



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลของประเทศไทย: การทบทวนวรรณกรรม

Activated carbon from Thailand's biomass: A review literature

ยุวรัตน์ เงินเย็น* และชนินษฐา คำวิลัยศักดิ์

Yuvarat Ngernyen* and Khanita Kamwilaisak

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 40002

Received October 2012

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตรชนิดต่างๆ โดยกำหนดขอบเขตเฉพาะงานวิจัยภายในประเทศไทย การเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยการคาร์บอนไนซ์ซึ่งขึ้นตามด้วยการกระตุ้นทางเคมีและ/หรือการกระตุ้นทางกายภาพ โดยการกระตุ้นแต่ละวิธีจะขึ้นอยู่กับการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้กับชนิดของสารที่ต้องการดูดซับ นอกจากนี้ได้รวบรวมการทดลองนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารละลายโลหะหนักและสารละลายสีย้อมผ้าชนิดต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ทั้งได้แสดงขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู แสดงสถานะของการเป็นถ่านกัมมันต์

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์ วัสดุทางการเกษตร พื้นที่ผิว ค่าการดูดซับไอโอดีน การดูดซับ

Abstract

This review involves with the preparation of activated carbons from agricultural products which the scope is research in Thailand. The activated carbons are produced by the carbonization with chemical and/or physical activation. The kinds of carbon activation are based on the purpose of application in an adsorbant in an adsorption process. This paper is also viewed using an activated carbon to adsorb metal compounds and synthesis dyes that it will be useful as a database for application in industry. Furthermore, the properties of activated carbon such as specific surface area, total pore volume, iodine number and methylene blue adsorption are mentioned in the article.

Keywords : Activated carbon, Agricultural products, Surface area, Iodine number, Adsorption

*Corresponding author.

Email address: nyuvarat@kku.ac.th

1. บทนำ

ถ่านกัมมันต์ คือ ตัวดูดซับ (Adsorbent) ชนิด ที่ถูกนำมาใช้เป็นอย่างมากในการกำจัดสารพิษต่าง ๆ สามารถดูดซับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิด เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิวมาก (มากถึง $2000 \text{ m}^2/\text{g}$) และการมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่พื้นผิว (Surface functional groups) ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่โครงสร้างรูพรุนมีความซับซ้อน สามารถผลิตได้จากวัสดุทุกชนิดที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้า ได้แก่ ถ่านหิน ลิกไนต์ และกะลามะพร้าว เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1990 ตลาดถ่านกัมมันต์ของโลก ยกเว้นยุโรปตะวันออกและจีน อยู่ที่ประมาณ 375,000 ตัน ต่อปี โดยคาดว่าถ่านรวมยุโรปตะวันออกและจีนแล้ว จะอยู่ที่มากกว่า 450,000 ตันต่อปี และช่วงปลายของคริสต์ทศวรรษ 1990 ตลาดถ่านกัมมันต์ของโลก อยู่ที่ประมาณ 700,000 ตันต่อปี โดยมีอัตราการขยายตัวของตลาดราว 4–6% ต่อปี [1] โดยถ่านกัมมันต์ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปนั้นได้มาจากถ่านหินซึ่งมีราคาสูงและจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุ Non-renewable materials ถ่านกัมมันต์ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดมีราคาค่อนข้างแพงเนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาผลิตมีราคาสูง นอกจากนั้น ยังเป็นวัสดุที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable material) เช่น ถ่านหิน ดังนั้น ในหลายปีที่ผ่านมา ได้มีความสนใจในการทำวิจัยการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่มีราคาถูกและเป็นวัสดุที่ทดแทนได้ (Renewable material) โดยเฉพาะวัสดุที่เป็นผลพลอยได้ (by product) จากการเกษตรและอุตสาหกรรมสำหรับประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นที่ส่วนใหญ่ทำการเกษตรกรรมเป็นหลัก ซึ่งทำให้มีผลพลอยได้จากการเกษตรเป็นจำนวนมาก นับได้ว่าเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่มุ่งเน้นไปที่การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตร

ดังนั้น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลของประเทศไทย ภายในระยะเวลา 20 ปี ที่ผ่านมากล่าวคือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534–2554 (ค.ศ. 1991–2011) โดยเนื้อหาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการเตรียมถ่านกัมมันต์ และการใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ซึ่งจะสามารถใช้เป็น

ฐานข้อมูลในการเลือกใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาเพื่อใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ รวมถึงสามารถทราบถึงงานวิจัยในปัจจุบัน

2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไป การเตรียมถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation) โดยในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ วัสดุที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ หรือเรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) โดยคุณสมบัติที่ได้แล้วยังมีความสามารถในการดูดซับน้อย ซึ่งต้องนำมาผ่านขั้นตอนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ โดยขั้นตอนการกระตุ้นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) และการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

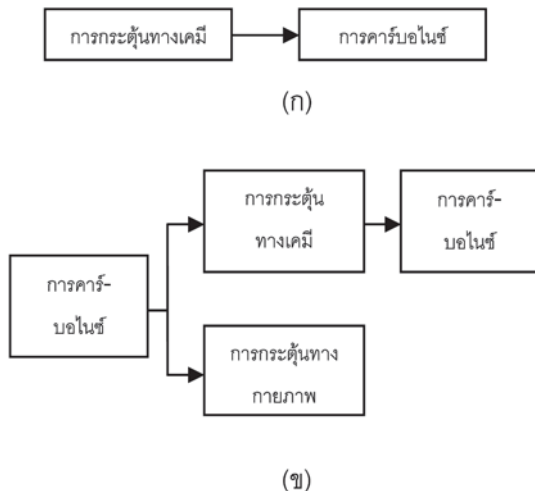
การกระตุ้นทางเคมีเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนเดียว โดยการคาร์บอนไนซ์ในสภาวะที่มีสารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โดยสารเคมีเหล่านี้ทำให้การคาร์บอนไนซ์เกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาของโครงสร้างรูพรุน ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่สิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ นิยมใช้กรดฟอสฟอริก เพราะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (recoverable) และอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นทางเคมีค่อนข้างต่ำราว $400\text{--}500^\circ\text{C}$ [2] เมื่อเปรียบเทียบกับกระตุ้นทางกายภาพ

การกระตุ้นทางเคมีจะก่อให้เกิดประจุไอออน ที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่นำมากระตุ้นทำให้เกิดประจุตามสารประกอบที่นำมากระตุ้น เกิดเป็นคุณสมบัติการดูดซับสารประกอบที่มีประจุบวกหรือลบ ส่วนการกระตุ้นทางกายภาพ ประกอบไปด้วยการคาร์บอนไนซ์วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบตามด้วยการกระตุ้นถ่านชาร์ที่ได้ด้วยสารกระตุ้น เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) ไอน้ำ (Steam) หรืออากาศ (air)

โดยปกติ การกระตุ้นทางเคมีจะทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมีจะให้ผลผลิตของถ่านกัมมันต์ (Yield) สูงกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้แล้ว ยังขึ้นอยู่กับวิธีการกระตุ้นที่ใช้ด้วย การกระตุ้นทางกายภาพคุณสมบัติในด้านประจุของถ่าน

