



# การเตรียมและศึกษาถ่านกัมมันต์จากเปลือก และเปลือกเมล็ดลิ้นจี่โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี Preparation and Characterization of Activated Carbons from Litchi Chinensis Shells and Seeds by Chemical Activation Method

: เกศศิริ เหล่าเชิงสุวรรณ  
: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาเคมีพื้นฐาน  
: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย  
: E-mail: katsiri\_lao@utcc.ac.th

## บทคัดย่อ\*

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ซึ่งเป็นสารชีวมวลเหลือทิ้งจากการกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมการแปรรูปผลไม้กระปองในประเทศไทย โดยการกระตุ้นทางเคมี การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่เตรียมได้ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ กระบวนการครั่นในเซนตามด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการกระตุ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ความพรุนสูง จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ซึ่งได้แก่ ชนิดของสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อปริมาณวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจะถูกนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพเพื่อทดสอบความพรุน ซึ่งสามารถทำได้โดยวิเคราะห์การดูดซับที่สภาวะแก๊ส และของเหลว ในการทดสอบการดูดซับที่สถานะแก๊ส ทำโดยนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นไปวัดพื้นที่ผิว จำเพาะ ปริมาณรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ด้วยวิธี Nitrogen Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ 77 K ด้วยเครื่อง Autosorp (BEL MINISORP) คำนวณโดยใช้สมการของ BET สำหรับ

\* ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนส่งเสริมงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

การทดสอบการดูดซึบที่สถานะของเหลวทำโดยนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นไปวัดค่าการดูดซึบไอโอดีน โดยแสดงเป็นค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/g) จากการทดลอง พบว่า สมภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี ได้แก่ การใช้  $H_3PO_4$  เป็นสารกระตุน อัตราส่วนระหว่างสารกระตุนต่อปริมาณเปลือกและเมล็ดลินจีที่ใช้ คือ 3:1 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุน คือ 600 °C และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่สมภาวะดังกล่าวได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดเท่ากับ 989 mg/g พื้นที่ผิวจำเพาะ BET เท่ากับ  $1,195.47 \text{ m}^2/\text{g}$  และปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ  $0.85 \text{ cm}^3/\text{g}$  ส่วนไอโซเทอมของการดูดซึบก๊าซในไตรเจนมีลักษณะเป็นไอโซเทอมแบบ Type I นอกจากนี้ ได้ศึกษาและปรับปรุงเพิ่มสมบัติในการดูดซึบพื้นที่ผิว โครงสร้างรูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นกับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า พบว่าเปลือกและเมล็ดลินจีมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์มากกว่า 600 mg/g และมีร้อยละความชื้นน้อยกว่า 8 ตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนดไว้

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์ เปลือกลินจี เมล็ดลินจี การกระตุนทางเคมี ค่าไอโอดีนนัมเบอร์

## Abstract\*

The objective of this research is the preparation of activated carbons from Litchi Chinensis shells and seeds, a biomass waste of significant amounts in the fruit canning industry in Thailand, by a chemical activation method. Activated carbons from Litchi Chinensis shells and seeds were prepared in a two step processes of carbonization and chemical activation. The influence of activation condition variables such as activation reagent, activation reagent/precursor ratio, activation temperature and activation time were investigated to find the optimum condition. The quality of the derived activated carbons is characterized in terms of their physical properties of absorption using different analytical methods for liquid and gas phase adsorption. In the gas adsorption test, the surface area, total pore volume and average pore diameters of the derived activated carbons were measured by Nitrogen Adsorption Isotherms at 77 K (BET method) using an Autosorp (BEL MINISORP). For the liquid absorption test, the adsorption quality of the derived activated carbons was evaluated in terms of iodine adsorption capacity (Iodine Number, mg/g) reflecting the surface area. The optimum condition from the experimental result was:  $H_3PO_4$  used as an

\* This research was funded from the University of the Thai Chamber of Commerce

activation reagent and  $H_3PO_4$ /Litchi Chinensis shells and seeds in a ratio of 3:1 by weight, an activation temperature of 600 °C and an activation time of 2 hrs. The characteristics of the derived activated carbon produced at optimum condition were: iodine number of 989 mg/g, BET surface area of 1,195.47  $m^2/g$ , and total pore volume of 0.85  $cm^3/g$ . The nitrogen absorption isotherm of the derived activated carbon exhibited a **Type I**. Moreover the commercial activated carbons used to compare the absorption quality, the surface area, the pore structure and iodine number with Litchi Chinensis shells and seeds activated carbon, were reported. Activated carbons obtained from Litchi Chinensis shells and seeds demonstrate a good quality for use as an activated carbon because the iodine numbers are more than 600 mg/g and the moisture contents (%) was less than 8%, the optimum value considered by the Thai Industrial Standards Institute.

**Keywords:** Activated Carbons, Litchi Chinensis Shell, Litchi Chinensis Seeds, Chemical Activation Method, Iodine Numbers

## บทนำ

ในระบบการผลิตของอุตสาหกรรมการแปรรูปผลไม้กระป๋องในประเทศไทย จะมีของเลี้ยงพากเปลือกและเมล็ดผลไม้ ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากของเลี้ยงเหล่านี้เมื่อเก็บไว้ระยะหนึ่งจะเกิดการหมักทำให้เกิดกลิ่นเน่าเหม็น ซึ่งจะส่งผลต่อสภาวะแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้อยู่อาศัยโดยรอบ และเมื่อต้องการทำจัดทิ้งก็จะต้องมีการขนย้ายไปทิ้งหรือเผาทำลาย ซึ่งจะเกิดค่าใช้จ่ายตามมา ดังนั้นเพื่อเป็นการลดภาระในการกำจัดทิ้ง และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือทิ้ง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเปลือก และเมล็ดลิ้นจี่ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการใช้ทรัพยากรถวายในประเทศไทยให้คุ้มค่ามากที่สุดในอีกหนทางหนึ่ง โดยการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพ หรือประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ โดยการนำเข้าวัตถุดินที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ซึ่งทำให้วัตถุดินนั้นมีโครงสร้างเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวภายในสูง จึงมีคุณสมบัติในการดูดซับสูง วัตถุดินที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีทรายชนิด ส่วนใหญ่มักเป็นพากอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน เป็นองค์ประกอบ มีปริมาณสารระเหยต่ำ คุณสมบัติคงที่ ราคาถูก และหาได้ง่าย เช่น พากเซลลูโลส ที่มาจากการพืช และต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลือย ชังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีพอกถ่านหิน เช่น ลิกโนต์ แอนตราไซด์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดินที่มาจากการลัตต์ เช่น กระดูกสัตว์ เข้าสัตต์ เป็นต้น (Antal, et al.,

ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 1 เป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากกลามะพร้าว ชื่อมาจากการบดวิชัท คาร์บอนิกาญจน์ จำกัด กรุงเทพมหานคร ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 2 เป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากถ่านไม้ ชื่อมาจากการบดวิชัทอิตลาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

### การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

เปลือกและเมล็ดลินจีที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จะถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ ในสารชีวนิตรตามวิธีการของ ASTM (American Standard for Testing Materials) เพื่อหาระยะห่างความชื้น ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM – D 2867-95 (ASTM Committee on Standards, 1998b) ปริมาณสารระเหย ตาม มาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM – D 5832-95 (ASTM Committee on Standards, 1998d) เงา ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM – D 2866-95 (ASTM Committee on Standards, 1998c) และคาร์บอนคงตัว (คำนวณโดย ปริมาณ คาร์บอนคงตัว = 100 – ร้อยละเงา – ร้อยละสารระเหย)

### การหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%Yield)

$$\% \text{ Yield} = \frac{(W_1 - W_4)}{W_1} \times 100$$

$W_1$  = น้ำหนักเปลือกและเมล็ดลินจีก่อนการทำ Carbonization

$W_4$  = น้ำหนักเปลือกและเมล็ดลินจีหลังการทำ Carbonization (ล้างน้ำสารกระดับออก)

