

การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยรีดักชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกต้องชั้นบนถ่านชาร์
จากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยพลังงานไมโครเวฟ



นายรังสรรค์ ละวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-519-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON BY REDUCTION OF SO₂
ADSORBED ON PALM-OIL CHAR WITH MICROWAVE ENERGY



Mr. Rungsan Lawanna

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-519-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีตกชั้นของซิลเฟอไรไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ
บนถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยพลังงานไมโครเวฟ

โดย

นายรังสรรค์ ละวรรณ

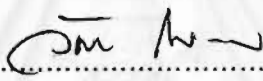
ภาควิชา

เคมีเทคนิค


อาจารย์ที่ปรึกษา

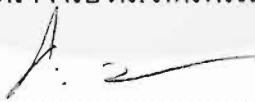
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตตานต์

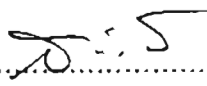
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

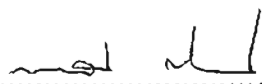

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ไพธิพิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตตานต์)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

รังสรรค์ ละวรรณ : การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยรีดักชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับบนถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยพลังงานไมโครเวฟ (PREPARATION OF ACTIVATED CARBON BY REDUCTION OF SO₂ ADSORBED ON CHAR WITH MICROWAVE ENERGY) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ; 97 หน้า. ISBN 974-333-519-6

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ มีวิธีการเตรียมแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนซ์ การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้อิ่มตัวบนถ่านชาร์ และการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ขั้นตอนแรกทำการคาร์บอนไนซ์ใช้อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ร้อยละ 31.72 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 18.87±0.14 ปริมาณแถรร้อยละ 9.89±0.06 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 69.41±0.09 ค่าพื้นที่ผิว BET 152±4 ตารางเมตรต่อกรัม

การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม ให้อิ่มตัวบนถ่านชาร์ ทำได้โดยการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร เป็นเวลานาน 420 นาที

การกระตุ้นในหลอดแก้วทนไฟรูปถ้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร กว้าง 100 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่ในเตาไมโครเวฟ ตัวแปรที่ศึกษาคือ เวลาในการกระตุ้นช่วง 30 ถึง 180 นาที พลังงานการกระตุ้นช่วง 225 ถึง 500 วัตต์ และจำนวนรอบของการทำการดูดซับแล้วนำมากระตุ้นโดยทำซ้ำกันให้ขนาดอนุภาคถ่านที่ใช้ช่วง 1.18 ถึง 2.36 มิลลิเมตร ได้ภาวะที่เหมาะสมคือ เวลาในการกระตุ้น 90 นาที พลังงานในการกระตุ้น 450 วัตต์ และจำนวนรอบของการทำการดูดซับแก๊สแล้วนำมากระตุ้นรอบที่ 2 ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติดังนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 1385±11 มิลลิเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 235±6 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.659 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.11 ค่าพื้นที่ผิว BET 1172±49 ตารางเมตรต่อกรัม การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีนี้มีข้อดี 2 ประการคือ ถ่านชาร์ในขั้นตอนแรกและถ่านกัมมันต์ที่ได้ในการกระตุ้นรอบแรก สามารถดูดซับแก๊สพิษได้ดีแล้วนำมากระตุ้นจะได้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นอีก

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

4072359323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ACTIVATED CARBON / SULPHUR DIOXIDE ADSORPTION / MICROWAVE ENERGY.

RUNGSAN LAWANNA: PREPARATION OF ACTIVATED CARBON BY REDUCTION OF SO₂ ADSORBED ON PALM-OIL CHAR WITH MICROWAVE ENERGY. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 97 pp. ISBN 974-333-519-6.

The preparation of activated carbon from palm-oil shell by activation with microwave energy was divided to three steps: Carbonization, Sulphur Dioxide adsorption and Microwave activation. The first step, carbonization was carried out at 400 °C for 60 minutes. The characteristics of char were % yield of 31.72, % volatile matter of 18.87±0.14, % ash of 9.89±0.06, % fixed carbon of 69.41±0.09 and BET surface area of 152±4 m²/g.

Sulphur dioxide 2000 ppm. was adsorbed for 420 min. by the prepared char until reaching the equilibrium at room temperature in reactor diameter 5 cm. and 30 cm. of height.

The activation with microwave energy was carried out in Pyrex tube (U-shape) reactor, diameter of 28 mm., length of 150 mm., and height of 100 mm. The reactor was set up in microwave oven. The studied variables were: activation time (range of 30-180 min.), activation energy (range of 225-500 watts.), and number of cycles of adsorption and activation from 1 to 4 times. The optimum condition from experimental results were: activation time of 90 min., activation energy of 450 watt., and second cycle of adsorption and activation. The characteristics of activated carbon produced at the optimum condition were: iodine adsorption number 1385±11 mg/g., methylene blue adsorption number 235±6 mg/g., bulk density 0.659 g/cm³, pH 8.11, BET surface area 1172±49 m²/g.

The advantages of this method for preparation of activated carbon were that Sulphur dioxide adsorption on char using in the process was supplied from the flue gas in electrical power plant which used coal as raw material. By microwave energy activation, the SO₂ adsorbed char or carbon turns out to have very high surface area.

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนแก้ไขข้อผิดพลาด ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการซ่อมและสร้างเครื่องมือ ขอขอบคุณบริษัท ทักษิณปาล์ม จำกัด ที่ได้มอบกะลาปาล์มมาใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ คุณวราวุฒ ประชาศิริกุล ที่ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้ อย่างดี และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากกองทุน ศ. ดร. ประสม สถาปิตานนท์ และจากกองทุนอุดหนุนจากการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ทำนุผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และเป็นกำลังใจตลอดมาจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
2 วารสารปริทัศน์.....	8
2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์.....	8
2.2	8
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	
2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	9
2.3.1 แบ่งตามชนิดตัวกระตุ้น.....	9
2.3.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	9
2.3.3 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง.....	9
2.3.4 แบ่งตามความหนาแน่น.....	10
2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	10
2.4.1 การคาร์บอนไนซ์.....	10
2.4.2 การกระตุ้น.....	13

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6.1 ทฤษฎีของแลงเมียร์.....	23
2.6.2 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	23
2.7 สมบัติของไมโครเวฟ.....	25
2.8 แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	28
2.8.1 สมบัติทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	28
2.8.2 ผลกระทบของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์.....	29
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ.....	32
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างประเทศ.....	34
3 การดำเนินการทดลอง.....	43
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	46
4 ผลการวิจัย.....	48
4.1 สมบัติของวัตถุดิบ.....	48
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์.....	49
4.3 ภาวะที่สมดุลในการแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านชาร์.....	50
4.4 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจากการเปลี่ยนเวลา และพลังงานในการกระตุ้น.....	50
4.5 ภาวะรอบของการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ.....	56
4.5 ผลจากการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบดถ่านชาร์ในเวลา เดียวกัน.....	59
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับค่าพื้นที่ผิว BET ณ ภาวะ ต่างๆ.....	61
4.7 ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ภาวะ ต่างๆโดยกลังอิเลคตรอนไมโครสโคปกำลังขยาย 2000 เท่า.....	62

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5	อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 66
5.1	ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไซท์..... 66
5.1.1	ผลของอุณหภูมิในการคาร์บอนไซท์..... 66
5.1.2	ผลของเวลาในการคาร์บอนไซท์..... 66
5.2	การเตรียมถ่านซาร์ที่อัดตัวด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ความเข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม..... 67
5.3	ผลการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจากการเปลี่ยนเวลาและพลังงานใน การกระตุ้น..... 68
5.3.1	ผลของระดับพลังงานในการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ..... 68
5.3.2	ผลของเวลาต่อการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ..... 70
5.4	ผลของจำนวนรอบของการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ..... 70
5.5	ผลของการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบดถ่านซาร์ ในเวลาเดียวกัน..... 73
5.6	ผลของการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีน กับค่าพื้นที่ผิวBET..... 74
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 75
6.1	สรุปผลการวิจัย..... 75
6.2	ข้อเสนอแนะ..... 76
6.3	ปัญหาที่พบในงานวิจัย..... 77
	รายการอ้างอิง..... 78
	ภาคผนวก..... 81
	ประวัติผู้เขียน..... 97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย.....	2
1.2 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย.....	3
2.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ต่อสมบัติถ่าน.....	12
2.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อสมบัติของเม็ดถ่าน	13
2.3 ส่วนประกอบหมู่ฟังก์ชันนัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่หลีกเลี่ยงการเกษตรต่างชนิดกัน	21
2.4 ค่าคงที่ทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	29
2.5 ระดับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สิ่งมีชีวิตยอมรับได้.....	30
2.6 ค่าไดอิเล็กตริกของถ่านชาร์ ชนิดต่าง ๆ	39
4.1 แสดงค่าการวิเคราะห์โดยประมาณของกะลาปาล์มน้ำมันและถ่านกะลา ปาล์มที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ณ. ภาวะต่าง ๆ	49
4.2 ผลการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันที่ได้จากการดูดซับแก๊สซัล เฟอร์ไดออกไซด์จนสมดุล ครั้งที่ 1 ที่มีต่อความเป็นกรด-ด่าง ค่าความ หนาแน่นปรากฏค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู และค่า พื้นที่ผิวBET ณ เวลาการกระตุ้นต่างๆ โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้น เป็น 225 วัตต์.....	52
4.3 ผลการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันที่ได้จากการดูดซับแก๊สซัล เฟอร์ไดออกไซด์จนสมดุล ครั้งที่ 1 ที่มีต่อความเป็นกรด-ด่าง ค่าความ หนาแน่นปรากฏค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู และค่า พื้นที่ผิวBET ณ ระดับพลังงานการกระตุ้นต่างๆ โดยกำหนดเวลาการ กระตุ้นเป็น 30 นาที.....	53
4.4 ผลการดูดซับถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วกระตุ้นด้วย พลังงานไมโครเวฟที่มีต่อความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นปรากฏค่า การดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าพื้นที่ผิวBET ณ จำนวนรอบต่างๆ โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และ เวลาในการกระตุ้นเป็น 90 นาที.....	57

