

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน โดยมีตัวแปรการศึกษา คือ ขนาดอนุภาคของไผ่รวก อัตราการให้ความร้อน เวลาที่ค้างไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย และอุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลหาค่าการดูดซับของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้มาทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยมีตัวแปรในการศึกษาคือ เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น และถ่านชาร์จากการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งวิจารณ์ผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณของไผ่รวก

เนื่องจากไผ่รวกเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติที่ราคาถูกและมีอยู่มากในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่จะปลูกกันอยู่ทางเหนือของประเทศมากที่สุด ซึ่งคาดว่าจะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการเตรียมเป็นถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากไผ่รวก โดยวิธีการแยกสลายด้วยความร้อนและการกระตุ้นด้วยถ่านชาร์ด้วยไอน้ำที่ต่อไป

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของไผ่รวกพบว่า มีปริมาณความชื้นค่อนข้างต่ำร้อยละ 6.94 โดยน้ำหนัก ปริมาณสารระเหยได้ค่อนข้างสูงร้อยละ 80.41 โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าค่อนข้างต่ำ ร้อยละ 4.27 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 8.38 โดยน้ำหนัก แสดงดังตาราง 3.1 ซึ่งในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์นั้นควรคำนึงถึงสมบัติบางประการของวัตถุดิบ สมบัติที่สำคัญของวัตถุดิบหลักๆคือ มีปริมาณความชื้นต่ำ ค่าคาร์บอนคงตัวสูง มีสารที่ระเหยได้สูง มีปริมาณเถ้าต่ำ และไม่สลายตัวเมื่อเก็บ การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมแก่การผลิตนั้น นอกจากพิจารณาสมบัติบางประการของวัตถุดิบแล้ว ยังต้องคำนึงราคาต้นทุน และกระบวนการผลิต ตลอดถึงวัตถุประสงค์การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานด้วย⁽¹⁶⁾

ซึ่งไผ่รวกประกอบไปด้วยคุณสมบัติตามที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ต่อไป

4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของไผ่รวก

จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของไผ่รวก แสดงดังตาราง 3.2 พบว่าไผ่รวกมีธาตุคาร์บอนอยู่ร้อยละ 43.43 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.63 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 49.19 โดยน้ำหนัก และซัลเฟอร์ร้อยละ 0.065 โดยน้ำหนัก ค่าความร้อน 4,231.46 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อนเพื่อนำผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ไปผลิตเป็นสารดูดซับได้ เพราะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเหมาะสำหรับนำมาเตรียมเป็นวัสดุคืบ⁽¹⁶⁾

4.3 ขั้นตอนการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน

4.3.1 การหาขนาดของไผ่รวกที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน

จากการทดลองทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) แสดงดังรูป 3.1 โดยใช้ขนาดอนุภาคของไผ่รวก <0.25, 0.25-0.50 และ 0.50-0.75 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน 400 องศาเซลเซียส เวลาที่ค้างไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 1.0 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคลดลง เนื่องจากขนาดอนุภาคขนาดเล็กเกิดการสูญเสียมวลได้มากกว่าขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ การแพร่ผ่านของความร้อนเกิดขึ้นได้ทั่วถึงในขนาดอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าในขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการสูญเสียมวลจึงส่งผลให้สารระเหยได้ระเหยออกไปจากอนุภาคได้มากกว่า และเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวจึงส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar และคณะ⁽³⁰⁾ พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคลดลงส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลง

จากการทดลองหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกความร้อน โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงดังรูป 3.2 พบว่าที่ขนาดอนุภาค <0.25 มิลลิเมตร ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 150.34 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ขนาดอนุภาค 0.25-0.50 มิลลิเมตร ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 83.87 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่ขนาด 0.50-0.75 มิลลิเมตร ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 78.98 มิลลิกรัมต่อกรัม อาจเนื่องจากขนาดอนุภาค <0.25 มิลลิเมตรเป็นขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าขนาดอนุภาค 0.25-0.50 และ 0.50-0.75 มิลลิเมตร และในขนาดอนุภาคขนาดเล็กการแพร่ของความร้อนเข้าสู่โครงสร้างในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนเกิดขึ้นได้ทั่วถึง และเกิดการระเหยของสารระเหยได้ที่สมบูรณ์มากกว่าทำให้เกิดรูพรุนได้มากและส่งผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคลดลง

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar และคณะ⁽³⁰⁾ ที่พบว่าขนาดอนุภาคเล็กสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากกว่าขนาดอนุภาคขนาดใหญ่

ดังนั้นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมคือขนาด <0.25 มิลลิเมตร โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดคือ 150.34 มิลลิกรัมต่อกรัม และนำขนาดอนุภาคนี้นี้ไปศึกษาในข้อ 4.3.2 ต่อไป

4.3.2 การหาอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน

จากการทดลองทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) แสดงดังรูป 3.3 โดยใช้ขนาดอนุภาคของไผ่รวก <0.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน 400 องศาเซลเซียส เวลาที่ค้างไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 1.0 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลง อาจเนื่องมาจากอัตราการให้ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นระหว่างกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สารระเหยได้ระเหยออกไปได้มากขึ้นระหว่างกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน และจากการพิจารณาผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊สจะพบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก อัตราการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น จึงทำให้สารระเหยได้ควบแน่นกลายเป็นของเหลวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว และส่วนที่เหลือจะระเหยออกเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lua และคณะ⁽²⁴⁾ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงเรื่อยๆ

จากการทดลองหาอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกความร้อนโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงดังรูป 3.4 พบว่าอัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 65.85 มิลลิกรัมต่อกรัม อัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 150.34 มิลลิกรัมต่อกรัม และอัตราการให้ความร้อนที่ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 105.24 มิลลิกรัมต่อกรัม อาจเนื่องมาจากอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำส่งผลให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนยาวนานขึ้น และอัตราการให้ความร้อนที่สูงเกินไปส่งผลให้ระยะเวลาให้การแยกสลายด้วยความร้อนสั้น ซึ่งเมื่อเวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อนสั้นหรือนานจนเกินไป จะส่งผลต่อโครงสร้างของรูพรุนที่เกิดขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่สั้นไปอาจไม่เพียงพอต่อการแยกสลายโครงสร้างของไผ่รวกเพื่อทำให้เกิดเป็นรูพรุนในโครงสร้าง หรือระยะเวลาที่นานจนเกินไปส่งผลให้ไปทำลายโครงสร้างของรูพรุนที่เกิดขึ้น เกิดการหลอมและยุบตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้นได้ จึงส่งผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง^(13, 20, 32)

ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อนคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 150.34 มิลลิกรัมต่อกรัม และนำอัตราการให้ความร้อนนี้ไปศึกษาในหัวข้อ 4.3.3 ต่อไป

4.3.3 การหาเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน

จากการทดลองทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) แสดงดังรูป 3.5 โดยใช้ขนาดอนุภาคของไผ่รวก <0.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5, 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง เมื่อเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายนานขึ้นมีผลทำให้ปริมาณความร้อนถ่ายเทสู่โครงสร้างวัตถุบิได้นานทำให้เกิดการเผาไหม้ของวัตถุบิ การเผาไหม้ของวัตถุทำให้เกิดการสูญเสียมวลมากขึ้น สารระเหยได้ระเหยออกจากวัตถุบิ และเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลว จึงส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ⁽³¹⁾

จากการทดลองหาเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อนโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงดังรูป 3.6 พบว่าเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายที่ 0.5 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 165.78 มิลลิกรัมต่อกรัม เวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายที่ 1.0 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 150.34 มิลลิกรัมต่อกรัม และเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายที่ 1.5 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 133.78 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจะลดลงเนื่องจากเวลาที่นานขึ้นมีผลต่อโครงสร้างของรูพรุน เพราะได้รับความร้อนเป็นเวลานาน ทำให้โครงสร้างเกิดแตกหักและสลายไปของรูพรุน ซึ่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของสาวิตรีและคณะ⁽²⁰⁾ พบว่าเมื่อเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายนานขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง

ดังนั้นเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายที่เหมาะสมคือ 0.5 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 165.78 มิลลิกรัมต่อกรัม และนำเวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้ายนี้ไปศึกษาในหัวข้อ 4.3.4 ต่อไป



4.3.4 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน

จากการทดลองทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) แสดงดังรูป 3.7 โดยใช้ขนาดอนุภาคของไผ่รวก <0.25 มิลลิเมตร อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาที่ค้างไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อนเพิ่มสูงส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งมีแนวโน้มที่จะลดลง เพราะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความร้อนที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียมวลของวัตถุดิบมากขึ้น เพราะเกิดการเผาไหม้ที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลง และสารระเหยจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวจึงทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar และคณะ⁽³⁰⁾ และ Li และคณะ⁽³¹⁾ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนเพิ่มขึ้นเพิ่มจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งจะลดลง

จากการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกความร้อนโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงดังรูป 3.8 พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 103.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 165.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 63.84 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 46.48 มิลลิกรัมต่อกรัม อาจเนื่องจากอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาในการแยกสลายด้วยความร้อนที่น้อยประกอบกับอุณหภูมิที่ต่ำซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาต่ออะตอมของคาร์บอนและสารระเหยได้ จึงทำให้สารระเหยได้โมเลกุลต่ำบางส่วนไม่สามารถระเหยออกจากโมเลกุลของไผ่รวกได้ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สารระเหยโมเลกุลต่ำจะระเหยออกจากโครงสร้างของไผ่รวกได้ดียิ่งขึ้น ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายในของไผ่รวกถูกแตกพันธะมากขึ้น ทำให้สารประกอบเหล่านี้เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและปิด รูพรุนที่เกิดขึ้น เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานในการทำลายพันธะภายในของโครงสร้างของวัตถุดิบ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจส่งผลให้รูพรุนขนาดเล็กรวมตัวกันกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ จากการเผาไหม้บางส่วนของผนังรูพรุน⁽³²⁾ ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง เนื่องจากความสามารถในการดูดซับไอโอดีนอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กสุดของรูพรุนขนาดเล็กที่โมเลกุลของไอโอดีนถูกจับได้ประมาณ $10 \text{ \AA}$ ⁽³³⁾ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hernander และคณะ⁽³³⁾ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงแรกที่ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกในช่วง 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง

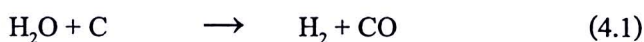
ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อนคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดคือ 165.78 มิลลิกรัมต่อกรัม

4.4 ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

จากขั้นตอนจากการแยกสลายด้วยความร้อน เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมให้การแยกสลายด้วยความร้อนคือ ขนาดอนุภาคของไผ่รวก <0.25 มิลลิเมตร อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาที่ค้างไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน 400 องศาเซลเซียส จากนั้นนำถ่านชาร์ที่ได้ในสภาวะดังกล่าวข้างต้น ไปทำการทดลองในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อไป โดยทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นคือ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง

4.4.1 การหาเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาผลการทดลองค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงดังรูป 3.9 พบว่าที่เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 1.5 ให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 284.44 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 2.0 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 644.66 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 2.5 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 279.64 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 3.0 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 350.74 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าเมื่อเวลาการกระตุ้นเพิ่มขึ้นในช่วง 1.5-2.0 ชั่วโมง จะทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มสูงขึ้นจาก 284.44 เป็น 644.66 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดที่เวลาการกระตุ้น 2.0 ชั่วโมง ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 644.66 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากที่เวลาการกระตุ้นที่ 2 ชั่วโมง สารระเหยได้ที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านชาร์ระเหยออกไปได้มากขึ้น ทำให้เกิดรูพรุนเกิดขึ้น และตัวกระตุ้นคือไอน้ำมีโอกาสเข้าไปทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับผิวของคาร์บอน⁽³⁶⁾ ดังสมการ (4.1) ซึ่งส่งผลให้รูพรุนมีมากขึ้นเนื่องจากเกิดการขยายรูพรุนที่มีอยู่แล้วและสร้างรูพรุนใหม่ และส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น



