บทที่5

อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์

ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิ และ เวลา ซึ่งมีผลต่อสมบัติถ่านชาร์ที่ได้คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ (Y) ปริมาณเถ้า (A) ปริมาณสารระเหย (VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC)

5.1.1 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์

เมื่ออุณหภูมิการคาร์บอไนซ์เพิ่มขึ้นปริมาณสารระเหยมีแนวโน้มลดลง เป็นผลมาจากการที่อุณหภูมิสูง ปริมาณความร้อนที่มีมากจะเป็นตัวไล่สารระเหยออกจากเนื้อถ่านชาร์ ทำให้ปริมาณสารระเหยที่เหลือในถ่านชาร์มีค่าต่ำลง จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูง สารระเหยจะถูกไล่ออกมาได้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิต่ำ จากรูปกราฟที่ 4.6 เห็นได้ว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณสารระเหยที่เหลืออยู่มากในกรณีอุณหภูมิต่ำ (350 องศาเซลเซียส) เมื่อใช้เวลาต่างกัน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสารระเหยที่เหลืออยู่ เริ่มที่จะไม่สามารถไล่ออกมาได้อีก อาจเกิดจากการอุดตันของพวกน้ำมันทาร์ ที่ได้จากการสลายตัวของเนื้อไม้จากความร้อนในระหว่างการคาร์บอไนซ์

ปริมาณผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากวัตถุดิบและสารระเหยในเนื้อกะลาเกิดการเผาไหม้ ทำให้เนื้อกะลาบางส่วนกลายเป็นเถ้าและสารระเหยจะถูกไล่ออกจากเนื้อกะลา และถูกเผาไหม้ไป จึงเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์ลดลง

ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก (300 องศาเซลเซียส) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 400 และ 450 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากไม่สามารถที่จะทำการไล่สารระเหยออกได้อีก อันเป็นผลมาจากการอุดตันของรูพรุน ส่งผลทำให้ค่าคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

5.1.2 ผลของเวลาการคาร์บอไนซ์

เมื่อเพิ่มเวลาคาร์บอไนซ์นานขึ้น กะลาจะได้รับปริมาณความร้อนมากขึ้น ทำให้สารระเหยถูกไล่ออกมาได้มาก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มเวลานานขึ้นค่าสารระเหยและค่าปริมาณผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.5 ส่วนค่าคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกันดังรูป 4.4 ที่เป็นเช่นนี้เพราะปริมาณสารระเหยที่เหลืออยู่อาจถูกอุดตันด้วยพวกน้ำมันทาร์ ที่เกิดจากการคาร์บอไนซ์ ทำให้ไม่สามารถที่จะไล่สารระเหยออกมาได้ในปริมาณสูงเหมือนในช่วงแรก (60 ถึง 90นาที) ซึ่งถ้าต้องการไล่สารระเหยออกอีก อาจต้องใช้เวลาและ

อุณหภูมิที่สูงกว่าที่ใช้ในการทดลอง ส่วนปริมาณเถ้ามีค่าค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 อยู่ที่ร้อยละ 9 ถึง 10

เมื่อพิจารณาถ่านชาร์ ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ พบว่าถ่านชาร์ ที่เหมาะสำหรับการกระตุ้นควรมีสารระเหยไม่มากและน้อยเกินไป ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25 (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537) นอกจากนี้ยังใช้ปริมาณผลิตภัณฑ์ (Yield) ค่าคาร์บอนคงตัว (FC) และความประหยัดในด้านพลังงาน มาพิจารณาประกอบควบคู่ไปด้วย จากการทดลองพบว่ามีหลายภาวะที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 25 ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าสมบัติถ่านชาร์ ที่มีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25 ที่ได้จากการทดลอง

ภาวะในการคาร์บอไนซ์		ร้อยละผลิตภัณฑ์	ร้อยละสารระเหย	ร้อยละคาร์บอนคงตัว
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)			
350	120	32.43	23.69±0.82	64.88±0.89
350	180	31.53	23.38±0.53	65.57±0.59
400	60	30.06	25.22±0.12	63.34±0.13
400	75	29.58	24.73±0.06	63.58±0.08
400	90	29.46	24.76±0.83	64.13±0.70
450	60	28.42	24.30±0.16	64.40±0.17

