



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>**การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่มีค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงต่ำ****Design of low parasitic capacitance high frequency high voltage transformer**

พงศกร กองผัด สุวิทย์ ปุณณชัยยะ* และ เดโช ทองอร่าม

Pongsakorn Kongput, Suvit Punnachaiya* and Decho Thong-Aram

ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 10330

Received December 2012

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

ค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่งเกิดจากขดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบมากเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงถูกจำกัดการตอบสนองความถี่สูงและมีประสิทธิภาพลดลง งานวิจัยนี้เสนอเทคนิคการลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง โดยออกแบบบอบบินเทฟลอนสำหรับพันขดลวดทุติยภูมิให้เป็นร่องหลายร่องแยกกันและใช้เทปเทฟลอนรองชั้นขดลวดแต่ละชั้น ผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการพันขดลวดซ้อนทับบนบอบบินเทฟลอนแบบร่องเดียว ความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นลงมีค่าลดลง 90.94% มีผลให้ตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้นจาก 45 kHz เป็น 94 kHz ในสภาวะไม่มีโหลด นอกจากนี้ยังช่วยลดการสูญเสียไดอิเล็กตริกจากผลของค่าความจุตัวเก็บประจุแฝงและลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างชั้นของขดลวดทุติยภูมิ

คำสำคัญ : หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ค่าความจุแฝง การสูญเสียไดอิเล็กตริก บอบบินเทฟลอน

Abstract

The parasitic capacitance occurred in high voltage transformer due to a large number of secondary windings was an important problem causing the high frequency response limit and decreasing the transformer efficiency. This research proposed the reduction of parasitic capacitance technique in high frequency high voltage transformer. The Teflon bobbin of secondary winding was designed in multi-slots and the winding coil was layered by with Teflon tape. The experimental results showed that the parasitic capacitance of the constructed transformer was 90.94% reduced and the frequency resonance was increased from 45 kHz to 94 kHz, at no loaded condition, comparing to the winding on single slot Teflon bobbin. Besides this technique can reduce the dielectric loss by effect of parasitic capacitance and diminish the layer to layer voltage of secondary winding.

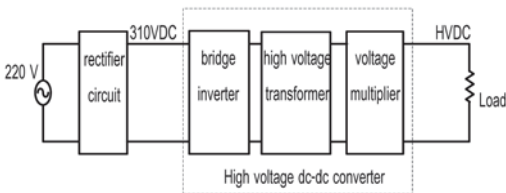
Keywords : High frequency high voltage transformer, Parasitic capacitance, Dielectric loss, Teflon bobbin

*Corresponding author. Tel.: +66-2218-6773

Email address: suvit.p@chala.ac.th

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นส่วนประกอบหลักของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องมือที่มีบทบาทในการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [1] เช่น เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ เครื่องเร่งอนุภาค เครื่องกำเนิดนิวตรอน เครื่องกำเนิดพลาสมา กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ เป็นต้น ในปัจจุบันวิวัฒนาการด้านเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic) ส่งผลให้โครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสามารถใช้การเรียงไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงจากระบบจ่ายไฟฟ้ามาตรฐานและกรองให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC to DC converter) จากนั้นใช้เทคนิคสวิตช์ (Switching technique) แปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (High frequency inverter) ก่อนขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและทวิแรงดันเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้โหลด ดังแผนภาพในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันสูงที่ใช้เทคนิคสวิตช์

การใช้เทคนิคสวิตช์ความถี่สูงมีข้อดี คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ขณะเดียวกันระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีการสูญเสียต่ำและการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงจะทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่คาบเวลาสั้นจึงควบคุมได้แม่นยำทำให้ระบบมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสูง [2] อย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจำเป็นต้องมีอัตรารอบ (Turn ratio) ของขดลวดสูง เพื่อแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางออกให้สูงตามต้องการ ดังนั้นจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจึงมีจำนวนมากส่งผลให้เกิดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitance) ระหว่างชั้นขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสูง [2-3] ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง เนื่องจากค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงใน

หม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวก่อให้เกิดการจำกัดการตอบสนองความถี่สูงและในการทำงานแบบสวิตช์ค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงนี้ยังก่อให้เกิดกระแสสไปก์ (Spike current) [4] ซึ่งเป็นสาเหตุให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรที่เกี่ยวข้องเกิดการเสียหายได้

จากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในปี ค.ศ.1988 [5] ได้มีการแก้ปัญหาการสูญเสียไดอิเล็กตริกจากผลของความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่ก่อให้เกิดความร้อนหลอมละลายบอบบิ้นและชั้นฉนวน โดยเสนอวิธีลดค่าความจุแฝงในหม้อแปลงเพื่อลดการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) ด้วยการแบ่งขดลวดทุติยภูมิออกเป็นขดย่อย ต่อมาในปี ค.ศ. 2001 [2] ได้เสนอแนวทางใหม่ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงต้นแบบ (20 kHz, 50 kVDC) โดยพันขดลวดทุติยภูมิบนบอบบิ้นแบบแยกช่องหลายช่องพร้อมประกอบด้วยวงแหวนลดความเข้มสนามไฟฟ้า (Stress-relief ring) ระหว่างปลายขดลวด เพื่อป้องกันการอาร์กของไฟฟ้าแรงดันสูง ส่งผลให้ค่าความจุแฝงระหว่างชั้นของขดลวดลดลงเท่าตัวแม้ว่าจะใช้จำนวนรอบมากกว่าเมื่อเทียบกับการพันแบบร่องเดียว และในปี ค.ศ. 2009 [6] ได้มีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (20 kHz, 60 kVDC) โดยขดทุติยภูมิพันบนบอบบิ้นแบบแยกช่องหลายช่องที่ทำด้วยไนลอนและอาศัยผลความจุแฝงในหม้อแปลงที่ลดต่ำลงให้ทำงานแบบเรโซแนนซ์ (LCC) ที่ความถี่สูงในการผลิตไฟฟ้าแรงดันสูง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะเรโซแนนซ์ดังกล่าวหม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของขดลวดทุติยภูมิต่อปฐมภูมิ (V_o/V_i) สูงมาก