จากการทดลอง เมื่อทำการเพิ่มเวลาให้นานขึ้นมากอีกเป็น 2.5 และ 3 ชั่วโมงไอน้ำมีโอกาสแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนภายในรูพรุนได้ลึกมากขึ้น แต่เนื่องถ่านชาร์จากไผ่รวกมีขนาด

<0.25 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็ก ความลึกของรูพรุนมีไม่มาก ให้น้ำสามารถแพร่เข้าทำปฏิกิริยาได้ทั่วทั้งก้อนของถ่าน เมื่อเวลานานขึ้นจึงทำให้รูพรุนขนาดเล็กเกิดการขยายตัวและรวมตัวกันเป็นรูพรุนของกลางและขนาดใหญ่^(13, 36) ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงเหลือ 502.40 และ 350.74 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสอดคล้องกับ Li และคณะ⁽³¹⁾ พบว่าการเพิ่มเวลาในการกระตุ้นมีผลต่อค่าการดูดซับไอโอดีน เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการกระตุ้นช่วง 20 ถึง 40 นาที ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลานานมากขึ้นในช่วง 40 ถึง 100 นาที จะทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง

ดังนั้นจากการพิจารณาค่าการดูดซับไอโอดีนจึงเลือกเวลาการกระตุ้นที่ 2.0 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 644.66 มิลลิกรัมต่อกรัม และนำไปศึกษาในข้อ 4.4.2 ต่อไป

4.4.2 ถ่านชาร์ที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

จากข้อ 4.4.1 เมื่อได้เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดลองหาถ่านชาร์ที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อไป โดยใช้ถ่านชาร์ที่ได้จากแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาคของไผ่รวก <0.25 มิลลิเมตร อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาที่ค้างไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง ไปทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ค่าการดูดซับไอโอดีนแสดงดังรูป 3.10 พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีน 369.68 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านชาร์ที่ได้จากอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 644.66 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านชาร์ที่ได้จากอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 279.64 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านชาร์ที่ได้จากอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 202.45 มิลลิกรัมต่อกรัม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถ่านชาร์ที่อุณหภูมิการแยกสลายด้วยความร้อนระหว่าง 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีเท่ากันของถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น พบว่าที่อุณหภูมิการแยกสลายด้วยความร้อนที่ 300 องศาเซลเซียส จะมีช่วงเวลาในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนที่สั้นมาก อาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาต่ออะตอมของคาร์บอนและสารระเหยได้ สารระเหยได้โมเลกุลต่ำบางส่วนจึงไม่สามารถระเหยออกจากโมเลกุลของไผ่รวกได้ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำจึงเกิดรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนน้อย และพบว่าที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส จะมีช่วงเวลาให้การแยกสลายด้วยความร้อนที่นานมากขึ้นและอุณหภูมิที่สูงกว่า เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นและในช่วงเวลาที่นานขึ้นนี้ โครงสร้างภายในของไผ่รวก

อาจจะถูกแตกพันธะมากขึ้น ทำให้สารประกอบเหล่านี้เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจส่งผลให้รูพรุนขนาดเล็กรวมตัวกันกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ จากการเผาไหม้บางส่วนที่ผนังรูพรุนขนาดเล็ก หรือรูพรุนขนาดกลาง⁽³²⁾ เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โอกาสที่ไอน้ำจะแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนภายในรูพรุนได้ลึกมากขึ้น ทำให้รูพรุนขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากซึ่งมีความสำคัญในการดูดซับ ที่มีค่อนข้างน้อย กลายสภาพกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มากขึ้น โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15-2,000 Å และ 1,000-2,000 Å ตามลำดับ จึงส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง เนื่องจากความสามารถในการดูดซับไอโอดีนอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กสุดของรูพรุนขนาดเล็กที่โมเลกุลของไอโอดีนถูกจับได้ประมาณ 10 Å^(13, 20) และที่อุณหภูมิการแยกสลายด้วยความร้อนที่สูงเกิดการสูญเสียมวลมากขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างเปราะบาง เมื่อนำมาทำการกระตุ้น โครงสร้างเหล่านี้จึงถูกทำลาย ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติในการดูดซับต่ำ^(13, 20)