สารบัญญัตินี้ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 ผลจากการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบตถ่านซารีใน เวลาเดียวกัน ที่มีต่อความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นปรากฏค่าการ ดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ณ ระดับพลังงานการกระตุ้น ต่างๆ โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที.....	60
5.1 ปริมาณสารระเหย ณ จำนวนรอบของการกระตุ้นต่างๆ โดยกำหนด พลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเป็น 90 นาที.....	72
5.2 การเปรียบเทียบผลการวิจัยการใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เปรียบเทียบ กับการใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในการกระตุ้นถ่านจากกะลาปาล์มน้ำมัน.....	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะและส่วนต่าง ๆ ของผลปาล์ม.....	1
1.2 ปริมาณการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยในระหว่าง พ.ศ. 2530-2542	4
2.1 แสดงตำแหน่งของออร์บิทัลของคาร์บอนที่เกิดจาก sp^2 Hybridization	14
2.2 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์.....	19
2.3 เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ.....	22
2.4 การให้ความร้อนแบบธรรมดาเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วย ไมโครเวฟ	27
2.5 ระบบของเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่เปรียบเทียบตัวดูดซับตัวอย่างคาร์บอน ต่าง ๆ.....	40
2.6 ระบบการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ.....	41
3.1 เครื่องคาร์บอนไนซ์แบบเบดนิ่งของภาควิชาเคมีเทคนิค.....	44
3.2 ชุดเครื่องมือสำหรับดูดซับแก๊สซิลเฟอรีไดออกไซด์.....	44
3.3 หลอดแก้วด้วยสำหรับใส่ตัวอย่างถ่านในการกระตุ้นติดตั้งอยู่ในเตา ไมโครเวฟ.....	45
3.4 เครื่องวัดพื้นที่ผิว Micromeritics Flow Sorb II 2300 ของสถาบันวิจัย โลหะและวัสดุ.....	45
4.1 ตัวอย่างกะลาปาล์มน้ำมันก่อนการคาร์บอนไนซ์และหลังคาร์บอนไนซ์.....	47
4.2 ผลของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่า การดูดซับเมทิลีนบลูที่ระดับพลังงานการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นที่ใช้เป็น 30 นาที.....	53
4.3 ผลของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิว BET ที่ระดับพลังงาน การกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นที่ ใช้เป็น 30 นาที.....	53

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่เวลาการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดระดับพลังงานการกระตุ้นเป็น 225 วัตต์.....	54
4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ ที่เวลาการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 225 วัตต์.....	54
4.5 ผลของเวลาในการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ ที่เวลาการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 225 วัตต์.....	55
4.6 ผลของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ ที่ระดับพลังงานต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที.....	55
4.8 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่จำนวนรอบต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และเวลาการกระตุ้นเป็น 90 นาที.....	57
4.9 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิว BET ที่จำนวนรอบต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์และเวลาการกระตุ้นเป็น 90 นาที.....	57
4.10 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ ที่ระดับพลังงานต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และเวลาการกระตุ้นเป็น 90 นาที.....	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ผลของการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่ระดับพลังงานต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที.....	60
4.12 ผลของการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏที่ระดับพลังงานต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที.....	60
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับค่าพื้นที่ผิว BET ณ ภาวะต่างๆ.....	61
4.14 ผิวถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	62
4.15 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 225 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที.....	62
4.16 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 225 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที.....	62
4.17 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 225 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที.....	62
4.18 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 225 วัตต์ เป็นเวลา 120 นาที.....	63
4.19 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 225 วัตต์ เป็นเวลา 180 นาที.....	63
4.20 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 250 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที.....	63
4.21 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที.....	63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 475 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที.....	64
4.23 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 500 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที.....	64
4.24 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที รอบที่ 1	64
4.25 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที รอบที่ 2	64
4.26 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที รอบที่ 3	65
4.27 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที รอบที่ 4	65
4.28 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่พลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที.....	65

หน้านี้หายไป ไม่มีในต้นฉบับที่นำมาสแกน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และคำย่อ

M = ค่าร้อยละความชื้น

A = ค่าร้อยละเถ้า

VM = ค่าร้อยละสารระเหย

FC = ค่าร้อยละคาร์บอนคงตัว

YC = ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์

pH = ค่าความเป็นกรด-ด่าง

BD = ค่าความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

IA = ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)

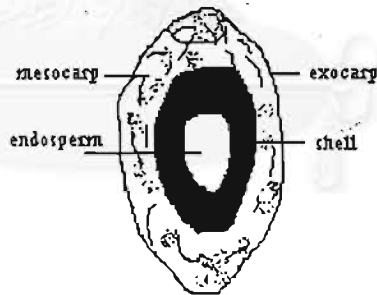
MB = ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)

S_{bet} = ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุน (ตารางเมตรต่อกรัม)





กะลาปาล์มน้ำมันเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ในวงศ์ปาล์ม เช่นเดียวกับ มะพร้าว ตาล กระจ่าง ปาล์ม น้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญมากชนิดหนึ่ง แหล่งปลูกที่สำคัญอยู่ในทวีปแอฟริกา อเมริกาใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับประเทศไทยได้เริ่มเพาะปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อเศรษฐกิจครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดกระบี่ และจากนั้นก็มีการปลูกมากขึ้นในจังหวัดทางภาคใต้ของประเทศที่จังหวัด สตูล ตรัง ภูเก็ต สุราษฎร์ธานี ชุมพร สงขลา และประจวบคีรีขันธ์ ปาล์มน้ำมันที่เพาะปลูกกันในเชิงเศรษฐกิจในปัจจุบันนั้น มีชื่อสามัญว่า African oil palm ซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Lacq. มีลักษณะแตกต่างจากปาล์มน้ำมันอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีชื่อสามัญว่า South American oil palm และพวกนี้มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Corozo oleifera* หรือ *Elaeis melanocca* (HBK) มีกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในแถบอเมริกาใต้ ผลผลิตของปาล์มน้ำมันจะมีลักษณะเป็นทะลาย ประกอบด้วยผลเกาะกันโดยรอบเป็นกระจุกใหญ่ มีสีม่วงดำ เมื่อผลปาล์มเริ่มสุก สีจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็นเหลืองส้ม และเมื่อสุกเต็มที่ก็จะร่วงลงมาเป็นบางส่วน ปาล์มน้ำมันจะเริ่มให้ผลผลิตเมื่ออายุ ประมาณ 3 ปี และลักษณะของปาล์มน้ำมันจะมีเมล็ดในแข็งแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะและส่วนต่าง ๆ ของผลปาล์ม

ชั้นนอกสุดคือ exocarp มีลักษณะบางและมีสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละพันธุ์ ชั้นถัดไปเรียกว่าชั้น mesocarp มีลักษณะหนามากกว่าชั้น exocarp ความหนาของชั้นนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะประจำพันธุ์ ชั้น mesocarp นี้เป็นชั้นที่สำคัญมากที่สุด เพราะในชั้นนี้จะมีน้ำมันอยู่มาก เรียกน้ำมันที่สกัดได้ว่า น้ำมันปาล์ม (Palm oil) และถัดจากชั้นนี้เรียกว่า กะลา (Endocarp หรือ shell) ซึ่งมี

ลักษณะแข็ง และในงานวิจัยนี้ได้นำเอาส่วนของกะลาไปใช้ในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และยังพบอีกว่าภายในกะลานั้นจะมีเนื้อในเรียกว่า endosperm หรือ kernel ในชั้นนี้มีน้ำมันอยู่ด้วยเช่นกันแต่เรียกน้ำมันที่สกัดได้ว่า น้ำมันเมล็ดปาล์ม (Palm kernel oil) ซึ่งสมบัติและส่วนประกอบของน้ำมันของ 2 ประเภทนี้ไม่เหมือนกันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

จากแนวโน้มปริมาณการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ดังตารางที่ 1.1 และ 1.2 และรูปที่ 1.2

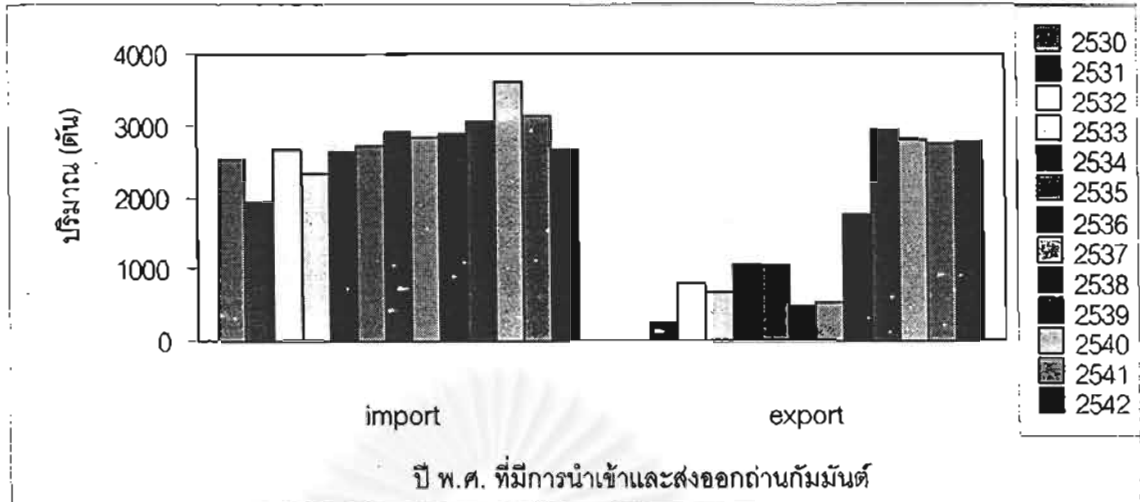
ตารางที่ 1.1 สถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

ปี (พศ.)	ปริมาณการนำเข้า (ตัน)	มูลค่าการนำเข้า (ล้านบาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท/ตัน)
2530	2,092	51.48	24,608.03
2531	1,932	52.31	27,075.57
2532	2,650	72.24	27,260.38
2533	2,322	75.31	32,433.25
2534	2,642	75.95	28,7474.16
2535	2,707	101.42	37,465.83
2536	2,908	96.31	33,118.98
2537	2,816	103.19	36,644.18
2538	2,883	124.61	43,222.34
2539	3,047	100.84	33,094.85
2540	3,598	127.14	35,336.30
2541	3,141	114.68	36,511.09
2542	2,646	90.26	34,111.48