กัมมันต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะเป็นการเพิ่มพื้นที่การดูดซับของถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม การเลือกวิธีการกระตุ้นสามารถใช่วิธีใดวิธีหนึ่งหรือทั้งสองวิธีร่วมกันได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของประเทศไทยซึ่งเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล สามารถสรุปวัตถุดิบที่นำมาใช้สภาวะที่ใช้ในการเตรียม และสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume) ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ซึ่งแสดงถึงรูพรุนขนาดเล็ก และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue) ซึ่งแสดงถึงรูพรุนขนาดกลาง โดยแบ่งเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว (ตารางที่ 1) การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน (ตารางที่ 2) และการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ (ตารางที่ 3) โดยในรูปที่ 1 (ก) แสดงขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว และรูปที่ 1 (ข) แสดงขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ (ก) ขั้นตอนเดียว และ (ข) การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างของวัสดุชีวมวลที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว ซึ่งเป็นการกระตุ้นโดยใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้น ได้แก่ ไม้ไผ่ [3] ไม้ยางพารา [4] เปลือกไม้ยูคาลิปตัส [5] เปลือกมังคุด [6] เมล็ดและเปลือกสับปะรด [7] กากกาแฟ [8] กะลาปาล์ม [9-10]

กะลามะพร้าว [10] เม็ดลำไย [11-12] ชานอ้อย [13] และแกลบ [14] โดยสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) [3] กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) [4] กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) [4-5, 7, 11-13] ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) [6, 8-9] โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) [10] และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) [14] ซึ่งจะเห็นได้ว่า สมบัติรูพรุนต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น และสภาวะในการกระตุ้น (อุณหภูมิและเวลา)

วัสดุชีวมวลมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยชีวมวลแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบเหล่านี้ต่างกัน ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติรูพรุนต่างกัน เช่น งานวิจัยของ Khuyasangaim [10] ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์ม โดยมีสภาวะการเตรียมเหมือนกัน กล่าวคือ ใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารกระตุ้น โดยแช่วัตถุดิบในสารเคมีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น ทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลามะพร้าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลาปาล์ม

สำหรับวัสดุชีวมวลชนิดเดียวกัน การใช้สภาวะในการกระตุ้นต่างกัน จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติรูพรุนต่างกัน ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Sakulduangdee [9] และ Khuyasangaim [10] ใช้วัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือ กะลาปาล์มเหมือนกัน แต่ใช้ชนิดของสารกระตุ้น อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้น แตกต่างกัน ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติรูพรุนต่างกัน โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์

Jiwalak et al. [15] ได้เสนอปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับอะตอมของคาร์บอน ดังนี้



โดยปฏิกิริยาที่ (1) เป็นปฏิกิริยา dehydration ของ KOH เกิดเป็น K_2O และปฏิกิริยาที่ (2) เป็นการเกิด water-gas reaction ระหว่างไอน้ำและคาร์บอน สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น [16] มีดังนี้



ซึ่งถ้าเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นให้มากขึ้น ปฏิกริยาก็คะเกิดมากขึ้น เป็นผลให้พื้นที่ผิวมีค่าสูงขึ้น

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย กำหนดค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon) ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดเม็ด (Pelletised activated carbon) และถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง (Block activated carbon) ต้องไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) ชั้นคุณภาพที่ 1 (First grade) กำหนดไว้ที่ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และชั้นคุณภาพพิเศษ (Premium grade) กำหนดไว้ที่ ไม่น้อยกว่า 1000 มิลลิกรัมต่อกรัม [17] ซึ่งจากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่า วัสดุชีวมวลหลายชนิด สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม เช่น ไม้ไผ่ [3] เปลือกไม้ยูคาลิปตัส [5] เมล็ดสนุ่นดำ [7] และกะลาปาล์ม [9] ซึ่งกะลาปาล์มเป็นวัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพสูงที่สุด โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดถึง 1,812 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดถึง 2,131 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก เปลือกสนุ่นดำ [7] กะลามะพร้าว [10] และเมล็ดลำไย [12] มีค่าการดูดซับไอโอดีนน้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยตัวอย่างของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีขายอยู่ในประเทศไทย ซึ่งผลิตจากกะลามะพร้าว ไม่ได้ระบุว่ากระตุ้นทางเคมีหรือทางกายภาพ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 627 ตารางเมตรต่อกรัม [18] 993 ตารางเมตรต่อกรัม [19] 1,214 ตารางเมตรต่อกรัม [20] หรือ ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากงานวิจัยของ Laowachirasuwan [21] ซึ่งไม่ได้ระบุชนิดของวัตถุดิบและไม่ได้ระบุว่ากระตุ้นทางเคมีหรือทางกายภาพ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,190 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับไอโอดีน 1,012 มิลลิกรัมต่อกรัม

นอกจากนั้น ยังมีการนำวัสดุชีวมวล ได้แก่ เปลือกมังกุด [6, 22] เม็ดมะขาม [22] เปลือกและวงเครือกล้วยน้ำว้า [23] กากกาแฟ [8, 21, 24] ชานอ้อย [25-27] ใบอ้อย [28] แกลบ [14, 29] เปลือกเมล็ดยางพารา [25, 29-30] ไม้ยางพารา [29] กะลามะพร้าว [25, 29, 31] กะลาปาล์ม [32] ก้านทะลายปาล์ม [33] ชังข้าวโพด [34-35] ไม้ยูคาลิปตัส [36-38] ไม้กระถินเทพา [36] ไม้กระถินณรงค์ [37] ไม้สัก [39]

เปลือกทุเรียน [40] เม็ดลำไย [11-12] เปลือกสนุ่นดำ [41] เปลือกถั่วแมคคาเดเมีย [34] เปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ [20] และฝักต้นหางนกยูง [42] มาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งประกอบไปด้วยการคาร์บอนไนซ์วัตถุดิบ ตามด้วยการกระตุ้นถ่านชาร์ที่ได้ด้วยสารกระตุ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยการคาร์บอนไนซ์จะทำการเผาในสภาวะไร้อากาศ [22, 31, 35, 39] หรือทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน (N_2) [8, 11, 14, 20-21, 26-27, 34, 37, 40] หรือทำภายใต้สภาวะสุญญากาศ [35] ส่วนการกระตุ้นจะทำ 2 แบบ คือแบบที่ 1 คือนำถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มาแช่สารเคมี ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) [21-23, 32-33] ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) [6, 20-21, 24-25] โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) [20-21, 41] กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) [20-21] กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) [12, 20-21, 28-31, 42] โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) [24, 36] หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) [20] แล้วจึงทำการเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ หรือแบบที่ 2 คือการเผาถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของสารกระตุ้น ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) [8, 11, 26-27, 32, 34, 37, 40] ไอน้ำ [8, 14, 24, 30, 32, 34-35, 39] อากาศ (air) [38] หรือแก๊สผสมของแก๊สเหล่านี้ [33, 38] ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