งานวิจัยนี้จะนำเสนอเทคนิคการลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงโดยออกแบบบอบบิ้นที่ใช้พันขดลวดทุติยภูมิให้มีจำนวนร่อง (Slot) สำหรับพันขดลวดหลายช่องแยกกันและใช้เทปฉนวนคั่นชั้นของขดลวดแต่ละชั้น การเลือกวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำมาใช้ทำบอบบิ้นและเทปฉนวนจะช่วยทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงต่ำและตอบสนองความถี่สูงขึ้น นอกจากนี้คุณลักษณะของการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งเกิดจากผลของค่าความจุแฝงร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage inductance) ที่สะท้อนมาไปยังขดลวดปฐมภูมินำไปสู่การใช้งานบริเวณที่ให้กำลังไฟฟ้าจาก

หม้อแปลงไฟฟ้าสูงด้วยการทำงานแบบเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์ (Resonant converter) [4]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พารามิเตอร์แฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

พารามิเตอร์แฝงในโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงชนิดบอบบิ้นร่องเดี่ยวที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรั่ว (L_l) ความจุของตัวเก็บประจุแฝง (C_s) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก (P_d) เกิดจากปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

ก. ตัวเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage inductor) เกิดจากขนาดของขดลวดทุติยภูมิที่มีระยะเหนี่ยวนำห่างจากขดลวดปฐมภูมิเนื่องจากมีจำนวนชั้นมาก ทำให้เกิดการรั่วไหลฟลักซ์สนามแม่เหล็ก (H) ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิจากการวิเคราะห์ตามรายงานวิจัย [7] พบว่าค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรั่วจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของจำนวนรอบและรูปทรงของขดลวดทั้งสอง ดังสมการ (1)

$$L_l \approx \frac{\mu_0 N^2}{h^2} \left(V_{12} + \frac{V_1 + V_2}{3} \right) \quad (1)$$

μ_0 คือ ค่าความซาบซึ่มของแกนที่ภาวะสูญญากาศ

N คือ จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

h คือ ความสูงของชั้นขดลวด

V_{12} คือ ปริมาตรของฉนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

V_1 คือ ปริมาตรของขดลวดปฐมภูมิ

V_2 คือ ปริมาตรของขดลวดทุติยภูมิ

ข. ตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) เริ่มพิจารณาจากโครงสร้างของฉนวนขดลวดทุติยภูมิชั้นแรกกับชั้นถัดไป (C_g) จะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุรูปทรงกระบอกและเมื่อพันซ้อนทับหลายชั้นจะก่อตัวเก็บประจุระหว่างชั้นของขดลวด เกิดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝง (C_s) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2 โดยค่าความจุแฝงจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตามรายงานวิจัย [7] เป็นไปตามสมการ (2) และ (3) ดังนี้

$$C_g = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r(h+s)}{\ln(d_i/d_o)} \quad (2)$$

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกในภาวะสูญญากาศ

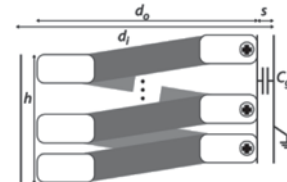
ϵ_r คือ ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของวัสดุ

h คือ ความยาวของจำนวนรอบขดลวด

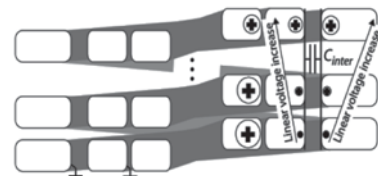
s คือ ระยะระหว่างชั้นขดลวด

d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางในของขดลวด

d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของขดลวด



(น) Cylindrical capacitor



(ข) Inter-capacitor

รูปที่ 2 การเกิดความจุแฝงในขดลวดทุติยภูมิ [7]

$$C_s = \frac{1}{3} C_g \frac{(N_1/N_2 - 1)^2}{(N_1/N_2)^2} \quad (3)$$

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวด

N_2 คือ จำนวนชั้นของขดลวด

N_1/N_2 คือ จำนวนชั้นของขดลวด

ค. การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) เป็นผลจากสนามไฟฟ้าความถี่สูงบนตัวเก็บประจุแฝงเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนไหวของอะตอมหรือโมเลกุลในวัสดุฉนวนก่อให้เกิดความร้อน จากรายงานวิจัย [5] กำลังไฟฟ้าของการสูญเสียไดอิเล็กทริก (P_d) ดังกล่าวขึ้นกับค่าความจุแฝงและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความจุแฝง ดังสมการ (4)

$$P_d = 2\pi f C_s V_{rms}^2 \tan(\delta) \quad (4)$$

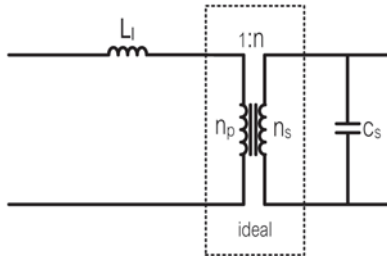
V_{rms} คือ แรงดันไฟฟ้าทางขดลวดทุติยภูมิ

f คือ ความถี่ที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงาน

C_s คือ ค่าความจุแฝง

$\tan(\delta)$ คือ แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุ

สภาวะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal) ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรั่วที่เกิดขึ้นจะปรากฏอยู่ด้านขดลวดปฐมภูมิและมีความจุของตัวเก็บประจุแผ่น (C_s) ระหว่างชั้นขดลวดทางด้านขดลวดทุติยภูมิดังแสดงวงจรสมมูลในรูปที่ 3