เห็นได้ว่า ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์ กะลาปาล์มน้ำมันนี้คือที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เนื่องจากใช้เวลาและอุณหภูมิไม่สูงมาก โดยมีสมบัติดังนี้ ร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 30.06 ร้อยละสารระเหยเท่ากับ 25.22±0.12 ร้อยละคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 63.34±0.13 และร้อยละเถ้าเท่ากับ 10.22±0.07 โดยลักษณะพื้นผิวภายนอกถ่านชาร์ มีสีดำมันวาว เปราะและถูกเผาไหม้โดยตลอดทั่วทั้งผิวกะลา มีขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมดเท่ากับ 3.45 ± 0.16 ตารางเมตรต่อกรัม

5.2 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ถ่านชาร์ จากกะลาปาล์มน้ำมันมีสมบัติดังนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 130.98±4.88 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) 3.45±0.16 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก ($S_{Micropore}$) 0.3566 กรัมต่อตารางเมตร ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.0002 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับพบว่า สมบัติการดูดซับไอโอดีนของถ่านชาร์ที่ได้และค่าพื้นที่ผิวมีค่าต่ำมาก เนื่องมาจากพวกน้ำมันทาร์และสารที่ได้จากการเผาสลายอุดตันอยู่ตามรูพรุนของผิวถ่านชาร์ จึงต้องนำถ่านชาร์ที่ได้มาทำการกระตุ้นเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติการดูดซับและพื้นที่ผิวให้สูงขึ้น ผลจากการกระตุ้นช่วยทำให้เกิด

1) การพัฒนาของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น
2) เพิ่มปริมาตรของรูพรุน
3) ทำให้พื้นที่ผิวโดยรวมสูงขึ้น
4) สมบัติการดูดซับสูงขึ้น

จากการศึกษาของ Cha และ Kim (1993) พบว่าถ่านชาร์ มีสมบัติในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี และเนื่องจากไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง (30 MHz-300 GHz) ทำให้สามารถที่จะทะลุผ่านถ่านชาร์และทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในอนุภาคถ่านชาร์ได้

ข้อดีของการใช้พลังงานไมโครเวฟ (Loren และ Cha, 1996) คือ

1. ลดเวลาในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว
2. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย

เพื่อให้ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้พลังงานไมโครเวฟจึงทำการทดลองแปรภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการกระตุ้น โดยทำการศึกษาตัวแปร 2 ตัวคือ

1. เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น
2. อัตราการไหลของแก๊สกระตุ้น (คาร์บอนไดออกไซด์)

แล้วศึกษาถึงสมบัติที่ได้คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทธิลีนบูล ค่าพื้นที่ผิว ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ค่าความหนาแน่นปรากฏ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพื่อเลือกภาวะที่มีสมบัติดีที่สุด จากนั้นนำไปศึกษาผลของขนาดอนุภาคและชนิดแก๊สกระตุ้น ที่มีต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ต่อไป

5.2.1 ผลของเวลาต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการทดลองตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่าค่าการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ในขณะที่ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู มีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.13 ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องมาจากมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของรูพรุนอันเนื่องมาจากการกระตุ้น (ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน) เพราะค่าการดูดซับไอโอดีนสามารถใช้บ่งชี้ปริมาณของรู

พรุนขนาดเล็ก (10 ไมโครเมตร) ได้ในขณะที่ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูสามารถใช้บงชี้ปริมาณรูพรุนขนาดกลางได้ (15 ไมโครเมตร) ดังค่าในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใช้ในการดูดซับสาร (Hassler, 1974)

สารที่ถูกดูดซับ	ขนาดรูพรุนที่ใช้ดูดซับ (ไมโครเมตร)
Iodine	10
Potassium Permanganate	10
Methylene Blue	15
Erythrosine Red	19
Molasses	28

