. (mg/g)				$q_e$ of $Fe^{3+}$ (mg/g)			
			TC501		LL502		TC501		LL502	
			$H_3PO_4$	KOH	$H_3PO_4$	KOH	$H_3PO_4$	KOH	$H_3PO_4$	KOH
400	60	1:2	501.93	474.13	373.54	465.68	23.12	24.00	26.25	27.15
		1:3	529.02	449.50	508.40	453.66	23.01	24.12	25.25	27.36
		1:4	529.02	440.26	641.08	474.69	22.98	24.06	25.17	27.44
		1:5	532.21	437.18	678.05	429.63	22.65	23.65	24.15	27.54
	120	1:2	513.09	474.13	425.75	462.68	23.00	24.69	26.22	27.36
		1:3	524.24	486.44	645.43	483.71	22.95	24.78	25.36	27.10
		1:4	538.58	492.60	625.85	468.68	22.54	24.00	25.68	27.65
		1:5	538.58	449.50	699.80	438.64	22.32	24.12	25.35	27.00
	180	1:2	522.65	477.20	449.67	465.68	21.65	23.69	27.35	27.36
		1:3	544.96	498.76	630.20	450.66	21.85	23.71	27.65	27.65
		1:4	546.55	467.97	725.90	405.59	21.65	23.89	28.00	27.01
		1:5	548.14	406.39	752.00	363.53	21.03	22.96	28.35	27.11
500	60	1:2	525.84	449.50	353.97	408.60	24.36	25.01	28.15	28.55
		1:3	538.58	517.23	523.62	465.68	24.15	25.12	28.23	28.45
		1:4	554.52	486.44	643.25	498.73	24.00	24.99	27.23	27.65
		1:5	559.30	495.68	708.50	492.72	24.66	24.85	27.55	26.52
	120	1:2	508.31	409.47	417.05	333.49	24.12	24.36	26.98	26.22
		1:3	548.14	538.78	534.50	522.78	24.03	24.65	25.21	26.23
		1:4	551.33	541.86	634.55	474.69	24.00	25.03	25.99	26.87
		1:5	560.89	529.54	671.53	513.75	24.00	25.00	25.65	26.84
	180	1:2	514.68	511.07	390.95	405.59	23.35	24.36	26.12	25.65
		1:3	540.18	548.02	477.95	522.76	23.25	24.12	26.23	25.36
		1:4	560.89	535.70	645.43	480.70	23.32	24.37	25.98	25.55
		1:5	557.70	530.16	669.35	528.77	23.33	23.66	25.23	24.98

ตารางที่ 5 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันของถ่านชนิดต่างๆ และค่าประจุบนพื้นผิว ( $pH_{pzc}$ )

Adsorbent	ปริมาณหมู่ฟังก์ชัน (mequiv./g)					$pH_{pzc}$	pH in $Fe^{3+}$	
	Carboxylic	Lactonic	Phenolic	Total acidic	Total basic			
ACC	0.0343	0.0643	0.6043	0.7029	0.4522	1.1551	5.55	2.75
LL	0.0112	0.0834	0.4686	0.5635	1.3640	1.7191	8.29	2.98
LL502	0.0075	0.2222	0.4088	0.6385	1.6262	2.2647	8.49	3.27
APLL502	0.0073	0.2388	0.3791	0.6252	1.7645	2.3897	5.65	3.03

หมายเหตุ APLL502 คือ ถ่านคาร์บอนไนซ์จากต้นกระถิน LL502 กระตุ้นที่ 400 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อกรดโดยมวล 1:5 ให้ค่า  $q_e$  ของ  $Fe^{3+}$  สูงที่สุด