ดังนั้นถ่านชาร์ที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไอน้ำคือ ถ่านชาร์ที่อุณหภูมิการแยกสลายด้วยความร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 644.66 มิลลิกรัมต่อกรัม

เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์จากไผ่รวกที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส และถ่านกัมมันต์ทางการค้าของบริษัท Fluka แสดงดังรูป 3.11 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ค่าการดูดซับสารละลายไอโอดีนสูงกว่าถ่านชาร์ เนื่องจากว่าเมื่อนำถ่านชาร์มาทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงที่ 700 องศาเซลเซียส สารระเหยได้ที่เหลืออยู่ภายในโครงสร้างของถ่านชาร์ถูกขับไล่ออกไปได้เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งในขั้นตอนการกระตุ้นนี้ยังมีไอน้ำเป็นตัวพาเอาสารระเหยได้ออกไป นอกจากนี้ไอน้ำยังเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันกับผิวของคาร์บอน⁽³⁷⁾ ส่งผลทำให้เกิดเป็นรูพรุนในโครงสร้างถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้าของบริษัท Fluka มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากไผ่รวก และถ่านชาร์ในทุกสถานะ โดยค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดเท่ากับ 787.05 มิลลิกรัมต่อกรัม อาจเนื่องมาจากวัตถุดิบที่นำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ทางการค้าของบริษัท Fluka นั้น อาจจะมีปริมาณร้อยละของคาร์บอนค่าตัวและสารระเหยได้ที่มากกว่า รวมไปถึงมีปริมาณร้อยละความชื้นและเถ้าที่ต่ำกว่า⁽¹⁶⁾ ไผ่รวกซึ่งเป็นวัตถุดิบของงานวิจัยนี้ จึงทำให้เมื่อเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ออกมาแล้วได้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่า

4.4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบประมาณของไฟรวก ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ และความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์

จากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์แบบประมาณของไฟรวก ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์แสดงในตาราง 3.3 พบว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้ขนาดอนุภาค <0.25 มิลลิเมตร อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาในการกระตุ้น 0.5 ชั่วโมง ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาในการกระตุ้น 2 ชั่วโมง ซึ่งลดสารระเหยลงเหลือประมาณร้อยละ 31.44 จะเห็นได้ว่าสารระเหยได้ยังมีค่าสูงอยู่ ซึ่งส่งผลให้ค่าคาร์บอนค่าตัวของถ่านกัมมันต์มีค่าไม่สูงมากนักอยู่ที่ประมาณร้อยละ 43 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ถ้าใช้เวลาในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนานขึ้นอาจสามารถไล่สารระเหยในถ่านกัมมันต์ออกไปได้มากขึ้น และทำให้ผลต่างที่คำนวณได้เป็นค่าคาร์บอนคงตัวอาจเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ทั้งนี้งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่เวลาการกระตุ้นอื่นๆ

การหาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรเป็นการหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร ปริมาตรในที่นี้คือปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาค และปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นอยู่กับขนาด และความพรุนของถ่านกัมมันต์⁽²⁰⁾ จากการทดลองพบค่าความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์จากไฟรวกมีค่าเท่ากับ 0.44 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 ที่กำหนดค่าความหนาแน่นในช่วงระหว่าง 0.20-0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร⁽¹³⁾

4.5 การดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลู และเมทิลออเรนจ์ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

การเปรียบเทียบการศึกษาการดูดซับสารละลายสีของถ่านชาร์ที่ได้จากการแยกสลายไฟรวกด้วยความร้อน โดยใช้ขนาดอนุภาคของไฟรวก <0.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน 400 องศาเซลเซียส เวลาที่คั่งไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการนำถ่านชาร์ในสภาวะดังกล่าวข้างต้นมากระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการกระตุ้น 2.0 ชั่วโมง

ผลการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลู แสดงดังรูป 3.12 พบว่าการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูของถ่านชาร์เข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 1.5 ชั่วโมง ค่าการดูดซับที่สมดุลการดูดซับ

เท่ากับ 2.46 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุการดูดซับที่เวลา 0.5 ชั่วโมง ค่าการดูดซับที่สมดุการดูดซับเท่ากับ 4.99 มิลลิกรัมต่อกรัม