### การหาค่าร้อยละการได้คืนของสารกระดับ (% Activation Reagent Recovery)

ค่าร้อยละการได้คืนของสารกระดับ ซึ่งแสดงถึงปริมาณของสารกระดับ (Activation Reagents) ที่ยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์หลังจากการกระดับ

$$\% ARR = \frac{(W_3 - W_4)}{W_2} \times 100$$

$W_2$  = น้ำหนักของสารกระดับ ( $ZnCl_2$ )

$W_3$  = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีหลังการทำ Carbonization (ยังไม่ล้างเอาสารกระดับออก)

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับแก๊สในไตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส (77 K)

โดยเป็นการนำเอาสมการ BET (Brunauer Emmett Teller) (Rouquerol, Rouquerol and Sing, 1999) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะปริมาตรรูปrun และขนาดของรูปrun เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นในลักษณะแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption) โดยที่ไม่เลกุลของสารที่ถูกดูดซับโดยไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ

$$\frac{P}{V(P^0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \left( \frac{P}{P^0} \right)$$

$$\text{โดยที่ } C = \exp \left[ \frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT} \right]$$

เมื่อ  $P^0$  = ความดันไออัมตัวของสารถูกดูดซับ ที่ อุณหภูมิของ การดูดซับ

$P$  = ความดันของสารถูกดูดซับ

$n$  = ปริมาณสารถูกดูดซับที่ความดัน  $P$  (mol/g)

2000; Babu and Chaurasia, 2003; Cheung, Porter and McKay, 2002; Salame and Bandosz, 2000)

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วๆ ไป แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการเผาติดิบ ให้เป็นถ่านชาร์ (Char) เรียกขั้นตอนนี้ว่า การทำคาร์บอนเซชัน (Carbonization) เป็นขั้นตอนที่ทำให้วัตถุดิบที่มีคาร์บอนปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ ให้มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งยังมีการเผาไม่สิ้นเปลืองที่ไม่ต้องการออก โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 200-400 องศาเซลเซียส (Yun, Park, and Park, 2001) จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการนำถ่านชาร์ไปเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่าการกระตุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว (Activation) ซึ่งขั้นตอนในการ Activation แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การกระตุนทางกายภาพ และการกระตุนทางเคมี (Ahmadpour and Do, 1996)

การกระตุนทางกายภาพ เป็นการกระตุนด้วยการใช้แก๊ส หรือไอน้ำ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุนค่อนข้างสูง ประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยอด (Superheated steam) เพื่อทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ ละลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นรูพรุนอยู่ทั่วไป ถ่านกัมมันต์ที่กระตุนด้วยวิธีนี้มีข้อดี คือสามารถนำมาใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารเคมีที่เหลือตกค้างออก ดังนั้น จึงมีสารพิษตกค้างน้อยมาก หรือแทบไม่มีเลย (Karaosmanoglu, Iaigur-Ergudenler, and Sever, 2000) แต่ข้อเสียก็คือ ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุนทางเคมี (Lu and Guo, 1998)

การกระตุนทางเคมี เป็นการกระตุนด้วยการใช้สารเคมีหลายชนิด เช่น  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$ ,  $HNO_3$ ,

$H_3BO_3$ , NaOH, KOH,  $Ca(OH)_2$ ,  $ZnCl_2$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $CaCl_2$ , KSCN,  $FeCl_3$ ,  $Ca_3(PO_4)_2$  และ NaCl (Girgis, Yunis, and Soliman, 2002; Kirubakaran, Krishnaiah, and Seshadri, 1991; Teng and Yeh, 1998; Zou and Han, 2001). ซึ่งการจะเลือกใช้สารเคมีชนิดใดก็ตามขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบที่นำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ โดยนำสารเคมีเหล่านี้มาผสมกับถ่านชาร์ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 600-800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ปราศจากแก๊สออกซิเจน เป็นเวลาหลายชั่วโมง ข้อดีของการกระตุนทางเคมี จะช่วยลดการเกิดثار์ และสารอื่นๆ อุณหภูมิที่ใช้กระตุน ต่ำกว่าการกระตุนทางกายภาพ และร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%yield) มีปริมาณสูง และถ่านกัมมันต์ที่ได้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ (Kenedy, Vijaya, and Sekaran, 2004) แต่ข้อเสียสำหรับวิธีการนี้ ก็คือ ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุนออกให้หมด และในบางครั้งอาจมีสารกระตุนตกค้างอยู่ จึงอาจไม่เหมาะสมที่จะนำถ่านกัมมันต์ที่กระตุนด้วยวิธีนี้ไปใช้ทางด้านอาหาร และการแพทย์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินินโดยการกระตุนทางเคมี จากนั้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ชนิดของสารกระตุน อัตราส่วนของสารกระตุนต่อปริมาณของกาแฟ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระตุน และระยะเวลาในการเผากระตุน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินิน

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย

ผล (เปลือกและเมล็ด) ลินินที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ซื้อมาจากที่อบเชยเมืองกาญจน์ ตลาดสี่มุมเมือง และตลาดใหญ่ จังหวัดปทุมธานี

ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 1 เป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากกลามะพร้าว ซื้อมาจากบริษัท คาร์บอนิกาญจน์ จำกัด กรุงเทพมหานคร ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าชนิดที่ 2 เป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากถ่านไม้ ซื้อมาจากบริษัทอิตัลมาาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

#### การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

เปลือกและเมล็ดลินจีที่ใช้ในการเตรียมถ่าน กัมมันต์จะถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ ในสารชีวมวลตามวิธีการของ ASTM (American Standard for Testing Materials) เพื่อหาปริมาณความชื้น ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM – D 2867-95 (ASTM Committee on Standards, 1998b) ปริมาณสารระเหย ตาม มาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM – D 5832-95 (ASTM Committee on Standards, 1998d) เด้า ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM – D 2866-95 (ASTM Committee on Standards, 1998c) และคาร์บอนคงตัว (คำนวนโดย ปริมาณ คาร์บอนคงตัว = 100 – ร้อยละเด้า – ร้อยละสาร ระเหย)

#### การหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%Yield)

$$\% \text{ Yield} = \frac{(W_1 - W_4)}{W_1} \times 100$$

$W_1$  = น้ำหนักเปลือกและเมล็ดลินจีก่อนการทำ Carbonization

$W_4$  = น้ำหนักเปลือกและเมล็ดลินจีหลังการทำ Carbonization (ล้างน้ำเอาสารกระตุ้นออก)

#### การหาค่าร้อยละการได้คืนของสารกระตุ้น

#### (% Activation Reagent Recovery)

ค่าร้อยละการได้คืนของสารกระตุ้น ซึ่งแสดง ถึงปริมาณของสารกระตุ้น (Activation Reagents) ที่ยังคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์หลังจากการกระตุ้น

$$\% ARR = \frac{(W_3 - W_4)}{W_2} \times 100$$

$W_2$  = น้ำหนักของสารกระตุ้น ( $ZnCl_2$ )

$W_3$  = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์จาก เปลือกและเมล็ดลินจีหลังการทำ Carbonization (ยังไม่ล้างเอาสาร กระตุ้นออก)

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของถ่าน กัมมันต์ที่ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การดูดซับ แก๊สในไตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส (77 K)

โดยเป็นการนำเอาสมการ BET (Brunauer Emmett Teller) (Rouquerol, Rouquerol and Sing, 1999) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน เป็นการดูดซับ ที่เกิดขึ้นในลักษณะแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption) โดยที่ไม่เกลุของสารที่ถูกดูดซับโดย ไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ

$$\frac{P}{V(P^0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \left( \frac{P}{P^0} \right)$$

$$\text{โดยที่ } C = \exp \left[ \frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT} \right]$$

เมื่อ  $P^0$  = ความดันไออิมตัวของสารถูกดูดซับ ที่ อุณหภูมิของการดูดซับ

$P$  = ความดันของสารถูกดูดซับ

$n$  = ปริมาณสารถูกดูดซับที่ความดัน  $P$  (mol/g)

