

# ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมี เพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ

ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

E-mail: QDUKDIKQ@gmail.com

รับบทความ: 21 เมษายน 2559 ยอมรับตีพิมพ์: 9 พฤษภาคม 2560

## บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวน สรุปประเด็น และเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเพื่อใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงประมาณ 600 – 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.20 – 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 80 – 90 ซึ่งได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว ขุยมะพร้าว เปลือกปาล์ม ไม้เนื้อแข็ง ขั้นตอนในการเตรียมถ่านกัมมันต์มี 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น ในขั้นตอนการกระตุ้นมี 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี เมื่อเปรียบเทียบการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี พบว่า การกระตุ้นทางเคมีมีการศึกษาและนำไปใช้งานมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้นในการกระตุ้น แต่ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง สารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ ซิงก์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผลิตได้มีการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นการกำจัดสารมลพิษในน้ำที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย และพบว่าถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถกำจัดสารมลพิษต่างๆ ได้แก่ โลหะหนัก สีย้อม สารกลุ่มฟีนอล สารฆ่าแมลง และศัตรูพืชในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การกระตุ้น การกำจัดสารมลพิษ

## Activated Carbon from Agricultural Residues by Chemical Activation for the Application of Pollutant Removal in Water

Theeradit Phothitontimongkol

Chemistry Program, Faculty of Science and Technology,  
Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok 10600, Thailand  
E-mail: QDUKDIKQ@gmail.com

Received: 21 April 2016 Accepted: 9 May 2017

### Abstract

The article aimed to focus on the literature reviews, summaries and disseminations of knowledge about the preparation of activated carbon from agricultural residues by chemical activation for the application of pollutant removal in water. The high surface area and pore volume of activated carbon is 600 – 2,400 m<sup>2</sup>/g and 0.20 – 1.00 cm<sup>3</sup>/g, respectively. Their component is consisted of 80 – 90% of carbon. Agricultural residues, e.g., rice straw, corncob, coconut shell, coconut coirpith, palm shell, hardwood, can be used for the preparation of activated carbon. The preparation of activated carbon comprises two steps including the carbonization and activation. In addition, the activation step can be classified into two methods: physical and chemical activation. Chemical activation is, however, applied to prepare activated carbon more than physical activation due to lower temperature and less time consuming with high surface area and pore volume of activated carbon. The chemical agents, such as ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and KOH are favorably used for the activation. Activated carbons from agricultural residues are applied as absorbent in the adsorption process and widely used for the pollutants removal in water. It is found that the efficiency of activated carbon from agricultural residues can be used to remove the pollutants, e.g., heavy metals, dyes, phenols and pesticides, in water.

**Keywords:** Activated carbon, Agricultural residues, Activation, Pollutant removal

บทนำ

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมได้ราย-

งานแนวโน้มปี พ.ศ. 2558 เกี่ยวกับการพัฒนา  
และความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจของประเทศไทย

เกิดการขยายตัวอย่างสูงและต่อเนื่องของภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม อุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ จัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญและเกิดการขยายตัวที่ตึ่ขึ้น (Office of Industrial Economics, 2014) ในขณะที่เดียวกันก็ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ โดยเฉพาะมลพิษทางแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนทั้งสารอินทรีย์ เช่น สีย้อม (dye) สารฆ่าแมลงและศัตรูพืช (pesticide) ฟีนอล (phenol) รวมทั้งสารอนินทรีย์คือ โลหะหนัก (heavy metal) ทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์ สัตว์ และพืช (Foo and Ha-meed, 2010; Omri et al., 2014; Zhaohong et al., 2014) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนและควบคุมน้ำทิ้งจากแหล่งอุตสาหกรรมที่กล่าวมา ให้มีปริมาณสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นพิษลดน้อยลงอยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้ จึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยวิธีการบำบัดมีหลายวิธีแต่หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมและมีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องคือ การดูดซับ (adsorption) เนื่องจากราคาไม่แพง การบำบัดใช้เวลาน้อย การวางระบบใช้อุณหภูมิและความดันปกติ และไม่ต้องใช้สารเคมีในการปรับสภาพน้ำเสีย (Moyo et al., 2013; Maneechakr, 2012) โดยใช้ตัวดูดซับ (absorbent) ชนิดถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและรูพรุนจำนวนมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซับมลพิษสูง (Chaouch et al., 2014; Fathy et al., 2012; Kaosuah et al., 2013; Moyo et al., 2013; Saygilli et al., 2015; Singh et al., 2008; Suhu et al., 2010)

วัสดุตั้งต้นที่นำมาใช้เตรียมและผลิตถ่านกัมมันต์ได้ต้องเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ชีวมวล (biomass) เซลลูโลส (cellulose) พีต (peat) ลิกไนต์ (lignite) ถ่านหิน (coal) (Mopoung, 2015) นอกจากนี้ยังมีวัสดุทางเลือกอีกกลุ่มที่สามารถใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ได้ และมีการศึกษาวิจัยอย่างมากคือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (agricultural residues) เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Ioannidou and Zabaniotou, 2007; Saygilli et al., 2015) เช่น เปลือกแอปริคอต (apricot shell) ชังข้าวโพด (corn cob) เปลือกมะพร้าว (coconut husk) (Tan et al., 2008b) เปลือกขนุน (jackfruit peel) (Prahas et al., 2008) ไม้มะกอก (olive tree wood) (Ould-Idriss et al., 2011) เมล็ดมะกอก (olive stones) (Yakout and Sharaf, 2012) เครือกล้วย (banana empty fruit bunch) (Sugumaran et al., 2012) เปลือกปาล์มน้ำมัน (oil palm shell) (Hesas et al., 2013) ไม้เนื้อแข็ง (hard wood) (Yagmur et al., 2013) ลำต้นอินทผลัม (date stems) (Hadoun et al., 2013) ก้านดาวเรือง (marigold straw) (Qin et al., 2014) แกลบข้าว (rice husk) และกากกาแฟ (coffee husk) (Saygilli et al., 2015) วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้มีวิธีการเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) ซึ่งวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นวิธีที่มีการนำมาใช้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์กันอย่างแพร่หลาย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากมีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก เวลาการกระตุ้นน้อย อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำ และถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนสูง สารเคมีที่ได้รับความนิยม

นำมาใช้ในการกระตุ้นทางเคมี ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) (Sahu et al., 2010; Hesas et al., 2013; Saygili et al., 2015) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) (Prahas et al., 2008; Ould-Idriss et al., 2011; Qin et al., 2014) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Ioannidou and Zabaniotou., 2007; Tan et al., 2008a; Sugumaran et al., 2012; Mestre et al., 2014)