ตารางที่ 1.2 สถิติการส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย

ปี (พศ.)	ปริมาณการส่งออก (ตัน)	มูลค่าการส่งออก (ล้านบาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท/ตัน)
2530	358	10.13	28,269.09
2531	261	8.12	31,111.11
2532	775	27.66	35,690.32
2533	664	25.00	37,650.60
2534	1,056	36.45	34,517.05
2535	1,027	34.01	33,115.87
2536	479	15.89	33,173.28
2537	522	18.25	34,961.69
2538	1,765	48.26	27,342.78
2539	2,937	75.68	25,767.79
2540	2,807	99.37	35,400.78
2541	2,737	120.32	43,958.72
2542	2,777	98.66	35,527.98

ที่มา : รายงานประจำปีกรมศุลกากร (2530-2542)



รูปที่ 1.2 ปริมาณการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทยในระหว่าง พ.ศ. 2530-2542

จากข้อมูลในตารางที่ 1.1 และ 1.2 นำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ดังรูปที่ 1.2 พบว่าปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่การส่งออกยังมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการนำเข้า ในขณะที่ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้ถ่านกัมมันต์ ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางขึ้น และส่วนใหญ่จะสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เพราะว่าการผลิตถ่านกัมมันต์ไม่เพียงพอกับความต้องการภายในประเทศ เนื่องจากปัญหาทางมลพิษเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้เกิดการสูญเสียเงินเป็นปริมาณมากสำหรับการซื้อถ่านกัมมันต์มาใช้ และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และมีอุตสาหกรรมทางการเกษตรที่พัฒนามากขึ้นเพราะนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาใช้มากมาย ซึ่งพบว่า มีวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตซึ่งสามารถนำกลับไปใช้โดยเพิ่มมูลค่าได้เช่น กะลาปาล์ม น้ำมันที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งสามารถที่จะเพิ่มมูลค่าได้ โดยใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ดีเพราะจากการวิจัยที่ผ่านมาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ดูดซับสูง ซึ่งสามารถนำไปช่วยให้มีอุตสาหกรรมต่อเนื่องเกิดขึ้นส่งผลดีต่อเศรษฐกิจโดยรวมของชาติได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่น่าจะใช้ประโยชน์จากเศษกะลาปาล์มน้ำมัน โดยนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมต่างๆ เพราะถ่านกัมมันต์เป็นถ่านชนิดหนึ่งที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง ใช้สำหรับดูดกลิ่น ดูดสี หรือ ดูดสารปนเปื้อน อื่น ๆ อินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับมีความแตกต่างกันออกไปในวัสดุแต่ละ

ชนิดดั่งนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์โดยวิธีใหม่ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสูง
ขึ้นจากเดิมอย่างมากมาย



1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยรีดักชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับบนถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นตัวให้ความร้อน
2. ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟรวมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

ขอบเขตการวิจัย

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ.
2. ศึกษาสมบัติของถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมัน ณ.ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสและเวลา 60 นาทีโดยนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ
3. นำถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ณ.ภาวะที่เหมาะสมมาทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในความเข้มข้นระดับพีพีเอ็มแล้วกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ตัวแปรที่ใช้ศึกษาได้แก่ เวลา ระดับพลังงานที่ใช้กระตุ้น และศึกษาจำนวนรอบของการดูดซับ-การกระตุ้นที่เหมาะสม จากนั้นนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยต่าง ๆ จากหน่วยราชการหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมกะลาปาล์มน้ำมันและเตรียมเครื่องมือในงานวิจัย
3. วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของกะลาปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เถ้า(A) ความชื้น(M) สารระเหย (VM) และคาร์บอนคงตัว (FC)
4. ศึกษาสมบัติของถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมัน ณ.ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์กะลาปาล์มน้ำมัน (Carbonization) โดยให้อุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที
5. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับถ่านกัมมันต์ด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในความเข้มข้นเป็นพีพีเอ็ม โดยแปรค่า

- เวลา 180 นาที 300 นาที 420 นาที 600 นาที และ 1260 นาที
 - อัตราการไหลของอากาศ 2.50 ลิตรต่อนาที
 - กำหนดให้ขนาดของถ่านชาร์ 1.18 – 2.36 มิลลิกรัม
6. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยเตาไมโครเวฟโดยแปรค่า
- ระดับพลังงานเป็น 480 วัตต์ 560 วัตต์ 640 วัตต์ 720 วัตต์ และ 800 วัตต์
 - เวลาในการกระตุ้น 30 นาที 60 นาที 90 นาที 120 นาที และ 180 นาที
 - ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ 1.18 – 2.36 มิลลิเมตร
7. ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ ได้แก่
- การดูดซับไอโอดีน (IA, มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - การดูดซับเมทธิลีนบลู (MB, มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - คุณสมบัติความเป็นกรด-เบส (pH)
 - ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (BD, กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - ค่าสารระเหย (VM %, ร้อยละ)
 - เถ้า (A%, ร้อยละ)
 - พื้นที่ผิววรูพรุนทั้งหมด (S_{BET} , ตารางเมตรต่อกรัม)
8. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้กระบวนการและภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจากถ่านชาร์ที่ผ่านการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อเพิ่มมูลค่าและก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น
2. เป็นเทคนิคใหม่ในการกระตุ้นเพื่อประโยชน์ในการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับขยายสวนต่อไป

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

หมายถึง ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวดูดซับสูง ทำให้มีสมบัติการดูดซับสูง ถ่านกัมมันต์ผลิตจากถ่านที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักโดยนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้น(Activated)

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ควรจะมีสมบัติดังต่อไปนี้ คือเป็นของเหลือทิ้งที่ราคาถูกและสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีพื้นที่ผิวดูดซับสูง มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูง มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ วัตถุดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุ สามารถแบ่งออกได้เป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

- พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชานอ้อยหรือ ชังข้าวโพด เป็นต้น
- พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท เป็นต้น

วัตถุดิบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในรูปถ่านชาร์ มักเป็นถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ อินทรีย์วัตถุหรือถ่านสังเคราะห์ หรืออาจเป็นถ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน โดยปกติส่วนมากวัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตถ่านกัมมันต์จะมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ เช่น ไม้ ลิกนิน เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาณสารระเหยสูงเป็นต้น จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่สูงและความหนาแน่นต่ำ สามารถใช้ในการดูดซับสารละลายได้ดีแต่ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ส่วนพวกกะลามะพร้าว กะลาตาลโตนด เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณสารระเหยสูง ซึ่งมีค่าปริมาณสารระเหยร้อยละ 80.1 และ 80.8 ตามลำดับ (บุญชัย ตระกูลหัชชัย, 2537) จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volume) สูงสามารถดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊ส

2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกได้ขึ้นอยู่กับ ความสะดวกของผู้ใช้ การแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ มีได้หลายแบบได้แก่

2.3.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. กระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่โดยการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน รูพรุนที่เกิดขึ้นมักจะมีขนาดใหญ่ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ $ZnCl_2$ เป็นต้น

ข. กระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการใช้แก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อากาศ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก ใช้ดูดซับแก๊สพิษต่างๆ ได้ดี

2.3.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ก. ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือ ไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 100 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไป ยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้นมักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

2.3.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

ก. ประเภทเป็นผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีและดูดกลิ่นในของเหลว

ข. ประเภทเป็นเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำเป็นเกล็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้าที่กักป้องกันแก๊สและไอพิษต่าง ๆ

2.3.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

ข. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือ ไอระเหย

2.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้ คือ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

2.4.1 คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสโดยเผาที่ภาวะออกซิเจนต่ำที่อุณหภูมิ 200 - 500 องศาเซลเซียส เพื่อจะผลิตถ่านชาร์ (Char) ซึ่งเป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) หรือแก๊ส หรืออาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น นั่นเอง

ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่ต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ซึ่งกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่ออกซิเจนน้อยหรือในที่มีมีการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านชาร์และแก๊สเรียกได้ว่าเป็น “กระบวนการไพโรไลซิส” กระบวนการไพโรไลซิสเป็นเทคโนโลยีที่วัตถุที่ประกอบด้วยคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยมีอาณาเขตอย่างน้อยหนึ่งอาณาเขตที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนในที่ที่ไม่มีออกซิเจน

ความแตกต่างของเทอมไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ ดูได้จากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ปริมาณอากาศที่ใช้มีส่วนสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเพลิง ไพโรไลซิสเป็นบางส่วนที่มีอากาศน้อยกว่าร้อยละ 20 ของอากาศที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี แก๊สซิฟิเคชันเป็นส่วนใหญ่ที่ใช้อากาศระหว่างร้อยละ 25-50 ที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี และส่วนของการเผาไหม้ใช้อากาศมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยเกิดการสลายตัวของโครงสร้างให้ส่วนที่ระเหยง่าย เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนคาร์บอนเบา ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความสามารถในการดูดซับต่ำทั้งนี้เพราะว่าการทำถ่านชาร์ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 - 500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์นี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่ม

ความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นเพียงการพัฒนาโครงสร้างให้เป็นไปทางเดียวกับการคาร์บอนเท่านั้น

การคาร์บอนที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการปรับภาวะในการโฟโรไลซิสให้เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์บอนคือ

2.4.1.1 อุณหภูมิ กระบวนการคาร์บอนเป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน หรือมีหมู่โมเลกุลที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลที่เป็นวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ จำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรแมติกหลักที่เลือกกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องได้แก่ น้ำแอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่าง ๆ

อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหย ที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่นถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอน เป็นผลทำให้ปริมาตรของรูพรุนเล็ก ๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขั้นแรกของการคาร์บอนลดลง และเม็ดถ่านหินมีความแข็งมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง

ตารางที่ 2.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ถ่านหินต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่เตรียมขึ้นได้ (Jankowska, 1991)