$n_m$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ความดัน  $P$  ( $mol/g$ )

$C$  = ค่าคงที่เริ่มน่วยที่มีความสัมพันธ์กับ พลังงานการดูดซับโดยที่

$\Delta H_A$  = ความร้อนของการดูดซับระหว่างการ เกิดการดูดซับแบบขั้นเดียว

$\Delta H_L$  = ความร้อนของการควบแน่น

$R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส (Gas Constant)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์

$\Delta H_A - \Delta H_L$  = ความร้อนสุทธิของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{P}{n(P_0 - P)}$  กับ  $\frac{P}{P_0}$  จะได้กราฟเส้นตรงและสามารถคำนวณ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากค่า  $n_m$  จากสมการ

$$S = n_m A_m L$$

เมื่อ  $S$  = พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $m^2/g$ )

$A_m$  = พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารถูก ดูดซับต่อ 1 โมเลกุล ( $m^2$ )

$L$  = ค่าคงที่ อโว加โดร ( $6.02 \times 10^{23}$  โมเลกุลต่อมอล)

### การทดสอบความสามารถในการดูดซับ ปริมาณไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การตรวจวัดค่าการดูดซับปริมาณไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีการบอกความสามารถในการดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่าง กันของถ่านกัมมันต์ โดยค่าการดูดซับปริมาณไอโอดีนแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ( $0.4\text{-}1.0$  นาโนเมตร) (Henning and Schfer, 2007)

ค่าการดูดซับปริมาณไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ทดสอบโดยใช้วิธีการไตเตอร์แบบ ไอโอดิเมทรี (Iodometry) เพื่อหาปริมาณของ

ไอโอดีนที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้โดยใช้สารละลาย มาตรฐานโซเดียมไนโตรชัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) เป็น ไตเตอร์ที่ชึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM-D4607-94 (ASTM Committee on Standards, 1998a) ค่าที่ได้เรียกว่า ค่าไอโอดีน นัมเบอร์ (Iodine number) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม ( $mg/g$ ) โดยคำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ ( $C$ ) จากสูตร  $C = \frac{N_1}{(50 \times S)}$

เมื่อ  $C$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน ที่เหลือ มีหน่วยเป็น  $N$

$N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม ไนโตรชัลเฟต

$S$  = ปริมาตรของของสารละลายโซเดียม ไนโตรชัลเฟต

และคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ( $\frac{x}{m}$ ) ได้จากสูตร

$$\left(\frac{x}{m}\right) = \frac{[A - (DF \times B \times S)]}{m}$$

เมื่อ  $A$  =  $12693 N_2$

$N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

$B$  =  $126.93 N_1$

$DF$  = dilution factor  $\frac{(100 + 10)}{50} = 2.2$

$m$  = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

$x$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับ ไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ( $\frac{x}{m}$ ) กับความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือหลังการดูดซับ ( $C$ ) จะได้กราฟเป็นเส้นตรง คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตรง ตำแหน่งที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน ที่เหลือเท่ากับ  $0.02 N$  (ASTM Committee on

Standards, 1998a)

ค่าปริมาณการดูดซับที่ได้มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/g) โดยคำนวณได้จากสูตร ดังนี้:

$$\text{ปริมาณการดูดซับ (mg/g)} =$$

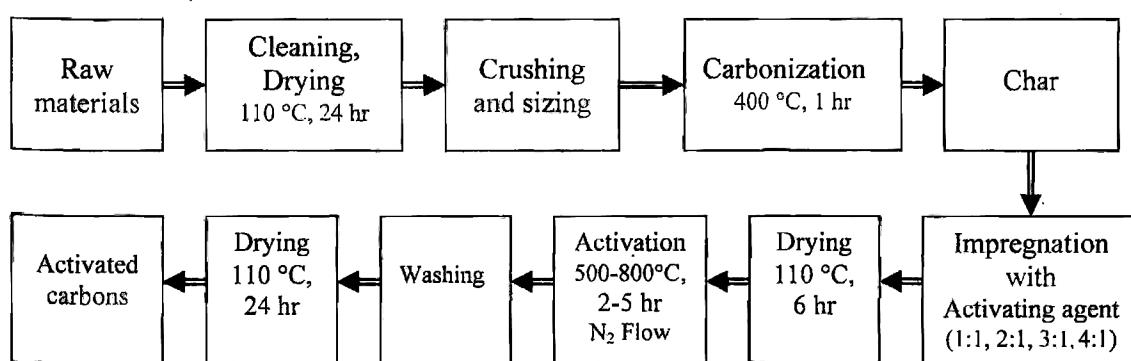
$$\frac{\text{ความเข้มข้นที่ถูกดูดซับ (mg/L)} \times \text{ปริมาตรของสารละลายน (L)}}{\text{น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)}}$$

### วิธีการทดลอง

#### การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี

นำเปลือกและเมล็ดลินจีมาล้างน้ำให้สะอาดแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นออกจากการเปลือกและเมล็ดลินจี นำเปลือกและเมล็ดลินจีที่อบแห้งแล้วมาบดด้วยเครื่องบด และคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน โดยเลือกขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร ( $8 \times 10$  เมช) เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสมในการดูดซับสารที่มีการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Castro, et al., 2000; Jagtoyen and Derbyshire, 1998) จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการการคาร์บอนไซซ์ โดยการเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ถ่านchar ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ ขั้นตอนไปเป็นกระบวนการการระดูนทางเคมี นำถ่านcharจากเปลือก

และเมล็ดลินจีที่ได้ 50.0 กรัม ( $W_1$ ) มาเติมสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้น ( $ZnCl_2$ ,  $KOH$ ,  $NaOH$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $H_3PO_4$  และ  $H_2SO_4$ ) ในอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อถ่านcharจากเปลือกและเมล็ดลินจี (1:1, 2:1, 3:1 และ 4:1) โดยน้ำหนัก ( $W_2$ ) เติมน้ำ 50 มิลลิลิตร เพื่อลดความหนืด และผสมโดยใช้เครื่องกวนด้วยแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง นำของผสมที่ได้ไปอบแห้งเพื่อรอบน้ำออกที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง นำของผสมที่ผ่านการอบแห้งไปเผาในเตาเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 100 มิลลิลิตร/นาที โดยเผาที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที และหยุดที่อุณหภูมิที่ต้องการนาน 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ จึงปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ ( $W_3$ ) ล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้ง เพื่อกำจัดสารกระตุ้นที่หลงเหลืออยู่ออกให้หมด ตามด้วยน้ำกักลิ่นอีก 2-3 ครั้ง หรือทดสอบที่น้ำล้างให้มี pH เป็นกลางจึงเสร็จขั้นตอนการล้าง นำถ่านกัมมันต์ที่ล้างแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำหนักคงที่ ( $W_4$ ) ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี

**การตรวจสอบพื้นที่ผิวห้องทรงของเปลือกและเมล็ดลินจีและถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าชในไตรเจน (Nitrogen Adsorption, BET)**

การวิเคราะห์การดูดซับก๊าชในไตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส (77 K) เป็นการวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถทำได้โดยชั้นน้ำหนักเปลือกและเมล็ดลินจี หรือถ่านกัมมันต์ประมาณ 0.1-0.2 กรัม บรรจุลงในเซลล์ตัวอย่าง จากนั้นนำไป Preheat ที่ Sample Preparation Station ทำการใส่ก๊าชในไตรเจน ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาดตัวอย่าง จากนั้นนำเซลล์ตัวอย่างไปบรรจุที่ Analysis Station ทำการติดตั้งค่า  $\frac{P}{P_0}$  ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-1.0 โดยเครื่องจะทำการคำนวณรัศม่าพื้นที่ทั้งหมดของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี

### **การหาค่าการดูดซับไอโอดีน (ไอโอดีนนัมเบอร์)**

ชั้นน้ำหนักถ่านกัมมันต์โดยประมาณ 3 ค่าตั้งนี้ 0.85, 0.99 และ 1.13 กรัม ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของไอโอดีนหลังการดูดซับน้อยกว่า เท่ากับ หรือมากกว่า 0.02 N โดยนำเอาแต่ละน้ำหนักมาเติมด้วย HCl ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร แล้วต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเด้าและชัลเพอร์ออกจากการผิวของถ่านกัมมันต์ ตั้งทึ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ตามด้วยสารละลายไอโอดีน 0.10 M 100 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าและเขย่าด้วยอัตราเร็ว 300 รอบต่อนาที นาน 1 นาที จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยกเอาถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1

นำสารละลายที่ได้จากการกรอง 50 มิลลิลิตร ไปไต่เทรถับสารละลายโซเดียมไฮโอดีโนซัลเฟต 0.10 N (ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจากการ standardize) จนสารละลายถูกเป็นสีเหลืองจาก เติมน้ำเป็น 2 มิลลิลิตร สารละลายจะกลা�ຍเป็นสีน้ำเงิน ไต่เทรถับต่อจนได้สารละลายใส่ไม่มีสี บันทึกปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮโอดีโนซัลเฟตที่ใช้ เพื่อคำนวนหาปริมาณการดูดซับต่อไป

นำผลของการดูดซับที่ได้จากน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ค่ามาพล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ กับความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือหลังการดูดซับ ปริมาณการดูดซับในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมที่ความเข้มข้น 0.02 N ของสารละลายไอโอดีนจะแสดงเป็นค่าไอโอดีนนัมเบอร์

### **อภิปรายผลการทดลอง**

#### **องค์ประกอบแบบประมาณของเปลือกและเมล็ดลินจี และถ่านชาร์**

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเปลือกและเมล็ดลินจี และถ่านชาร์ แสดงในตารางที่ 1 พบว่า เปลือกและเมล็ดลินจีมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 18.0 ซึ่งเป็นบริมาณที่เพียงพอที่จะนำมาพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลอื่นๆ เช่น เมล็ดลำไย 19.6 เปอร์เซ็นต์ (Supunnee Junpirom, Chaiyot Tangsathikulchai, and Malee Tangsathikulchai, 2007) มะละผลปalem 19.8 เปอร์เซ็นต์ (Guo and Lua, 2001) และตันโอลิกานัม 23.0 เปอร์เซ็นต์ (Timur, et al., 2006)

เมื่อนำเปลือกและเมล็ดลินจีมาผ่านกระบวนการการคาร์บอนไซซ์ชัน ทำให้เกิดการละลายตัวของ

สารระเหย แสดงว่าสารอินทรีย์ที่สลายตัวได้ง่าย ส่วนใหญ่ได้รับการออกไประแล้ว ปริมาณสารระเหยจึงลดลง ถ่านชาร์ที่ได้จึงมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น มากถึงร้อยละ 71 การมีคาร์บอนคงตัวสูงถือว่าเป็นสมบัติที่ดีของวัตถุดินที่จะนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์

**ตารางที่ 1** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ และถ่านชาร์

ตัวอย่าง	องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เก้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
เปลือกและเมล็ดลิ้นจี่	19.0	3.0	60.0	18.0
ถ่านชาร์	13.0	5.0	11.0	71.0

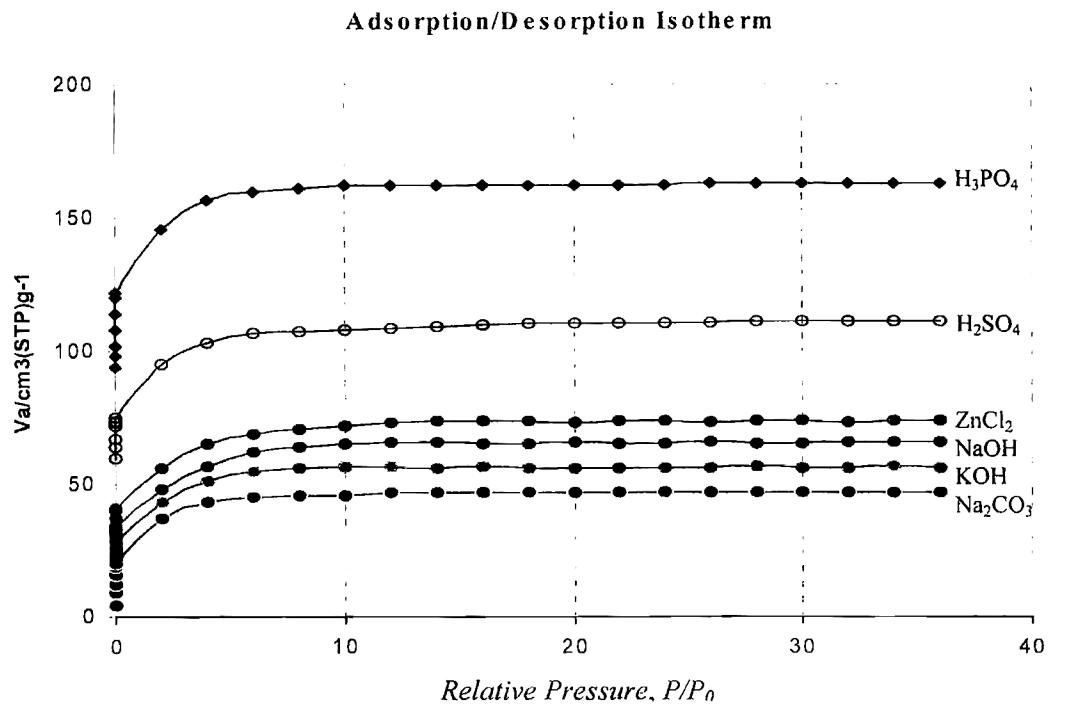
### การวิเคราะห์การดูดซับก๊าซในໂຕຣເຈນດ້ວຍ ເທິກິນີກ BET

จากการนำถ่านชาร์ทที่ได้จากการคาร์บอนเชชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ไปศึกษาการดูดซับก๊าซในໂຕຣເຈນດ້ວຍເທິກິນີກ BET พบร่วมกับถ่านชาร์ทที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ  $13.457 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  ปริมาตรรูพ魯น เท่ากับ  $6.647 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  และมีขนาดรูพ魯น เท่ากับ 1.0738 nm โดย Cross Section Area ของก๊าซในໂຕຣເຈນที่ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์โดยการวิเคราะห์ด້ວຍເທິກິນີກ BET มีค่าเท่ากับ  $0.162 \text{ nm}^2$  (BEL MINISORP)

ภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างเส้นกราฟໄອໂຫເຫອມของ การดูดซับก๊าซในໂຕຣເຈນบนถ่านกัมมันต์จากลักษณะของเส้นกราฟที่ปรากฏ พบร่วมกับถ่านกัมมันต์ที่ศึกษามีลักษณะเส้นกราฟໄອໂຫເຫອມเป็นชนิด

ต่อไป และการมีปริมาณเก้าต่าจะทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สูงตามไปด้วย ซึ่งจะทำการศึกษาต่อไป

Type I โดยจำแนกตามระบบ IUPAC อธิบายได้ว่า เป็นถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพ魯นขนาดเล็ก และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Rouquerol, Rouquerol, and Sing, 1999) ในตอนแรกพื้นผิวของตัวดูดซับจะยังว่างอยู่ ไม่เกิดข้องตัวถูกดูดซับ จะถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะค่อยๆ ลดลง ทำให้อัตราดูดซับลดลง การดูดซับจึงเกิดได้ช้า และในที่สุดเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเต็ม หรือเข้าสู่จุดสมดุล อัตราการดูดซับก็จะกลับเป็นศูนย์ ปริมาณที่ถูกดูดซับจึงเป็นค่าคงที่ ไอโซเทอมที่ให้สามารถคำนวณในสมการ BET ซึ่งสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ปริมาตรรูพ魯นรวม และขนาดรูพ魯นเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ได้