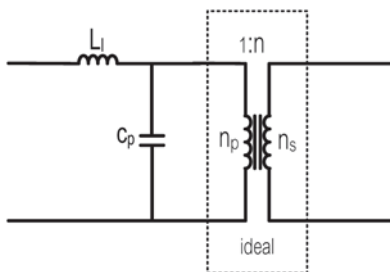


รูปที่ 3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

สำหรับค่าความจุของตัวเก็บประจุแผ่นที่เกิดขึ้นด้านขดลวดทุติยภูมิ (C_s) จะส่งผลสะท้อนมาปรากฏเป็นค่าความจุของตัวเก็บประจุแผ่นด้านขดลวดปฐมภูมิ (C_p) ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 4 จากรายงานวิจัย [3] ค่าความจุแผ่น C_p สามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

$$C_p = n^2 C_s \quad (5)$$

n คือ อัตรารอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเมื่อโอนย้ายตัวเก็บประจุแผ่นไว้ทางขดลวดปฐมภูมิ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4 จะเห็นว่าพารามิเตอร์แผ่นที่โอนย้ายมาด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะพิจารณาได้ 2 ลักษณะ คือ เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (LC low pass filter) แผ่น ซึ่งมีผลต่อการจำกัดการตอบสนองของความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีทำงานในระบบสวิตช์ที่ควบคุมแรงดันคงที่แบบ พัลส์วิดท์มอดูเลชัน (PWM) ทั่วไป

และเป็นวงจรแทงค์ (LC Tank circuit) [3] ในกรณีทำงานในระบบสวิตช์แบบเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ ของหม้อแปลงไฟฟ้าตามสมการ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_p}} \quad (6)$$

หรือ ในกรณีอัตรารอบเป็น 1: n

$$f_r = \frac{1}{2\pi n\sqrt{L_1 C_p}} \quad (7)$$

ในสภาวะเรโซแนนซ์ดังกล่าวหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีอัตราแรงดันไฟฟ้า (V_o/V_i) สูงมากและมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density) สูง ดังนั้นการใช้งานในบริเวณใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ จะช่วยให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอัตรารอบต่ำ ขนาดเล็กและประหยัดพื้นที่ แต่ควรหลีกเลี่ยงไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานที่ความถี่พอดิเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้าอันเนื่องมาจากเป็นจุดวิกฤติที่อาจทำให้ฉนวนไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าสไปก์ (Spike voltage) ที่เกิดขึ้นได้

2.2 การลดความจุแผ่นในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

จากสมการ (2) และ (3) จะเห็นว่าค่าความจุแผ่นขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) จำนวนชั้นของขดลวด ทุติยภูมิ (N_1/N_2) ดังนั้นการลดความจุแผ่นสามารถจัดการได้ดังนี้

1) เลือกใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ

2) ลดจำนวนชั้นของขดลวดทุติยภูมิลง ทำได้ 2 กรณี คือ การลดอัตรารอบของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยอาศัยการทำงานที่ภาวะเรโซแนนซ์และการลดแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิแล้วใช้วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า (Voltage multiplier) ช่วย

3) การพันขดลวดทุติยภูมิแยกออกเป็นส่วยย่อยและนำมาอันดับกัน มีผลให้ความจุแผ่นย่อยต่อกันและมีค่าลดลง

การลดค่าความจุแผ่นในหม้อแปลงจะช่วยลดปัญหาของพารามิเตอร์อื่นในโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง คือ เมื่อรูปทรงของขดลวดทุติยภูมิมีความสูงจากแกนลดลงจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วลดลง ขณะเดียวกันค่าความจุแผ่นที่ลดลงจะทำให้การสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่สูงลดลงด้วย

3. ขั้นตอนการออกแบบและสร้าง

3.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงจะแตกต่างจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำความถี่ต่ำทั่วไป เนื่องจากต้องคำนึงถึงการทำงานในสภาพไฟฟ้าแรงดันสูงและผลของไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งมีข้อพิจารณาดังต่อไปนี้

- 1) แกนหม้อแปลงความถี่สูงต้องเป็นชนิดแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core) ที่มีขนาดเพียงพอต่อกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ
- 2) วัสดุฉนวนที่ใช้ในการออกแบบบอบบิ้นสำหรับพันขดลวดทุติยภูมิและเทปฉนวนรองขดลวดแต่ละชั้นต้องมีค่าไดอิเล็กทริกต่ำและทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมได้
- 3) ระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิต้องห่างกันเพียงพอที่จะไม่เกิดการอาร์กขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ
- 4) การใช้ฉนวนรองของขดลวดต่ำและปรับรูปทรงขดลวดทุติยภูมิเพื่อลดพารามิเตอร์แฝงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่าน้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่ให้แรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิ 30 kV ที่กำลังไฟฟ้า 1.2 kW แรงดันไฟฟ้าทางขดลวดปฐมภูมิประมาณ $220V_{rms} \times \sqrt{2} = 310VDC$ ต้องการให้ทำงานที่ความถี่ 45 kHz จึงเลือกใช้แกนหม้อแปลงชนิดเฟอร์ไรต์เพื่อทำงานที่ความถี่สูงและเพื่อให้หม้อแปลงทนไฟฟ้าแรงดันสูงจะต้องพันแยกขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ จึงเลือกแกนรูปตัว U (U-shaped core) ประกะกัน โดยเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์กำลังสูงรุ่น UU120X160X20 ของ TDK สำหรับจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ (N_p) คำนวณจากสมการ (8) ได้จำนวนรอบ 10 รอบ

$$N_p = \frac{V_p \times 10^6}{4B_m A_c f} \quad (8)$$

V_p คือ แรงดันทางด้านขดลวดปฐมภูมิ (V)

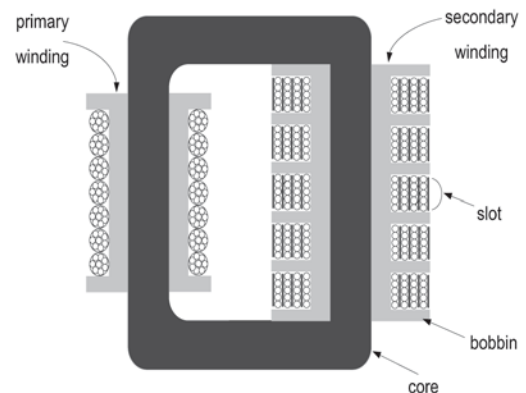
A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน (mm^2)

B_m คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T)

f คือ ความถี่ (Hz)

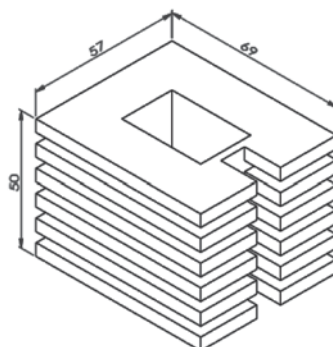
จากการทดลองหาอัตราแรงดันไฟฟ้าที่ภาวะความถี่เรโซแนนซ์เบื้องต้น สามารถเลือกอัตรารอบของขดลวดที่