## 5. การหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันและค่า $pH_{pzc}$

จากตารางที่ 5 พบว่าถ่านกัมมันต์การค้า (ACC) มีหมู่กรดทั้งหมด (0.7029 mequiv./g) มากกว่า หมู่เบสรวม (0.4522 mequiv./g) ซึ่งข้อมูลสอดคล้องกับค่า  $pH_{pzc}$  ของถ่าน ACC ซึ่งน้อยกว่า 7 (5.55) แสดงว่าบนพื้นที่ผิวของถ่าน ACC เป็นกรดส่วนถ่านคาร์บอนไนซ์มีหมู่กรดทั้งหมด (0.5635 mequiv./g) น้อยกว่าหมู่เบสรวม (1.3640 mequiv./g) ซึ่งข้อมูลสอดคล้องกับค่า  $pH_{pzc}$  ของคาร์บอนไนซ์ซึ่งมากกว่า 7 (8.29) แสดงว่าบนพื้นที่ผิวของถ่านเป็นเบส เมื่อนำถ่าน LL มากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง เป็น LL502 จากข้อมูลยังพบว่ากระตุ้นด้วยความร้อนมีผลทำให้บนพื้นที่ผิวของถ่านมีหมู่คาร์บอกซิลลดลง หมู่ฟีนอลลดลง และหมู่แลคโตนิกเพิ่มขึ้น และยังพบว่ากระตุ้นด้วยความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ยังทำให้หมู่กรดเบสรวมเพิ่มขึ้น และเมื่อนำ LL502 กระตุ้นด้วยกรด  $H_3PO_4$  ทำให้หมู่ฟีนอลลดลง หมู่แลคโตนิกเพิ่มขึ้น หมู่กรดเบสรวมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งหมู่เหล่านี้จะเป็นหมู่ฟังก์ชันในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับความสามารถในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อนำถ่านคาร์บอนไนซ์มากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และนำมากระตุ้นต่อด้วย  $H_3PO_4$  ทำให้ความสามารถในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  มากขึ้น เมื่อเทียบกับถ่าน LL

จากการทดลองการหาค่า  $pH_{pzc}$  ของถ่าน ACC เท่ากับ 5.55 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลายของถ่านที่มี  $Fe^{3+}$  (2.75) แสดงว่า บนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์การค้ามีสภาพเป็นลบ ( $pH < pH_{pzc}$ ) จึงสามารถดูดซับ  $Fe^{3+}$  ส่วนถ่าน LL มีค่า  $pH_{pzc}$  (8.29) น้อยกว่าค่า  $pH_{pzc}$  ถ่าน LL502 (8.49) พบว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนจะทำให้ค่า  $pH_{pzc}$  ของถ่านกัมมันต์สูงกว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ (Nieto-Delgado & Rangel-Mendez, 2012) และถ่าน APLL502 ซึ่งเป็นการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดจึงทำให้มีค่า  $pH_{pzc}$  เป็น 5.65 และถ่านทุกตัวมีค่า  $pH_{pzc}$  มากกว่าค่า pH ของถ่านที่มีสารละลาย  $Fe^{3+}$  (2.98– 3.27) แสดงว่า บนพื้นที่ผิวของถ่านทุกตัวมีสภาพเป็นลบ ( $pH < pH_{pzc}$ ) จึงสามารถดูดซับไอออนบวก  $Fe^{3+}$  ได้