ภาพที่ 2 เส้นกราฟไอโซเทอมการอุดซับก๊าซในไตรเจนของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ โดยการกระตุนด้วยสารกระตุนที่แตกต่างกัน 6 ชนิด

#### ชนิดของสารกระตุนที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

จากตารางที่ 2 ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจาก การกระตุนด้วยสารกระตุนที่แตกต่างกัน ได้แก่  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$ ,  $H_2SO_4$ ,  $KOH$ ,  $NaOH$  และ  $Na_2CO_3$  โดยใช้สภาวะในการกระตุนเหมือนกัน ดังนี้ อัตราส่วนระหว่างสารกระตุนต่อวัตถุดิบ 1:1 อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุน 500 องศา เชลเชียล และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า  $H_3PO_4$  ให้พื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ยสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับสาร

กระตุนชนิดอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านchar พบว่า  $H_3PO_4$  ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยสูงสุด เมื่อจาก  $H_3PO_4$  เป็นสารช่วยยับยั้งการเกิดثار (Tan) และของเหลวชนิดอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นระหว่าง การกระตุนซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุน (Lua and Yang, 2005) จึงทำให้ทราบถึงสาร กระตุนที่เหมาะสมกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ ดังนั้น  $H_3PO_4$  จึงถูกเลือกเพื่อนำไปศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมกับการเตรียมถ่าน กัมมันต์ต่อไป

ตารางที่ 2 ผลของสารกระตุ้น 6 ชนิดที่มีต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลินจี

ชนิดของสารกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ – BET (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูปrunรวม (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูปrunเฉลี่ย (nm)	ไอโอดีนน้ำเบอร์ (mg/g)
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	508.74	0.39	2.22	532
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	357.62	0.19	2.16	325
KOH	119.36	0.03	2.01	176
NaOH	112.12	0.03	2.01	171
ZnCl <sub>2</sub>	105.89	0.02	2.01	144
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	58.56	0.01	1.46	98

### ผลของสภาวะการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรด H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

จากตารางที่ 3 ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด เตรียมขึ้นโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี สารกระตุ้น ที่ใช้ คือ H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 500 °C และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยเพิ่ม อัตราส่วนระหว่างกรด H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ต่อเปลือกและเมล็ดลินจีจาก 1:1 ถึง 4:1 จากการทดลอง พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ปริมาตรรูปrunรวม ขนาดรูปrunเฉลี่ย และค่าไอโอดีนน้ำเบอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารกระตุ้นที่เพิ่มขึ้น คือ จากอัตราส่วน 1:1 จนถึง 3:1 อธิบายได้ว่าปริมาณกรด H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ที่มากจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นระหว่างสารกลุ่มฟอสเฟต กับสารชีวมวลในวัตถุติดที่ดีขึ้น เนื่องจากสารกลุ่มฟอสเฟตช่วยทำให้โครงสร้างรูปrunของถ่านกัมมันต์ ถ่างออก เกิดโครงข่ายเชื่อมโยงระหว่าง Biopolymer fragments ที่เป็นโครงสร้างชีวมวล ส่งผลให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น (Supunthee Junpirom,

Chaiyot Tangsathikulchai, and Malee Tangsathikulchai, 2007) แต่เมื่ออัตราส่วนระหว่างกรด H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ต่อเปลือกและเมล็ดลินจีเพิ่มเป็น 4:1 พื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ปริมาตรรูปrunรวม ขนาดรูปrunเฉลี่ย และค่าไอโอดีนน้ำเบอร์กลับมีค่าลดลง แสดงว่าปริมาณสารกระตุ้นที่มากเกินพอ จะไปกดปิดรูปrunบางส่วนภายในของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง ความสามารถในการดูดซับจึงลดลง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกระตุ้นด้วย H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเปลือกและเมล็ดลินจี เป็น 3:1 ให้พื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ปริมาตรรูปrunรวม ขนาดรูปrunเฉลี่ย และค่าไอโอดีนน้ำเบอร์สูงที่สุด ดังนั้น จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี และถูกเลือกเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

ตารางที่ 3 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระดุนต่อเบลีอิกและเมล็ดลินจีที่มีต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น

อัตราส่วนระหว่างสารกระดุน ( $H_3PO_4$ ) : เบลีอิกและเมล็ดลินจี	พื้นที่ผิว – BET ( $m^2/g$ )	ปริมาตรรูพูนรวม ( $cm^3/g$ )	ขนาดรูพูนเฉลี่ย ( $\mu m$ )	ไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)
1:1	508.74	0.39	2.22	532
2:1	674.41	0.37	2.31	568
3:1	811.23	0.62	2.45	736
4:1	734.51	0.57	2.39	652

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการกระดุนที่มีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ปริมาตรรูพูนรวม ขนาดรูพูนเฉลี่ย ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ร้อยละผลผลิต และร้อยละการได้คืนของสารกระดุน ของถ่านกัมมันต์ ทั้ง 16 ตัวอย่าง (A – P) แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทั้งหมดเตรียมขึ้นโดยใช้กรด  $H_3PO_4$  เป็นสารกระดุน ที่อัตราส่วนระหว่างกรด  $H_3PO_4$  ต่อเบลีอิกและเมล็ดลินจีจาก 1:1 ถึง 4:1 เวลาที่ใช้ในการกระดุน 2 ชั่วโมง โดยศึกษาอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากตารางที่ 4 ภาพที่ 3 และ 4 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระดุนให้สูงขึ้นจนถึง 600 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวจำเพาะ – BET และค่าไอโอดีนนัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นที่ทุกสภาวะการเตรียม อธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาระหว่างกรด  $H_3PO_4$  กับวัตถุติด (เบลีอิกและเมล็ดลินจี) เกิดได้มากขึ้น ทำให้สารอินทรีย์ท้อญี่ปุ่นในโครงสร้างของเบลีอิกและเมล็ดลินจีหลุดออกมามาในรูปแก๊ส ส่งผลให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น (Natthaya Punsuwan, Chaiyot Tangsathikulchai, and Malee Tangsathikulchai, 2006) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ที่ทุกสภาวะการเตรียม ถ่านกัมมันต์ที่ได้กลับมีพื้นที่ผิวจำเพาะ

– BET และค่าไอโอดีนนัมเบอร์มีค่าลดลง เนื่องจากมีการลดตัวของโครงสร้างรูพูน ทำให้ผนังของรูพูนยุบตัว และเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างรูพูน ปริมาณรูพูนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จึงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง (Mohanty, et al., 2005; Timur, et al., 2006; Tsai, et al., 2001)

จากการที่ 5 และ 6 พบว่า ร้อยละผลผลิต และร้อยละการได้คืนของสารกระดุน ลดลงตามการเพิ่มของอุณหภูมิที่ทุกสภาวะการเตรียม การที่ร้อยละผลผลิตมีค่าลดลง เนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของสารระเหยที่ยังเหลืออยู่ และเนื้อคาร์บอนบางส่วน (Gonzalez-Serrano, et al., 2004) ส่วนการลดลงของร้อยละการได้คืนของสารกระดุนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เป็น เพราะที่อุณหภูมิสูง  $H_3PO_4$  เกิดการระเหย และสลายตัวของพันธะ ทำให้ความสามารถในการกระดุนลดลง (Onal, et. al., 2006)