1:65 โดยออกแบบโครงสร้าง 2 รูปแบบ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพารามิเตอร์แฝงในแต่ละโครงสร้าง แบบแรกใช้บอบบิ้นของขดลวดทุติยภูมิแบบร่องเดียวทั่วไปและแบบที่สองเป็นแบบร่องแยกหลายร่องดังแสดงในรูปที่ 5 อีกประการหนึ่งในการออกแบบ คือ การพันขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งทำงานที่ความถี่สูง จะต้องคำนึงผลของปรากฏการณ์นำกระแสไฟฟ้าเพียงบนผิวของตัวนำ (Skin effect) ที่ความถี่สูง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการนำกระแสของเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนจะใช้ลวดทองแดงเคลือบฉนวนเส้นเล็กหลายๆ เส้นมาตีเกลียวกันในการพันขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบบอบบิ้นแบบร่องเดียวจำนวน 10 รอบ



รูปที่ 5 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่สูง ที่ออกแบบเพื่อทดสอบ

ส่วนขดลวดทุติยภูมิพันด้วยเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ AWG#30 ที่จำนวนรอบเท่ากัน 650 รอบ แบบแรกจะพันบนบอบบิ้นแบบร่องเดียวและแบบที่สองจะพันบนบอบบิ้นที่ออกแบบร่องหลายร่องแยกกันดังขนาดและรูปทรงในรูปที่ 6

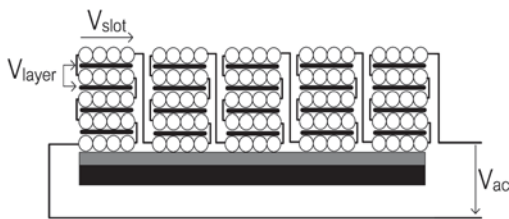


รูปที่ 6 แบบบอบบิ้นสำหรับพันขดลวดทุติยภูมิ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเทฟลอน ของ Dupont Teflon ที่ $f = 1$ MHz

Dielectric constant, ϵ_r	2.10	-
Dielectric strength	30.00	kV/mm
Dissipation factor, $\tan(\delta)$	0.0002	-
Bulk resistivity	10^{16}	$\Omega \cdot m$

วัสดุที่ใช้ทำบอบบิ้นเลือกใช้เทฟลอน (PTFE) ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังตารางที่ 1 เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ทนต่อไฟฟ้าแรงดันสูงและความถี่สูง แท่งเทฟลอน จะถูกเจาะช่องเพื่อใช้พันขดลวดเรียกว่า สล็อต (Slot) จำนวน 5 ร่อง เป็นการแบ่งแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดแต่ละขดและแยกย่อยค่าความจุแฝง โดยแต่ละร่องจะมีความกว้างของร่องสำหรับพันขดลวด 4 มิลลิเมตรและระหว่างร่องจะถูกคั่นด้วยผนังเทฟลอนหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อความแข็งแรงรองรับการพันขดลวด นอกจากนี้ร่องพันขดลวดจะเจาะช่องทะลุถึงกันทุกร่องเพื่อเปิดไว้สำหรับให้เส้นลวดพาดผ่านไปพันขดลวดร่องถัดไป ลักษณะของการพันขดลวดแสดงดังรูปที่ 7 เส้นลวดจะถูกพันเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ ในแต่ละร่องของบอบบิ้นและระหว่างชั้นของขดลวดจะรองคั่นด้วยเทปเทฟลอนหนา 0.3 มิลลิเมตร (ทนแรงดันไฟฟ้า 10 kV) สำหรับเป็นฉนวนคั่นแต่ละชั้นของขดลวด



รูปที่ 7 ลักษณะการพันขดลวดทุติยภูมิในร่อง

ขดลวดทุติยภูมิในแต่ละร่องจะต่ออนุกรมกัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแต่ละร่องสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{slot} = \frac{\sqrt{2}V_{ac}}{n_{slot}} \quad (9)$$

V_{ac} คือ แรงดันไฟฟ้าด้านนอกของหม้อแปลง

n_{slot} คือ จำนวนร่องของบอบบิ้น

และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิแต่ละชั้น (Layer to layer voltage) ในแต่ละร่องของบอบบิ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

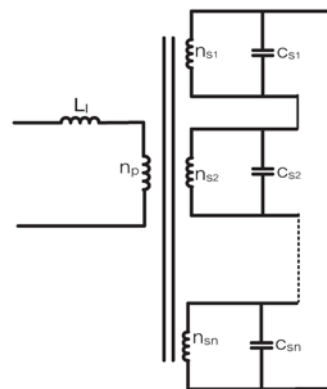
$$V_{layer} = \frac{V_{slot}}{n_{layer}} \quad (10)$$

n_{layer} คือ จำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละร่อง

การออกแบบบอบบิ้นที่มีลักษณะเป็นร่องหลายร่อง แยกกันนอกจากจะช่วยลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดแล้วยังช่วยลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าอีกด้วย เนื่องจากขดลวดทุติยภูมิในแต่ละร่องจะต่ออนุกรมกัน ดังวงจรสมมูลรูปที่ 8 และจากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพิจารณาหาความจุของตัวเก็บประจุแฝงรวมของขดลวดทุติยภูมิได้จากสมการ

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_{s1}} + \frac{1}{C_{s2}} + \dots + \frac{1}{C_{sn}}} \quad (11)$$

$C_{s1,2,n}$ คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุในแต่ละร่อง



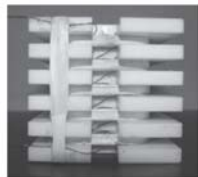
รูปที่ 8 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูง ที่แบ่งการพันขดลวดทุติยภูมิหลายร่อง