Final carbonization temperature (°C)	Mechanical strength of the granules (%)	Bluk density of granules (g cm ⁻³)	Rate of oxidation with CO ₂ at 820 °C g(g min) ⁻¹	Activation energy Of the granules (kJ mol ⁻¹)
400	Unstable	0.62	-	-
500	72.7	0.60	-	-
600	93.8	0.61	0.00194	212
700	98.0	0.65	0.00156	237
800	98.4	0.69	0.00134	256

2.4.1.2 อัตราการให้ความร้อน เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส กล่าวคือ ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ถ่านชาร์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่าเพราะว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อสมบัติของเม็ดถ่านชาร์ (Jankowska, 1991)

Heating rate ($^{\circ}\text{C min.}^{-1}$)	Mechanical strength of granules (%)	Bulk density of granules (g cm^{-3})	Pore volume of granules ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)			
			Total	Micro- pores	Meso- pores	Macro- pores
1	93.0	0.71	0.24	-	-	-
5	94.0	0.70	0.22	0.12	0.01	0.09
8	94.1	0.72	0.23	-	-	-
20	91.5	0.62	0.28	-	-	-
stepwise growth	60.0	0.28	1.09	0.11	0.03	0.95

2.4.1.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction) จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) หรือแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความรวดเร็วในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า เนื่องจากการเผาไหม้มีส่วนช่วยสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำไปกระตุ้นมีผลทำให้แก๊สกระตุ้นสามารถแทรกตัวเข้าไปในอนุภาคถ่านชาร์ได้ง่าย

โดยทั่วไปการคาร์บอนไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (Softening period) และ ช่วงหลังการอ่อนตัว (After softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำเพื่อให้แก๊สหลุดออกจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอัดแน่นภายในโพรง และถ่านชาร์ที่ได้จะแน่นและแข็งด้วย (Bansel and Coworker ,1988)

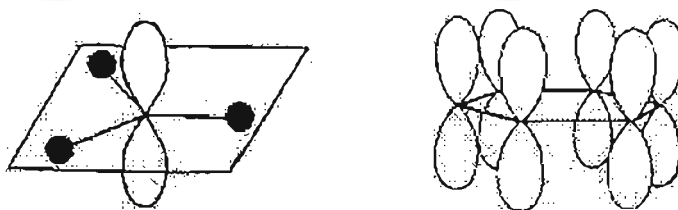
2.4.2 การกระตุ้น (Activation) การกระตุ้น หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีความสามารถในดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวถ่านชาร์มีความว่างไวมากขึ้น (นิชชรี นิลนนท์ ,2541) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่าง (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไป ทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว หมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active center)

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตร คือเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและที่เป็นวง เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น เมื่อนำมาคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสร้างวงอะโรแมติก (Aromatization) โดยอะตอมคาร์บอนซึ่งเดิมสร้างพันธะโดยใช้ออร์บิทัลจากชั้น 2s จำนวน 2 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว จะเกิดการไฮบริไดเซชัน เปลี่ยนมาใช้ออร์บิทัลจากชั้น 2s จำนวน 1 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว และมีออร์บิทัลอิสระจากชั้น 2p อีก 1 ตัว (sp^2 Hybridization) จึงเกิดพันธะแบบซิกมา (Sigma bond) กับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ข้างเคียง 3 ตัวเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมในระนาบเดียวกันและออร์บิทัลอิสระที่เหลือจะโคจรอยู่บนและล่างของระนาบ พร้อมทั้งจะเกิดพันธะแบบไพ (Pi bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในที่สุดจะเกิดเป็นวงแหวนอะโรแมติกที่มีออร์บิทัลเคลื่อนที่ (Resonance) ได้ทั่วโครงสร้างซึ่งเรียกว่าวงเบนซินหรือวงอะโรแมติก วงเบนซินแต่ละวงจะเชื่อมติดกันจนมีลักษณะเป็นแผ่นสำหรับโครงสร้างถ่านชาร์จะมีแผ่นของวงเบนซินนี้อยู่หลายแผ่นเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ อย่างไม่มีระเบียบ ซึ่งการเรียงตัวในลักษณะนี้จะเกิดแรงผลักระหว่างชั้น จากไพออร์บิทัลที่เคลื่อนที่อยู่บนและล่างของแต่ละชั้น ถ่านชาร์จะสร้างเสถียรภาพ ด้วยการใช้ออร์บิทัลสร้างพันธะเคมีโดยการดึงอะตอมแปลกปลอมอื่นเข้าสู่โครงสร้าง เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน หรือฟอสฟอรัส เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งของออร์บิทัลของคาร์บอนที่เกิดจาก sp^2 Hybridization

2.4.2.1 วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) นอกจากนี้ยังมีสารเคมีตัวอื่น ๆ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 - 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้

2.4.2.2 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่นการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะทำให้ถ่านชาร์เพิ่มความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น แก๊สที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ ได้แก่ ไอน้ำ อิมมิตวียิงวด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ คือ (Hassler, 1974)

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของแก๊สออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณของวัสดุที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน แต่มักไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะว่าถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้อำนาจการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 800 - 900 องศาเซลเซียส แต่ก็มีบ้างที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส

ข้อดีของการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง ข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี

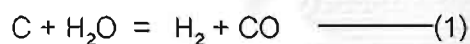
การกระตุ้น คาร์บอนอะตอมจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดซ์ เกิดเป็นแก๊สออกไซด์ของคาร์บอน แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านชาร์เป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านชาร์ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนเหล่านี้ถูกอุดตันไว้ด้วยน้ำมันหาร์ท ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขัดขวางด้วยอะมอฟัสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด และสร้างรูพรุนขึ้น

มาใหม่ด้วย การกระตุ้นตัวอย่างถ่านชาร์หลาย ๆ ตัวอย่างพบว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติในการดูดซับลดลง การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้อุณหภูมิ 800 - 900 องศาเซลเซียส ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากการที่อากาศสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ จึงไม่นิยมใช้ในการกระตุ้น เพราะทำให้ควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาได้ลำบาก

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ และอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์ต่ำ จึงเป็นผลให้ได้รูพรุนที่ต้องการช้า แต่ที่อุณหภูมิสูงเกินไปปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิววนอกของอนุภาค ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนแต่ไม่ทำให้เกิดรูพรุนขึ้น

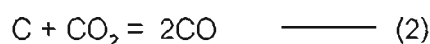
การกระตุ้นด้วยไอน้ำ การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึงการใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อน แต่โดยทั่วไปจะสมมุติเป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ของถ่านชาร์

ดังสมการ ที่ (1) และ (2) (Rodriguez - Reinoso and Lanires - Solano, 1965)

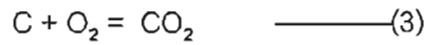


ส่วนการใช้ไอน้ำที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ด้วยในการกระตุ้น ไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาลดลง ทั้งนี้เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่จะเกิดปฏิกิริยาแข่งขันกับไอน้ำ
ที่มา : (Ergun et al., 1965)

การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์ที่ถูกใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านชาร์เสียก่อน ส่วนวิธีการผลิตนั้น คล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำและปฏิกิริยาเป็นแบบดูดความร้อน ดังสมการ

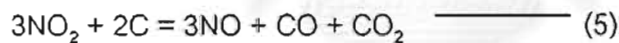


ค. การกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิเจน (หรืออากาศ) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นง่าย และเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ หรือการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาดว่าขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นดังสมการ

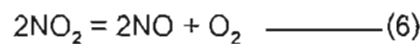


ปฏิกิริยาทั้งสองเป็นแบบคายความร้อน และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหมูฟังก์ชันนอลที่มีออกซิเจนขึ้นที่ผิวของถ่านชาร์จำนวนมาก แต่อากาศไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้น เพราะควบคุมได้ยาก และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงเกินไป

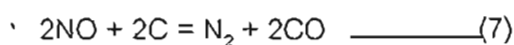
ง. การกระตุ้นด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเร็วกว่าแก๊สออกซิไดส์อื่น คาดว่าการเกิดเป็นไปตามสมการของ Suzuki



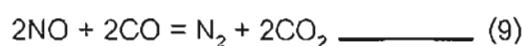
ที่บริเวณผิวของถ่านชาร์พบว่าปริมาณ NO_2 ลดลงและปรากฏเป็น NO เกิดขึ้นมาแทนแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็น



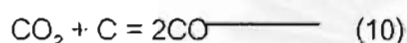
ในขณะที่ให้พลังงานไมโครเวฟเข้าไปปริมาณ NO ลดลงเร็วมากเนื่องจากเกิดการดูดซับบนผิวของถ่านชาร์



แก๊สไนโตรเจนโมโนออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่บริเวณจุดร้อนภายในอนุภาคของถ่านชาร์ และยังพบอีกว่า ที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็น

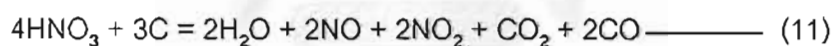


ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาปริมาณไอน้ำจะไม่เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนเมื่อกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ ในขณะที่เพิ่มให้อุณหภูมิสูงประมาณ 316 องศาเซลเซียสขึ้นปฏิกิริยาเป็นดังนี้

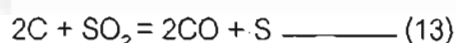
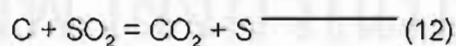


Richter

ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง HNO_3 กับอนุภาคของถ่านชาร์ พบว่ามีปริมาณไอน้ำเกิดขึ้นแต่มีปริมาณน้อยที่บริเวณผิวของหลอดทดลองซึ่งวัดยาก ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 350 - 450 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิต่ำมีแก๊ส CO เกิดขึ้นเล็กน้อย สิ่งที่น่าสนใจคือ มีจุดร้อนเกิดขึ้นซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยานั่นเองดังปฏิกิริยา



จ. การกระตุ้นด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความถี่สูงของไมโครเวฟจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นภายในอนุภาคถ่านชาร์ พบว่าคาร์บอนตอบสนองต่อพลังงานไมโครเวฟมากคือ เมื่อให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟอุณหภูมิภายในอนุภาคจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงพอที่จะทำให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สัมผัสกับถ่านชาร์ทำให้คาร์บอนจับตัวกับออกไซด์ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ส่งผลให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์แตกตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และกำมะถันดังปฏิกิริยา