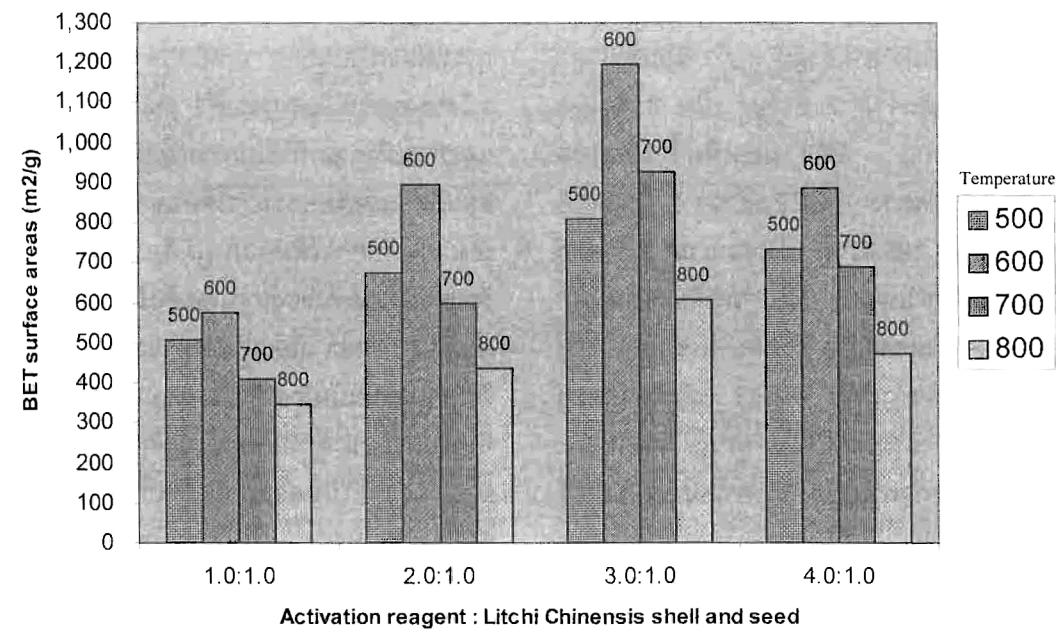
จากการวิจัยที่ได้ พบว่า เวลาที่ใช้ในการกระดุนมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาถ่านกัมมันต์ 4 ตัวอย่าง (J, Q, R และ S) จากตารางที่ 4 ซึ่งถ่านกัมมันต์ทั้งสี่ตัวอย่างเตรียมขึ้นโดยใช้  $H_3PO_4$  เป็นสารกระดุน ที่อัตราส่วน 3:1 อุณหภูมิที่ใช้ในการกระดุน 600 องศาเซลเซียส

โดยศึกษาเวลาที่ใช้ในการกระตุนที่แตกต่างกันที่ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ พบร่วม เมื่อเพิ่มเวลา ที่ใช้ในการกระตุนจาก 2 ชั่วโมง เป็น 3 ชั่วโมง ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ - BET มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ - BET ที่เวลา 3 ชั่วโมงให้ ค่าสูงที่สุด คือ  $1,198.63 \text{ m}^2/\text{g}$  ส่วนที่เวลา 2 ชั่วโมง ให้ค่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ - BET เท่ากับ  $1,195.47 \text{ m}^2/\text{g}$  แต่มีเพิ่มเวลาเป็น 4 และ 5 ชั่วโมง ตาม ลำดับ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ - BET กลับมีค่าลดลง เหลือ  $816.73$  และ  $743.28 \text{ m}^2/\text{g}$  ตามลำดับ สำหรับค่าปริมาตรรูพูนรวม และค่าไอโอดินนัมเบอร์ มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเวลาที่ใช้ในการ กระตุน จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้เวลาในการกระตุนที่นานเกินพอก กลับทำให้

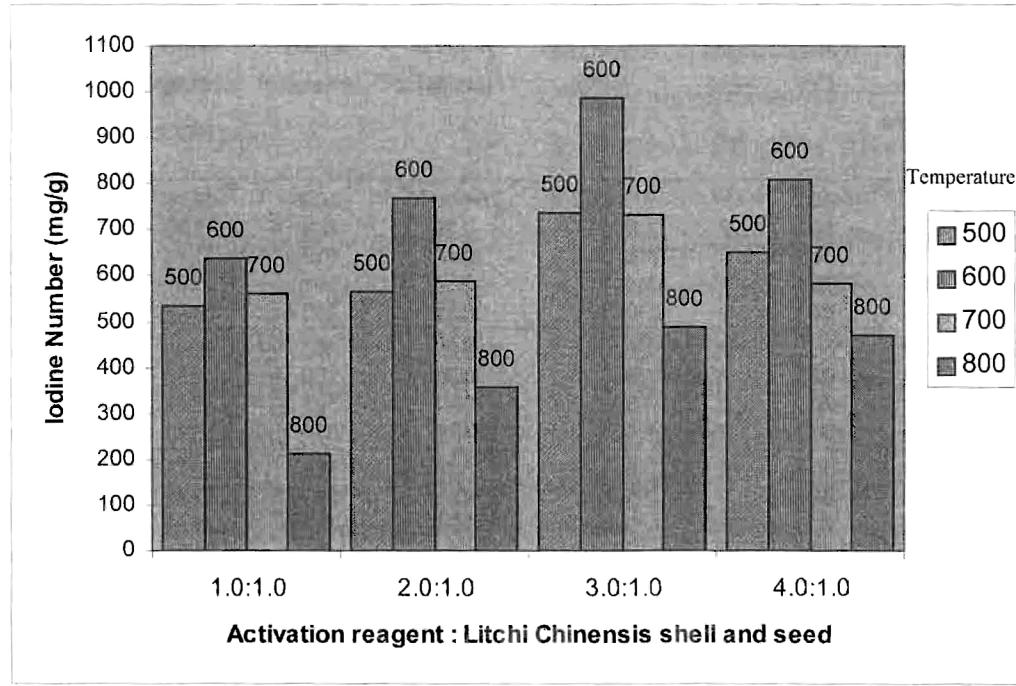
ค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง สาเหตุของ การลดลงเนื่องจากการอุดปิดรูพูนบางส่วน และ พังของรูพูนเกิดการยุบตัว (Sun, et al., 1997) และการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุนส่งผลต่อร้อยละ ผลผลิต และร้อยละการได้คืนของสารกระตุน เช่น เดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิคือมีค่าลดลง การที่ ร้อยละการได้คืนของสารกระตุนมีค่าลดลงตามการ เพิ่มขึ้นของเวลา เนื่องมาจากการระเหยของ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ที่เวลานานขึ้นนั้นเอง ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าเวลา ที่ใช้ในการกระตุนที่ดีที่สุดโดยคำนึงถึงความคุ้มค่า ทางพลังงานเป็นสำคัญคือเวลาที่ลับที่สุด คือ 2 ชั่วโมง ซึ่งเหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จาก เปลือกและเมล็ดลินจีที่มีคุณภาพสูง

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกและเมล็ดลินจีที่กระตุนด้วย  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ที่สภาวะต่างๆ