## 6. ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตร และขนาดของรูพรุน

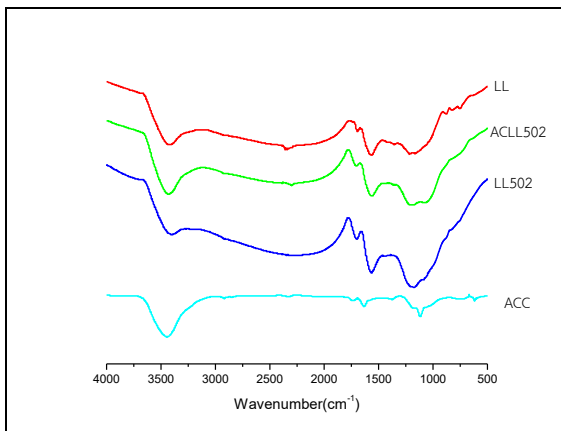
จากการวิเคราะห์ค่าขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของถ่านแต่ละชนิด วิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET (ตารางที่ 6) พบว่าถ่าน LL ที่เผากระตุ้นด้วยความร้อนเป็น LL502 ทำให้มีพื้นที่ผิว (surface area data ( $m^2/g$ ) จาก Multipoint BET มากกว่า แสดงว่าการเผากระตุ้นด้วยความร้อนทำให้ถ่าน LL502 มีความสามารถในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  มากกว่า ส่วนถ่าน ACC มีขนาดพื้นที่ผิวมากกว่าถ่านชนิดอื่น แสดงว่าถ่าน ACC มีขนาดรูพรุนมากกว่าแต่เมื่อพิจารณาจากความสามารถในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ของถ่าน ACC พบว่าดูดซับได้น้อยกว่าถ่านชนิดอื่นๆ สรุปได้ว่าถ่าน ACC มีขนาดพื้นที่ผิวและรูพรุนมากกว่าแต่ความสามารถในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  น้อยกว่าถ่าน LL502 เพราะหมู่ฟังก์ชันกรดเบสรวมบนพื้นที่ผิวของ ACC น้อยกว่า การกระตุ้นด้วยความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ทำให้หมู่คาร์บอกซิลลดลง (หลุดออกไปเป็น  $CO_2$  เมื่อให้ความร้อน) หมู่แลคโตนิกเพิ่มขึ้นอย่างมาก (การจัดโครงสร้างจากหมู่ไฮดรอกซีเป็นคาร์บอนิล) และหมู่ฟีนอลลดลง จึงทำให้หมู่กรดรวมสูงขึ้น เมื่อเทียบกับถ่านคาร์บอนไนซ์ (Soudani et al., 2013; Asadullah et al., 2014) และยังทำให้พื้นที่ผิวของถ่านที่ถูกกระตุ้นสูงกว่าถ่าน CC (Nandeshwar et al., 2016; Suliman et al., 2016; Zhang et al., 2016)

ตารางที่ 6 ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตร และขนาดของรูพรุน ของถ่านชนิดต่างๆ

Adsorbent	The textural properties of prepared adsorbents		
	Surface area ( $m^2/g$ )	Pore volume ( $cm^3/g$ )	Pore size (Å)
ACC	901.14	1.58	5.55
LL	86.9	0.08	2.99
LL502	247.3	0.08	3.96
APLL502	262.1	0.07	2.97

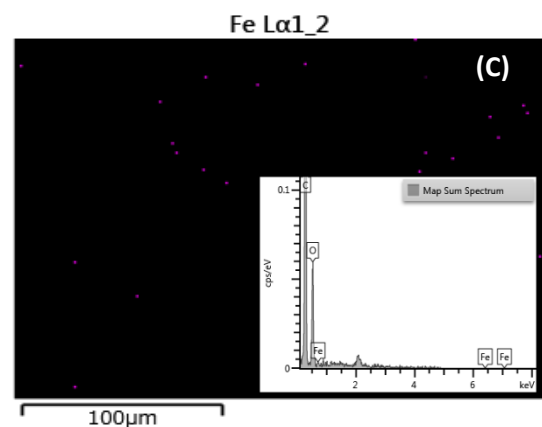
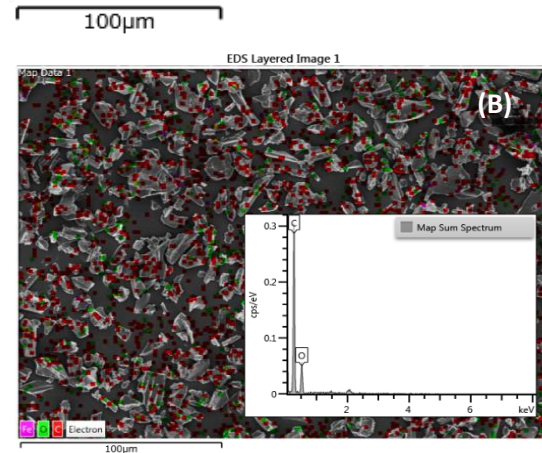
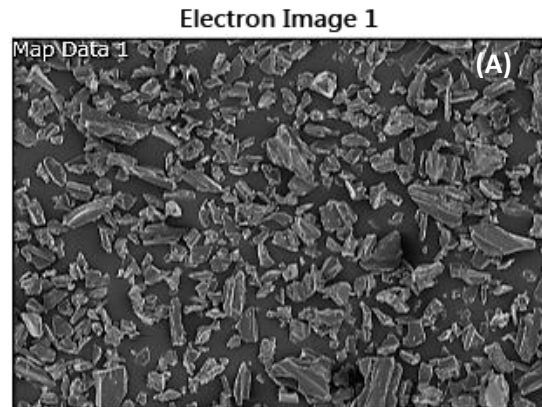
## 7. ผลจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านด้วยเครื่อง FT-IR