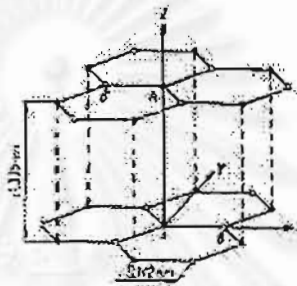


ปฏิกิริยาที่ 12 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนปฏิกิริยาที่ 13 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดที่อุณหภูมิสูง

ที่มา : (Kong Y. And Cha. C. Y., 1996)

2.5 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Structure of Activated carbon)

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือการทำให้มีความพรุนไม่ใช่เป็นการกระตุ้นให้ขนาดของรูใหญ่



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในผลึกของแกรไฟต์ (Jankowska, 1991)

โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นกับชนิด และความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ ผลึกของแกรไฟต์มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 10 นาโนเมตร พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเรียงตัวของผลึก โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และบางครั้งมีจำนวนมากถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูปร่างและขนาดของความพรุน จึงทำให้มีผลต่อกลไกการดูดซับ ดังนั้นจึงได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีรูพรุนออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีรัศมีรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 500 ไมโครเมตร มีปริมาตรของ รูพรุนขนาดใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้ว รูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิว

จำเพาะน้อยมาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) หรือที่เรียกกันว่า Transitional pores มีรัศมีรูพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 15 ถึง 500 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางประมาณ 0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับ ที่มีรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินาเจล (Alumina gel) และ อะมิโนซิลิเกต คะตะลิส (Amino silicate catalyst)

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) ปกติมีขนาดรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 15 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ยถ่านกัมมันต์มีปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 100 ตารางเมตรต่อกรัม พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมีมากกว่าในรูพรุนขนาดกลาง หรือผิวอื่น ที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้นรูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำ ๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อกันว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่าการกระจายขนาดของรูพรุน จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และวิธีการกระตุ้น

รูพรุนส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงการออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากช่องว่างของถ่านชาร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจในการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก (Redriguez-Reinoso et al, 1965) จึงไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้บ้าง รูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ

ที่มา : (วารุณี ประชาศิริกุล, 2541)

จากการศึกษาของ Gergova (1993) พบว่าถึงแม้จะทำการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการเดียวกันจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน หมู่ฟังก์ชันนัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีความแตกต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.3

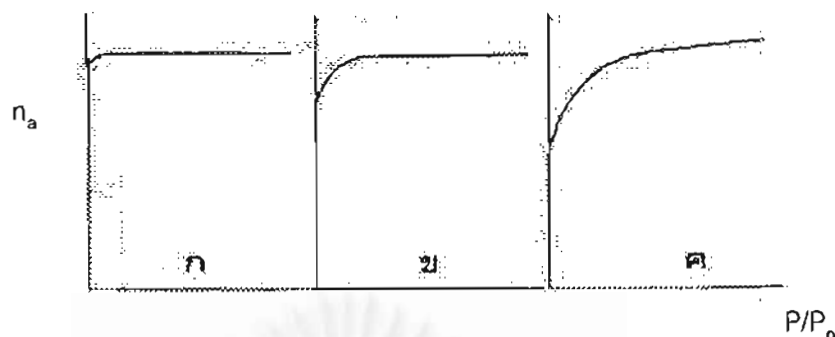
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบหมู่ฟังก์ชันนัลของออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่เหลือจากการเกษตรต่างชนิดกัน (Gergova, 1993)

วัตถุดิบ	Content of surface functional groups (mg-eq g ⁻¹)	
	C-O ± 0.03	O-H ± 0.05
Apricot stones	3.27	0.02
Grape seeds	1.32	2.05
Cherry stones	1.42	1.90

2.6 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุล ของสารที่เรียกว่าสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับ (Adsorbent)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่สารประกอบต่าง ๆ เคลื่อนย้ายจากสารละลายจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายกับปริมาณผิวของตัวดูดซับ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักคาร์บอน และความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ ซึ่งเส้นความสัมพันธ์นี้เราเรียกว่า "ไอโซเทอมของการดูดซับ" สำหรับถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะของไอโซเทอมแตกต่างกันไปตามชนิดของรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



Different types of adsorption isotherms (N_2 at 77 K) on microporous carbons

รูปที่ 2.3 เส้นไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ

ที่มา: Rodriguez-Reinoso, 1965

(ก) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ที่มีขนาดไม่แตกต่างกันมาก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ

(ข) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีขนาดแตกต่างกันมากกว่าแบบแรก เส้นความสัมพันธ์จะขนานกับแกนราบ แต่ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงแนวราบเส้นความสัมพันธ์จะมีความโค้งมนมากกว่าและความเข้มข้นที่สมดุลของสารถูกดูดซับสูงกว่า

(ค) ถ่านกัมมันต์จะประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดแตกต่างกันมาก และมีรูพรุนขนาดกลาง มักพบถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นกับขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ (Jankowska, 1991)

- การพาโมเลกุลสารถูกดูดซับผ่านชั้นฟิล์มซึ่งอยู่รอบ ๆ สารดูดซับ
- การแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุน และผ่านไปตามผนังของผิวรูพรุนของสารดูดซับ
- ยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับด้วยผิวว่องไว อีกทั้งยังเกิดพันธะระหว่างสารถูกดูดซับกับผิวถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปการดูดซับมี 2 ชนิด คือการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดขึ้นโดยพันธะที่ดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับ กับตัวดูดซับ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่อ่อน ดังนั้นสารถูก

ดูดซับอาจหลุดจากกันได้ง่าย อันเป็นกระบวนการย้อนกลับ ส่วนการดูดซับอีกชนิดหนึ่งคือการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เกิดขึ้นโดยมีพันธะที่เชื่อมระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับเป็นพันธะที่แข็งแรง และจึงไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกยึดโดยตัวดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ โดยทั่วไปการศึกษาหาปริมาณสารที่ถูกดูดซับ จะทำการวัดที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ สมการที่ใช้อธิบายข้อมูลไอโซเทอม ได้แก่ Freundlich, Langmuir และ Brunauer, Emmet & Teller หรือ ที่เรียกกันว่า BET isotherm ไอโซเทอมนี้ได้พัฒนาโดย Freundlich และ Langmuir ซึ่งเป็นสมการที่นำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดในการใช้หาพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์

2.6.1 ทฤษฎีของแลงเมียร์ (Langmuir Theory)

พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อโมเลกุลของไอเคลื่อนที่มาชนกับที่ว่างบนผิวที่เหมาะสม โมเลกุลก็จะเกาะติดอยู่ การเกาะติดนี้ขึ้นกับพลังงานความแข็งแรงของการดึงดูด ชนิดของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ในตอนแรกเมื่อพื้นที่ผิวยังไม่มีโมเลกุลเกาะอยู่ จำนวนโมเลกุลที่ถลันตัวจะมีมากกว่าที่ระเหย เมื่ออัตราการระเหยเท่ากับการถลันตัวก็จะถึงจุดสมดุลจำนวนโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับที่สมดุลเป็นฟังก์ชันของปัจจัยต่าง ๆ คือ

1. เวลาเฉลี่ยระหว่างที่โมเลกุลถลันตัวและกลับกลายเป็นไอ
2. พื้นที่รวมของพื้นผิวของแข็ง
3. สัดส่วนของพื้นผิวรวมซึ่งมีอำนาจในการดูดซับโดยเฉพาะ
4. จำนวนโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับในสถานะแก๊สหรือสารละลาย
5. จำนวนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

2.6.2 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี (Physical and Chemical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพมีแรงยึดเกาะจากการดูดซับอ่อน ต้องการพลังงานเพื่อการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าแรงยึดทางเคมี เมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และ แก๊ส โมเลกุลที่ถูกดูดซับยังมีสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม สามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารดูดซับและผิวของสารดูดซับมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกันหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน พันธะที่เกิดขึ้นเป็นพันธะทางเคมี การดูดซับโดยวิธีนี้จะแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ บางครั้งการดูดซับต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วยเรียกว่า การดูดซับแบบกระตุ้น (Activated Adsorption) ชั้นการดูดซับทางเคมีหนาเพียงโมเลกุลเดียว เพราะโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับต้องสัมผัสกันโดยตรง และเกิดการถ่ายเทหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทั้งสองแบบคือ

1. ขนาดความร้อนของการดูดซับ เมื่อแก๊สดูดซับบนผิวของสารดูดซับ จะมีความร้อนถูกปล่อยออกมา ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพจะมีขนาดพอกับความร้อนที่ปล่อยออกมาในการกลั่นตัวจากแก๊สเป็นของเหลว ประมาณกิโลแคลอรีต่อโมล ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีความร้อนของการดูดซับประมาณ 10^4 ถึง 10^5 แคลอรีต่อโมล
2. อุณหภูมิการดูดซับ การดูดซับทางกายภาพเกิดภายใต้ภาวะ อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม ขณะที่การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อสารสามารถเกิดพันธะเคมีกับผิวของตัวดูดซับ
3. โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางกายภาพ สามารถทำให้หลุดออกจากผิวของตัวดูดซับได้ด้วยวิธีลดความดันที่อุณหภูมิเดียวกับการดูดซับโดยโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลง การจัดชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดโดยวิธีเคมีทำได้ยาก
4. จำนวนชั้นที่ถูกดูดซับ การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวซ้อนกันได้หลายชั้น แต่การดูดซับทางเคมีมักเกิดโมเลกุลที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว บางกรณีการดูดซับทางกายภาพอาจเกิดบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมี
5. พลังงานกระตุ้น การดูดซับทางกายภาพเกิดได้อย่างรวดเร็วไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น การดูดซับทางเคมีอาจเกิดได้ทันทีโดยทั่วไปแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น