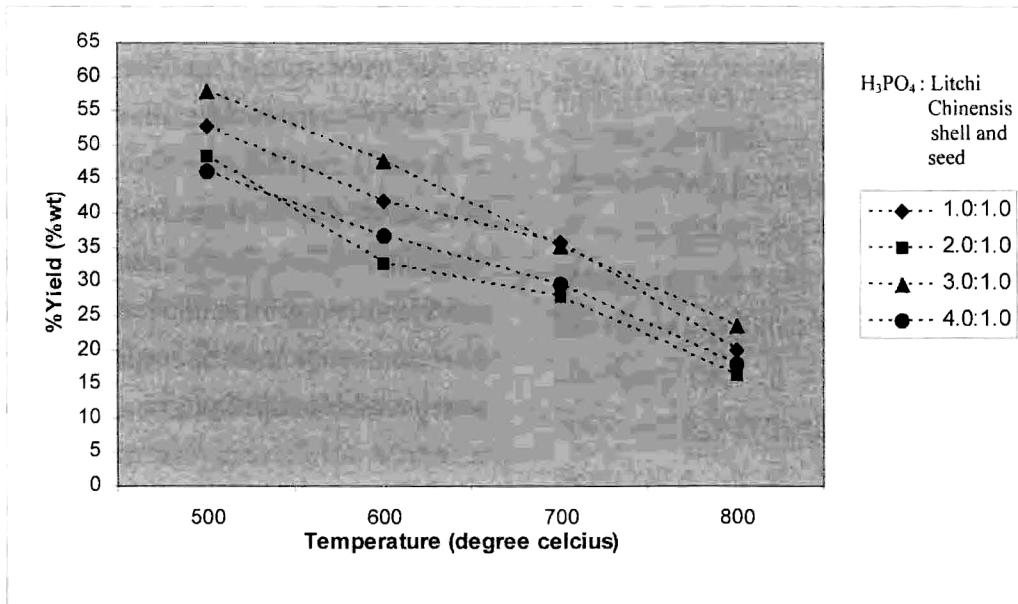
ตัวอย่าง	สภาวะในการกระตุน			พื้นที่ผิว จำเพาะ - BET	ปริมาตร รูพูนรวม (cm <sup>3</sup> /g)	ค่าไอโอดิน (mg/g)	ร้อยละ ผลผลิต (wt%)	ร้อยละการได้คืน ของสารกระตุน (wt%)
	$\text{H}_3\text{PO}_4$ 配比	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)					
และเมล็ด ลินจี								
ถ่านชาร์	-	400	1	13.45	$6.647 \times 10^{-3}$	108	65.78	-
A	1 : 1	500	2	508.74	0.39	532	52.89	32.56
B	1 : 1	600	2	576.18	0.42	639	41.78	27.48
C	1 : 1	700	2	411.35	0.34	561	35.62	19.85
D	1 : 1	800	2	345.26	0.19	213	19.49	6.56
E	2 : 1	500	2	674.46	0.64	568	48.34	43.89
F	2 : 1	600	2	897.13	0.79	769	32.56	36.45
G	2 : 1	700	2	598.52	0.47	587	27.67	22.49
H	2 : 1	800	2	435.64	0.36	357	16.34	7.23
I	3 : 1	500	2	811.26	0.76	736	57.78	41.78
J	3 : 1	600	2	1,195.47	0.85	989	47.56	32.67
K	3 : 1	700	2	926.19	0.81	734	35.23	18.05
L	3 : 1	800	2	609.37	0.54	490	23.51	9.45
M	4 : 1	500	2	734.08	0.72	652	46.11	37.91
N	4 : 1	600	2	886.47	0.78	811	36.67	26.72
O	4 : 1	700	2	688.18	0.68	586	29.45	17.13
P	4 : 1	800	2	473.27	0.38	471	17.89	11.42
Q	3 : 1	600	3	1,198.63	0.86	632	31.54	21.14
R	3 : 1	600	4	816.73	0.77	578	29.12	17.28
S	3 : 1	600	5	743.28	0.73	524	30.25	14.83



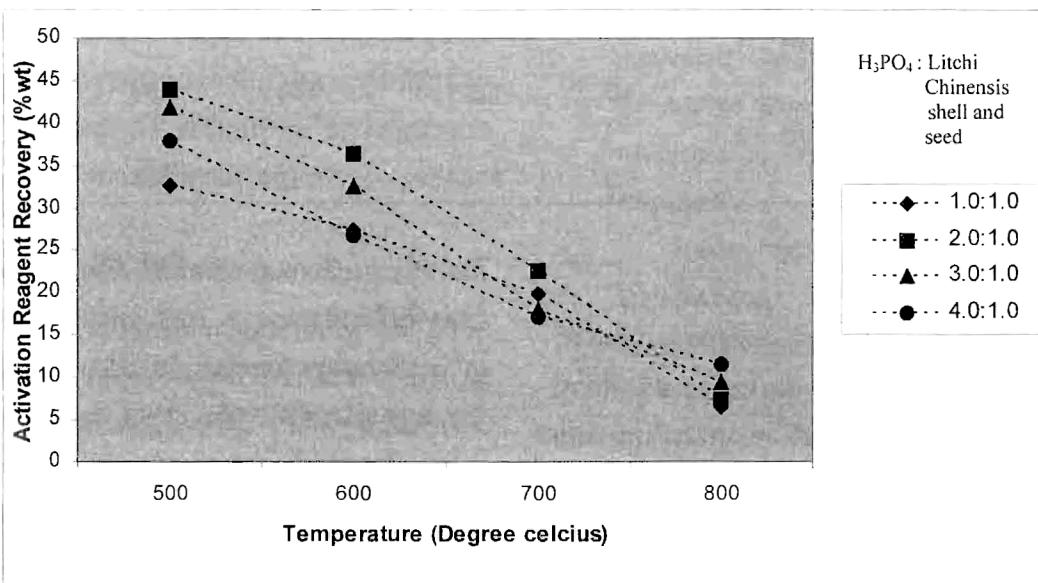
ภาพที่ 3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกราดตันที่มีต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น ที่อัตราส่วนระหว่างสารกราดตันต่อเปลือกและเมล็ดลินจีแตกต่างกันใน 4 อัตราส่วน



ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกราดตันที่มีต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น ที่อัตราส่วนระหว่างสารกราดตันต่อเปลือกและเมล็ดลินจีแตกต่างกันใน 4 อัตราส่วน



ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเปลือกและเมล็ดลินจี'แตกต่างกันใน 4 อัตราส่วน



ภาพที่ 6 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อร้อยละการได้คืนของสารกระตุ้นของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเปลือกและเมล็ดลินจี'แตกต่างกันใน 4 อัตราส่วน

## การเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีกับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีที่เตรียมขึ้น ที่สภาวะที่เหมาะสม ( $H_3PO_4/3:1/600\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ hr}$ ) กับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้าสองแหล่ง ผลการทดลอง พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีที่เตรียมขึ้นมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ใกล้เคียงกับเกรดทางการค้า ส่วนปริมาตรรูปทรงรวม ขนาด

รูปทรงเฉลี่ย และค่าไอโอดีนนัมเบอร์น้อยกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า แต่มีค่าความชื้นมากกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกและเมล็ดลินจีมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้เนื่องจากมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์มากกว่า  $600\text{ mg/g}$  และมีร้อยละความชื้นน้อยกว่า 8 ตามมาตรฐานของ มอก. 900–2547 ที่กำหนดไว้ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีกับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า

ชนิดของ ถ่านกัมมันต์	ความชื้น (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	พื้นที่ผิว จำเพาะ - BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	ปริมาตร รูปทรงรวม ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	ขนาดรูปทรง เฉลี่ย ( $\text{nm}$ )	ไอโอดีน นัมเบอร์ ( $\text{mg/g}$ )
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี $(H_3PO_4/3:1/600\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ hr})$	7.0	1,195.47	0.85	2.83	989
ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า – 1 (grade A) (กระยะมะพร้าว)	4.0	1,214.53	0.88	2.92	1,158
ถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า – 2 (ถ่านไน้)	5.0	1,189.56	0.87	2.89	1,012

## บทสรุป

จากการศึกษา พบว่า เปลือกและเมล็ดลินจีสามารถใช้เป็นวัตถุดินตั้งต้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ โดยสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี ได้แก่ การใช้  $H_3PO_4$  เป็นสารกระตุน ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุนต่อเปลือกและเมล็ดลินจี เป็น  $3:1$  อุณหภูมิ  $600$  องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุน  $2$  ชั่วโมง เนื่องจากผลจากการวิเคราะห์ทางกายภาพ และทางเคมีให้ผลที่ดีที่สุด ดังนี้ การวิเคราะห์การดูดซับก๊าซในโครง筋ของถ่าน

กัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี ด้วยเทคนิค BET ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ – BET เท่ากับ  $1,195.47\text{ m}^2/\text{g}$  ปริมาตรรูปทรงรวมเท่ากับ  $0.85\text{ cm}^3/\text{g}$  และขนาดรูปทรงเฉลี่ยเท่ากับ  $2.83\text{ nm}$  ส่วนการวิเคราะห์การดูดซับในสถานะของเหลวด้วยการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ พบว่า ได้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่สภาวะข้างต้นเท่ากับ  $989\text{ mg/g}$  จึงสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจี คือ  $H_3PO_4/3:1/600\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ hr}$  เส้นกราฟไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซในโครง筋 บนถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลินจีที่เตรียมขึ้นจากลักษณะของเส้นกราฟที่ปรากฏ พบว่า ถ่าน