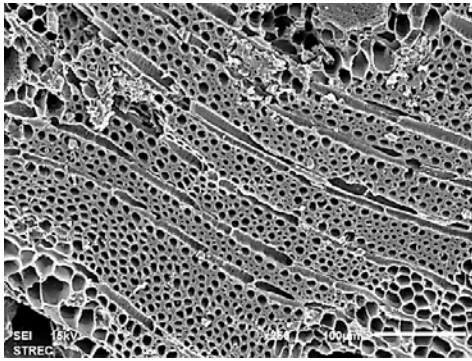
งานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมา ประเทศไทย น่าจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อใช้ภายในประเทศและขยายตลาดเพื่อการส่งออกได้ในอนาคต เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศทางเกษตรกรรม ย่อมมีผลพลอยได้เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ได้ เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย ทะลายปาล์ม (Vitidsant, 2011) รวมทั้งนำถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับเพื่อใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อสรุปและเผยแพร่เนื้อหาความรู้จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี และนำถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารมลพิษในน้ำ

### ถ่านกัมมันต์

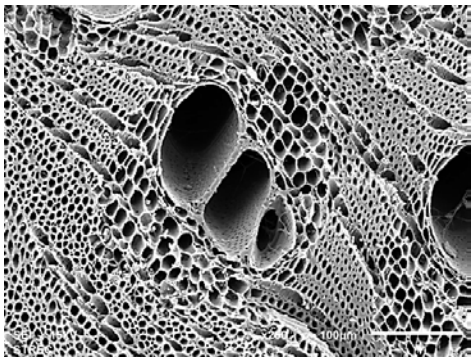
ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่สามารถผลิตได้จากการนำวัสดุทางธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการกระตุ้นจนได้ผลิตภัณฑ์สีดำในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amor-

phous carbon) โดยประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 80–90 และธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วมเพียงเล็กน้อย เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน ธาตุที่เป็นองค์ประกอบเหล่านี้วิเคราะห์โดยเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (elemental analysis, EA) (Mestre et al., 2014; Monreno-Castilla et al., 2001; Sun, K., and Jiang, 2010; Yagmur et al., 2013) ส่วนโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวสูง (ภาพที่ 1) โดยปริมาตรรูพรุน (pore volume) มีค่าประมาณ 0.20 ถึงมากกว่า 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ( $cm^3/g$ ) และพื้นที่ผิว (surface area) มีค่าประมาณ 600 ถึงมากกว่า 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม ( $m^2/g$ ) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้นและกระบวนการกระตุ้น (Virginia and Adrián, 2012) ลักษณะทางกายภาพและปริมาณรูพรุน และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สามารถศึกษาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) และเครื่องการตรวจวัดพื้นผิวและความมีรูพรุนของสารตัวอย่าง (surface area and porosity analysis, BET) ตามลำดับ (Bouchelta et al., 2008; Qin et al., 2014; Saka, 2012) นอกจากนี้โครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์สามารถยืนยันได้โดยการพิสูจน์เอกลักษณ์ (characterization) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction spectroscopy, XRD) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) (Hadoun et al., 2013; Sricharoenchaikul et al., 2008)

ถ่านกัมมันต์ยังสามารถจำแนกได้เป็นชนิดผง (powder) มีขนาดประมาณ 15 – 25  $\mu m$



(a)



(b)

**ภาพที่ 1** ลักษณะรูพรุนและพื้นที่ผิวของ (a) ถ่านคาร์บอน และ (b) ถ่านกัมมันต์จากกลองจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ถ่ายโดย วีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล, 2558)

และชนิดเกล็ด (granular) มีขนาดประมาณ 1 – 5 มิลลิเมตร (mm) ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนี้มีการใช้งานจริงอย่างแพร่หลาย (Mopoung, 2015) อีกทั้งประเทศไทยได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเกล็ด (มอก.900 – 2547) แสดงในตาราง 1 (Temtarasilp, 2008; Vitidsant, 2011) จากลักษณะคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงและนำมาใช้บำบัดสารมลพิษในน้ำ (Virginia and Adrián, 2012) เช่น กำจัดสารมลพิษกลุ่มฟีนอล

ด้วยถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้จำพวกต้นกกและต้นอ้อ (reed biomass) (Fathy et al., 2012) สีย้อมบำบัดโดยถ่านกัมมันต์จากแกนผลมะกอก (olive cores) (Kaosuah et al., 2013) สารฆ่าแมลงและศัตรูพืชถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลัม (Salman et al., 2011) และโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว ไอออนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์มและกะลามะพร้าว (Rahman et al., 2014) จากงานวิจัยที่ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดมลพิษในน้ำจะเห็นได้ว่าวัสดุตั้งต้นที่นักวิจัยให้ความสนใจเพื่อใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

**ตาราง 1** คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์มาตรฐานกำหนด	
	ชนิดผง	ชนิดเกล็ด
1. ค่าไอโอดีน	≥ 600	≥ 600
2. ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm <sup>3</sup> )	0.20 ถึง 0.75	≥ 0.20
3. ความชื้น (ร้อยละ)	-	≤ 8
4. ความแข็ง (ร้อยละ)	-	≥ 70

ที่มา: Temtarasilp, 2008; Vitidsant, 2011

### วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

วัสดุทางธรรมชาติหรือบางครั้งเรียกว่า วัสดุชีวมวล (biomass) ซึ่งรวมถึงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นวัสดุตั้งต้นที่สำคัญในการใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งในประเทศไทยสามารถหาได้ง่ายและมีปริมาณมากเนื่องจากเป็นประเทศที่เจริญก้าวหน้าและมีรากฐานด้านการเกษตรกรรมที่ชัดเจน ทำให้วัสดุชนิดนี้มีต้นทุนต่ำ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Mopoung, 2015; Vitidsant, 2011;) นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มคุณ-

ค่าทางการใช้งานและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของประเทศไทยในปัจจุบัน โดยหลักในการพิจารณาเลือกวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่จะนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ คือ ปริมาณคาร์บอนสูง และปริมาณเถ้า (ash) ต่ำ (สารอินทรีย์ หรือแร่ธาตุ) (Hesas et al., 2013; Ioannidou and Zabaniotou, 2007) โดยวัสดุตั้งต้นที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนที่สูงเช่นกัน อีกทั้งปริมาณเถ้าที่ต่ำในวัสดุตั้งต้นเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าสิ่งปนเปื้อนในวัสดุตั้งต้นก็มีน้อย เมื่อนำมาผลิตถ่านกัมมันต์จะได้ถ่านกัม-

มันต์ที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนที่มากพอ เนื่องจากโอกาสที่เถ้าจะไปปิดกั้นรูพรุนของคาร์บอนภายในถ่านกัมมันต์ก็ลดลงตามปริมาณเถ้าจากวัสดุตั้งต้น (Mopoung, 2015) ซึ่งตาราง 2 แสดงตัวอย่างวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ศึกษาจากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า มีปริมาณคาร์บอนสูงมีค่าประมาณร้อยละ 40 – 50 และปริมาณเถ้าต่ำประมาณร้อยละ 0.20 – 10.00 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากงานวิจัยมีปริมาณคาร์บอนแปรผันตรงกันข้ามกับปริมาณเถ้าเป็นส่วนมาก