เช่นเดียวกันกับการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว สมบัติรูพรุนต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แบบ 2 ขั้นตอน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น และสภาวะในการกระตุ้น (อุณหภูมิและเวลา) เช่น งานวิจัยของ Sananmuang และ Cha-un [22] ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังกุดและเม็ดมะขาม โดยมีสภาวะการเตรียมเหมือนกัน พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเม็ดมะขามมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าการดูดซับไอโอดีน สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเปลือกมังกุด หรืองานวิจัยของ Suksawang [29] ที่พบว่า กะลามะพร้าว เปลือกเมล็ดยางพารา และไม้ยางพารา ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าแกลบ เมื่อใช้สภาวะในการเตรียมเหมือนกัน เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Srisatit และ Singhasiri [36] ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์ในสภาวะเดียวกัน แล้วพบว่าไม้กระถินเทพา ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และค่าการดูดซับไอโอดีน สูงกว่าไม้ยูคาลิปตัส

การใช้วัสดุชีวมวลชนิดเดียวกัน สภาวะในการกระตุ้นเหมือนกัน แต่ใช้สารเคมีในการกระตุ้นแตกต่างกัน ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติรูพรุนต่างกัน เช่น Laowachirasuwan [21] ใช้กากกาแฟเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์เหมือนกัน และใช้อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นเหมือนกันเช่นกัน แต่ใช้สารเคมีในการกระตุ้นต่างกัน พบว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และค่าการดูดซับไอโอดีน สูงกว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดซัลฟิวริก ซึ่งสารกระตุ้นทั้ง 3 ชนิด ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติรูพรุนใกล้เคียงกัน หรือ งานวิจัยของ Chuntranuluck และคณะ [33] ที่ใช้ก้นหอยพลาสติกเป็นวัตถุดิบ พบว่า เมื่อใช้สภาวะในการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นเหมือนกัน แต่ใช้สารกระตุ้นต่างกัน พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้แก๊สผสมของคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ

สำหรับการใช้สภาวะในการกระตุ้นต่างกันทั้งอุณหภูมิและเวลา โดยใช้วัสดุชีวมวลชนิดเดียวกัน จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติรูพรุนต่างกัน ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Sirichote และคณะ [25] Singchiwong [26] และ Paosombat [27] ใช้ขาน้อยเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์เหมือนกัน แต่มีสภาวะในการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นแตกต่างกัน โดยพบว่า การใช้สารเคมี (ซิงค์คลอไรด์) เป็นสารกระตุ้น ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้น หรือ งานวิจัยของ Sirichote และคณะ [25] Chaiya และ Reubroycharoen [30] ที่ใช้เปลือกเมล็ดยางพาราเป็นวัตถุดิบ พบว่า การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าการใช้ไอน้ำ จากงานวิจัยเหล่านี้จะเห็นได้ว่า การใช้สารเคมีซึ่งเป็นการกระตุ้นทางเคมี จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นสารกระตุ้น เป็นไปตามสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ [43] ดังนี้



ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน วัสดุชีวมวลส่วนใหญ่ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาตากแห้ง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดถึง 2,624 มิลลิกรัมต่อกรัม ยกเว้น กากกาแฟ (เฉพาะการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์) ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม [21]) แกลบ ช้างข้าวโพด ไม้ยูคาลิปตัส (เฉพาะการกระตุ้นด้วยแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ) ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม [38]) เม็ดลำไย และเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่ (เฉพาะการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก) ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม [20]) ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนน้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2

ส่วนการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมี ร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ ยังไม่เป็นที่นิยมในการวิจัยมากนัก เนื่องจากต้องใช้สารกระตุ้นทั้งสารเคมีและแก๊ส ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น สำหรับวัสดุชีวมวลที่นำมาเตรียมด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ กะลามะพร้าว [44] กากกาแฟ [8] ผักมะขาม [45] ผักราชพฤกษ์ [46] และกากงา [47] ดังตารางที่ 3 ซึ่งการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน ประกอบไปด้วย ขั้นตอนที่ 1 แช่วัตถุดิบในสารเคมีแล้วจึงเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ส่วนขั้นตอนที่ 2 ทำการเผาภายใต้บรรยากาศของสารกระตุ้น ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [8, 44-47] หรือ ไอน้ำ [8] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Charoenbood and Ngernyen [45] และงานวิจัยของ Budseareechai and Ngernyen [46] ซึ่งได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากผักมะขามและผักราชพฤกษ์ ตามลำดับ ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน ดังวิธีที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่ในขั้นตอนที่ 1 หลังจากแช่วัตถุดิบแล้ว ไม่ได้ทำการเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน แต่ทำการเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังขั้นตอนที่ 2 เลย หรืองานวิจัยของ Thabuot [47] ซึ่งเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากงา ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน เช่นกัน แต่มีขั้นตอนการเตรียมในขั้นตอนที่ 1 แตกต่างออกไป กล่าวคือ ทำการเผาวัตถุดิบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนก่อน แล้วจึง

นำตัวอย่างที่ได้มาแช่สารเคมีซึ่งเป็นสารกระตุ้น

การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติของถ่านกัมมันต์ให้ดีขึ้นจากการกระตุ้นทางเคมีหรือการกระตุ้นทางกายภาพเพียงอย่างเดียว ดังงานวิจัยของ Boonamnuayvitaya [8] ที่ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 วิธี กล่าวคือ แบบขั้นตอนเดียว โดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้น แบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นสารกระตุ้น และการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ซิงค์คลอไรด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้ซิงค์คลอไรด์และไอน้ำ เป็นสารกระตุ้น โดยทั้ง 3 วิธี ใช้สภาวะในการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้น (อุณหภูมิและเวลา) เหมือนกัน พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (914 ตารางเมตรต่อกรัม) สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบ ขั้นตอนเดียวโดยใช้ซิงค์คลอไรด์แต่เพียงอย่างเดียว (470 ตารางเมตรต่อกรัม) และสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แต่เพียงอย่างเดียว (11 ตารางเมตรต่อกรัม) อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (305 ตารางเมตรต่อกรัม) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวโดยใช้ซิงค์คลอไรด์แต่เพียงอย่างเดียว (470 ตารางเมตรต่อกรัม) และน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบ 2 ขั้นตอนโดยใช้ไอน้ำแต่เพียงอย่างเดียว (469 ตารางเมตรต่อกรัม) เล็กน้อย

อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาเฉพาะชนิดของวัสดุที่รวมวลว่าต้องเป็นวัสดุที่รวมวลชนิดเดียวกันโดยไม่พิจารณาถึงสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น และสภาวะในการกระตุ้น

(อุณหภูมิและเวลา) การกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติสูงดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวหรือแบบ 2 ขั้นตอน ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Kajorncheappunngam และคณะ [44] ที่เตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้การกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ มีค่าการดูดซับไอโอดีนน้อยกว่างานวิจัยของ Sirichote และคณะ [25] และ Sopanakijkosol [31] ซึ่งทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวแบบ 2 ขั้นตอน ดังนั้น การกระตุ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพร่วมกัน จึงไม่เหมาะสมในการนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเปล่าประโยชน์ เพราะต้องใช้ทั้งสารเคมีและแก๊ส