2.7 สมบัติของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนแสงที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และสามารถทะลุผ่านสสารที่มีความโปร่งใสได้ เป็นพลังงาน (radiant energy) แตกต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่าง ๆ คือ แตกต่างที่ความยาวของคลื่นและความถี่ ไมโครเวฟจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุกับรังสีอินฟราเรด ความยาวคลื่นของแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความถี่ ซึ่งมีความถี่ประมาณ 300 MHz ถึง 300 GHz ไมโครเวฟเดินทางเป็นเส้นตรงเหมือนกับแสง และสะท้อนหักเหกับโลหะผ่านอากาศและตัวกลางอื่น ๆ แต่ไม่ทุกชนิด เช่น แก้วบางชนิด กระดาษ และพลาสติก ไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนได้ด้วยพวกรสารไดอิเล็กตริก เช่น น้ำ หรือคาร์บอน เมื่อไมโครเวฟถูกสะท้อนกลับมันจะไม่ให้ความร้อนกับตัวสัมผัสนั้น มันจะให้ความร้อนเฉพาะกับวัตถุที่ดูดกลืนมันเท่านั้น ในการให้ความร้อนมันจะสูญเสียพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (Loss factor) วัตถุที่ดูดกลืนไมโครเวฟได้สูงสามารถถูกทำให้ร้อนได้ง่ายด้วยไมโครเวฟ

กลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

วัตถุโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยอนุภาคประจุไฟฟ้าบวก และอนุภาคประจุไฟฟ้าลบจำนวนเท่ากัน จึงทำให้วัตถุนั้นมีลักษณะเป็นกลางทางไฟฟ้าเรียกว่าสารไดอิเล็กตริก เมื่อนำไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปทิศทางต่าง ๆ และพยายามเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้โมเลกุลจะทำตัวเหมือนมี 2 ขั้ว และหมุนรอบตัวตามแกน โมเลกุลเหล่านี้จะจัดตัวตามแนวขั้วบวกและลบ กระแสไฟฟ้าทั่วไปจะเปลี่ยนทิศทางกลับไปมา 60 ครั้งใน 1 วินาที ในทำนองเดียวกันไมโครเวฟมีความถี่อยู่ในช่วง 915-2,450 MHz เมื่อผ่านไมโครเวฟลงไป โมเลกุลที่มีขั้วมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวเป็นเส้นตรงตามสนามแม่เหล็ก แต่สนามแม่เหล็กจะกลับไปกลับมา 915-2,450 ล้านครั้งต่อวินาที โมเลกุลซึ่งพยายามที่จะแกว่งที่ความถี่นั้น จะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากการที่สารไดอิเล็กตริกสามารถทำให้ร้อนขึ้นได้จากการให้พลังงานไมโครเวฟเข้าไป โดยความร้อนที่เกิดขึ้น มาจากการจัดเรียงตัวของสารไดอิเล็กตริกตามขั้วไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการสลับไปมาอย่างรวดเร็ว เรียกว่าการเกิดไดโพลโรเทชัน (Dipole Rotation) ผลจากการเกิดไดโพลโรเทชัน ทำให้สารไดอิเล็กตริก ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่นโมเลกุลของน้ำ ซึ่งปกติเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ภายใต้ภาวะปรกติ โมเลกุลของน้ำจะจัดเรียงตัวแบบอิสระ แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ มันจะพยายามจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ผลจากการสลับไปมาของขั้วไฟฟ้า ทำให้โมเลกุล

ของมันต้องปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงมีผลทำให้ความร้อนเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเสียดสีกันในระหว่างการหมุนของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้า

การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถแสดงได้เป็นค่าคงที่เชิงซ้อน (ϵ^*) ดังสมการที่ 14

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' \quad \text{————— (14)}$$

โดยที่ ϵ' คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ϵ'' คือเทอม (Loss factor) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการทำให้ สารไดอิเล็กตริก ร้อนขึ้น ส่วนค่าพลังงานที่ถูกดูดซับของสารไดอิเล็กตริก แสดงได้ดังสมการที่ 15

$$P = 0.556 \cdot 10^{-10} f \epsilon'' E^2 V \quad \text{————— (15)}$$

โดยที่ P ค่าพลังงานที่ถูกดูดซับโดยสารไดอิเล็กตริก (Watts)

f คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Hz)

E คือค่ารากที่สองของความเข้มของสนามไฟฟ้าในเนื้อวัตถุ (Voles/cm)

V คือ ปริมาตรของวัตถุ (cm^3)

ค่าความลึกในการทะลุผ่าน (D_p) คือความลึกที่ไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัตถุและความเข้มลดลงเหลือ 36.8 % ของความเข้มเริ่มต้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 16

$$D_p = \lambda_0 \cdot [(1 + (\epsilon''/\epsilon')^2)^{1/2} - 1]^{1/2} / (2\pi(2\epsilon')^{1/2}) \quad \text{————— (16)}$$

โดยที่ λ_0 คือความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศที่ 2,450 Hz เท่ากับ 12.24 cm.

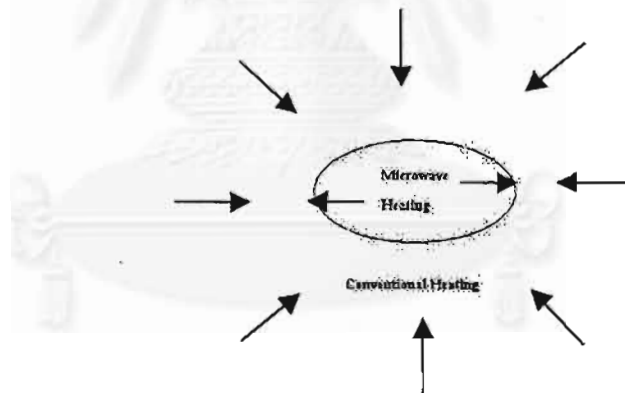
โดยปรกติถ่านหินนั้นมีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟน้อยมาก (Cha, 1994) แต่ถ่านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซ์ถ่านหิน จะมีค่าไดอิเล็กตริกค่อนข้างมาก (Bates, 1989) จากที่ได้ทราบมาแล้วว่าถ่านซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซ์ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี เมื่อถ่านซาร์อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า คุณสมบัติของถ่านซาร์จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้คุณสมบัติของแก๊สเฟสกับอนุภาคถ่านซาร์แตกต่างกันมาก ถ้าโมเลกุลของแก๊สมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเมื่อส่งผ่านไปยังถ่านซาร์ คาร์บอนจะจับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เช่นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นหรือทำปฏิกิริยาโดยตรงกับออกซิเจนที่มีในโมเลกุล

สรุป ไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาของถ่านชาร์ได้ดังนี้

1. ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับธาตุในโมเลกุล
2. สร้างอิเล็กตรอนอิสระเมื่อโมเลกุลแก๊สสัมผัสกับถ่านชาร์
3. เป็นแหล่งความร้อนให้กับอนุภาคของแข็งสำหรับปฏิกิริยา

ความแตกต่างของการให้ความร้อน

ในการให้ความร้อนโดยทั่วไป เช่นการใช้เปลวไฟโดยตรง การแผ่รังสี และการใช้อากาศร้อน แหล่งความร้อนจะทำให้โมเลกุลของวัตถุร้อนจากผิวภายนอกเข้าไปข้างใน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (temperature gradient) ซึ่งอาจจะเผาไหม้ส่วนนอก ก่อนที่อุณหภูมิข้างในจะสูงขึ้นถึงระดับที่ต้องการ ในทางตรงข้ามไมโครเวฟจะทะลุทะลวงวัตถุที่หนาหลาย ๆ เซนติเมตรพร้อมกันหมด ทำให้โมเลกุลที่มีขั้วสั่นสะเทือนในเวลาเดียวกันจะไม่มีภาคนำความร้อนจากผิวนอกเข้าไปข้างใน แต่ความร้อนจะถูกสร้างขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อม ๆ กันทั่ววัตถุดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การให้ความร้อนแบบธรรมดาเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

2.8 แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulphur dioxide)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสีแต่มีรส ที่ระดับความเข้มข้นสูงมากพอจะมีกลิ่นฉุนระคายจมูก แสงแดดและมลพิษอื่นๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยามีผลเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และกรดกำมะถันในที่สุด นอกจากนั้นหากอยู่ร่วมกับอนุภาคมลสารซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แมกนีเซียม เหล็ก และวาเนเดียม จะเกิดมีปฏิกิริยาเติมออกซิเจนเกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดกำมะถันเช่นเดียวกัน หรือไม่เช่นนั้นละอองน้ำในอากาศซึ่งมีแอมโมเนียเจือปนอยู่ด้วยก็อาจทำปฏิกิริยากับแก๊สนี้ เกิดเป็นกรดกำมะถันได้อีก

การสันดาปเชื้อเพลิงเพื่อใช้พลังงานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และการอุตสาหกรรมทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังเกิดจากการผลิตปิโตรเลียม การถลุงโลหะ การทำเยื่อกระดาษ และการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

2.8.1 สมบัติทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นแก๊สไม่ติดไฟ ไม่เกิดการระเบิดและไม่มีสี ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 0.3-1.0 ppm ในอากาศ จะรับรู้โดยประสาทสัมผัส ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 3.0 ppm จะมีกลิ่นฉุนรู้สึกระคายเคืองต่อโพรงจมูกและเยื่อตา เป็นแก๊สที่ละลายน้ำได้โดยมีค่าการละลายอยู่ที่ 11.29 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สอื่นคือ ออกซิเจน ไนตริกออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีการละลาย 0.004, 0.006, 0.003 และ 0.169 กรัม/100 มิลลิลิตร ตามลำดับที่อุณหภูมิเดียวกันแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าคงที่ทางกายภาพแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงค่าคงที่ทางกายภาพของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

Physical Content of SO₂

Molecular weight	64.06
Density (g/l) (gas)	2.927 at 0°C 1 atm
Specific gravity (liq)	1.434 at -10°C
Molecular volume (ml) (liq)	44
Melting point (°C)	-75.64
Boiling point (°C)	-10.02
Critical temperature (°C)	157.2
Critical pressure (atm)	77.7
Heat of fusion	1.769
Heat of vaporization	5.96
Dielectric constant (E)	13.8 at 14.5°C
Viscosity (dyne sec/cm ²)	0.0039 at 0°C
Molecular boiling point constant (°C/1000 g)	1.45
Dipole moment (Debye unit)	1.61