ตาราง 2 ตัวอย่างปริมาณคาร์บอน และปริมาณเถ้าในวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	ปริมาณคาร์บอน <sup>๑</sup> (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ซีเลียมจากไม้ยางพารา (Srinivasakannan and Bakar, 2004)	43.98	0.74
ไม้เบิร์ค (birch wood) (Budino va et al., 2006)	48.40	0.20
สบู่ดำ (physic nut) (Sricharoenchaikul et al., 2008)	45.50	6.30
เปลือกทุเรียน (durian shell) (Jun et al., 2010)	39.30	4.84
ฝักต้นหางนกยูงฝรั่ง (delonix regia fruit pod) (Sugumaran et al., 2012)	34.22	2.80
เครือกล้วย (banana empty fruit bunch) (Sugumaran et al., 2012)	41.75	15.73
ไม้เนื้อแข็ง (Yagmur et al., 2013)	49.02	0.38
เปลือกปาล์มน้ำมัน (Hesas et al., 2013)	54.70	7.20
เศษไม้คอร์ก (Mestre et al., 2014)	56.30	1.80
ก้านดาวเรือง (Qin et al., 2014)	46.73	-

<sup>๑</sup>วิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (elemental analysis)

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่จะใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ต้องผ่านขั้นตอนการเตรียม ได้แก่ การอบทำให้แห้ง บด และคัดขนาด จากนั้นนำมาทำให้เป็นถ่านชาร์ (char) ขั้นตอนนี้เรียกว่า การคาร์บอนไนซ์ (carbonization) เป็นการไพโรไลซิส

แบบหนึ่ง โดยเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส หรือเป็นการทำถ่านตามรูปแบบภูมิปัญญาชาวบ้านทั่วไป ทำให้ได้ปริมาณคาร์บอนสูงมากขึ้น และวัตถุดิบมีรูพรุนก่อนนำไปเข้าขั้นตอนการกระตุ้น นอกจากนั้นการคาร์-

บอไนซ์ยังช่วยกำจัดธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ ออกมาในรูปของน้ำมันคาร์ และแก๊ส ทำให้เกิดการเจือปนตัวของคาร์บอนที่เป็นระเบียบมากขึ้น (Demiral et al., 2011; Temtarasilp, 2008; Vitid-sant, 2011)

### การกระตุ้น

ถ่านที่ได้จากการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรผ่านขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์จะถูกนำมาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพให้มีพื้นที่ผิวและความพรุนมากขึ้นจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษได้ดีขึ้น (Acharya et al., 2009; Fathy et al., 2012; Kaosuah et al., 2013; Rahman et al., 2014; Salman et al., 2011 และ Singh et al., 2008) ขั้นตอนนี้เรียกว่า การกระตุ้น (activation) แบ่งได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) (Ioannidou and Zabaniotou, 2007; Virginia and Adrián, 2012) สามารถอธิบายได้พอสังเขปดังนี้

**การกระตุ้นทางกายภาพ** นำถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์มากระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือไอน้ำที่อุณหภูมิกระตุ้น (activation temperature) ประมาณ 600–950°C นอกจากนี้ยังมีการรายงานเกี่ยวกับอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ของการกระตุ้นทางกายภาพที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พบว่า มีการใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์สูงประมาณ 400–850°C และบางวัตถุประสงค์ใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์สูงถึง 1,000°C ซึ่งอุณหภูมิตั้งขั้นตอนจากการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นทางกายภาพเป็น

การเพิ่มการใช้พลังงานอย่างมาก และเพิ่มค่าใช้จ่ายในทางอ้อม ทั้งยังไม่สามารถควบคุมสมบัติของถ่านคาร์ให้คงที่ได้ รวมถึงพื้นที่ผิวและรูพรุนเกิดในปริมาณน้อย (Ioannidou and Zabaniotou, 2007; Virginia and Adrián, 2012)

อย่างไรก็ตาม วิธีนี้นักวิจัยยังใช้ศึกษาในการเตรียมถ่านกัมมันต์อย่างต่อเนื่อง Zhang et al. (2004) เตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้โอ๊ก (oak) แคนข้าวโพด (corn hulls) และชังข้าวโพด (corn stover) กระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 และ 800°C โดยการผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 2 ชั่วโมง พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าพื้นที่ผิวประมาณ 400–1,000 m<sup>2</sup>/g และปริมาตรรูพรุนประมาณ 0.38–0.66 cm<sup>3</sup>/g Bouchelta et al. (2008) ใช้เมล็ดอินทผลัมกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ โดยใช้อุณหภูมิการไพโรไลซิส และอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีค่าพื้นที่ผิวประมาณ 635 m<sup>2</sup>/g Demiral et al. (2011) ผลิตถ่านกัมมันต์จากกากมะกอก (olive bagasse) อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่ 500°C ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน จากนั้นกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 750–900°C พบว่า ปริมาตรรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.2981–0.6067 cm<sup>3</sup>/g และค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงระหว่าง 523–1,106 m<sup>2</sup>/g Lo et al. (2012) เตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ ใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ที่ 600°C และอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีค่าพื้นที่ผิวประมาณ 464.70–589.65 m<sup>2</sup>/g สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ไม่ต้องใช้สารเคมี ทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อนในกระบวนการ และไม่ต้องเสียเวลาดังสารเคมีที่ตกค้าง (Ioannidou and Zabaniotou,

2007; Virginia and Adrián, 2012)

**การกระตุ้นทางเคมี** เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว และรูพรุนของวัสดุติบด้วยการกระตุ้นโดยใช้สารเคมีที่อุณหภูมิการกระตุ้นประมาณ 400 – 600°C ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุติบที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์และสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น สารเคมีที่นิยมใช้ส่วนมากมีสมบัติการดูดน้ำ (dehydrating agent) ได้แก่  $ZnCl_2$  KOH และ  $H_3PO_4$  แต่สารเคมีเหล่านี้มีสภาวะกัดกร่อนได้ ทำให้รูปแบบการกระตุ้นทางเคมี มีข้อเสีย คือ เกิดการกัดกร่อนระหว่างกระบวนการกระตุ้น ทำให้อุปกรณ์และเครื่องมือต้องออกแบบมาเป็นกรณีพิเศษต้องเสียเวลาในการล้างสารเคมีตกค้าง และเกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาข้อดีและประโยชน์ของการกระตุ้นทางเคมี ได้แก่ ใช้อุณหภูมิการกระตุ้นต่ำ ทำให้ประหยัดพลังงาน ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นเป็นขั้นตอนเดียวกัน ทำให้ใช้เวลาการกระตุ้นน้อยลง แต่อาจมีการแยกขั้นตอนระหว่างการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นออกจากกันได้ตามความเหมาะสมของวัสดุติบและสารเคมีที่ใช้ งาน และที่สำคัญผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีมีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง (Ioannidou and Zabaniotou, 2007; Temtarasilp, 2008; Virginia and Adrián, 2012; Vitidsant, 2011)