กัมมันต์ที่ศึกษา มีลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอมเป็นชนิด *Type I* โดยจำแนกตามระบบ IUPAC อธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีกับถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิน杰ที่ขึ้นมาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ – BET ใกล้เคียงกับเกรดทางการค้า ส่วนปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และค่าไอโอดีน намเบอร์น้อยกว่าถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้า อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกและเมล็ดลิน杰มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้เนื่องจากมีค่าไอโอดีน намเบอร์มากกว่า 600 mg/g และมีร้อยละความชื้นน้อยกว่า 8 ตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) งานที่จะศึกษาต่อไป คือ การศึกษาวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิน杰โดยจะเพิ่มวิธีการกระตุนทางกายภาพควบคู่ไปกับการกระตุนทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองว่าแบบใดให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงกว่า

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณฝ่ายวิจัย มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สำคัญที่สุดสำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ที่สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.สไปท์ ตุ้งคำมนี อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ พระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ และคำปรึกษาในการทำวิจัยฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จ

## บรรณานุกรม

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. ถ่านกัมมันต์ มอก. 900-2547 ICS 71.100.80. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
- Ahmadpour, A., and Do, D.D. 1996. "The Preparation of Active Carbons from Coal by Chemical and Physical Activation." *Carbon* 34: 471-479.
- Antal, M.J., et al. 2000. "Attainment of the Theoretical Yield of Carbon from Biomass." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 11: 4024-4031.
- ASTM Committee on Standards. 1998a. "Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbons." In *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 112-125. Philadelphia, PA: ASTM Committee on Standards.
- \_\_\_\_\_. 1998b. "Standard Test Method for Determination of Moisture Content of Activated Carbons." In *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 709-711. Philadelphia, PA: ASTM Committee on Standards.
- \_\_\_\_\_. 1998c. "Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbons." In *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 707-708. Philadelphia, PA: ASTM Committee on Standards.

- \_\_\_\_\_. 1998d. "Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbons." In **Annual Book of ASTM Standards**, p. 782. Philadelphia, PA: ASTM Committee on Standards.
- Babu, B.V., and Chaurasia, A.S. 2003. "Modeling Simulation and Estimation of Optimum Parameters in Pyrolysis of Biomass." **Energy Conversion and Management** 44: 2135-2158.
- Castro, J., et al. 2000. "Phosphoric Acid Activation of Agricultural Residues and Bagasse from Sugar Cane: Influence of the Experimental Conditions on Adsorption Characteristics of Activated Carbons." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 39: 166-172.
- Cheung, C.W., Porter, J.F., and McKay, G. 2002. "Removal of Cu(II) and Zn(II) Ions by Sorption onto Bone Char Using Batch Agitation." **Langmuir** 18: 650-656.
- Guo, J., and Lua, A.C. 2001. "Kinetic Study on Pyrolysis Process of Oil-Palm Stone Using Two-Step Consecutive Reaction Model." **Biomass and Bioenergy** 20: 223-233.
- Girgis, S., Yunis, S., and Soliman, M. 2002. "Characteristics of Activated Carbon from Peanut Hulls in Relation to Conditions of Preparation." **Materials Letters** 57: 164-173.
- Gonzalez-Serrano, E., et al. 2004. "Removal of Water Pollutants with Activated Carbons Prepared from  $H_3PO_4$  Activation of Lignin from Kraft Black Liquors." **Water Research** 38: 3043-3050.
- Henning, K.D., and Schäfer, S. 2007, June 25. "Impregnated Activated Carbon for Environmental Protection." **CPL Carbon Link** [Online serial]. Available: <http://www.activated-carbon.com/enviro.html>
- Jagtoyen, M., and Derbyshire, F. 1998. "Activated Carbons from Yellow Poplar and White Oak by  $H_3PO_4$  Activation." **Carbon** 36: 1085-1097.
- Karaosmanoglu, F., Iaigur-Ergudenler, A.I., and Sever, A. 2000. "Biochar from The Straw-Stall of Rapeseed Plant." **Energy and Fuels** 14: 336-339.
- Kenedy, L.J., Vijaya, J.J., and Sekaran, G. 2004. "Effect of Two-Stage Process on the Preparation and Characterization of Porous Carbon Composite from Rice Husk by Phosphoric Acid Activation" **Industrial and Engineering Chemistry Research** 43: 1832-1838.
- Kirubakaran, C.J., Krishnaiah, K., and Seshadri, S.K. 1991. "Experimental Study of the Production of Activated Carbon from Coconut Shells in a Fluidized Bed Reactor." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 30: 2411-2416.

- Lua, C.A., and Guo, J. 1998. "Preparation and Characterization of Chars from Oil Palm Waste." **Carbon** 36: 1663-1670.
- Lua, A.C., and Yang, T. 2005. "Characteristics of Activated Carbon Prepared from Pistachio-Nut Shell by Zinc Chloride under Nitrogen and Vacuum Conditions." **Journal of Colloid and Interface Science** 290: 505-513.
- Mohanty, K., et al. 2005. "Preparation and Characterization of Activated Carbons from Terminalia Arjuna Nut with Zinc Chloride Activation for the Removal of Phenol from Wastewater." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 44: 4128-4138.
- Natthaya Punsuwan, Chaiyot Tangsathikulchai, and Malee Tangsathikulchai. 2006. "Chemically Activated Carbon from Bagasse and the Removal of Chromium from Aqueous Solution with Activated Carbon." **Suranaree Journal Science Technology** 13: 143-158.
- Onal, Y., et al. 2006. "Textural Development of Sugar Beet Bagasse Activated with  $ZnCl_2$ ." **Journal of Hazardous Materials** 142: 138-143.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., and Sing, K. 1999. Adsorption by Powder and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. London: Academic Press.
- Salame, I.I., and Bandosz, T.J. 2000. "Comparison of the Surface Features of Two Wood-Based Activated Carbons." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 39: 301-306.
- Sun, J., et al. 1997. "Activated Carbon Produced from an Illinois Basin Coal." **Carbon** 35: 341-352.
- Supunnee Junpirom, Chaiyot Tangsathikulchai, and Malee Tangsathikulchai. 2007. "Preparation of Activated Carbons from Longan Seed by Physical and Chemical Activation Method." **Suranaree Journal Science Technology** 14: 63-76.
- Teng, H., and Yeh, T. 1998. "Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with Zinc Chloride Activation." **Industrial and Engineering Chemistry Research** 37: 58-65.
- Timur, S., et al. 2006. "Preparation of Activated Carbons from Oreganum Stalks by Chemical Activation." **Energy and Fuels** 20: 2636-2641.
- Thai Industrial Standards Institution. 2004. **Activated Carbons TISI. 900-2004 ICS 71.100.80.** Bangkok: Thai Industrial Standards Institution.
- Tsai, W.T., et al. 2001. "Thermogravimetric Analysis of Corn Cob Impregnated With Zinc Chloride for Preparation of Activated Carbon." **Journal of Thermal Analysis Calorimetry** 63: 351-357.

- Yun, C.H., Park, Y.H., and Park, C.R. 2001. "Effect of Pre-carbonization on Porosity Development of Activated Carbons from Rice Straw." **Carbon** 39: 559-567.
- Zou, Y., and Han, B. 2001. "High-Surface-Area Activated Carbon from Chinese Coal." **Energy and Fuels** 15: 1383-1386.



**Asst. Prof. Katsiri Laowachirasuwan** received her Master of Science Degree in Chemistry (Inorganic Chemistry) from Texas A&M University, Kingsville, USA. She is currently working at the School of Science, University of the Thai Chamber of Commerce. Her main interest is in material science, inorganic chemistry and analytical chemistry. Her current research includes the characterization of activated carbons.