ค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงรวมที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ (C_s) จะมีค่าเท่ากับส่วนกลับผลรวมของส่วนกลับของค่าความจุตัวเก็บประจุในแต่ละร่อง จึงมีผลทำให้ค่าตัวเก็บประจุรวมลดลงตามจำนวนร่องที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในขดลวดทุติยภูมิจากรายงานวิจัย [8] ค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงแต่ละร่องของหม้อแปลงแกนทรงเหลี่ยมสามารถคำนวณได้ จากสมการ (12)

$$C_{slot} = \frac{4\epsilon_0\epsilon_r lw(n_{layer}-1)}{3dn_{layer}^2} \quad (12)$$

- C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุแต่ละร่อง
 ϵ_{slot} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวนแต่ละชั้น
d คือ ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างชั้นของขดลวด
l คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวด
w คือ ความกว้างของร่อง
 n_{layer} คือ จำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละร่อง

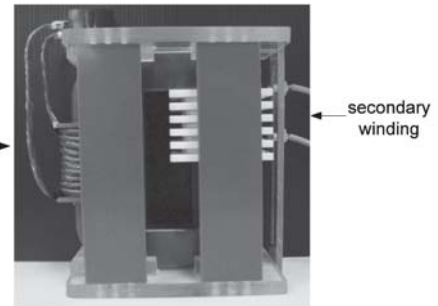
ในรูปที่ 9 แสดงชุดขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่สร้างขึ้นมีจำนวนขดลวด 650 รอบ โดยรูปที่ 9 (ก) เป็นชุดขดลวดที่พันบนบอบบินแบบร่องเดี่ยวมีจำนวนชั้นของขดลวดในร่อง 7 ชั้น คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแต่ละชั้นได้ 6.06 kV ส่วนในรูปที่ 9 (ข) เป็นชุดขดลวดที่พันบนบอบบินแบบแยกร่อง 5 ร่อง มีจำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละร่อง 13 ชั้น คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแต่ละชั้นได้ 0.65 kV จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแต่ละชั้นของบอบบินแบบแยกร่องลดลงประมาณ 10 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของฉนวนที่ใช้จะต่ำกว่ามาก



(ก) บอบบินแบบร่องเดี่ยว (ข) บอบบินแบบแยกร่อง

รูปที่ 9 ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

ชุดขดลวดทุติยภูมิและชุดขดลวดปฐมภูมิที่สร้างขึ้นจะนำมาประกอบร่วมกันในแต่ละด้านของแกนเฟอร์ไรต์รูปตัวยูเป็นโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 10 การแยกชุดขดลวดทั้งสองให้ห่างกัน เนื่องจากเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Step up transformer) ซึ่งขดลวดทุติยภูมิจะมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าขดลวดปฐมภูมิอยู่มาก (ประมาณ 100 เท่า) ดังนั้นจะต้องเปิดช่องว่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิสำหรับการจัดการฉนวนเพื่อไม่ให้เกิดการอาร์กกันระหว่างขดลวดทั้งสองขณะทำงานและยังต้องมีพื้นที่ผิวของชุดขดลวดในการระบายความร้อน



รูปที่ 10 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบและสร้างขึ้น

3.2 การระบายความร้อนและวัสดุฉนวน

วัสดุฉนวนที่ใช้สำหรับการฉนวนระหว่างช่องว่างชุดของขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิและชั้นของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าต้องมีคุณสมบัติที่มีค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สูง (Breakdown voltage) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ นำความร้อนได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ ฉนวนที่แทรกระหว่างชั้นของขดลวดจะมีผลต่อค่าความจุของตัวเก็บประจุผ่านทางชุดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าเลือกใช้วัสดุฉนวนที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะทำให้ค่าตัวเก็บประจุสูงในหม้อแปลงไฟฟ้าสูงประกอบกับหม้อแปลงทำงานที่ความถี่สูงจะทำให้เกิดการสูญเสียไดอิเล็กทริกในหม้อแปลงส่งผลให้เกิดความร้อนในหม้อแปลงสูงด้วย [5]

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันฉนวนสำหรับหม้อแปลง (Shell Diala Oils A & AX) การใช้น้ำมันเป็นฉนวนเนื่องจากสร้างภาชนะบรรจุได้ง่าย มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี มีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง (High dielectric strength) 28 kV/mm และน้ำมันหม้อแปลงสามารถไหลผ่านช่องว่างในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่แรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในถึงภาชนะบรรจุ น้ำมันหม้อแปลงและช่วยในการระบายความร้อนจากหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสีย คือ ถึงภาชนะบรรจุน้ำมันฉนวนมีน้ำหนักมาก

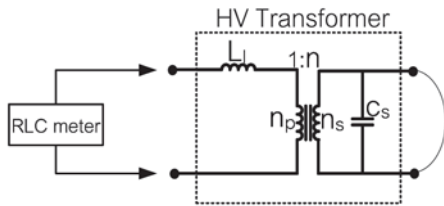
4. ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบ

4.1 การตรวจวัดค่าพารามิเตอร์แฝงในหม้อแปลง

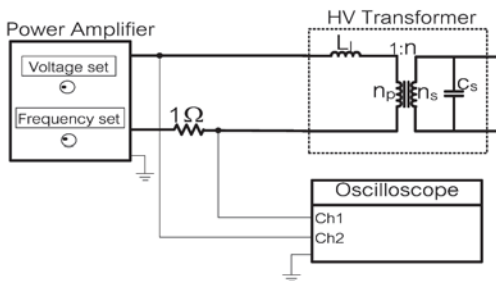
การตรวจวัดค่าพารามิเตอร์แฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงแบ่งการตรวจวัดเป็น 2 ส่วน คือ การตรวจ

วัดเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรั่วและการทดสอบเพื่อหาค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝง โดยทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่พันขดลวดทุติยภูมิแตกต่างกันทั้งบอบบินแบบร่องเดี่ยวและแบบเซาะร่องหลายร่องแยกกันที่สร้างขึ้น ในภาวะที่ไม่มีโหลด

การตรวจวัดค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรั่ว ใช้เครื่องวัด RLC meter ของ Hewlett Packard รุ่น 4262A วัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วทางด้านขดลวดปฐมภูมิโดยลัดวงจรขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้างดแสดงในแผนภาพรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผนภาพการวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่ว



รูปที่ 12 แผนภาพการจัดระบบวัดเพื่อหาค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝง

การตรวจวัดเพื่อหาค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงใช้หลักการวัดความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance) โดยจัดระบบวัดดังในรูปที่ 12 และป้อนความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดวัดแรงดันไฟฟ้าพร้อมทั้งจุดวัดกระแสไฟฟ้าจากการแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าบนตัวต้านทานค่า $1\ \Omega$ ในวงจรด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ การหาความถี่เรโซแนนซ์ทำได้โดยแปรเปลี่ยนความถี่ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเพื่อหาภาวะที่เกิดกระแสไหลผ่านตัวต้านทานในวงจรสูงที่สุดและเฟสของกระแสและแรงดันไฟฟ้าตรงกัน (In phase) จากนั้นนำค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากผลของวงจร LC นี้ไปคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรั่วในหม้อ

แปลงไฟฟ้าที่วัดได้ข้างต้น โดยใช้สมการ

$$C_s = \frac{1}{4(\pi n f_r)^2 L_l} \quad (13)$$

ผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์แฝงของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการพันขดลวดทุติยภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2 โดยที่ TR#1 คือหม้อแปลงที่ใช้บอบบินแบบร่องเดี่ยวและ TR#2 คือ หม้อแปลงที่ใช้บอบบินแบบแยกร่องขดลวดทุติยภูมิ 5 ร่อง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

Parameter	TR#1	TR#2
Leakage inductance (L_l) μH	37.6	37.2
Parasitic capacitance (C_s) pF	63.78	5.78

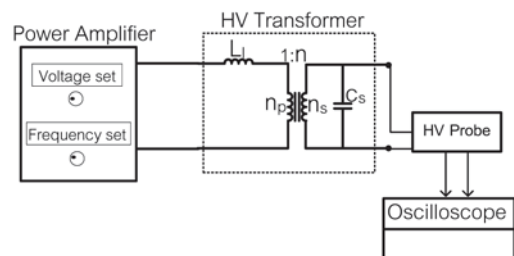
ตารางที่ 3 แสดงผลการวัดค่าความจุแฝง (C_s) ในหม้อแปลงไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าคำนวณตามสมการที่ (12) พบว่าผลจากการคำนวณค่าความจุแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พันขดลวดทุติยภูมิโดยใช้บอบบินเดี่ยวและแบบแยกร่องมีค่าคลาดเคลื่อนจากที่วัดได้ 37.02% และ 44.98% ตามลำดับ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าความจุแฝงในหม้อแปลง

Bobbin type	Measure	Calculate	Error
Single slot	63.78 pF	40.14 pF	37.02%
Multi-slot	5.78 pF	3.18 pF	44.98%

4.2 การทดสอบอัตราแรงดันไฟฟ้าที่เรโซแนนซ์

การทดสอบอัตราแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ภาวะเรโซแนนซ์สามารถทำได้โดยจัดระบบทดสอบดังรูปที่ 13 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาด 2 V_{pp} คงที่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้าทางขดลวดปฐมภูมิและอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าทางออกที่ขดลวดทุติยภูมิด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ จากนั้นแปรเปลี่ยนความถี่พร้อมวัดแรงดันไฟฟ้าทางออกของหม้อแปลง



รูปที่ 13 แผนภาพระบบทดสอบภาวะเรโซแนนซ์

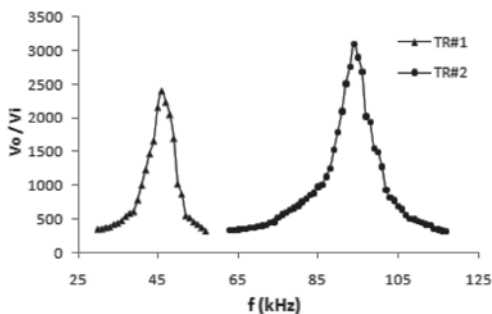
ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราแรงดันไฟฟ้าทางออกต่อทางเข้าดังกราฟรูปที่ 14 ซึ่งพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะมีอัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (V_o/V_i) สูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งสูงกว่าอัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอัตราของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำทั่วไปในสมการที่ (14)

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_o}{V_i} \quad (14)$$

N_s คือ จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

N_p คือ จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ

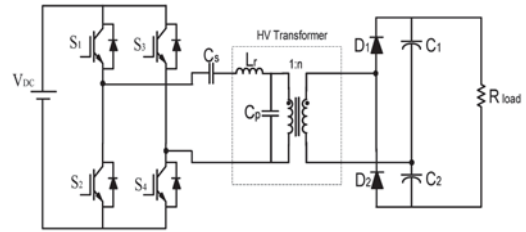
โดยโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ พันบนบอบบินแบบแยกร่องมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 94 KHz สูงกว่าหม้อแปลงที่ขดลวดทุติยภูมิพันบนบอบบินแบบร่องเดียวซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 45 KHz และยังมีอัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแบบร่องเดียว 22.40%



รูปที่ 14 เปรียบเทียบอัตราแรงดันไฟฟ้าในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

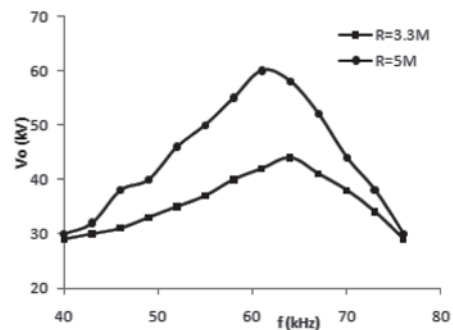
4.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในภาวะมีโหลด

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิพันบนบอบบินแบบแยกร่องในภาวะมีโหลด ทำโดยบรรจุหม้อแปลงในถังฉนวนน้ำมันและขับหม้อแปลงทางขดปฐมภูมิด้วย LCC เรโซแนนซ์แบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full bridge inverter) ที่แรงดันไฟฟ้า 50-300 VDC ด้วยวงจรขับเกต ส่วนทางด้านขดทุติยภูมิป้อนเข้าวงจรทวีแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบฟูลเวฟ โดย C_1 และ C_2 มีความจุ 0.002 μF ก่อนจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดตัวต้านทานในถังฉนวนน้ำมัน ดังวงจรในรูปที่ 15