นักวิจัยหลายท่านได้นำวิธีการกระตุ้นทางเคมีมาใช้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลายชนิด เช่น Tan et al. (2008b) ใช้เปลือกมะพร้าวโดยใช้อุณหภูมิการทำเป็นถ่านที่ 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านที่ได้ แช่ในสารละลาย KOH ด้วยอัตราส่วนการแช่ (ร้อยละโดยมวล) 1 ต่อ 1 ของสารละลาย KOH ต่อถ่านเปลือกมะพร้าว และนำไป

กระตุ้นที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวเท่ากับ 1,940  $m^2/g$  และ 1.143  $cm^3/g$  ตามลำดับ Saka (2012) นำเปลือกต้นไผ่มาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  เข้มข้นร้อยละ 50 ใช้อุณหภูมิการกระตุ้น 600°C ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) เป็นเวลา 30 นาที มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1,289  $m^2/g$  และ 0.201  $cm^3/g$  ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ KOH และ  $ZnCl_2$  ในปีเดียวกัน Yakout and Sharaf (2012) ใช้เมล็ดมะกอกกระตุ้นด้วยสารละลาย  $H_3PO_4$  เข้มข้นร้อยละ 80 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1,218  $m^2/g$  และ 0.6  $cm^3/g$  ตามลำดับ Yagmur et al. (2013) นำไม้เนื้อแข็งกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย  $H_3PO_4$  เข้มข้นร้อยละ 85 ในอัตราส่วนการแช่โดยมวล 2 ( $H_3PO_4$ ) ต่อ 1 (ไม้เนื้อแข็ง) ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 2,143  $m^2/g$  และ 1.474  $cm^3/g$  ตามลำดับ และ Qin et al. (2014) กระตุ้นก้านดาวเรืองด้วยสารละลาย  $H_3PO_4$  ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนการแช่โดยมวล 2 ( $H_3PO_4$ ) ต่อ 1 (ก้านดาวเรือง) ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1,344.23  $m^2/g$  และ 0.91  $cm^3/g$  ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมีจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กระบวนการกระตุ้นทางเคมีขั้นตอนการกระตุ้นเกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียวโดยใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่น้อยลงซึ่งเป็นการลดต้นทุนทางหนึ่งในการผลิตถ่านกัมมันต์ แต่กลับให้พื้นที่ผิว



และปริมาณความพูนที่มากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีรูพรุนขนาดไมโครที่ดีและกระจายตัวสม่ำเสมอ รวมถึงร้อยละผลได้ (% yield) ของถ่านกัมมันต์มีค่าสูง และแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบเป็นเบื้อนถูกกำจัดให้ลดลง นอกจากนี้เมื่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นโอกาสที่จะใช้ในการกำจัดมลพิษในน้ำจะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ดังนั้นวิธีการกระตุ้นทาง

เคมีจึงมีการนำมาใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างมาก (Acharya et al., 2009; Fathy et al., 2012; Kaosuah et al., 2013) ทั้งนี้สารเคมีที่นำมาใช้ในการกระตุ้นทางเคมีเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้ศึกษา พบว่า  $H_3PO_4$ ,  $ZnCl_2$  และ  $KOH$  นิยมนำมาใช้กระตุ้นทางเคมีโดยใช้วัตถุติดเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรดังในตาราง 3

ตาราง 3 วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นโดยสารเคมี

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	อุณหภูมิในการกระตุ้น (°C)	อัตราส่วนการแช่สารเคมีต่อวัตถุติด (โดยมวล)	ค่าพื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)
<b>กระตุ้นโดยใช้สารละลาย <math>H_3PO_4</math></b>			
ก้านดาวเรือง (Qin et al., 2014)	400	2	1,344
ไม้ไผ่ (Liu et al., 2014)	400	-	1,692
เมล็ดมะกอก (Yakout and Sharaf, 2012)	500	-	1,218
ลำต้นอินทผลัม (Hadoun et al., 2013)	550	2	1,455
เปลือกขุ่น	550	4	1,250
<b>กระตุ้นโดยใช้สารละลาย <math>ZnCl_2</math></b>			
เปลือกมะพร้าว	500	1	1,275
เปลือกปาล์มน้ำมัน (Hesas et al., 2013)	500	0.65	1,672
เปลือกมะพร้าว (coirpith)	700	1	750
เมล็ดลูกพีช (peach stones)	800	2.5	2,050
<b>กระตุ้นโดยใช้สารละลาย <math>KOH</math></b>			
แกนฝักข้าวโพด (corn cobs)	550	2	1,350
ลำต้นอินทผลัม (stem of date palm)	600	3	950
เปลือกมันสำปะหลัง (cassava peel)	750	2.5	1,600
กากกาแฟ (coffee endocarp)	850	2	1,600
เปลือกมะพร้าว (Tan et al., 2008)	850	1	1,940

ที่มา: ดัดแปลงจาก Virginia and Adrián, 2012

จากตาราง 3 เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการกระตุ้น พบว่า  $H_3PO_4$  ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นน้อยที่สุด (400 – 600°C) รองลงมาคือ  $ZnCl_2$  (500 – 800°C) และ  $KOH$  (550 – 850°C) ตามลำดับ แต่ค่าพื้นที่ผิวเฉลี่ยจากสารเคมีทั้ง 3

ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 1,391 1,407 และ 1,488 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาข้อดีข้อเสียของสารเคมีแต่ละชนิด พบว่า  $KOH$  มีสภาพกัดกร่อนและเป็นสารเคมีอันตราย  $ZnCl_2$  สามารถเกิดเป็นสารประกอบกลุ่มซิงค์ที่มีความเสี่ยงต่อ

สิ่งแวดล้อม รวมทั้งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  ไม่สามารถนำมาใช้กับกลุ่มอุตสาหกรรมยาและอาหารได้ เนื่องจากจะเกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ ส่วน  $H_3PO_4$  สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และใช้พลังงานต่ำ (Yakout and Sharaf, 2012; Virginia and Adrián, 2012; Vitidsant, 2011) ข้อมูลเหล่านี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งในการใช้พิจารณาเพื่อเลือกสารเคมีที่ใช้กระตุ้นเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่นำมาใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ต้องมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกระตุ้นต่อไป เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามที่ต้องการกับงานที่ใช้