จากที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน มีจำนวนงานวิจัยมากกว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว เนื่องจากการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว ต้องใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้นเท่านั้น ส่วนการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน สามารถใช้แก๊สที่ไม่เป็นอันตรายมาใช้ในการกระตุ้นได้ อย่างไรก็ตาม การกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียว จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติสูงดีกว่าการกระตุ้นแบบ 2 ขั้นตอน ดังงานวิจัยของ Sukananta [6] Boonamnuayvitaya [8] และ Mopoung [12] อนึ่ง งานวิจัยของ Junpirom และคณะ [11] และ Kajorncheappunngam [14] พบว่า การกระตุ้นแบบ 2 ขั้นตอน ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติสูงดีกว่าการกระตุ้นแบบขั้นตอนเดียวเล็กน้อย โดยการเลือกขั้นตอนที่เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับสารที่ต้องการใช้ในการดูดซับ และตัวแปรที่บ่งบอกลักษณะความเป็นถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่เราต้องการ

ตารางที่ 1 การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว

วัตถุดิบ	สภาวะในการกระตุ้น	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตร รูพรุนรวม (cm ³ /g)	ค่าการ ดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	ค่าการ ดูดซับ เมทิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
ไม้ไผ่	แช่ KOH 105°C 8 hrs เผาต่อด้วย N ₂ 600–900°C ไม่ระบุเวลา	0.4–796	0.08–0.31	140–960	94–252	[3]
ไม้ยางพารา	แช่ H ₂ SO ₄ + H ₃ PO ₄ 30°C 24 hrs เผาต่อด้วย N ₂ 400–700°C 1–3 hrs	100–1,244	–	–	–	[4]
เปลือกไม้ ยูคาลิปตัส	แช่ H ₃ PO ₄ อุณหภูมิห้อง ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 500°C 1 hr	1,085–1,239	–	685–917	310–427	[5]
เปลือกมังคุด	แช่ ZnCl ₂ 24 hrs เผาต่อที่ 500 และ 600°C ไม่ระบุเวลา	638–1,867	–	–	378–417	[6]
เมล็ดสบู่ดำ	แช่ H ₃ PO ₄ อุณหภูมิห้อง ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 500–700°C 1–3 hrs	193–507	–	500–900	–	[7]
เปลือกสบู่ดำ	แช่ H ₃ PO ₄ อุณหภูมิห้อง ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 500–700°C ไม่ระบุเวลา	175–533	–	338–461	–	[7]
กากกาแฟ	แช่ ZnCl ₂ ไม่ระบุเวลา เผาต่อด้วย N ₂ ไม่ระบุอุณหภูมิและเวลา	470	0.45	–	–	[8]
กะลาปาล์ม	แช่ ZnCl ₂ 85°C 30 min เผาต่อด้วย N ₂ 400–600°C 0.5–2 hrs	1,010–2,131	0.06–1.36	1,340–1,812	–	[9]
กะลา มะพร้าว เม็ดลำไย	แช่ NaCl 24 hrs เผาต่อที่ 800°C 1 hr	386	0.14	486	–	[10]
	แช่ NaCl 24 hrs เผาต่อที่ 800°C 1 hr	492	0.20	532	–	[10]
	แช่ H ₃ PO ₄ 1 hr เผาต่อด้วย N ₂ 400–900°C 1 hr	651–946	0.33–0.49	–	–	[11]
ชานอ้อย	แช่ H ₃ PO ₄ อุณหภูมิห้อง ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 400–800°C 1 hr	–	–	512–557	–	[12]
	แช่ H ₃ PO ₄ 1 hr เผาต่อด้วย N ₂ 300–600°C 1 และ 2 hrs	855–1,574	0.42–1.22	–	–	[13]
กากلب	แช่ NaOH 80°C 6 hrs เผาต่อด้วย N ₂ 400 และ 500°C 30 min และ 1 hr	51–347	–	–	–	[14]

ตารางที่ 2 การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน

วัตถุดิบ	สภาวะในการคาร์บอนซ์	สภาวะในการกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ m^2/g	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
เปลือกมังคุด	เผาไร้อากาศ 600°C 1 hr	แช่ KOH 1 hr เผาต่อที่ 900°C 1 hr	1,120	–	909	–	[22]
	เผาที่ 350°C ไม่ระบุเวลา	แช่ ZnCl_2 24 hrs เผาต่อที่ 500°C และ 600°C ไม่ระบุเวลา	584–1,024	–	–	167–239	[6]
เม็ดมะขาม	เผาไร้อากาศ 600°C 1 hr	แช่ KOH 1 hr เผาต่อที่ 900°C 1 hr	1,407	–	1,097	–	[22]
เปลือกกล้วยน้ำว้า	เผาที่ 500°C 1 hr	แช่ KOH ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 600 – 900°C 1 hr	–	–	389–1,087	577–598	[23]
วงเครือกล้วยน้ำว้า	เผาที่ 500°C 1 hr	แช่ KOH ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 600 – 900°C 1 hr	–	–	354–1,031	583–596	[23]
กากกาแฟ	เผาด้วย N_2 400°C 4 hrs	แช่ KOH 85°C 4 hrs เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs	28	0.02	124	–	[21]
	เผาด้วย N_2 400°C 4 hrs	แช่ NaOH 85°C 4 hrs เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs	27	0.02	212	–	
	เผาด้วย N_2 400°C 4 hrs	แช่ H_2SO_4 85°C 4 hrs เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs	45	0.02	180	–	
	เผาด้วย N_2 400°C 4 hrs	แช่ H_3PO_4 85°C 4 hrs เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs	260	0.14	320	–	
	เผาด้วย N_2 400°C 4 hrs	แช่ ZnCl_2 85°C 4 hrs เผาต่อด้วย N_2 500 – 700°C 2–4 hrs	224–1,228	0.17–0.86	292–926	–	
	เผาด้วย N_2 ไม่ระบุอุณหภูมิ และเวลา	กระตุ้นด้วย CO_2 600°C 4 hrs	11	0.02	–	–	[8]
	เผาด้วย N_2 ไม่ระบุอุณหภูมิ และเวลา	กระตุ้นด้วย steam 600°C 4 hrs	469	0.36	–	–	
	เผาที่ 600°C 1 hr	แช่ NaCl ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 500 – 700°C 3 hrs	123–317	–	–	–	[24]
	เผาที่ 600°C 1 hr	แช่ ZnCl_2 ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 500 – 700°C 3 hrs	587–914	–	–	–	
	เผาที่ 600°C 1 hr	กระตุ้นด้วย steam 700 – 900°C 3–7 hrs	396–1,067	–	–	–	
ขาน้อย	เผาที่ 300°C 3 hrs	แช่ ZnCl_2 ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 600 และ 800°C 3 hrs	1,150–1,553	–	934–1,212	279–283	[25]
	เผาด้วย N_2 550°C 20 min	กระตุ้นด้วย CO_2 850°C 20–40 min	427–490	–	–	–	[26]
	เผาด้วย N_2 400 – 800°C 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 600 และ 800°C 1 hr	377–865	0.19–0.56	–	–	[27]
ใบอ้อย	เผาที่ 600°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 12 hrs เผาต่อที่ 600 – 800°C ไม่ระบุเวลา	–	–	1,180–1,859	–	[28]