จากรูปที่ 1 การศึกษาหาชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่าน ACC LL LL502 และถ่านกัมมันต์ APLL502 จากสเปกตรัม IR พบ OH และ N-H stretching ที่ 3500 C-H stretching ที่ 2900 และ C=O stretching ที่ 1600  $\text{cm}^{-1}$  แสดงว่าบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก แลคโตนิก ฟีนอลิกและหมู่ฟังก์ชันเบส เช่น หมู่อะมิโน



รูปที่ 1 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของนำถ่านกัมมันต์การค้า (ACC) ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ได้จากต้นกระถิน (LL) ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (LL502) และ ถ่าน LL502 ที่กระตุ้นด้วยกรด  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (APLL502) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำถ่านคาร์บอนไนซ์ที่กระตุ้นด้วยความร้อน 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (LL502) มาดูดซับ  $\text{Fe}^{3+}$  จะพบ  $\text{Fe}^{3+}$  บนพื้นผิวของถ่านซึ่งยืนยันได้ด้วยผลภาพถ่าย SEM และ ผล X-ray ร่วมกับ EDS



รูปที่ 2 (A) ภาพถ่าย SEM และ EDS ของถ่าน LL502 (B) X-RAY ของถ่าน LL502 ที่นำไปดูดซับ  $\text{Fe}^{3+}$  และ (C) EDS ของ  $\text{Fe}^{3+}$  บนถ่าน LL502

## 8. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและน้ำผิวดินก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่าน LL502

จากการนำน้ำบาดาลและน้ำผิวดินมาวิเคราะห์ (ตารางที่ 7) พบว่าค่า pH ค่า Hardness และปริมาณ  $\text{Cl}^-$  มีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค ส่วนค่าปริมาณ Fe เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้

บริโศค เมื่อนำน้ำบาดาลไปดูดซับด้วยถ่าน LL502 ปริมาณ Fe ลดลงจาก 2.5 mg/L เป็น 0.05 mg/L คิดเป็นร้อยละ 98 สำหรับน้ำผิวดิน ปริมาณ Fe ลดลงจาก 2 mg/L เหลือเพียง 0.05 mg/L คิดเป็นร้อยละ 97.5 ซึ่งทำให้หลังการดูดซับน้ำด้วยถ่านมีปริมาณ Fe ไม่เกินมาตรฐาน

ถ่าน LL502 ทำให้ค่า Hardness ลดลง และปริมาณ  $Cl^-$  ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวของ

ถ่าน LL502 มีค่า  $pH_{pzc}$  มากกว่า pH ของน้ำบาดาล และน้ำผิวดิน แสดงว่าพื้นผิวของถ่านเป็นลบ ไอออนต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำเช่น  $Ca^{2+}$   $Mg^{2+}$  และ  $Fe^{2+}$  ถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านได้ ส่วนการดูดซับไอออนลบ  $Cl^-$  ดูดได้เพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 7 ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านคาร์บอน LL502

ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำ	น้ำบาดาล		น้ำผิวดิน		มาตรฐานน้ำบริโศค	
	ก่อนเติมถ่าน	หลังเติมถ่าน	ก่อนเติมถ่าน	หลังเติมถ่าน	ค่าที่ยอมรับ	ค่าสูงสุดที่อนุโลม
	LL502	LL502	LL502	LL502		
pH	7.04	7.15	7.11	7.10	7.0-8.5	6.5-9.2
Hardness (mg $CaCO_3/L$ )	250	50	82	50	< 300	500
$Cl^-$ (mg/L)	95	88	70	77	< 250	600
Fe (mg/L)	2.5	0.05	2.0	0.05	< 0.5	1.0

หมายเหตุ แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรฐานการในทางวิชาการสำหรับการป้องกัน ด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 125 ตอนพิเศษ 85 ลงวันที่ 21 พฤษภาคม 2552

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเหล็ก (III) เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น

ตัวดูดซับ	$q_e$	references
$Fe_3O_4@SiO_2-NH_2$	20.66 mg $Fe^{3+}/g$	Meng et al., 2017
CQ501	21.13 mg $Fe^{2+}/g$	Maneechakr et al., 2017
เปลือกเฮเซลนัท	13.59 mg $Fe^{3+}/g$	Sheibani et al, 2012
LL502	28.18 mg $Fe^{3+}/g$	Present study
TC501	23.67 mg $Fe^{3+}/g$	Present study

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ราคาถูก โดยใช้วัตถุดิบจากลูกไม้ที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ เช่น ลูกตีนเป็ด (COG) ลูกหูกวาง (TC) ลูกยางใบซอ (FL) ลูกสาละ (CGA) และลูกยางพารา (HB) โดยการเผากระตุ้นด้วยความร้อน พบว่า ถ่านคาร์บอนจากลูกหูกวางเผากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (TC501) สามารถดูดซับ  $Fe^{3+}$  ได้ 23.67 mg/g วัตถุดิบอีกชนิดคือนำถ่านหุงต้มจากต้นสะแก (CQ) และ ถ่านหุงต้มจากต้นกระถิน (LL) ในพื้นที่ เผากระตุ้นด้วยความร้อน พบว่าถ่านคาร์บอนจากต้นกระถินเผากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (LL502) สามารถดูดซับ  $Fe^{3+}$  ได้ 28.18 mg/g นำถ่านคาร์บอนมากระตุ้นเผาทางเคมีด้วย  $H_3PO_4$

ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล และ KOH พบว่าผลการกระตุ้นสภาวะที่ดีที่สุดดูดซับเหล็กได้มากกว่าถ่าน LL502 เพียงเล็กน้อย จึงไม่คุ้มค่าต่อการกระตุ้น จึงเลือกถ่าน LL502 ในการดูดซับเหล็ก สมบัติทางกายภาพของพื้นที่ผิวของ LL502 พบว่าถ่านหุงต้มกระตุ้นด้วยความร้อน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $S_{Bet}$ ) และปริมาตรรูพรุนรวม ( $V_t$ ) เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น  $pH_{pzc}$  มากกว่าเดิม และมากกว่า pH ของสารละลาย รวมทั้ง ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันกรดเบสรวมเพิ่มมากขึ้น ทำให้ถ่าน LL502 ดูดซับ  $Fe^{3+}$  ได้ดีกว่าถ่าน LL นำถ่านไปประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำ  $Fe^{3+}$  ในน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน ถ่าน LL502 สามารถกำจัด  $Fe^{3+}$  ได้สูงถึงร้อยละ 98