ที่มา : (พรรณทวี ธรรมธราชาร , 2539)

2.8.2 ผลกระทบของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นตัวที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ระคายเคืองต่อเยื่อตา อันตรายต่อปอดทำให้มีอาการแน่นหน้าอก หายใจถี่ ทำงานได้น้อยลง และยังมีผลต่อการเพาะปลูก เมื่อพืชได้รับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ จะมีผลให้เซลล์ตาย ในระหว่างขอบใบหรือระหว่างเส้นใบ ในขั้นต้นจะมีลักษณะบวมน้ำ ใบจะร่วงไหม้หรือหลุดร่วง เฉพาะเซลล์ตรงส่วนที่เกี่ยวพันเท่านั้น ทำให้ใบขาดกระรุ่งกระริ่ง

ในปี ค.ศ. 1967 US. Public Health Service ได้ประมาณระดับของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สิ่งมีชีวิตยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ระดับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สิ่งมีชีวิตยอมรับได้

Exposure time interval	Approximate SO ₂ Con ^c hazardous to human health(ppm)	Approximate SO ₂ Con ^c hazardous to vetable (ppm)
1 hr	0.5	0.8
1 day	0.2	0.3
4 days	0.15	0.2
1 month	0.07	0.09
1 year	0.01	0.01

การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้

เมื่อนำเอาถ่านหินมาเป็นเชื้อเพลิง จะก่อให้เกิดปัญหาด้านการกัดกร่อนและปัญหาเกี่ยวกับสภาพเป็นพิษ เนื่องจากในถ่านหินมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้แล้วจะให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ออกมา เมื่อแก๊สทั้งสองถูกปล่อยออกสู่อากาศจะกลายเป็นกรดซัลฟูริกและกรดซัลฟูริก เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาต่างๆ จึงต้องมีการกำจัดกำมะถันในถ่านหิน ซึ่งกระบวนการกำจัดกำมะถันสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ๆคือ

- ก. วิธีการทางฟิสิกส์ เช่น electropolitic separation, agetic separation
- ข. วิธีทางชีววิทยา วิธีการนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายกำมะถันให้ลดน้อยลง
- ค. วิธีทางเคมี คือใช้ปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดกำมะถันให้น้อยลง

นอกจากนี้ยังแบ่งวิธีการกำจัดกำมะถันออกได้ 3 ลักษณะ ตามช่วงเวลาการกำจัดคือ

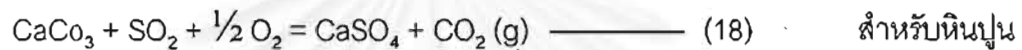
1.วิธีการกำจัดกำมะถันก่อนการเผาไหม้

- ก. วิธีทางกายภาพ เป็นวิธีที่ง่ายและไม่สลับซับซ้อน แต่กำจัดได้เฉพาะกำมะถันอนินทรีย์(inorganic sulpher)เท่านั้น โดยอาศัยหลักของความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ
- ข. วิธีทางเคมี มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น ไฮดรด์ซัลเฟอร์ไรเซชัน (hydrodesulphurization) และออกซิดีซัลเฟอร์ไรเซชัน(oxydesulphurization) โดยให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊ส

ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งกำมะถันอินทรีย์และกำมะถันไฟโรต์เท่านั้นที่เข้าทำปฏิกิริยา ส่วนกำมะถันซัลเฟตจะไม่เข้าทำปฏิกิริยาและค้างอยู่ในถ้ำนั่นเอง

2. วิธีการกำจัดกำมะถันขณะเผาไหม้

วิธีนี้ทำโดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปในช่วงที่เกิดการเผาไหม้ แล้วให้สารเคมีที่เติมลงไปรวมตัวกับกำมะถันที่สลายตัวจากการเผาไหม้ เป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่สามารถแยกออกจากการเผาไหม้ได้ ตัวอย่างเช่น การใช้ปูนขาว หินปูน ผสมลงไปในช่วงการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไชด์เบด โดยถ่านหินที่ใช้มีขนาด 1 นิ้ว เมื่อเผาไหม้ถ่านหินจะเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกกำจัดตามปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและของแข็ง ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดหรือไม่ขึ้นกับพื้นที่ผิวของการสัมผัสของสารทั้งสอง ส่วนแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดออกได้ง่ายโดยใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) หรือถุงกรอง (bag filter) เป็นต้น

3. วิธีการกำจัดกำมะถันหลังเผาไหม้

วิธีนี้เป็นการดึงเอาแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากฟลูแก๊ส (flue gas) โดยมีกระบวนการดูดซึมแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งมีได้หลายวิธีต่างกันออกไป และมีประสิทธิภาพในการจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แตกต่างกันไป

ที่มา : (พรพนทวิ ธรรมธรราร , 2539)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยในประเทศ

บุญชัย ตระกูลมหชัย (2537) ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดด้วยวิธีทางกายภาพ ภาวะที่เหมาะสมคือทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ใช้ขนาดขนาดของอนุภาค 1.19 ถึง 1.68 มิลลิเมตร จากนั้นกระตุ้นด้วยแก๊สผสมที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลกับไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด ที่มีความเร็ว 6.44 เมตรต่อวินาที ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,800 ถึง 1,900 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1,000 ถึง 1,300 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 250 ถึง 350 มิลลิกรัมต่อกรัม

พรรณทวิ ธรรมธราธาร (2539) ศึกษาการทำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยเทคนิค แก๊สลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ผสมกับปูนขาว และยิปซัมในอัตราส่วน 6:2:4 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาทำเป็นถ่านลอยอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นสารดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลอง 180-240 องศาเซลเซียส ค่า U/U_m 1.25 ปริมาณถ่านลอยอัดเม็ดที่ใช้ในการดูดซึม 700 กรัม โดยใช้แก๊สป้อนที่มีปริมาณ 2000-25000 พีพีเอ็ม สามารถกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก

นิชชรี นิลนนท์ (2541) ศึกษาถึงการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกาง ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์คือที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ขนาดอนุภาค 0.6-1.18 มิลลิเมตร โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราไหล 5 ลิตรต่อนาที พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติดังนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 675 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 254 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่น 0.323 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าพื้นที่ผิว 640 ตารางเมตรต่อกรัม

วราวุฒิ ประชาศิริกุล (2541) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่างานวิจัยของ นิชชรี นิลนนท์ (2541) เนื่องจากสภาวะเหนียวในกะลาปาล์มไล่ออกไปยากกว่าในไม้โกงกาง จึงใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์สูงกว่า และภาวะในการกระตุ้นที่ดีที่สุดใช้เวลา 90 นาที อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.2 ลิตรต่อ นาที โดยขนาดอนุภาคถ่านซาร์ที่เหมาะสมคือ 1.18-2.36 มิลลิเมตร พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติดังนี้ ค่าการดูดซับไอโอดีน 411.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 174.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.524 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าพื้นที่ผิว BET. 476 ตารางเมตรต่อกรัม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.9.2 งานวิจัยต่างประเทศ

2.9.2.1 การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Kirubakaran, C. John, Krishnaiah, K. and Seshadri S. K. (1991) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งกับฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าประสิทธิภาพในการกระตุ้นด้วยฟลูอิดไดซ์เบด ดีกว่าแบบเบดนิ่งที่ภาวะในการผลิตเดียวกัน (ขนาด เวลา อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้กระตุ้น แก๊สตัวกลาง) ดูจากค่าการดูดซับไอโอดีนและฟีนอล ที่ดีกว่า โดยใช้เวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่า เมื่อเทียบกับแบบเบดนิ่ง และพบว่าการใช้แก๊สไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สตัวกลาง จะทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศ ทั้งนี้เพราะอากาศมีส่วนทำให้เกิดการเผาไหม้ของคาร์บอน และภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาคือที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนสารเคมีในการกระตุ้นที่ ร้อยละ 25 และใช้แก๊สไนโตรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สตัวกลาง ซึ่งมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 1,100 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม

Mohd Zobir Hussein and others (1995) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชั้นของเปลือกต้นปาล์ม โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ CO_2 การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติเป็นด่าง (pH=10) ส่วนการใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวร่วมในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติเป็นกรด (pH ประมาณ 6.6) จากการศึกษาพบว่าการใช้ความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ในช่วงร้อยละ 0-10 จะทำให้ได้รูพรุนขนาดเล็กและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ $ZnCl_2$ ขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนขนาดเล็กไปเป็นรูพรุนขนาดกลาง และจากการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชั้นของต้นปาล์ม เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวที่เตรียมได้มีค่ามาก (มากกว่า 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม)

Anthony A. Lizzio and Joseph A. DeBarr (1996) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินอินลินอยล์ โดยมีการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยถ่านชาร์ที่เตรียม

ได้นี้มาจากถ่านหินประเภท บิทูมินัส ซึ่งเป็นถ่านหินที่มีปริมาณสารระเหยสูง ภายใต้ไพโรไลซิสและการกระตุ้นที่เหมาะสม เทคนิคการเตรียมที่สำคัญคือการที่ถ่านชาร์ต้องอิมตัวด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และจากการศึกษาพบว่าปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะไม่ขึ้นกับการเพิ่มพื้นที่ผิว สิ่งสำคัญคือการหาปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนของคาร์บอนกับออกซิเจน บนพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาณพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่เตรียม

Hsishen Teng and others (1996) ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่าง C/O ในถ่านหินบิทูมินัส เมื่อใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ พบว่าค่าพื้นที่ผิว (BET surface area) ของถ่านชาร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ C/O เนื่องจากออกซิเจนจะก่อตัวเป็นหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านชาร์เกิดโครงสร้างแบบโครงตาข่าย ช่วยลดสมบัติเทอร์โมพลาสติกของถ่านหินในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ทำให้ลดการเกิดเค้กบนผิวถ่านชาร์ได้ (ซึ่งจะป้องกันการเกิดรูพรุนขึ้น) ในการกระตุ้นถ่านชาร์จากถ่านหินที่มีอัตราส่วน C/O สูงพบว่าเส้นไอโซเทอมมีลักษณะแบนราบ แสดงว่าลักษณะรูพรุนที่ได้เป็นแบบขนาดเล็ก โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะมีค่ามากที่สุด เมื่อค่าการเผาไหม้เท่ากับร้อยละ 55 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการกระตุ้นต่อไป เนื่องจากเกิดการรวมตัวของรูพรุนเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นและการมีเต้าตกค้างอยู่ในรูพรุน