ตารางที่ 2 การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน (ต่อ)

วัตถุดิบ	สภาวะในการคาร์บอน	สภาวะในการกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
แกลบ	เผาที่ 800°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 24 hrs เผาต่อที่ $600\text{--}800^\circ\text{C}$ 2 hrs	–	–	272–393	–	[29]
	เผาด้วย N_2 400°C 30 min และ 1 hr	กระตุ้นด้วย steam 600 และ 700°C 30 min และ 1 hr	222–422	–	–	–	[14]
เปลือกเมล็ด ยางพารา	เผาที่ 400°C 3 hrs	แช่ ZnCl_2 ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 600 และ 800°C 3 hrs	1,472–1,737	–	1,027–1,281	276–281	[25]
	เผาที่ 800°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 24 hrs เผาต่อที่ $600\text{--}800^\circ\text{C}$ 2 hrs	–	–	531–728	–	[29]
	เผาที่ 600°C 3 hrs	กระตุ้นด้วย steam $700\text{--}900^\circ\text{C}$ 1–5 hrs	450–933	–	–	–	[30]
ไม้ยางพารา	เผาที่ 800°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 24 hrs เผาต่อที่ $600\text{--}800^\circ\text{C}$ 2 hrs	–	–	562–724	–	[29]
กะลามะพร้าว	เผาที่ 450°C 3 hrs	แช่ ZnCl_2 ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 600 และ 800°C 3 hrs	899–1,140	–	907–1,281	162–164	[25]
	เผาที่ 800°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 24 hrs เผาต่อที่ $600\text{--}800^\circ\text{C}$ 2 hrs	–	–	430–690	–	[29]
	เผาไร้อากาศ 400°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 ไม่ระบุเวลา เผาต่อที่ 700 และ 800°C 1–3 hrs	760–992	0.74–0.93	760–1,050	–	[31]
กะลาปาล์ม	เผาด้วย N_2 400°C 1–4 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 $700\text{--}900^\circ\text{C}$ 1–3 hrs	350–1,500	–	300–1,100	–	[32]
	เผาด้วย N_2 400°C 1–4 hr	กระตุ้นด้วย steam $700\text{--}900^\circ\text{C}$ 1–3 hrs	600–1,650	–	750–1,400	–	
ก้านทะลาย ปาล์ม	เผาที่ 350°C 45 min	แช่ KOH $600\text{--}900^\circ\text{C}$ 1–3 hrs	–	–	268–1,308	184–266	[33]
	เผาที่ 350°C 45 min	กระตุ้นด้วย CO_2 + steam + air $600\text{--}900^\circ\text{C}$ 1–3 hrs	–	–	414–799	206–227	
ขังข้าวโพด	เผาด้วย N_2 $300\text{--}800^\circ\text{C}$ 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 $300\text{--}800^\circ\text{C}$ ไม่ระบุเวลา	732–836	0.40–0.42	–	–	[34]
		กระตุ้นด้วย steam $300\text{--}800^\circ\text{C}$ ไม่ระบุเวลา	423–675	0.34–0.36	–	–	
	เผาไร้อากาศ $350\text{--}500^\circ\text{C}$ 3 hrs	กระตุ้นด้วย steam 132°C 3 hrs	–	–	209–288	–	[35]

ตารางที่ 2 การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน (ต่อ)

วัตถุดิบ	สภาวะในการ คาร์บอนซ์	สภาวะในการ กระตุ้น	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตร รูพรุนรวม (cm^3/g)	ค่าการ ดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการ ดูดซับ เมทิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
ไม้ยูคา ลิปตัส	เผาที่ 300°C 2 hrs	แช่ NaCl 24 hrs เผาต่อที่ 800°C 1 hr	369	0.27	612	–	[36]
	เผาด้วย N_2 400°C 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 600–900°C 1–5 hrs	460–1,491	0.23–0.80	–	–	[37]
	เผาที่ 450°C 45 min	กระตุ้นด้วย steam 800 และ 900°C 2.5 hrs	334–1,076	–	514–1,233	238–242	[38]
	เผาที่ 450°C 45 min	กระตุ้นด้วย CO_2 +air 800 และ 900°C 2.5 hrs	168–180	–	259–274	238–240	
	เผาที่ 450°C 45 min	กระตุ้นด้วย CO_2 + steam +air 800–950°C 1.5–3 hrs	310–894	–	353–1,142	210–243	
ไม้กระถิน เทพา	เผาที่ 300°C 2 hrs	แช่ NaCl 24 hrs เผาต่อที่ 800°C 1 hr	409	0.34	701	–	[26]
ไม้กระถิน ณรงค์	เผาด้วย N_2 400°C 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 600–900°C 1–5 hrs	433–1,032	0.21–0.56	–	–	[37]
ไม้สัก	เผาไร้อากาศ 650–1,050°C ไม่ระบุเวลา	กระตุ้นด้วย steam 900°C ไม่ระบุเวลา	749–750	–	–	–	[39]
เปลือก ทุเรียน	เผาด้วย N_2 900°C ไม่ระบุเวลา	กระตุ้นด้วย CO_2 1 hr	659	0.40	–	–	[40]
	เผาสภาวะสูญญากาศ 900°C ไม่ระบุเวลา	กระตุ้นด้วย CO_2 1 hr	951	0.61	–	–	
เม็ดลำไย	เผาด้วย N_2 650°C 2 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 800–900°C 30 min–3 hrs	451–1,278	0.22–0.81	–	–	[11]
	เผาที่ 400–800°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 อุณหภูมิห้อง เผาต่อที่ 400–800°C 1 hr	–	–	360–452	–	[12]
เปลือกสบู่ ดำ	เผาที่ 400°C 1 hr	แช่ NaOH 70°C 24 hrs เผาต่อที่ 400–800°C 30 min–2 hrs	–	–	250–1,138	100–499	[41]
เปลือกถั่ว แมคคาเด เมีย	เผาด้วย N_2 300–800°C 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 300–800°C ไม่ระบุเวลา	383–487	0.20–0.25	–	–	[34]
		กระตุ้นด้วย steam 300–800°C ไม่ระบุเวลา	717–844	0.43–0.48	–	–	

ตารางที่ 2 การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 2 ขั้นตอน (ต่อ)

วัตถุดิบ	สถานะในการคาร์บอน	สถานะในการกระตุ้น	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
เปลือกและเมล็ดลิ้นจี่	เผาด้วย N_2 400°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 85°C 4 hrs	345–1,199	0.19–0.86	213–989	–	[20]
		เผาต่อด้วย N_2 500–800°C 2–5 hrs					
		แช่ H_2SO_4 85°C 4 hrs	358	0.19	325	–	
		เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs					
		แช่ KOH 85°C 4 hrs	119	0.03	176	–	
		เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs					
		แช่ NaOH 85°C 4 hrs	112	0.03	171	–	
		เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs					
		แช่ ZnCl_2 85°C 4 hrs	106	0.02	144	–	
		เผาต่อด้วย N_2 500°C 2 hrs					
ผักตบชวา	เผาที่ 300°C 1 hr	แช่ H_3PO_4 ไม่ระบุเวลา	–	–	346–2,624	–	[42]
		เผาต่อที่ 400–700°C 1–3 hrs					