## ข้อเสนอแนะ

ถ่านคาร์บอนที่ขนาดอนุภาคต่ำกว่า 400 mesh มีความสามารถในการกำจัดเหล็กก่อนข้างสูง งานวิจัยนี้อาจจะไม่จำเป็นต้องเผากระตุ้นที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณสุรชัย กาญจนาคม ที่ช่วยอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์ BET SEM X-RAY และ EDS ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่กรุณาให้ความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน

## เอกสารอ้างอิง

Asadullah, M., Jahan, I., Ahmed, M.B., Adawiyah, P., Malek, N.H. and Rahman, M. S. 2014. Preparation of microporous activated carbon and its modification for arsenic removal from water. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 20: 887-896. doi:10.1016/j.jiec.2013.06.019

Danish, M., Hashim, R., Ibrahim, M.M. and Sulaiman, O. 2013. Effect of acidic activating agents on surface area and surface functional groups of activated carbons produced from Acacia mangium wood. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 104: 418-425. doi: 10.1016/j.jaap.2013.06.003

Gao, Q., Liu, H., Cheng, C., Li, K.Y., Zhang, J., Zhang, C.L. and Yiran Li, Y. 2013. Preparation and characterization of activated carbon from wool waste and the comparison of muffle furnace and microwave heating methods. **Powder Technology**. 249: 234-240. doi:10.1016/j.powtec. 2013.08.029

Maneechakr, P. and Karnjanakom, S. 2017. Adsorption behaviour of Fe(II) and Cr(VI) on activated carbon: Surface chemistry, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. **The Journal of Chemical Thermodynamics**. 106: 104 -112. doi:10.1016/j.jct.2016.11.021

Meng, C., Zhikun, W., Qiang, L., Chunling, L., Shuangqing, S. and Songqing, H. 2017. Preparation of amino-functionalized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@mSiO<sub>2</sub> core-shell magnetic nanoparticles and their application for aqueous Fe<sup>3+</sup> removal. **Journal of Hazardous Materials**. 341: 198-206. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.07.062

Nandeshwar, S.N., Mahakalakar, A.S., Gupta, R.R. and Kyzas, G.Z. 2016. Green activated carbons from different waste materials for the removal of iron from real wastewater samples of Nag River, India. **Journal of Molecular Liquids**. 216: 688-692. doi:10.1016/j.molliq.2015.12.065

Nieto-Delgado, C. and Rangel-Mendez, J. R. 2012. Anchorage of iron hydro(oxide) nanoparticles onto activated carbon to remove As(V) from water. **Water Research**. 46(9): 2973-2982. doi:10.1016/j.watres.2012.03.026

Sheibani, A., Shishehbor, M.R. and Alaei, H. 2012. Removal of Fe(III) ions from aqueous solution by hazelnut hull as an adsorbent. **International Journal of Industrial Chemistry**. 3: 1-4.

Shen, W., Li, Z. and Liu, Y. 2008. Surface Chemical Functional Groups Modification of Porous Carbon. **Recent Patents on Chemical Engineering**. 1: 27-40.

Soudani, N., Souissi-najar, S. and Ouederni, A. 2013. Influence of Nitric Acid

Concentration on Characteristics of Olive Stone Based Activated Carbon. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. 21(12): 1425-1430. doi:10.1016/S1004-9541(13)60638-2

Suliman, W., Harsh, J.B., Abu-Lail, N.I., Fortuna, A.M., Dallmeyer, I. and Garcia-Perez, M. 2016. Modification of biochar surface by air oxidation: Role of pyrolysis temperature. **Biomass and Bioenergy**. 85: 1-11. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.030

Zhang, D., Huo, P. and Liu, W. 2016. Separation Science and Engineering: Behavior of phenol adsorption on thermal modified activated carbon. **Chinese Journal Of Chemical Engineering**. 24: 446-452. doi:10.1016/j.cjche.2015.11.022