ผลการดูดซับสารละลายสีเมทิลออเรนจ์ แสดงดังรูป 3.13 พบว่าการดูดซับสารละลายสีเมทิลออเรนจ์ของถ่านชาร์เข้าสู่สมดุการดูดซับที่เวลา 2 ชั่วโมง ค่าการดูดซับที่สมดุการดูดซับเท่ากับ 1.14 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับสารละลายสีเมทิลออเรนจ์ของถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุการดูดซับที่เวลา 1 ชั่วโมง ค่าการดูดซับที่สมดุการดูดซับเท่ากับ 4.96 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีเมทิลีนบลูและสีเมทิลออเรนจ์ พบถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารละลายดังกล่าวมากกว่าถ่านชาร์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้น ทำให้มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในการกระตุ้นทำให้ถ่านชาร์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนมีความพรุนมากขึ้น เพราะมีการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าถ่านชาร์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bestani และคณะ⁽²⁹⁾

ผลการเปรียบเทียบการศึกษการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลู และสารละลายสีเมทิลออเรนจ์ของถ่านชาร์ ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน โดยใช้ขนาดอนุภาคของไผ่รวก <0.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อน 400 องศาเซลเซียส เวลาที่คั่งไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการนำถ่านชาร์ในสภาวะดังกล่าวข้างต้นมากระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการกระตุ้น 2.0 ชั่วโมง โดยผลการดูดซับของถ่านชาร์ แสดงดังรูป 3.14 และผลการดูดซับของถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูป 3.15

การเปรียบเทียบการศึกษการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูและสารละลายสีเมทิลออเรนจ์ของถ่านชาร์ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน โดยใช้ไผ่รวกขนาด <0.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาที่คั่งไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังรูป 3.14 พบว่าถ่านชาร์เข้าสู่สมดุการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูที่เวลา 1.5 ชั่วโมง โดยมีค่าการดูดซับที่สมดุของการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูเท่ากับ 2.46 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านชาร์เข้าสู่สมดุการดูดซับสารละลายสีเมทิลออเรนจ์ที่เวลา 2 ชั่วโมง โดยมีค่าการดูดซับที่สมดุของการดูดซับสารละลายสีเมทิลออเรนจ์เท่ากับ 1.14 มิลลิกรัมต่อกรัม

การเปรียบเทียบการศึกษาการดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลูและสารละลายซีเมทิลออเรนจ์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการนำถ่านชาร์ในสภาวะดังกล่าวข้างต้นมากระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการกระตุ้น 2.0 ชั่วโมง แสดงดังรูป 3.15 พบว่าถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุลการดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลูที่เวลา 0.5 ชั่วโมง โดยมีค่าการดูดซับที่สมดุลของการดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลูเท่ากับ 4.99 มิลลิกรัมต่อกรัม และ ถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุลการดูดซับสารละลายซีเมทิลออเรนจ์ที่เวลา 1 ชั่วโมง โดยมีค่าการดูดซับที่ สมดุลของการดูดซับสารละลายซีเมทิลออเรนจ์เท่ากับ 4.96 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากการทดลองพบว่าถ่านชาร์มีความสามารถในการดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลูได้ดีกว่า สารละลายซีเมทิลออเรนจ์ อาจเป็นเพราะว่าที่ผิวหน้าของถ่านชาร์มีประจุเป็นลบ จึงทำให้สามารถ ดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลูซึ่งแตกตัวให้ประจุบวกได้ดีกว่าสารละลายซีเมทิลออเรนจ์ซึ่งแตกตัว ให้ประจุลบ (โครงสร้างสารละลายซีเมทิลีนบลู และเมทิลออเรนจ์แสดงดังภาคผนวก ข) ส่วน ถ่านกัมมันต์นั้นมีความสามารถในการดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลูและสารละลายซีเมทิล ออเรนจ์ไม่แตกต่าง อาจเนื่องมาจากผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ประกอบไปด้วยประจุบวกและลบ ให้ปริมาณที่เท่ากันกัน จึงทำให้ค่าการดูดซับไม่แตกต่างกัน