ตารางที่ 3 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับการกระตุ้นทางกายภาพ

วัตถุดิบ	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
กะลามะพร้าว	แช่ H_3PO_4 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 650–850°C	–	–	451–754	–	[44]
	เผาต่อด้วย N_2 400°C 1 hr	1 และ 2 hrs					
กากกาแฟ	แช่ ZnCl_2 ไม่ระบุเวลา	กระตุ้นด้วย CO_2 600°C 4 hrs	914	1.01	–	–	[8]
	เผาต่อด้วย N_2 ไม่ระบุอุณหภูมิและเวลา						
	แช่ ZnCl_2 ไม่ระบุเวลา	กระตุ้นด้วย steam 600°C 4 hrs	305	0.28	–	–	
	เผาต่อด้วย N_2 ไม่ระบุอุณหภูมิและเวลา						
ผักมะขาม	แช่ H_3PO_4 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 500–700°C 1 และ 2 hrs	405–815	0.17–0.34	–	–	[45]
ผักราชพฤกษ์	แช่ H_3PO_4 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 600°C 1 hr	476	0.23	–	–	[46]
กากงา	เผาด้วย N_2 500 และ 600°C 4 hrs	กระตุ้นด้วย CO_2 850°C 1 hrs	–	–	–	สูงสุด 379	[47]
	แช่ต่อด้วย NaOH และ KOH 4 hrs						

3. การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในกระบวนการแยก (Separation process) และกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสารเคมีเมื่อถ่านกัมมันต์อยู่ในสารละลายที่มีสารเคมีเหล่านั้น ตัวอย่างประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ได้แก่ การบำบัดน้ำ การบำบัดน้ำเสีย การผลิตอาหารและเครื่องดื่ม แอลกอฮอล์ การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ ใช้เป็นยารักษาโรค การกำจัดกลิ่น การกำจัดสารพิษ การแยกแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยา [1, 48]

ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จะถูกนำไปใช้สำหรับกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสารไม่มีชีวิตหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีชีวิตอ่อน โดยรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ภายในอนุภาคคาร์บอนช่วยในการถ่ายโอนโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) ถ่านกัมมันต์ในปัจจุบันมี 2 เกรดในทางการค้า คือ ขนาดรูพรุนขนาดใหญ่สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับของเหลว และขนาดรูพรุนขนาดเล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับการดูดซับก๊าซ จะพบว่าส่วนใหญ่การใช้งานจะเป็นการทำให้บริสุทธิ์และการแยกก๊าซและของเหลวผสม ที่เป็นพวกไม่มีชีวิตและเป็นสารอินทรีย์ที่มีชีวิตอ่อนๆ ที่ดูดซับได้มากกว่าการดูดซับน้ำมากๆ นอกจากนี้ ความแข็งแรงของพันธะของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีค่าต่ำ เป็นผลให้ความร้อนในการดูดซับมีค่าต่ำและเป็นผลให้การนำตัวดูดซับนี้กลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ได้ดี

ตารางที่ 4 แสดงงานวิจัยที่ผ่านมาของประเทศไทย ซึ่งใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุชีวมวลเป็นตัวดูดซับ โดยนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเปลือกมังคุด [22] เม็ดมะขาม [22] เปลือกทุเรียน [49] กะลามะพร้าว [44] ผักราขพฤษ [46] มาดูดซับสีย้อม นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขาน้อย [13, 25] เปลือกลูกยาง [25] กะลามะพร้าว [44] ไม้กระถินเทพา [36] เปลือกไม้ยูคาลิปตัส [50] มูลโค [51] ผักมะขาม [45] มาดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก [25] โครเมียม [13, 36, 44] นิเกิล [36] ทองแดง [45, 50] ตะกั่ว [45, 50-51] แคดเมียม [45] และใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากกาแฟ

[8, 52] ช้างข้าวโพด [19] เปลือกถั่วแมคคาเดเมีย [53] ไม้ยางพารา [54] มาดูดซับสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้แก่ พอร์มาดีไฮด์ [8] ฟีนอล [52] โมโนเอทิลีนไกลคอล [19] เมทานอลในไบโอดีเซล [53] โทลูอิน [52, 54] และเบนซีน [54]

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ ระหว่างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุชีวมวลกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยใช้สภาวะในการดูดซับเหมือนกัน พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Aworn และคณะ [19] ที่ทำการศึกษาดูดซับโมโนเอทิลีนไกลคอลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากช้างข้าวโพด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ผลิตจากกะลามะพร้าว พบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณการดูดซับโมโนเอทิลีนไกลคอลใกล้เคียงกัน โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากช้างข้าวโพดมีปริมาณการดูดซับ 4.5 mmol/g ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีปริมาณการดูดซับ 5.91 mmol/g อย่างไรก็ตามบทความนี้ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ทำการดูดซับสารดังตารางที่ 4 จากงานวิจัยอื่นๆ เนื่องจากใช้สภาวะในการทดลองต่างกัน เพราะปริมาณการดูดซับของสารจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ต้องการดูดซับ ปริมาณของสารที่ต้องการดูดซับ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

ในปัจจุบัน การนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ทางพาณิชย์ในประเทศไทย ยังมีไม่แพร่หลายนักเนื่องจากข้อจำกัดด้านราคา และปริมาณการนำมาใช้โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในวงจำกัด ดังนั้น งานส่วนใหญ่จึงอยู่ในระดับงานวิจัย แต่ถ้าราคาต้นทุนการผลิตของถ่านกัมมันต์มีราคาดต่ำลง อาจส่งผลให้มีการใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น งานวิจัยน่าจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการผลิต โดยการลดต้นทุนการผลิต หรือการทำให้ราคาของถ่านกัมมันต์ลดต่ำลง จะทำให้มีแนวโน้มการนำไปใช้งานเพิ่มขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของการใช้ถ่านกัมมันต์คือเป็นวัสดุที่ผลิตได้จากวัสดุชีวมวล