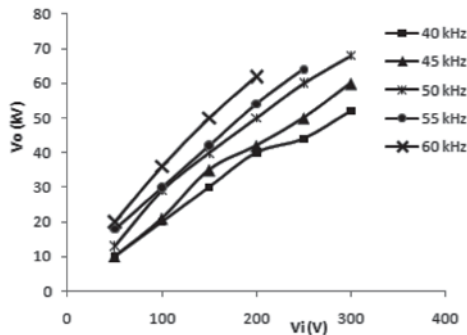
รูปที่ 15 วงจรขับหม้อแปลงแบบ LCC เรโซแนนซ์

จากการแปรเปลี่ยนความถี่ขับหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าที่โหลดความต้านทาน 5 M Ω และ 3.3 M Ω โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่วงจรขับ 150 V เพื่อหาอัตราแรงดันไฟฟ้าที่ภาวะเรโซแนนซ์ ได้ผลทดลองดังกราฟรูปที่ 16 จะเห็นว่าเมื่อจัดวงจรขับแบบ LCC เรโซแนนซ์และจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดตัวต้านทานที่ 5 M Ω และ 3.3 M Ω ความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงจะมีค่าเป็น 61 และ 64 KHz ตามลำดับและที่โหลดค่าต้านทานต่ำแรงดันไฟฟ้าทางออกจะลดลง



รูปที่ 16 อัตราแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ภาวะเรโซแนนซ์ขณะมีโหลด

ในการทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าทางออกและแรงดันไฟฟ้าของวงจรขับทางขดปฐมภูมิที่ความถี่บริเวณใกล้ตำแหน่งเรโซแนนซ์ระหว่าง 40-60 KHz แสดงดังกราฟรูปที่ 17 จะพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าวงจรขับคงที่ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแรงดันไฟฟ้าทางออกจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางออกที่ลดลงเมื่อขดทุติยภูมิจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นได้ โดยปรับชุดเซตแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ (Voltage regulation) ด้วยอัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงขึ้น โดยการเพิ่มวงจรป้อนกลับแบบ PFM (Pulse frequency modulation) จากการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.4 kW (68 kV, 20 mA)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าทางออกและแรงดันขาเข้าที่ความถี่บริเวณใกล้เคียง 60 kHz

5. สรุปผล

ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงขนาดแรงดันไฟฟ้าทางออก 30 kV ที่อัตรารอบ 1:65 กำลังไฟฟ้า 1.2 kW โดยใช้โครงสร้างบอบบินเทฟลอนเป็นแบบแยกช่อง 5 ช่อง เพื่อพันขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและแต่ละชั้นของขดลวดในแต่ละช่องคั่นด้วยเทปเทฟลอนหนา 0.3 มิลลิเมตร สามารถช่วยลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแผ่นในหม้อแปลงไฟฟ้าลงได้ถึง 90.94% การที่ค่าความจุของตัวเก็บประจุแผ่นในหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงส่งผลให้หม้อแปลงมีการตอบสนองความถี่สูงขึ้นและมีความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้นเท่าตัวจาก 45 kHz เป็น 94 kHz เมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่พันขดลวดทุติยภูมิบนบอบบินเทฟลอนแบบช่องเดียว นอกจากนี้บอบบินเทฟลอนแบบแยกช่องยังช่วยลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างชั้นของขดลวดทุติยภูมิลง 10 เท่าและลดการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ก่อให้เกิดความร้อนในบอบบิน เป็นการลดโอกาสการเกิดอาร์กระหว่างชั้นขดลวด ส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีความทนทาน

ผลการทดลองใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่มีค่าความจุของตัวเก็บประจุแผ่นต่ำนี้จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด โดยจัดวงจรแบบ LCC เรโซแนนซ์และทวิแรงดันสองเท่าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดตัวด้านทานที่ 5 MW และ 3.3 MW ความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงจะมีค่าเป็น 61 และ 64 kHz ตามลำดับ หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 1.4 kW เพียงพอสำหรับงานพัฒนาด้านเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์และเครื่องเร่งอนุภาคขนาดเล็กที่ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าสมรรถนะสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และขอขอบคุณบริษัทคงศักดิ์ เอ็กเซอร์เคียวการแพทย์และอุตสาหกรรมจำกัด ที่สนับสนุนชิ้นส่วนและอุปกรณ์ในการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tomita K, Suksri A, Addoddorn C. HVDC bridge generator 40 kV 5 mA. KKKU Engineering Journal. 2005; 32(1): 77-92. (In Thai).
- [2] Fothergill JC, Devine PW, Lefley PWA. A novel prototype design for a transformer for high voltage, high frequency, high power use. IEEE transactions on power delivery 2001; 16(1): 89-98.
- [3] Perez MA, Blanco C, Rico M, Linera FF. A new topology for high voltage, high frequency transformers. APEC 1995 Conference Proceedings 1995; 2: 554-559.
- [4] Johnson SD, Witulski AF, Erickson RW. Comparison of resonant topologies in high-voltage dc applications. IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 1998; 24(3): 263-274.
- [5] Kurita H, Hasegawa T, Shibuya Y, Gohnai T, Ohsuga H, Honda Y. Dielectric loss of high voltage/ high frequency transformers used in switching power supply for space. IEEE Power electronics specialists conference 1988; 2: 1120-1126.
- [6] Liu J, Sheng L, Jianjiang S, Zhang Z, He X. Design of High Voltage, High Power and High Frequency Transformer in LCC Resonant Converter. IEEE. 2009; 1034-1486

- [7] Meier S, Kjellqvist T, Nærra S, Nee HP. Design consideration for medium-frequency power transformers in offshore wind farms. European conference on power electronics and applications, 2009; EPE'09 13th.
- [8] Biela J, Kolar JW. Using transformer parasitics for resonant converter- A review of the calculation of the stray capacitance of transformers. IEEE Conference Record of the industry applications, IAS 2005; 3: 1868-1875.