จากรูป 3.16 พบว่าในทุกเงื่อนไขของถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลูได้ ฉะนั้นรูปพูนที่เกิดขึ้นหลังการกระตุ้นคาดว่าเป็นขนาดกลาง เนื่องจากเมทิลีนบลูมีอนุภาคประมาณ $120 \text{ \AA}$ ⁽³⁵⁾ ยกเว้นที่เวลาในการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 2 ชั่วโมง พบว่าการดูดซับสารละลายซีเมทิลีนบลู น้อยกว่าการดูดซับไอโอดีน ส่วนการทดสอบด้วยไอโอดีนพบว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ เท่ากันตลอดช่วงการศึกษาเวลาในการกระตุ้น 1.5-3.0 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากไอโอดีนมีอนุภาค ประมาณ $<10 \text{ \AA}$ ⁽¹³⁾ จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการใช้เวลาในการกระตุ้น 2 ชั่วโมง ให้ ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุด ซึ่งเป็นไปได้ว่า ณ ที่เวลาในการกระตุ้น 2 ชั่วโมงอาจจะมีโครงสร้าง ของรูปพูนขนาดเล็กมากกว่าเงื่อนไขอื่น

4.6 ลักษณะพื้นผิวของไผ่รวก ถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไผ่รวก แสดงดังรูป 3.17 พบว่าไผ่รวกมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ไม่ค่อยมีรูพรุนให้เห็นมากนัก เมื่อถ่านชาร์ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้ไผ่รวกขนาด <0.25 มิลลิเมตร เวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังรูป 3.18 พบว่าลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์ที่ได้มีลักษณะพื้นผิวขรุขระกว่าของไผ่รวก และมากกว่าที่อุณหภูมิการแยกสลายด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 500 และ 600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 3.19 และ 3.20 เพราะเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแยกสลายด้วยความร้อนทำให้เกิดรอยแตกแยกที่พื้นผิวเกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากเมื่อไผ่รวกได้รับความร้อนทำให้สารระเหยได้บางส่วนถูกไล่ออกจากโครงสร้างของไผ่รวกจึงทำให้ลักษณะพื้นผิวมีลักษณะเหมือนกับรอยแยกขรุขระ เกิดเป็นรูพรุนมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงมากจนเกินไปรูพรุนเหล่านั้นก็เกิดการหลวมตัวและยุบพังได้ เนื่องจากการได้รับความร้อนที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียมวลมีผลทำให้เกิดการเผาไหม้ได้^(20, 32)

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการถ่านชาร์ในสถานะดังกล่าวข้างต้นมากระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2.0 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้ไผ่รวกขนาด <0.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาที่ค้ำไว้ ณ อุณหภูมิสุดท้าย 0.5 ชั่วโมง และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังรูป 3.21 พบว่าลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะที่เป็นรูพรุนเกิดขึ้น เนื่องจากว่าเมื่อนำถ่านชาร์มาทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงที่ 700 องศาเซลเซียส สารระเหยได้ที่เหลืออยู่ภายในโครงสร้างของถ่านชาร์ถูกขับไล่ออกไปได้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นการกระตุ้นด้วยไอน้ำยังมีไอน้ำเป็นตัวพาเอาสารระเหยได้ออกไปอีกจึงทำให้ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้เกิดมีลักษณะเป็นรูพรุนขึ้น ซึ่งจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนั้น มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับด้วย ในการกระตุ้นจะทำให้มีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ⁽¹³⁾

ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการนำถ่านชาร์ที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส ในสถานะดังกล่าวข้างต้นมากระตุ้นด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นมีการลดจำนวนลงแสดงดังรูป 3.22 และแทบจะไม่มีรูพรุนเกิดขึ้น เป็นเพียงแต่พื้นผิวที่แตกแยกขรุขระเท่านั้น แสดง

ผังรูป 3.23 อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิในการแยกสลายด้วยความร้อนของถ่านชาร์ที่จะนำมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์นั้นค่อนข้างสูง โครงสร้างที่เกิดเป็นรูพรุนจึงอาจจะทำลาย