ตารางที่ 4 การใช้ประโยชน์ด้านกัมมันตภาพที่เตรียมได้จากวัสดุชีวมวลในการดูดซับ

ชนิดของสาร ถูกดูดซับ	วัตถุดิบ	สารถูกดูดซับ	ปริมาณการดูดซับ	อ้างอิง
สีย้อม	เปลือกมังคุด	สีย้อมรีแอกทีฟสีเหลือง (Reactive Yellow 145)	4.51 mg/g	[22]
		สีย้อมรีแอกทีฟสีแดง (Reactive Red 195)	3.71 mg/g	
		สีย้อมรีแอกทีฟสีน้ำเงิน (Reactive Blue 222)	3.82 mg/g	
	เม็ดมะขาม	สีย้อมรีแอกทีฟสีเหลือง (Reactive Yellow 145)	5.49 mg/g	[22]
		สีย้อมรีแอกทีฟสีแดง (Reactive Red 195)	5.64 mg/g	
		สีย้อมรีแอกทีฟสีน้ำเงิน (Reactive Blue 222)	5.24 mg/g	
	เปลือกทุเรียน	สีเบสิกกรีน (Basic Green 4)	303–312 mg/g	[49]
	กะลามะพร้าว	สีย้อมผ้าสีแดง	0.002–0.02 mg/g	[44]
	ฝักราชพฤกษ์	สีย้อมผ้าสีแดง	115 mg/g	[46]
โลหะหนัก	ชานอ้อย	เหล็ก (iron(III))	0.66 mmol/g	[25]
		โครเมียม (chromium(VI))	103–250 mg/g	[13]
	เปลือกลูกยาง	เหล็ก (iron(III))	0.41 mmol/g	[25]
	กะลามะพร้าว	เหล็ก (iron(III))	0.18 mmol/g	[25]
		โครเมียม	2.52–2.73 mg/g	[44]
	ไม้กระถินเทพา	โครเมียม	1.37–2.75 mg/g	[36]
		นิกเกิล	1.67–4.32 mg/g	
	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	ทองแดง (Cu(II))	0.45–0.85 mmol/g	[50]
		ตะกั่ว (Pb(II))	0.55–0.89 mmol/g	
	มูลโค	ตะกั่ว	4.28 mg/g	[51]
สารอินทรีย์	กากกาแฟ	ตะกั่ว	30–45 mg/g	[45]
		ทองแดง	17–27 mg/g	
		แคดเมียม	6–25 mg/g	
		ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)	30–300 mg/g	[8]
	ขังข้าวโพด	โทลูอิน	14–476 mg/g	[52]
		ฟีนอล	6.36 mg/g	
		โมโนเอทิลีนไกลคอล (monoethylene glycol)	4.51 mmol/g	[19]
	เปลือกถั่วแมคคาเดเมีย	เมทานอลในไบโอดีเซล	159–263 mg/g	[53]
	ไม้ยางพารา	โทลูอิน	0.33–0.49 g/g	[54]
		เบนซีน	0.16–0.31 g/g	

4. สรุป

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดมีราคาแพง จึงได้มีงานวิจัยที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทย ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หรือเป็นวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุทางการเกษตรชนิดต่างๆ นี้ ยังเป็นวัสดุดูดซับที่ดีในการกำจัดสารพิษต่าง ๆ อีกด้วย อย่างไรก็ตาม นักวิจัยในงานวิจัยสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ควรมุ่งเน้นไปในการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการเพิ่มความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการอุตสาหกรรมต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mozammel HM, Masahiro O, Bhattacharya SC. Activated charcoal from coconut shell using $ZnCl_2$ activation. *Biomass and Bioenergy* 2002; 22: 397-400.
- [2] Shi Q, Zhang J, Zhang C, Li C, Zhang B, Hu W, Xu J, Zhao R. Preparation of activated carbon from cattail and its application for dyes removal. *Journal of Environmental Sciences* 2010;22(1): 91-97.
- [3] Hirunpraditkoon S, Intiya P, Thonglert W, Nuithitikul K. Properties of activated carbon derived from bamboo furniture waste with chemical activation, *Proceedings of The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD)*; 2010 Mar 4-6; Nong Khai. Thailand.
- [4] Chaisongkroa N, Intamanee J, Bunyakarn C, Chungsiriporn J. Preparation of activated carbon from rubber wood off-cut by mixed acid activation, *The 19th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TICChE)*; 2009 Oct 26-27; Kanchanaburi. Thailand.
- [5] Thongton T, Patnukao P, Pavasant P. Effect of binders and reinforcers on physical and chemical properties of granular activated carbon from eucalyptus bark, *The 18th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TICChE)*; 2008 Oct 20-21; Chonburi. Thailand.
- [6] Sukananta P. Investigation of surface property and characteristic of the activated carbon from mangosteen shell prepared by the single and two stage. *Agricultural Science Journal* 2010; 41: 285-288. (In Thai).
- [7] Watsanathip W, Kanokkantapong V, Pavasant P. Preparation of activated carbon from *Jatropha* wastes via phosphoric acid chemical activation, *The 19th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TICChE)*; 2009 Oct 26-27; Kanchanaburi. Thailand.
- [8] Boonamnuayvitaya V, Sae-ung S, Tanthapanichakoon W. Preparation of activated carbons from coffee residue for the adsorption of formaldehyde. *Sep. Purifi. Technol.* 2005; 42: 159-168.
- [9] Sakulduangdee S. Preparation and organophilicity study of activated carbon from solid waste palm shells by $ZnCl_2$ [Master thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2002. (In Thai).
- [10] Khuysangaim S. Lead and mercury removal from textile wastewater by activated carbon from palm shell and coconut shell [Master Thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2001. (In Thai).
- [11] Junpirom S, Tangsathitkulchai C, Tangsathitkulchai M. Preparation of activated carbon from longan seed by physical and chemical activation method. *Suranaree J. Sci. Technol.* 2007; 14(1): 63-76. (In Thai).
- [12] Mopoung S, Nongklai W. Chemical and surface properties of longan seed activated charcoal. *International Journal of Physical Sciences* 2008; 3(10): 234-239.
- [13] Punsuwan N, Tangsathitkulchai C, Tangsathitkulchai M. Chemically activated carbon from bagasse and the removal of chromium from aqueous solution with activated carbon.

- Suranaree J. Sci. Technol. 2006; 13(2): 143-158. (In Thai).
- [14] Kajorncheappunngam S. A study of activated carbon production from rice husk. KKU Engineering Journal. 2002; 29(1-2): 87-100. (In Thai).
- [15] Jiwalak N, Tangsathitkulchai C, Tangsathitkulchai M. Activated carbon from lignite coal by chemical activation with potassium hydroxide. Suranaree J. Sci. Technol. 2006; 13(3): 207-218. (In Thai).
- [16] Tsang RL. Physical and chemical properties and adsorption type of activated carbon prepared from plum kernels by NaOH activation. J. Hazard. Mater. 2007; 147: 1020-1027.
- [17] Thai Industrial Standards Institute. Thai Industrial Standard: Activated carbon (TIS 900-2547). Ministry of Industry; 2004. (In Thai).
- [18] Noonpui S, Thiravetyan P, Nakbanpote W, Netpradit S. Color removal from water-based ink wastewater by bagasse fly ash, sawdust fly ash and activated carbon. Chemical Engineering Journal 2010; 162: 503-508.
- [19] Aworn A, Thiravetyan P, Nakbanpote W. Preparation of CO₂ activated carbon from corncob for monoethylene glycol adsorption. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2009; 333: 19-25.
- [20] Laowachirasuwan K. Preparation and characterization of activated carbons from litchi chinensis shells and seeds by chemical activation method. University of the Thai Chamber of Commerce Journal 2011; 31(3): 83-102. (In Thai).
- [21] Laowachirasuwan K. Preparation and characteristics of activated carbons from coffee residue by chemical activation method. University of the Thai Chamber of Commerce Journal 2009; 29(2): 116-131.
- [22] Sananmuang R, Cha-un N. Physical characteristics and adsorption properties for reactive dyes of char and activated carbon prepared from mangosteen peel and tamarind seed. Naresuan University Journal 2007; 15(1): 9-16. (In Thai).
- [23] Mopoung S. Chemical composition and Physical properties of charcoal and activated charcoal from peel and bunch banana. Naresuan University Science Journal 2005; 2(1): 107-119. (In Thai).
- [24] Chaiya C, Limtakul A. Effect of activation process to the properties of activated carbon derived from coffee residue, The 18th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TICChE); 2008, Oct 20-21; Chonburi. Thailand. (In Thai).
- [25] Sirichote O, Innajitara W, Chuenchom L, Chunchit D, Naweekan K. Adsorption of iron (III) ion on activated carbons obtained from bagasse, pericarp of rubber fruit and coconut shell. Songklanakarin J. Sci. Technol. 2002; 24(2): 235-242.
- [26] Singchiwong P. Production of activated carbon from bagasses [Master thesis]. Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Thonburi; 1994. (In Thai).
- [27] Paosombat B, Duangpenmatr M, Ngernyen Y. Physically activated carbon from sugar-mill bagasse, The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD); 2010 Mar 4-6; Nong Khai. Thailand.
- [28] Anuwetch L, Inkum S, Mopoung S. Production of activated carbon from sugarcane leave. Naresuan University Science Journal 2008; 5(2): 210-220. (In Thai).