KKU Engineering Journal

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

ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลของประเทศไทย: การทบทวนวรรณกรรม

Activated carbon from Thailand's biomass: A review literature

ยุวรัตน์ เงินเย็น* และชนิษฐา 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) โดยคุณสมบัติที่ได้นั้นยังมีความสามารถในการดูดซับน้อย ซึ่งต้องนำมาผ่านขั้นตอนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ โดยขั้นตอนการกระตุ้นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) และการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

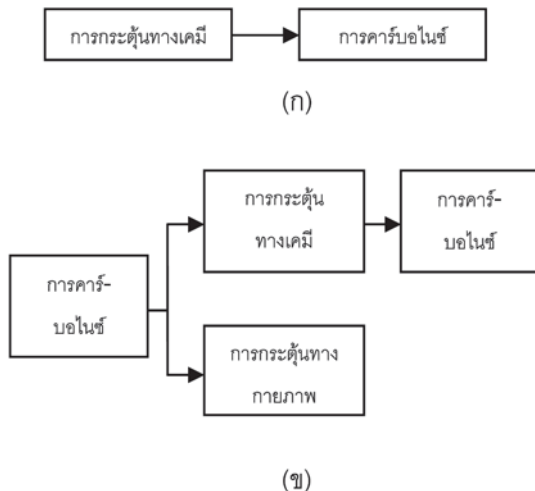
การกระตุ้นทางเคมีเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนเดียว โดยการคาร์บอนไนซ์ในสภาวะที่มีสารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โดยสารเคมีเหล่านี้ทำให้การคาร์บอนไนซ์เกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาของโครงสร้างรูพรุน ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่สิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์ นิยมใช้กรดฟอสฟอริก 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] เมล็ด และเปลือกสับปะรด [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 Khuysangaim [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 Khuysangaim [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] เมล็ดสนับดำ [7] และกะลาปาล์ม [9] ซึ่งกะลาปาล์มเป็นวัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพสูงที่สุด โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดถึง 1,812 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดถึง 2,131 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก เปลือกสนับดำ [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 เปลือกมังคุด [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] เปลือกสนับดำ [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] ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดและเม็ดมะขาม โดยมีสภาวะการเตรียมเหมือนกัน พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเม็ดมะขามมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าการดูดซับไอโอดีน สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเปลือกมังคุด 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 Boonamnuyvitaya [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] Boonamnuyvitaya [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]
กากลบ	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]
	จวงเครือกล้วยน้ำว้า	เผาที่ 500°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 ₃ PO ₄ 24 hrs เผาต่อที่ 600–800°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 ₃ PO ₄ 24 hrs เผาต่อที่ 600–800°C 2 hrs	–	–	531–728	–	[29]
	เผาที่ 600°C 3 hrs	กระตุ้นด้วย steam 700–900°C 1–5 hrs	450–933	–	–	–	[30]
ไม้ยางพารา	เผาที่ 800°C 1 hr	แช่ H ₃ PO ₄ 24 hrs เผาต่อที่ 600–800°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 ₃ PO ₄ 24 hrs เผาต่อที่ 600–800°C 2 hrs	–	–	430–690	–	[29]
	เผาไร้อากาศ 400°C 1 hr	แช่ H ₃ PO 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 ₂ 700–900°C 1–3 hrs	350–1,500	–	300–1,100	–	[32]
	เผาด้วย N ₂ 400°C 1–4 hr	กระตุ้นด้วย steam 700–900°C 1–3 hrs	600–1,650	–	750–1,400	–	
ก้านทะลาย ปาล์ม	เผาที่ 350°C 45 min	แช่ KOH 600–900°C 1–3 hrs	–	–	268–1,308	184–266	[33]
	เผาที่ 350°C 45 min	กระตุ้นด้วย CO ₂ + steam + air 600–900°C 1–3 hrs	–	–	414–799	206–227	
ขังข้าวโพด	เผาด้วย N ₂ 300–800°C 1 hr	กระตุ้นด้วย CO ₂ 300–800°C ไม่ระบุเวลา	732–836	0.40–0.42	–	–	[34]
		กระตุ้นด้วย steam 300–800°C ไม่ระบุเวลา	423–675	0.34–0.36	–	–	
	เผาไร้อากาศ 350–500°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	สถานะในการ คาร์บอนไนซ์	สถานะในการ กระตุ้น	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตร รูพรุนรวม (cm^3/g)	ค่าการ ดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการ ดูดซับ เมทธิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
เปลือกและ เมล็ดลิ้นจี่	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 นกกุง	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	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตร รูพรุนรวม (cm^3/g)	ค่าการ ดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	ค่าการ ดูดซับ เมทธิลีนบลู (mg/g)	อ้างอิง
กะลา มะพร้าว	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 ไม่ระบุอุณหภูมิ และเวลา						
	แช่ ZnCl_2 ไม่ระบุเวลา	กระตุ้นด้วย steam 600°C 4 hrs	305	0.28	–	–	
	เผาต่อด้วย N_2 ไม่ระบุอุณหภูมิ และเวลา						
ผักมะขาม	แช่ H_3PO_4 1 hr	กระตุ้นด้วย CO_2 500–700°C 1 และ 2 hrs	405–815	0.17–0.34	–	–	[45]
ผักราช พฤกษ์	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] ผักราชพฤกษ์ [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 ฟลูออโรไนด์ [8] ฟีนอล [52] โมโนเอทิลีนไกลคอล [19] เมทานอลในไบโอดีเซล [53] โทลูอีน [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]
	ไม้กระถินเทพา	โครเมียม	2.52–2.73 mg/g	[44]
		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]
	ฝักรมะขาม	ตะกั่ว	30–45 mg/g	[45]
		ทองแดง	17–27 mg/g	
สารอินทรีย์	กากกาแฟ	แคดเมียม	6–25 mg/g	
		ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)	30–300 mg/g	[8]
		โทลูอิน	14–476 mg/g	[52]
	ขังข้าวโพด	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

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดมีราคาแพง จึงได้มีงานวิจัยที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทย ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หรือเป็นวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุทางการเกษตรชนิดต่างๆ นี้ ยังเป็นวัสดุที่ดีในการกำจัดสารพิษต่าง 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 (TIChE); 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, Boonamnuayvitaya 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 (TIChE); 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 (TIChE); 2008 Oct 20-21; Chonburi. Thailand.