การใช้งานถ่านกัมมันต์ในปัจจุบันมีความเกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสารละลายให้บริสุทธิ์ก่อนนำเข้ากระบวนการผลิตทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาดในการอุปโภคและบริโภค เช่น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล อุตสาหกรรมการผลิตแป้ง อุตสาหกรรมผลิตยา อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และสารรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst supports) (Vitidsant, 2011; Suhu et al., 2010; Mopoung, 2015) แต่สำหรับการนำไปใช้งานที่จะกล่าวถึงในบทความฉบับนี้ คือ การใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อกำจัดสารมลพิษในน้ำเนื่องจากเล็งเห็นถึงการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมายในประเทศไทยดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งอาจส่งผลให้มีโอกาสเสี่ยงอย่างมากที่จะเกิดการปนเปื้อนของสารมลพิษในน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งข้อมูลการนำไปใช้ในบทความฉบับนี้จะมุ่งประเด็นสรุปจากงานวิจัยที่มีการ

ศึกษาอย่างแพร่หลายเพื่อแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำได้หลายชนิดอย่างมีประสิทธิภาพที่ดี

### ถ่านกัมมันต์กับการกำจัดสารมลพิษในน้ำ

วิธีการกำจัดสารมลพิษปนเปื้อนในน้ำเสียมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) มีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีที่ใช้สร้างตะกอน และกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการกำจัด การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ต้องใช้เรซินที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงขึ้น การบำบัดด้วยโอโซน (ozone treatment) มีราคาต้นทุนสูง และการติดตั้งระบบยุ่งยาก และเทคโนโลยีเยื่อแผ่น (membrane technology) ปัญหาเกิดการอุดตันของของเสียตามแผ่นเยื่อ ทำให้ต้องใช้แรงดันสูง และต้องใช้สารเคมีในการทำความสะอาดระบบ จากวิธีการบำบัดต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากต้นทุนต่ำ ใช้เวลาในการบำบัดน้อย สามารถใช้งานในสภาพอุณหภูมิและความดันปกติได้ และการปรับสภาพน้ำเสียไม่ต้องใช้สารเคมี (Kaosuah et al., 2013; Maneechakr, 2012; Moyo et al., 2013) รวมถึงมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดสารมลพิษในน้ำ เพราะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจากการกระตุ้นทางเคมีทำให้ถ่านกัมมันต์มีค่าความจุการดูดซับ (adsorption capacity) ที่สูงขึ้นสามารถดูดซับสารมลพิษได้มากขึ้น โดยสารมลพิษในน้ำที่มีการศึกษาการกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระตุ้นทางเคมี ได้แก่ สารมลพิษกลุ่มโลหะหนัก และสารมลพิษกลุ่มสารอินทรีย์

**สารมลพิษกลุ่มโลหะหนัก** Kobya et al. (2005) ใช้เมล็ดแอพริคอต Jyotikusum et al. (2009) ใช้ไม้มะขาม และ Rahman et al. (2014) ใช้เปลือกปาล์มและกะลามะพร้าวในการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ในการกำจัดไอออนของโครเมียม (VI) ( $Cr^{6+}$ ) และตะกั่ว (II) ( $Pb^{2+}$ ) ในน้ำพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่กล่าวมาสามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดได้ ไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption isotherms and kinetics) เป็นไปตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir) และ pseudo-second-order ตามลำดับ และค่าความจุการดูดซับสูงสุด (maximum adsorption capacity) ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดแอพริคอต ไม้มะขาม และเปลือกปาล์มในการดูดซับ  $Cr^{6+}$  ในสารละลายคือ 34.70 28.01 และ 46.30 mg/g ตามลำดับ ส่วนค่าความจุการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดแอพริคอต ไม้มะขาม เปลือกปาล์ม และกะลามะพร้าวในการดูดซับ  $Pb^{2+}$  ในสารละลายคือ 22.85 43.85 74.63 และ 73.53 mg/g ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่น ๆ ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เช่น สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวเหลือทิ้ง (algal bloom residue) เพื่อกำจัด  $Cr^{6+}$  ในสารละลาย (Zhang et al., 2010) กระดุมมะพร้าวเหลือทิ้ง (waste coconut buttons) (Anirudhan and Sreekumari, 2011) และเปลือกวอลนัท (walnut shell) (Manoochchri et al., 2012) เพื่อกำจัด  $Pb^{2+}$  ในสารละลาย สำหรับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ไอออนของปรอท (II) ( $Hg^{2+}$ ) แคดเมียม (II) ( $Cd^{2+}$ ) ทองแดง (II) ( $Cu^{2+}$ ) และนิกเกิล (II) ( $Ni^{2+}$ ) สามารถกำจัดได้โดยถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีกระตุ้นทางเคมี ตัวอย่างเช่น

$Hg^{2+}$  ในสารละลายถูกดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้เบิร์ค (birch wood) (Budinova et al., 2006) และกระดุมมะพร้าวเหลือทิ้ง (Anirudhan and Sreekumari, 2011) พบว่า ร้อยละของประสิทธิภาพการดูดซับ  $Hg^{2+}$  ในสารละลายมีค่ามากกว่า 90 ที่ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายประมาณ 6.0 จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบ pseudo-second-order ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ และฟรอนด์ลิช (Freundlich) ของถ่านกัมมันต์จากไม้เบิร์ค และกระดุมมะพร้าวเหลือทิ้ง ตามลำดับ และค่าความจุการดูดซับสูงสุดในการดูดซับ  $Hg^{2+}$  ในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้เบิร์ค และกระดุมมะพร้าวเหลือทิ้งคือ 160.00 และ 78.84 mg/g ตามลำดับ

$Cd^{2+}$  ในสารละลายมีการศึกษาการดูดซับโดย Kadirvelu and Namasivayam (2003) และ Kobya et al. (2005) นำขุยมะพร้าว (coconut coirpith) และเมล็ดแอพริคอต กระตุ้นทางเคมีจนได้ถ่านกัมมันต์ จากนั้นใช้ดูดซับ  $Cd^{2+}$  ในสารละลายที่ pH 5.0 พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ และค่าความจุการดูดซับสูงสุดในการดูดซับ  $Cd^{2+}$  ในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากขุยมะพร้าว และเมล็ดแอพริคอตคือ 93.4 และ 33.5 mg/g ตามลำดับ

$Cu^{2+}$  ในสารละลาย โดยนำเมล็ดแอพริคอต และกระดุมมะพร้าวเหลือทิ้งผลิตถ่านกัมมันต์ (Anirudhan and Sreekumari, 2011; Kobya et al., 2005) สารละลาย  $Cu^{2+}$  ที่ pH 6.0 มีค่าความจุการดูดซับสูงสุดในการดูดซับ  $Cu^{2+}$  ในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดแอพริคอต และกระดุมมะพร้าวเหลือทิ้งคือ 24.21 และ 73.60 mg/g ตามลำดับ จลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับ

เป็นไปตามสมการ pseudo-second-order และฟรุ้ง-ดลิตซ์ของถ่านกัมมันต์จากกระดุมมะพร้าวเหลือทิ้ง  $Ni^{2+}$  ในสารละลาย Kadirvelu et al. (2001) Kobya et al. (2005) และ Rahman et al. (2014) กระตุ้นทางเคมีโดยใช้แก่นมะพร้าว (coirpith) เมล็ดแอฟริคอต และเปลือกปาล์มและกะลา มะพร้าว ตามลำดับ พบว่า pH ของสารละลาย  $Ni^{2+}$  ที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 5.0 ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์จากแก่นมะพร้าว เปลือกปาล์มและกะลา มะพร้าว จลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-second-order ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์มและกะลามะพร้าว ค่าความจุการดูดซับสูงสุดในการดูดซับ  $Ni^{2+}$  ในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากแก่นมะพร้าว เมล็ดแอฟริคอต เปลือกปาล์ม และกะลามะพร้าวคือ 62.50 26.97 19.61 และ 12.18 mg/g ตามลำดับ

**สารมลพิษกลุ่มสารอินทรีย์** เป็นกลุ่มสารมลพิษที่มีความหลากหลาย สีย้อมเป็นหนึ่งในสารมลพิษที่มีการศึกษาการกำจัดโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร Yavuz and Aydin (2006) ใช้เปลือกเฮเซลนัท (hazelnut shell) กระตุ้นทางเคมีในการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อใช้กำจัดสีย้อมไดเรกต์ (direct dye) สีเหลือง 50 (DY50) สีแดง 80 (DR80) และสีน้ำเงิน 71 (DB71) พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ และค่าความจุการดูดซับสูงสุดในการดูดซับสีย้อมไดเรกต์ทั้ง 3 ชนิดในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากเปลือกเฮเซลนัท คือ 11.00 14.00 และ 26.00 mg/g ตามลำดับ สำหรับ สีย้อมเบสิกเรด 46 (basic red 46) และคองโกเรด (congo red) สามารถถูกดูดซับได้ด้วยถ่านกัมมันต์เช่นกัน โดยใช้แกนผลมะกอก (Kaosuah et al.,

2013) และต้นหางนกยูง (flame tree) (Rajappa et al., 2014) เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์บดบดในสารละลายที่ pH เท่ากับ 9.0 และ 4.0 ของสีย้อมเบสิกเรด 46 และคองโกเรด ตามลำดับ จลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามสมการ pseudo-second-order และแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ค่าความจุการดูดซับสูงสุดในการดูดซับสีย้อมเบสิกเรด 46 และคองโกเรดในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากแกนผลมะกอก และต้นหางนกยูง คือ 781.25 และ 62.50 mg/g ตามลำดับ นอกจากการศึกษาการกำจัดสีย้อมยังมีนักวิจัยที่สนใจการกำจัดสารมลพิษชนิดฟีนอล และสารฆ่าแมลงและศัตรูพืช ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

ช่วงปี ค.ศ. 2008–2011 สาร 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-trichlorophenol) เป็นสารมลพิษที่นักวิจัยสนใจหาวิธีการกำจัด โดย Tan et al. (2008) ใช้เปลือกมะพร้าวเตรียมถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับ 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล ได้ 191.73 mg/g ในปีถัดมา Tan et al. (2009) ยังคงศึกษาการกำจัด 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล แต่เปลี่ยนวัสดุในการเตรียมถ่านกัมมันต์เป็นเปลือกปาล์มซึ่งสามารถดูดซับได้ในระบบคอลัมน์ และเมื่อปีค.ศ. 2011 ต้น *loosestrife* ถูกนำมากระตุ้นทางเคมีในการผลิตถ่านกัมมันต์โดย Fan et al. พบว่า สามารถดูดซับ 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอลได้ สูงสุดเท่ากับ 367.65 mg/g และจลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-second-order ของถ่านกัมมันต์จากต้น *loosestrife* อย่างไรก็ตามยังคงมีสารฟีนอลอื่น ๆ ที่ต้องศึกษาการกำจัดเช่นกัน คือ 4-ไนโตรฟีนอล (4-nitrophenol) ซึ่งกำจัดได้ด้วยการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากต้นกก พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องตามสมการแลงเมียร์

ค่าการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 227.30 mg/g และจลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo-second-order (Fathy et al., 2012)

สารฆ่าแมลงและศัตรูพืช ได้แก่ กรด 2,4-ไดคลอโรฟีนอกซีแอซิดิก (2,4-dichlorophenoxyacetic acid) (Hameed et al., 2009) เบนทาโซน (bentazon) และคาร์โบฟูแรน (carbofuran) (Salman et al., 2011) มีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลัม พบว่า กรด 2,4-ไดคลอโรฟีนอกซีแอซิดิก เบนทาโซน และคาร์โบฟูแรนถูกดูดซับได้ดีบนถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลัม แต่ไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์การดูดซับมีความแตกต่างกันคือ กรด 2,4-ไดคลอโรฟีนอกซีแอซิดิก ที่ pH 3.6 มีไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกันกับสมการแลงเมียร์ และ pseudo-first-order มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 238.10 mg/g สำหรับเบนทาโซนและคาร์โบฟูแรน ที่ pH 5.5 มีไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกันกับสมการฟรุนดลิช และ pseudo-second-order ตามลำดับ มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 86.26 และ 137.04 mg/g ของเบนทาโซนและคาร์โบฟูแรน ตามลำดับ

### บทสรุป

ขั้นตอนในการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น ซึ่งการคาร์บอนไนซ์ทำให้ได้เพียงถ่านคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนต่ำ แต่เมื่อนำเข้าสู่ขั้นตอนการกระตุ้นส่งผลให้ถ่านคาร์บอนมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงมากที่เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ วิธีการกระตุ้นมี 2 วิธี ได้แก่ การ

กระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งวิธีการกระตุ้นทางเคมีจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงมากกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้วิธีการกระตุ้นทางเคมีมีการศึกษาและต่อยอดพัฒนางานวิจัยที่หลากหลาย สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยส่วนมากสารเคมีที่มีการใช้ ได้แก่  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$  และ  $KOH$  นอกจากนี้ขั้นตอนในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีความสำคัญแล้ว วัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้รับความสนใจอย่างมากคือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพราะมีต้นทุนต่ำ หาได้ง่าย และมีปริมาณคาร์บอนสูง ประเทศไทยมีต้นทุเรียนวัตถุประสงค์ที่ดีและเหมาะสม เนื่องจากเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้หาวัตถุดิบได้ไม่ยากและมีจำนวนมากเพียงพอในการใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ ประโยชน์และการนำไปใช้งานของถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แสดงให้เห็นได้จากงานวิจัยหลายฉบับที่ใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นตัวดูดซับทางเลือกในกระบวนการดูดซับซึ่งเป็นวิธีการกำจัดสารมลพิษในน้ำที่มีประสิทธิภาพอีกทางหนึ่ง และกลุ่มสารมลพิษในน้ำที่สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ โลหะหนัก สีย้อม สารกลุ่มฟีนอล และสารฆ่าแมลงและศัตรูพืช กลุ่มสารมลพิษดังกล่าวสามารถตรวจพบได้ในกิจกรรมและกระบวนการที่เกี่ยวข้องในหลายอุตสาหกรรมที่มีการประกอบการในประเทศไทย ส่งผลทำให้เกิดโอกาสที่สารมลพิษเหล่านี้จะมีการปนเปื้อนออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และเป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช ดังนั้นการเตรียมถ่านกัม-

มันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีนับเป็นสิ่งที่น่าสนใจและศึกษาพัฒนาการต่อไป เพื่อใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของประเทศไทย หรืออาจมีการนำถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผลิตได้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องอุปโภคบริโภค อาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

### เอกสารอ้างอิง

- Acharya, J., Sahu, J. N., Mohanty, C. R., and Meikap, B. C. (2009). Removal of lead(II) from wastewater by activated carbon developed from Tamarind wood by zinc chloride activation. **Chemical Engineering Journal** 149: 249–262.
- Acharya, J., Sahu, J. N., Mohanty, C. R., and Meikap, B. C. (2009). Removal of chromium(VI) from wastewater by activated carbon developed from Tamarind wood activated with zinc chloride. **Chemical Engineering Journal** 150: 25–39.
- Anirudhan, T. S., and Sreekumari, S. S. (2011). Adsorptive removal of heavy metal ions from industrial effluents using activated carbon derived from waste coconut but-tons. **Journal of Environmental Sciences** 23(12): 1989–1998.
- Bouchelta, C., Medjram, M. S., Bertrand, M., and Bellat, J. P. (2008). Preparation and characterization of activated carbon from date stones by physical activation with steam. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 82: 70–77.
- Budinova, T., Ekinci, E., Yardim, F., Grimm, A., Bjombom, E., Minkova, V., and Goranova, M. (2006). Characterization and application of activated carbon produced by  $H_3PO_4$  and water vapor activation. **Fuel Processing Technology** 87: 899–905.
- Chaouch, N., Ouahrani, M. R., and Laouini, S. E. (2014). Adsorption of lead(II) from aqueous solutions onto activated carbon prepared from algerian dates stones of *Phoenix dactylifera* L. (Ghars variety) by  $H_3PO_4$  activation. **Oriental Journal of Chemistry** 30(3): 1317–1322.
- Demiral, H., Demiral, İ., Karabacakoğlu, B., and Tümsek, F. (2011). Production of activated carbon from olive bagasse by physical activation. **Chemical Engineering Research and Design** 89: 206–213.
- Fan, J., Jian, Zhang, J., Zhang, C., Ren, L., and Shi, Q. (2011). Adsorption of 2, 4, 6-trichlorophenol from aqueous solution onto activated carbon derived from loosestrife. **Desalination** 267: 139–146.
- Fathy, N. A., Sayed, S. A., and El-enin, R. M. M. A. (2012). Effect of activation temperature on textural and adsorptive properties for activated carbon derived from local reed biomass: Removal of *p*-Nitrophenol. **Environmental Research, Engineering and Management** 59(1): 10–22.

- Foo, K. Y., and Hameed, B. H. (2010). Decontamination of textile wastewater via TiO<sub>2</sub>/activated carbon composite materials. **Advances in Colloid and Interface Science** 159: 130–143.
- Hadoun, H., Sadaoui, Z., Souami, N., Sahel, D., and Toumert, I. (2013). Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> chemical activation. **Applied Surface Science** 280: 1–7.
- Hameed, B. H., Salman, J. M., and Ahmad, A. L. (2009). Adsorption isotherm and kinetic modeling of 2, 4-D pesticide on activated carbon derived from date stones. **Journal of Hazardous Materials** 163: 121–126.
- Hesas, R. H., Arami, A. N., Duad, W. M. A., and Sahu, J. N. (2013). Comparison of oil palm shell-based activated carbons produced by microwave and conventional heating methods using zinc chloride activation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 104: 176–184.
- Ioannidou, O., and Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 1: 1966–2005.
- Jun, T. Y., Arumugam, S. D., Latip, N. H. A., Abdullah, A. M., and Latif, P. A. (2010). Effect of activation temperature and heating duration on physical characteristics of activated carbon prepared from agriculture waste. **Environment Asia** 3: 143–148.
- Kadirvelu, K., and Namasivayam, C. (2003). Activated carbon from coconut coirpith as metal adsorbent: adsorption of Cd(II) from aqueous solution. **Advances in Environmental Research** 7: 471–478.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K., and Namasivayam, C. (2001). Adsorption of nickel(II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from coirpith. **Separation and Purification Technology** 24: 497–505.
- Kaosuah, F., Kaouah, B., Berrama, T., Trai, M., and Bendjama, B. (2013). Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (*oleaster*) by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> for the removal of Basic Red 46. **Journal of Cleaner Production** 54: 296–306.
- Kobyas, M., Demirbas, E., Senturk, E., and Ince, M. (2005). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone. **Biore-source Technology** 96: 1518–1521.
- L. D. (2012). Adsorption capacity and removal efficiency of heavy metal ions by Moso and Ma bamboo activated carbons. **Chemical Engineering Research and Design** 90: 1397–1406.
- Liu, S. L., Wang, Y. N., and Lu, K. T. (2014). Preparation and pore characterization of

- activated carbon from Ma bamboo (*Dendrocalamus latiflorus*) by  $H_3PO_4$  chemical activation. **Journal of Porous Materials** 21: 459–466.
- Lo, S. F., Wang, S. Y., Tsai, M. J., and Lin, Maneechakr, P. (2012). Preparation of activated carbon from the seed of *Terminalia catappa*. **Apheit Journals** 18(1): 119–128. (in Thai)
- Manoochehri, M., Khorsand, A., and Hashemi, E. (2012). Role of activated carbon modified by  $H_3PO_4$  and  $K_2CO_3$  from natural adsorbent for removal of Pb(II) from aqueous solutions. **Carbon Letters** 13(3): 167–172.
- Mestre, A. S., Pires, R. A., Aroso, I., Fernandes, E. M., Pinto, M. L., , Reis, R. L., Andrade, M. A., Pires, J., Silva, S. P., and Carvalho, A. P., C. (2014). Activated carbons prepared from industrial pre-treated cork: Sustainable adsorbents for pharmaceutical compounds removal. **Chemical Engineering Journal** 253: 408–417.
- Monreno-Castilla, C., Carrasco-Marin, F., López-Ramón, V., Alvarez-Merino, M. A. (2001). Chemical and physical activation of olive-mill waste water to produce activated carbons. **Carbon** 39: 1415–1420.
- Mopoung, S. (2015). **Activated caron**. Phitsanulok: Naresuan University. (in Thai)
- Moyo, M., Chikazaza, L., Chomunorwa, B., and Guyo, U. (2013). Adsorption batch studies on the removal of Pb(II) using Maize Tassel based activated carbon. **Journal of Chemistry** Article ID508934.
- Office of Industrial Economics. (2014). **The Summary of Economic Circumstance Industry A. D. 2014 and the tendency of A. D. 2015**. Bangkok: Ministry of Industry Thailand. (in Thai)
- Omri, A., Lambert, S. D., Geens, J., Bennour, F., and Benzina, M. (2014). Synthesis, surface characterization and photocatalytic activity of  $TiO_2$  supported on almond shell activated carbon. **Journal of Materials Science & Technology** 30(9): 894–902.
- Ould-Idriss, A., Stitou, M., Cuerda-Correa, E. M., Fernández-González, C., Macías-García, A., Alexandre-Franco, M.F., and Gómez-Serrano, V. (2011). Preparation of activated carbons from olive-tree wood revisited. I. Chemical activation with  $H_3PO_4$ . **Fuel Processing Technology** 92: 261–265.
- Prahas, D., Kartika, Y., and Indraswati, N., Ismadji, S. (2008). Activated carbon from jackfruit peel waste by  $H_3PO_4$  chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization. **Chemical Engineering Journal** 140: 32–42
- Qin, C., Chen, Y., and Gao, J. (2014). Manufacture and characterization of activated carbon from marigold straw (*Tag-*