- [29] Suksawang R. Utilization of agricultural wastes for activated carbon production and application for removal of dyes and heavy metal ions from aqueous solution [Master thesis]. Chonburi: Burapha University; 2007. (In Thai).
- [30] Chaiya C, Reubroycharoen P. Preparation of activated carbon derived from para rubber seed shell by steam fluidization, The 19th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TIChE); 2009, Oct 27; Kanchanaburi. Thailand. (In Thai).
- [31] Sopanakijkosol P. Production of activated carbon from coconut shell for adsorption chromium (VI) [Master thesis]. Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Thonburi; 2000. (In Thai).
- [32] Sunpetch B. Activated carbon from palm shells [Master thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2000. (In Thai).
- [33] Chuntranuluck S, Nopcharoenkul W, Vitidsant T, Watanasuk A. Production of activated carbon from palm bunch (*Elaeis quineensis* Jacq.) by activation with potassium hydroxide and steam, 43rd Kasetsart University Annual Conference; 2005 Feb 1-4; Bangkok. Thailand. (In Thai).
- [34] Aworn A, Thiravetyan P, Nakbanpote W. Preparation and characteristics of agricultural waste activated carbon by physical activation having micro- and mesopores. J. Anal. Appl. Pyrol. 2008; 82: 279-285.
- [35] Sawadchai B. Utilization of activated carbon generated from biomass for removal of chromium from industrial wastewater [Master thesis]. Phitsanulok: Naresuan University; 2005. (In Thai).
- [36] Srisatit T, Singhasiri T. Using activated carbon from eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) and acacia (*Acacia mangium* Willd.) for chromium and nickel removal from synthesis wastewater. Thai Environmental Engineering Journal 2006; 20(3): 25-37. (In Thai).
- [37] Ngernyen Y, Tangsathitkulchai C, Tangsathitkulchai M. Porous properties of activated carbon produced from eucalyptus and wattle wood by carbon dioxide activation. Korean J. Chem. Eng. 2006; 23(6); 1046-1054.
- [38] Jindaphunphairoth V. Preparation of activated carbon from *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. by activation with carbon dioxide and superheated steam [Master thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2000. (In Thai).
- [39] Sinworn S. The performance evaluation of vapor benzene and toluene treatment system prototype using activated carbon from wood shop in Bang Su district. SDU Research Journal 2007; 3(3): 13-22. (In Thai).
- [40] Nuithitikul K, Srikhun S, Hirunpraditkoon S. Kinetics and equilibrium adsorption of Basic Green 4 dye on activated carbon derived from durian peel: Effects of pyrolysis and post-treatment conditions. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2010; 41: 591-598.
- [41] Tongpoothorn W, Sriuttha M, Homchan P, Chanthai S, Ruangviriyachai C. Preparation of activated carbon derived from *Jatropha curcas* fruit shell by simple thermo-chemical activation and characterization of their physic-chemical properties. Chemical Engineering Research and Design 2011; 89: 335-340.
- [42] Soiklom S. Chromium removal in synthetic wastewater by flame tree-activated carbon, 45th Kasetsart University Annual Conference; 2007 Jan 30-Feb 2; Bangkok. Thailand. (In Thai).
- [43] Patrick JW. Porosity in carbons. Edward Arnold: Great Britain; 1995.
- [44] Kajorncheappunngam S, Polchai N, Chanachai P, Boontang M. Production of activated carbon from coconut shell for heavy metal and dye

- removal. *KKU Engineering Journal* 2003; 30(4): 295-303. (In Thai).
- [45] Charoenbood A, Ngernyen Y. Granular activated carbon from tamarind pod and its adsorption of heavy metal ions, The 4th Ubon Ratchathani University Research Conference (UBRC); 2010 Aug 9-10; Ubon Ratchathani. Thailand. (In Thai).
- [46] Budseareechai S, Ngernyen Y. Modification of activated carbon surface to improve adsorption capacity of dye, The 7th Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Conference; 2010 Dec 7-8; Nakhon Pathom. Thailand. (In Thai).
- [47] Thabuot M. Activated Carbon from Sesame Residue. *Engineering Journal of Siam University* 2010; 21. (In Thai).
- [48] Nabais JV, Carrott P, Carrott MMLR, Luz V, Ortiz AL. Influence of preparation conditions in the textural and chemical properties of activated carbons from a novel biomass precursor: The coffee endocarp. *Bioresour. Technol.* 2008; 99: 7224-7231.
- [49] Srikun S, Nuithitikul K, Hirunpraditkoon S. Effect of carbonization and activation on property of activated carbon derived from durian peel, The 17th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TICChE); 2007 Oct 29-30; Chiang Mai. Thailand. (In Thai).
- [50] Patnukao P, Kongsuwan A, Pavasant P. Batch studies of adsorption of copper and lead on activated carbon from *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. bark. *Journal of Environmental Sciences* 2008; 20: 1028-1034.
- [51] Bualoi T, Sanongraj W, Sanongraj S. Adsorption of lead in synthetic wastewater using cow dung activated carbon. *Thai Environmental Engineering Journal* 2009; 23(3): 53-61. (In Thai).
- [52] Chaiya C, Boonamnuyvitaya V. Adsorption of toluene vapor on mesoporous activated carbon produced from coffee residue, The 2nd Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment; 2003 Feb 12-14; Phuket. Thailand.
- [53] Banjong P, Chatsiriwech D. Adsorption of methanol in biodiesel by activated carbon produced from macadamia nut shell, The 21st Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TICChE); 2011 Nov 10-11; Songkhla. Thailand. (In Thai).
- [54] Bunyakan C, Chungsiriporn J, Intamane J. Adsorption of toluene and benzene onto activated carbon prepared from rubber wood sawdust compared with commercial activated carbon, The 18th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TICChE); 2008 Oct 20-21; Chonburi. Thailand.