4.7 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน

การเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ในการดูดซับไอโอดีนและสารละลายสีเมทิลีนบลูแสดงดังตาราง 4.1 จะพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไผ่รวกมีค่าการดูดซับไอโอดีนและการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นๆ อาจเป็นเพราะในงานวิจัยนี้เลือกใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ การกระตุ้นด้วยไอน้ำถูกจัดว่าเป็นการกระตุ้นทางกายภาพ โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพได้แก่ ไอน้ำ, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ออกซิเจน, แก๊สออกซิเจน และแก๊สไฮโดรเจนจากการเผา ซึ่งเรียกสารดังกล่าวว่า แก๊สออกซิไดซ์ (oxidizing gas) โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 – 1000°C ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) บางส่วนของเม็ดถ่านทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ทำให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างกันไปคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง⁽¹⁶⁾ แต่ในงานวิจัยอื่นๆ เลือกใช้การกระตุ้นด้วยสารเคมี สารเคมีที่เติมลงไปจะช่วยทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบและขณะที่ทำการคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ และเกิด การเชื่อมไขว้กัน (cross-link) ของโครงสร้างทำให้ถ่านหินเกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากติดการเชื่อมไขว้กันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมไขว้กัน ประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำ หรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก จึงส่งผลให้ในงานวิจัยอื่นๆ มีค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับสีเมทิลีนบลูค่อนข้างสูงกว่า ข้อดีของวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมีคือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือมีสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถด้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลา⁽¹²⁾

และทำการเมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากไม้ไผ่เหมือนกัน ก็พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูมีค่าแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการกระตุ้นแตกต่างกันแล้ว อายุของไม้ไผ่ รวมไปถึงชนิดของสายพันธุ์ก็มีผลต่อค่าการดูดซับของไอโอดีนและสารละลายสีเมทิลีนบลูด้วย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้พบว่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน แสดงดังตาราง 4.1 ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนประมาณ 644.66 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไผ่รวมสามารถใช้เป็นตัวดูดซับได้ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงตามอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนมีเกณฑ์ที่กำหนดอยู่ที่ 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์จากไผ่รวมมีค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

ตาราง 4.1 การเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ในการดูดซับ ไอโอไดน์และสารละลายไอโอดีนที่ติดบนผิว

ชนิด ถ่านกัมมันต์	อุณหภูมิในการ การบดบดไนซ์ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการ การบดบดไนซ์ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	เวลาในการ กระตุ้น (ชั่วโมง)	อัตราส่วน (การบดบดไนซ์ : ถ่าน)	ค่าการดูดซับ ไอโอไดน์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าการดูดซับสาร ละลายไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลบ. ซม.)
ไผ่ตง ⁽¹³⁾	450	1	450	4	เคมี 3:1 (H_3PO_4 : char)	615.84	8.46	-
ไผ่ตม ⁽¹³⁾	450	1	450	4	เคมี 3:1 (H_3PO_4 : char)	277.24	8.47	-
ก้นกะลาปล่ม น้ำมัน ⁽²⁰⁾	350	45 (นาที)	800	3	เคมี 1:1 (KOH : char)	1,308.00	248.00	0.35
	350	45 (นาที)	800	2.20	ไอน้ำ	799	224	0.44
สนับ ⁽²⁷⁾	400	1	800	2	เคมี 4:1 (NaOH : char)	1,138.00	499.17	-
อาร์ทิส ⁽²⁸⁾	500	1	500	2	เคมี 2:1 (H_3PO_4 : char)	1,134.00	780.00	-
ชันโซล่า % เวอร์มิกิวลิต้า ⁽²⁹⁾	600	1	650	2	เคมี 1:1 ($ZnCl_2$: char)	1,178.00	130.00	-
ไม้ยางพารา ⁽³⁰⁾	400	1	750	1	ไอน้ำ	765.00	255	-
กากตะกอน ⁽³¹⁾	300	1	850	40 (นาที)	ไอน้ำ	178.45	130.69	-
เปลือกเมล็ดคาง ⁽³²⁾	400-650	-	880	1	ไอน้ำ	1,326.00	265	-
ไผ่รวก ⁽³³⁾	400	30 (นาที)	700	2	ไอน้ำ	644.66	4.99	0.44