ทั้งนี้เพราะในตอนเริ่มแรกของการกระตุ้นนั้น พลังงานไมโครเวฟที่ให้เข้าไปจะถูกดูดซับโดยถ่านชาร์และถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้สารระเหยและน้ำมันทาร์ที่เหลืออยู่ในตัวถ่านชาร์ ถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cha (1993) ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนที่ได้ในตอนแรก มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลางเป็นจำนวนมาก ทำให้ความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลูมีค่าสูงในช่วงแรกในขณะที่การดูดซับไอโอดีนซึ่งต้องอาศัยรูพรุนที่มีขนาดเล็กมีค่าต่ำ แต่เมื่อให้เวลาในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีการพัฒนารูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันระหว่างคาร์บอนอะตอมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ $C+CO_2 \leftrightarrow 2CO$,ΔH +162 kJ mol^{-1} (Torregrosa,1991) ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kirubakaran (1991) และ Satya Sai และ Jaleel Ahmed (1997) ในขณะเดียวกันรูพรุนขนาดกลางที่เกิดขึ้นในตอนแรกก็จะมีการขยายตัวเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งไม่มีผลต่อการดูดซับ เป็นเพียงทางผ่านของแก๊สกระตุ้นในการที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในอนุภาคถ่านชาร์ ส่งผลให้ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูลดลง ส่วนโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่ายที่ภายในอนุภาคประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กมากมายที่เชื่อมโยงกันด้วยรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏที่แสดงในรูปที่ 4.14 มีค่าลดลง เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ นิชชรี นิลนนท์ (2541) และ ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ (2540) พบว่าการเพิ่มเวลาในการกระตุ้นทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความหนาแน่นลดลง อันเป็นผลมาจากความพรุนที่เพิ่มมากขึ้นในเนื้อถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการกระตุ้น

ผลของเวลาต่อค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด (S_{BET}, $S_{Langmuir}$) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าการดูดซับไอโอดีนคือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพื้นที่ผิวที่ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มเวลาในการสัมผัสระหว่างคาร์บอนที่ผิวถ่านชาร์กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Loren และ Cha (1996) คือค่าพื้นที่ผิวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นกับเวลาในการกระตุ้นดังกราฟที่ 4.19 แต่อัตราในการเพิ่มขึ้นจะมากขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวในตอนแรกเห็นได้ว่ามีค่าค่อนข้างน้อย (30-60 นาที) เนื่องมาจากการเปิดรูพรุนของถ่านชาร์ที่ได้จากการอุดตันของพวกน้ำมันทาร์และสารระเหยอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคถ่านชาร์อย่างรวดเร็วเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟเข้าไป มีผลทำให้รูพรุนที่ได้ค่อนข้างเป็นรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ มากกว่ารูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งเห็นได้จากค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูจะสูงในช่วงแรกและมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าการดูดซับไอโอดีนมีแนวโน้มตรงข้ามกัน แต่เมื่อให้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้น (60-90 นาที) ผลของการกระตุ้นจะทำให้เกิดการพัฒนารูพรุนขนาดเล็กมากขึ้น ในขณะเดียวกันรูพรุนขนาดกลางก็พัฒนาไปเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ส่งผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้นในขณะเดียวกันค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูลดต่ำลง ส่วนค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับเวลาเช่นกันดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.17 ถึง 4.18 ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงด่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ที่เป็นเช่นนี้เพราะในระหว่างการกระตุ้นมีการเผาไหม้ของเนื้อกะลาบางส่วนทำให้มีเถ้าเกิดขึ้น ซึ่งเป็นออกไซด์ของพวกสารอนินทรีย์ในเนื้อถ่านชาร์ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

5.2.2 ผลของอัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการกระตุ้น

ผลของอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 จากการทดลองพบว่าการที่อัตราไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง ดังรูป 4.9 ในขณะที่ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.10 ที่เป็นเช่นนี้น่ามาจากสาเหตุการขยายตัวของโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จากขนาดเล็กไปเป็นขนาดกลางและใหญ่อันเนื่องมาจากปริมาณสารตั้งต้นที่มีมากขึ้น ส่งผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนอะตอมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ดังนั้นมีโอกาสที่รูพรุนขนาดเล็กที่มีอยู่จะเกิดการขยายตัวจึงมีมากขึ้นและเมื่อมาพิจารณาที่ ค่าพื้นที่ผิว (BET, Langmuir, Micropore) และค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 พบว่าค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก เหล่านี้มีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลที่กล่าวมาแล้วคือ มีการขยายตัวของขนาดรูพรุนจากขนาดเล็กไปเป็นขนาดกลางและใหญ่มากขึ้นจึงทำให้ค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของมันมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Loren และ Cha (1996) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลทำให้อัตราการขจัดคาร์บอนออกจากผิวถ่านชาร์มีค่ามากขึ้น

และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองโดยดูจาก ค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิว พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยใช้ภาวะการผลิตดังนี้ ขนาดอนุภาค 1.18-2.36 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.2 ลิตรต่อนาที และ เวลากระตุ้น 90 นาที ให้ผลดังนี้

1. การดูดซับไอโอดีนสูงสุดคือ 411.27±2.81 มิลลิกรัมต่อกรัม
2. ค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) สูงสุด 476.64±11.54 ตารางเมตรต่อกรัม
3. ค่าพื้นที่ผิว ($S_{Langmuir}$) สูงสุด 628.86±2.05 ตารางเมตรต่อกรัม
4. ค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก ($S_{Micropore}$) สูงสุด 365.93 ตารางเมตรต่อกรัม
5. ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ($V_{Micropore}$) สูงสุด 0.1696 ลูกบาก์ศเซนติเมตรต่อกรัม

ดังนั้นเราจึงเลือกภาวะนี้เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองขั้นนี้ จากนั้นจึงนำภาวะที่ได้ไปศึกษาถึงผลของ ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ ที่มีผลต่อการกระตุ้นต่อไป

5.3 ผลของขนาดอนุภาคถ่านชาร์ต่อการกระตุ้น

ผลของขนาดอนุภาคถ่านชาร์ แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 และ รูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อได้ภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา ก็นำภาวะที่ได้มาทำการศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้น พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง สมบัติการดูดซับ ค่าพื้นที่ผิวและค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังนี้ เมื่อขนาดของถ่านชาร์เล็กลงจาก 2.36-4.75 มิลลิเมตร เป็น 1.18-2.36 มิลลิเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.6 ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.72 ค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.00 ค่าพื้นที่ผิว ($S_{Langmuir}$) เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.09 ค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก ($S_{Micropore}$) เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.99 ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ($V_{Micropore}$) เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.07 และเมื่อขนาดเล็กลงจาก 1.18-2.36 มิลลิเมตร เป็น 1.18-0.60 มิลลิเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.67 ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.16 ค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.23 ค่าพื้นที่ผิว ($S_{Langmuir}$) เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.50 ค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก ($S_{Micropore}$) เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.40 ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ($V_{Micropore}$) เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.65 เห็นได้ว่าการที่อนุภาคมีขนาดเล็กลงจะส่งผลดีกับค่าการดูดซับและพื้นที่ผิวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่ค่าความหนาแน่นปรากฏที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เนื่องจากการที่อนุภาคมีขนาดเล็กลงทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่บรรจุในภาชนะตวงวัดน้อยลง ทำให้สามารถที่จะบรรจุถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้นในขณะที่ปริมาตรเท่าเดิม จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏที่ได้มีค่ามากขึ้นเมื่อขนาดเล็กลง

ตามปรกติแล้วขนาดอนุภาคถ่านชาร์ของตัวอย่าง ที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเบดนิ่ง ควรจะมีผลต่อการกระตุ้นเนื่องจากคาร์บอนเป็นตัวนำความร้อนที่

ไม่ดี (Hassler,1974) และปฏิกิริยาของคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของคาร์บอนลดลง โดยความร้อนที่ได้รับการชดเชยจากแหล่งความร้อนรอบเครื่องปฏิกรณ์นั้น ไม่สามารถที่จะให้กับถ่านชาร์ได้อย่างเต็มที่เนื่องจากถ่านชาร์เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี แต่การใช้พลังงานไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิของถ่านชาร์ร้อนขึ้นจากภายในอนุภาคเท่า ๆ กันทุกจุด ทำให้สามารถชดเชยความร้อนที่สูญเสียไปจากปฏิกิริยาได้ จึงทำให้ขนาดของอนุภาคไม่มีผลต่อการกระตุ้น

5.4 ผลของชนิดแก๊สกระตุ้นที่ใช้ในการทดลอง

ผลจากการใช้แก๊สกระตุ้นต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.6 ถึง 4.8 และรูปที่ 4.22 ถึง 4.29

1. การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้น (0.2 ลิตรต่อนาที ขนาดตัวอย่าง 1.18-2.36 มิลลิเมตร) พบว่าจะให้ผลดีกับการกระตุ้นที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับตัวกระตุ้นอื่น ๆ พบว่าการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการกระตุ้นเพียงอย่างเดียว จะให้ผลในสมบัติที่ดีที่สุด และจากภาพถ่ายอิเล็คตรอนไมโครสโคป ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เห็นได้ว่าบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นอย่างมากมาย อันเป็นผลมาจากการกระตุ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปของผิววัตถุดิบกะลาปาล์ม รูปที่ 4.22 และรูปผิวถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รูปที่ 4.23 เห็นได้ว่ารูปผิวกะลาปาล์มและถ่านชาร์พื้นผิวจะไม่ค่อยมีรูพรุนเลย หรือถ้ามีก็เป็นลักษณะโพรงใหญ่ ๆ และเมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วจะมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นมากมาย ทำให้สมบัติในการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย

2. การใช้แก๊สออกซิเจนในการกระตุ้นพบว่าเมื่อปริมาณของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทธิลีนบลูมีค่าลดลง ส่วนค่าพื้นที่ผิวและค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กก็มีค่าลดลงเช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากออกซิเจนทำให้เกิดการเผาไหม้ของผิวถ่านกัมมันต์ มีผลทำให้รูพรุนขนาดเล็กและกลางที่มีอยู่ขยายตัวกลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้ค่าการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวมีค่าลดลง จากรูปที่ 4.24 และ 4.29 เป็นภาพผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจน 0.4 ลิตรต่อนาที และ 0.6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยการใช้กล้องอิเล็คตรอนไมโครสโคป ใช้กำลังขยาย 2,000 เท่า เห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะเป็นรูที่มีขนาดใหญ่และบริเวณผิวจะมีลักษณะเหมือนโดนเผาทำลาย เห็นได้ชัดในรูปที่ 4.29 อันเป็นผลมาจากการถูกเผาไหม้เนื่องจากการใช้ออกซิเจนกระตุ้น

ส่วนค่าปริมาณเถ้าพบว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจน มีค่ามากกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สอื่น ๆ ที่ใช้ศึกษา ที่เป็นเช่นนี้น่าเกิดจากการสูญเสียคาร์บอนในการเผาไหม้และปฏิกิริยาระหว่างสาร

อนินทรีย์ที่มีอยู่ในเนื้อถ่านกัมมันต์กับแก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นออกไซด์ขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณเถ้าสูงขึ้นได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nestor Tancredi et al. (1996)

3. การใช้แก๊สผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับออกซิเจนกระตุ้น จุดประสงค์คือต้องการทราบผลของความสัมพันธ์ของออกซิเจนที่มีอยู่ในสารกระตุ้นโดยการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีอัตราการไหลคงที่อยู่ที่ 0.2 ลิตรต่อนาที และแปรอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน คือ 0.4 และ 0.6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนและเมทธิลีนบลู มีค่าลดลง ส่วนค่าพื้นที่ผิวและค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กก็มีค่าลดลงเช่นกัน แต่ค่าที่ได้จะมีค่าสูงกว่าการใช้ออกซิเจนกระตุ้นเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในแก๊สผสมช่วยทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กและกลางได้ อันเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอนุภาคของถ่านชาร์ เห็นได้จากรูปที่ 4.28 (อัตราการไหลแก๊สออกซิเจน 0.6 ลิตรต่อนาที) พบว่าบริเวณผิวถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นมากมายและมีรูพรุนเล็ก ๆ กระจายอยู่ด้วย ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากผลของแก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดการเผาไหม้ มีผลทำให้รูพรุนเล็ก ๆ เกิดการเผาไหม้ไป ทำให้เกิดการรวมตัวของรูพรุนเล็ก ๆ เป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.25 (อัตราการไหลแก๊สออกซิเจน 0.4 ลิตรต่อนาที) เห็นได้ว่าบริเวณผิวจะมีรูพรุนเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วผิวถ่านกัมมันต์และจากการที่มีปริมาณออกซิเจนผสมอยู่น้อยกว่า ดังนั้นการขยายตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีน้อยกว่าในกรณีแรก ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็มีค่าลดลงเมื่อเปรียบกับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้นเพียงอย่างเดียวที่เวลาเท่ากัน อันเป็นผลมาจากการเผาไหม้ไปอันเนื่องมาจากแก๊สออกซิเจนในแก๊สผสม ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nestor Tancredi et al. (1996) ซึ่งพบว่าการมีแก๊สออกซิเจนผสมอยู่ในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ร้อยละการเผาไหม้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้นเพียงอย่างเดียวที่เวลาเท่ากันและการมีออกซิเจนผสมอยู่มีผลทำให้ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและเล็กมีค่าลดลงในขณะที่รูพรุนขนาดใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.10

4. ผลจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ จากการทดลองพบว่าการใช้ไอน้ำกระตุ้นนั้นผลที่ได้จะดีกว่าถ่านชาร์ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นเล็กน้อย คือค่าพื้นที่ผิวเพิ่มจาก 3.45 เป็น 12.86 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวขนาดเล็กเพิ่มจาก 0.3566 เป็น 4.49 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.0002 เป็น 0.002 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 130.98 เป็น 147.17 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูเพิ่มขึ้นจาก 119.01 เป็น 137.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปด้วย มีผลช่วยเพิ่มสมบัติการดูดซับขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่าน ๆ มาโดยทั่วไปการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะให้ผลในการกระตุ้นที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกันกับ

การกระตุ้นด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ออกซิเจน แต่จากการทดลองพบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้น จะทำให้ค่าพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับสูงขึ้นจากถ่านชาร์ ก่อนการกระตุ้นเล็กน้อยเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการที่ไอน้ำมีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี ดังนั้นพลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่จะถูกดูดซับด้วยไอน้ำ ทำให้ถ่านชาร์มีอุณหภูมิต่ำจนไม่สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เนื่องจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังสมการ

$$C + H_2O \rightarrow H_2O + CO, \Delta H = +130 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO \quad , \Delta H = +162 \text{ kJ mol}^{-1}$$

ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิไม่สูงพอปฏิกิริยาในการกระตุ้นก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งเหตุผลนี้สามารถพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์ค่าสารระเหยของถ่านชาร์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำและแก๊สผสมไอน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่าค่าร้อยละสารระเหยของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำเท่ากับ 24.85±0.37 ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแก๊สผสมไอน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 23.66±0.64 ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าร้อยละสารระเหยของถ่านชาร์ที่ได้ก่อนการกระตุ้น (400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) 25.22±0.12 ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิของอนุภาคถ่านชาร์ มีค่าต่ำมาก จึงแทบจะไม่เกิดการไล่สารระเหยที่เหลืออยู่ในเนื้อถ่านชาร์ และการกระตุ้นเกิดขึ้นเลย จึงทำให้ค่าการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลการทดลองพบว่าสมบัติการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการกระตุ้นโดยการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นั้นให้ผลดีที่สุดและภาวะที่สามารถเตรียมถ่านให้มีสมบัติการดูดซับและพื้นที่ผิวสูงสุดคือ การใช้ขนาดอนุภาคถ่าน 0.6 ถึง 1.18 มิลลิเมตร โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.2 ลิตรต่อนาที และเวลาในการกระตุ้น 90 นาที โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติดังนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 455.17±4.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 228.45±0.77 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.545±0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) 487.28±11.80 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิว ($S_{Langmuir}$) 644.56±1.69 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก ($S_{Micropore}$) 374.71 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ($V_{Micropore}$) 0.1741 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แต่จากการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิว ค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู เมื่อทำการแปรขนาดอนุภาคถ่านชาร์ที่ใช้แล้ว พบว่าการที่อนุภาคถ่านชาร์มีขนาดเล็กลง มีผลช่วยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่การเตรียมถ่านให้มีขนาดเล็กนั้นจะมีการสูญเสียเนื้อถ่านไปในขั้นตอนการบดค่อนข้างมาก ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการ

กระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ การใช้ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 1.18-2.36 มิลลิเมตร ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้นในอัตรา 0.2 ลิตรต่อนาที โดยใช้เวลากระตุ้น 90 นาที

จากค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สูงสุดคือเท่ากับ 455.17±4.04 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนที่ได้ยังค่อนข้างต่ำ เนื่องจากค่าตามมาตรฐาน American Water Works Association (AWWA) กำหนดไว้ว่าถ่านกัมมันต์ควรจะมีค่าการดูดซับไอโอดีนอย่างน้อย 500 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่มาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (มอก. 900-2523) กำหนดค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ไว้อย่างต่ำที่ 600 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวของถ่านที่เตรียมได้มีค่าค่อนข้างสูงคือ S_{BET} เท่ากับ 487.28±11.80 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นทำให้สามารถที่จะนำถ่านที่เตรียมได้นี้ ไปประยุกต์ใช้ในงานเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่นใช้เป็นตัวรองรับสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้ นอกจากการใช้งานเป็นตัวดูดซับโดยทั่วไป

และจากการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิว (S_{BET}) ที่ได้จากงานวิจัยนี้ 476.64±11.54 ตารางเมตรต่อกรัม กับของ Loren และ Cha (1996) ผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินโดยการใช้พลังงานไมโครเวฟและใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สกระตุ้นเช่นเดียวกัน พบว่าค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากงานวิจัยของ Loren และ Cha มีค่าสูงสุด ประมาณ 400 ตารางเมตรต่อกรัม เห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการใช้กะลาปาล์มโดยการใช้ไมโครเวฟจะมีค่าพื้นที่ผิวที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วัตถุดิบต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลงานวิจัยระหว่างการกระตุ้นโดยการให้ความร้อนแบบธรรมดากับการกระตุ้นโดยการให้ความร้อนโดยพลังงานไมโครเวฟเมื่อใช้วัตถุดิบชนิดเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าการกระตุ้นโดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจะดีกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา คือการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟไม่ต้องเสียพลังงานไฟฟ้าไปในขั้นตอนการทำความร้อนให้กับเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในขั้นตอนนี้ต้องสูญเสียพลังไฟฟ้าไปค่อนข้างมากและการใช้พลังงานไมโครเวฟจะมีผลดีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เห็นได้ว่าการใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบธรรมดานั้น ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะต่ำมาก (ร้อยละ 19.13) ในขณะที่การใช้พลังงานไมโครเวฟนั้นปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะสูงมาก (ร้อยละ 81.23) เนื่องจากการกระตุ้นโดยการให้ความร้อนแบบธรรมดานั้น ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก 800-1,000 องศาเซลเซียส จึงมีการเผาไหม้ไปของอนุภาคถ่านชาร์บางส่วนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณต่ำ ในขณะที่การใช้พลังงานไมโครเวฟจะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจึงทำให้การเผาไหม้ของอนุภาคถ่านชาร์มีน้อยกว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าสูง

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยการให้ความร้อนแบบธรรมดาเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในการกระตุ้นถ่านจากกะลาปาล์มน้ำมัน

ภัทรา ปัญญาวัฒนกิจ (2540)	วราวุฒิ ประชาศิริสกุล (2541)
วัตถุดิบ : กะลาปาล์มน้ำมัน ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ : เบดนิ่ง ภาวะในการคาร์บอไนซ์ : 400 °C 1 ชั่วโมง ภาวะในการกระตุ้น : ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 900 °C เวลากระตุ้น 60 นาที เวลา Heat up เครื่องปฏิกรณ์ 4 ชั่วโมง เวลากระตุ้น 1 ชั่วโมง ใช้ Heater ขนาด 1000 W. ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นทั้งหมด 5 ยูนิต ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ต่อกรัมถ่านที่กระตุ้นได้เท่ากับ 0.1 ยูนิตต่อกรัม ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ 19.13 ค่าพื้นที่ผิวถ่าน 670 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 779 มิลลิกรัมต่อกรัม	วัตถุดิบ : กะลาปาล์มน้ำมัน ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ : เบดนิ่ง ภาวะในการคาร์บอไนซ์ : 400 °C 1 ชั่วโมง ภาวะในการกระตุ้น : อัตราการไหล CO_2 0.2 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที กระตุ้นด้วยไมโครเวฟขนาด 750 W. ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น 1.125 ยูนิต ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ต่อกรัมถ่านที่กระตุ้นได้เท่ากับ 0.03 ยูนิตต่อกรัม ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ 81.23 ค่าพื้นที่ผิวถ่าน 476 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 411 มิลลิกรัมต่อกรัม

และการใช้พลังงานไมโครเวฟกระตุ้นนั้นจะใช้เวลาน้อยกว่าการใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบธรรมดา เนื่องจากการให้ความร้อนแบบธรรมดานั้นต้องเสียเวลาในขั้นตอนการให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการกระตุ้นนานมาก (4 ชั่วโมง) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานไมโครเวฟ เพราะการใช้พลังงานไมโครเวฟไม่ต้องเสียเวลาในขั้นตอนนี้