- etes erecta* L.) by  $H_3PO_4$  chemical activation. **Materials Letters** 135: 123–126.
- Rahman, M. M., Adil, M., Yusof, A. M, Kamaruzzaman, Y. B., and Ansary, R. H. (2014). Removal of heavy metal ions with acid activated carbons derived from oil palm and coconut shells. **Materials** 7: 3634–3650.
- Rajappa, A., Ramesh, K., and Nandhakumar, V. (2014). Removal of congo red dye from aqueous solution using  $ZnCl_2$  activated carbon prepared from *Delonix regia* pods (Flame Tree). **International Journal of Chemistry and Pharmaceutical Sciences** 2(7): 961–971.
- Sahu, J. N., Jyotikusum, A., and Meikap, B.C. (2010). Optimization of production conditions for activated carbons from Tamarind wood by zine chloride using response surface methodology. **Bioresource Technology** 101: 1974–1982.
- Saka, C. (2012). BET, TG–DTG, FT–IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with  $ZnCl_2$ . **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 95: 21–24.
- Salman, J. M., Njoku, V. O., and Hameed, B. H. (2011). Bentazon and carbofuran adsorption onto date seed activated carbon: Kinetics and equilibrium. **Chemical Engineering Journal** 173: 361–368.
- Saygılı, H., Güzel, F., and Önal, Y. (2015). Conversion of grape industrial processing waste to activated carbon sorbent and its performance in cationic and anionic dyes adsorption. **Journal of Cleaner Production** 93: 84–93.
- Singh, C. K., Sahu, J. N., Mahalik, K. K., Mohanty, C. R., Raj Mohan, B., and Meikap, B.C. (2008). Studies on the removal of Pb(II) from wastewater by activated carbon developed from Tamarind wood activated with sulphuric acid. **Journal of Hazardous Materials** 153: 221–228.
- Sricharoenchaikul, V., Pechyen, C., Aht-ong, D., and Atong, D. (2008). Preparation and characterization of activated carbon from the pyrolysis of physic nut (*Jatropha curcas* L.) waste. **Energy Fuels** 22(1): 31–37.
- Srinivasakannan, C. S., and Bakar, M. Z. A. (2004). Production of activated carbon from rubber wood sawdust. **Biomass & Bioenergy** 27: 89–96.
- Sugumaran, P., Priya Susan, V., Ravichandran, P., and Seshadri, S. (2012). Production and characterization of activated carbon from banana empty fruit bunch and *Delonix regia* fruit pod. **Journal of Sustainable Energy & Environment** 3: 125–132.
- Sun, K., and Jiang, J. C. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. **Biomass and Bioen-**

- ergy 34: 539–544.
- Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., and Hameed, B. H. (2008a). Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. **Journal of Hazardous Materials** 154: 337–346.
- Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., and Hameed, B. H. (2008b). Preparation of activated carbon from coconut husk: Optimization study on removal of 2, 4, 6-trichlorophenol using response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials** 153: 709–717.
- Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., and Hameed, B. H. (2009). Fixed-bed adsorption performance of oil palm shell-based activated carbon for removal of 2, 4, 6-trichlorophenol. **Bio-resource Technology** 100: 1494–1496.
- Temtarasilp, P. (2008). **Preparation and characterization of activated carbon from *Dendrocalamus asper* Backer and *Dendrocalamus Latiflorus***. Master of Science (Chemistry). Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- Virginia, H. M., and Adrián, B. P. (2012). **Lignocellulosic Precursors used in the Synthesis of Activated Carbon: Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment**. Croatia: InTech.
- Vitidsant, T. (2011). **Activated carbon: Production and application**. 2nd ed. Khon Kaen: Klangnanavithaya. (in Thai)
- Yagmur, E., Tunc, M. S., Banford, A., and Zeki, A. (2013). Preparation of activated carbon from autohydrolysed mixed southern hardwood. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 104: 470–478.
- Yakout, S. M., and Sharaf, G. (2012). Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones. **Arabian Journal of Chemistry** 9(2): S1155–S1162.
- Yavuz, O., and Aydin, A. H. (2006). Removal of direct dyes from aqueous solution using various adsorbents. **Polish Journal of Environmental Studies** 15(1): 155–161.
- Zhang, H., Tang, Y., Cai, D., Liu, X., Wang, X., Huang, Q., and Yu, Z. (2010). Hexavalent chromium removal from aqueous solution by algal bloom residue derived activated carbon: Equilibrium and kinetic studies. **Journal of Hazardous Materials** 181: 801–808.
- Zhang, T., Walawender, W. P., Fan, L. T., Fan, M., Daugaard, D., and Brown, R. C. (2004). Preparation of activated carbon from forest and agricultural residues through CO<sub>2</sub> activation. **Chemical Engineering Journal** 105: 53–59.
- Zhang, Z., Yu, F., Huang, L., Juatieli, J., Li, Y., Song, L., Yu, N., and Dionysiou, D. D. (2014). Confirmation of hydroxyl radicals (<sup>•</sup>OH) generated in the presence of TiO<sub>2</sub>

Supported on AC under microwave irradiation. **Journal of Hazardous Materials** 278: 152–157.

Zhaohong, Z., Fengyang, Y., Lirong, H., Jian-aerguli, J., Yuanyuan, L., Lijun, S., Ning, Y., Dionysios, D. D. (2014). Confirmation of hydroxyl radicals ( $\cdot\text{OH}$ ) generated in the presence of  $\text{TiO}_2$  Supported on AC under microwave irradiation. **Journal of Hazardous Materials** 278: 152–157.