Serrano-Talavera B. And Munoz-Guillena (1996) ศึกษาถ่านหินแอนทราไซท์จากประเทศสเปนที่มีปริมาณแถร์ร้อยละ 5.6 โดยน้ำหนัก ในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยผ่านการกระตุ้นแล้ว พบว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากสารออกซิไดซ์พวก อากาศและกรดไนตริกกับคาร์บอนในถ่านชาร์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันมีผลต่อปริมาณรูพรุนของถ่านชาร์และมีผลต่อการกระตุ้นถ่านชาร์คือ สารออกซิไดซ์เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ใช้เพื่อขั้นตอนก่อนการเกิดออกซิเดชัน ทำการเปรียบเทียบว่ามีผลต่อปริมาณรูพรุนและมีผลต่อการกระตุ้นอย่างไร ในงานวิจัยยังพบอีกว่าการเกิดออกซิเดชันเพิ่มจาก อากาศ 4 ชั่วโมง อากาศ 8 ชั่วโมง กรดไนตริก 4 ไมลาร์ กรดไนตริก 15 ไมลาร์ การวัดออกซิเดชันทั้งหมดนี้เป็นสิ่งสำคัญมากที่จะเปลี่ยนผลของการพัฒนารูพรุนของถ่านกัมมันต์ให้สูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นในถ่านจะทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณรูพรุนสูงขึ้น นั่นคือขั้นตอนไพโรไลซิส และขั้นตอนออกซิเดชัน มีความสำคัญต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์ และยังพบอีกว่าถ้ามีกรดไนตริกทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 1300 ตารางเมตรต่อกรัม

Anthony A. Lizzio, Joseph A. DeBarr, and Carl W. Kruse (1997) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินอินลินอยล์ เพื่อลดมลพิษของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ดี จากการทดลองถ่าน Illinois No.2 bituminous ให้ผลดีที่สุดที่จะกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ 120 องศาเซลเซียส และที่ 25 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ดี โดยศึกษาเปรียบเทียบกับถ่านชาร์ธรรมดา การพัฒนาการเตรียมถ่านชาร์ทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันและการบำบัดด้วยแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งสามารถเพิ่มการดูดซับของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ดีขึ้นบนถ่านชาร์ผลคือแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ จะถูกกำจัดสูงขึ้นนั่นหมายถึงพื้นที่ผิวของถ่านชาร์จะเพิ่มขึ้น ขั้นตอนที่สำคัญมี 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนก่อนออกซิเดชัน ขั้นตอนไพโรไลซิส และขั้นตอนการกระตุ้น เพื่อเตรียมถ่านชาร์ให้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ในการศึกษาสามารถกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 97 โดยน้ำหนัก

Gonzalez-Serrano E. and others (1997) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จาก คราฟลินิน (Kraft Lignin) โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบว่าที่อุณหภูมิกระตุ้นต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส การพัฒนาคุณภาพเกิดจากการไล่สารระเหยเห็นได้ชัดเจนจากการสูญเสียมวลที่สูง หลังจากนั้นที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียมวลค่อนข้างน้อย ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพจะเกิดมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของคาร์บอนอะตอมทำให้มีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียส ปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์จะลดลงอันเนื่องมาจากการหดตัวของรูพรุนเป็นผลมาจากความร้อนที่สูงขึ้น โดยผลการทดลองที่ได้จะสอดคล้องกับงานของ Caturla et. al. (1991) เป็นการทดลองกระตุ้นเมล็ดลูกพีชด้วย $ZnCl_2$ และจากการศึกษาด้วยเส้นไอโซเทอม พบว่าการกระตุ้นที่ 350 องศาเซลเซียส เส้นไอโซเทอมมีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวราบที่ความดันต่ำ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างรูพรุนมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก กล่าวคือมีความกว้างประมาณ 1-2 เท่าของอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สามารถดูดซับได้ (0.3 นาโนเมตร) และเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นสูงขึ้นเส้นไอโซเทอมจะมีความชันเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ และจากการศึกษาพบว่าสามารถเลือกเตรียมถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ เช่นถ้าต้องการนำไปใช้ในการดูดซับแก๊ส ซึ่งต้องการรูพรุนขนาดเล็กก็ควรเลือกภาวะในการผลิตคือใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อน้ำหนักถ่านชาร์น้อยกว่า 1 สำหรับการใช้งานในของเหลว ซึ่งต้องการรูพรุนขนาดใหญ่ก็เลือกใช้ภาวะที่ อุณหภูมิ 450 - 500 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อน้ำหนัก

ถ่านชาร์มากกว่า 1.5 และในการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากคราฟลินินโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 1,800 ตารางเมตรต่อกรัม ที่ภาวะ 500 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อน้ำหนักถ่านชาร์เท่ากับ 2.3 โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก

Satya Sai, P. M. and Jaleel Ahmed (1997) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดเซชัน พบว่ามีประสิทธิภาพดีในการใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ จากการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของ เวลาในการทำปฏิกิริยา ความเร็วของแก๊สดวกลาง ขนาดของอนุภาค และอุณหภูมิ ช่วยให้มีผลดีต่อการกระตุ้น แต่การเพิ่มขึ้นของเวลามาก ๆ ก็มีสาเหตุทำให้เกิดการขยายตัวของรูพรุน และการรวมตัวของรูพรุนเป็นผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง ผลของความสูงของเบด พบว่าเมื่อเบดมีความสูงมากกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางมาก ๆ ทำให้ค่าไอโอดีนลดต่ำลง เนื่องมาจากการเกิด สลักกิ้ง (Slugging) มีผลทำให้การสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับของแข็งเป็นไปได้ไม่ดี และผลของแก๊สดวกลางที่ใช้ พบว่าการใช้ไอน้ำจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ และผลจากการกระตุ้นพบว่ามีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 1,328 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวสูงสุดเท่ากับ 4,300 ตารางเมตรต่อกรัม

2.9.2.2 การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยา

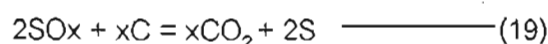
Cha, C. Y. and Kim, B. K. (1993) พบว่าถ่านหินจะไม่เกิดการไพโรไลซิส (Pyrolyst) เลยภายใต้ภาวะที่ทำการทดลอง (500 W. 60 นาที) แต่เมื่อมีการผสมถ่านชาร์เข้าไปด้วย จะช่วยทำให้เกิดการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วเนื่องจากถ่านชาร์มีสมบัติในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี นอกจากนั้นพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยังมีสมบัติในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีด้วย และได้อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาเคมีของถ่านชาร์ ด้วยคลื่นไมโครเวฟดังนี้

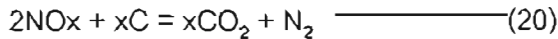
1. พลังงานไมโครเวฟจะช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับธาตุในโมเลกุลที่ถูกสัมผัส
2. สร้างอิเล็กตรอนอิสระเมื่อโมเลกุลของแก๊สสัมผัสกับถ่านชาร์
3. เป็นตัวที่ทำให้อุณหภูมิของของแข็งร้อนขึ้น

Cha, C. Y. (1993) ศึกษาการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำปฏิกิริยากำจัด SO₂ กับ NO_x ภายในเบดที่บรรจุไว้ด้วยถ่านชาร์ แก๊สที่ใช้ศึกษาได้มาจากการเผาไหม้จากโรงงานไฟฟ้า ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปดูดซับด้วยถ่านชาร์ จากนั้นจะใช้พลังงานไมโครเวฟในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนในเบดกับ SO₂ กับ NO_x ทำให้เกิดเป็น กำมะถันและแก๊สไนโตรเจน นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับถ่านชาร์จาก 7 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 700 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์เป็นผลผลิตร่วมจากปฏิกิริยา จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด SO₂ กับ NO_x ได้ถึงร้อยละ 98 จากข้อมูลที่ได้ในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยได้นำไปสร้างเป็นโรงงานต้นแบบเพื่อใช้ศึกษาการกำจัด SO₂ กับ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้จริงต่อไป

Challa, S. Little, W.E. and Cha, C. Y. (1994) ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของถ่านชาร์ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ไมโครเวฟในการประยุกต์ใช้กำจัดแก๊ส NO_x และ SO₂ ที่ได้จากการเผาไหม้ จากการศึกษาพบว่ากระบวนการฟื้นฟูประสิทธิภาพช่วยเพิ่มค่าแฟคเตอร์สูญเสีย (Loss factor) ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงขึ้นและค่าแฟคเตอร์สูญเสียของวัสดุจะมีค่าสูงขึ้นกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ปฏิกิริยาที่เกิด





จากการศึกษาตัวอย่างถ่านหินที่ใช้สามารถสรุปค่าไดอิเล็กตริกได้ดังตารางที่ 2.8

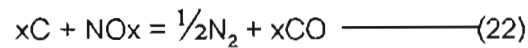
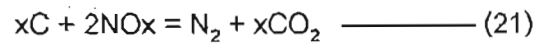
ตารางที่ 2.6 ค่าไดอิเล็กตริกของถ่านชาร์ชนิดต่าง ๆ (Challa, S. Little, W.E. and Cha, C. Y., 1994)

Dielectric Properties of Various Types of Char		
Char Type	Dielectric Constant	Skin Depth, (cm.)
Fresh calcined char	10.10-2.45j	1.641
NO _x saturated char	10.17-2.13j	1.782
Regenerated Char (4 th cycle NO _x)	10.64-2.43j	1.668
Regenerated Char (15 cycle NO)	9.23-2.59j	1.617
Sulfur saturated char	9.53-2.60j	1.613
Regenerated Char (2 cycle SO ₂)	10.09-3.13j	1.470
Regenerated Char (21 cycle SO ₂)	9.49-4.55j	1.220

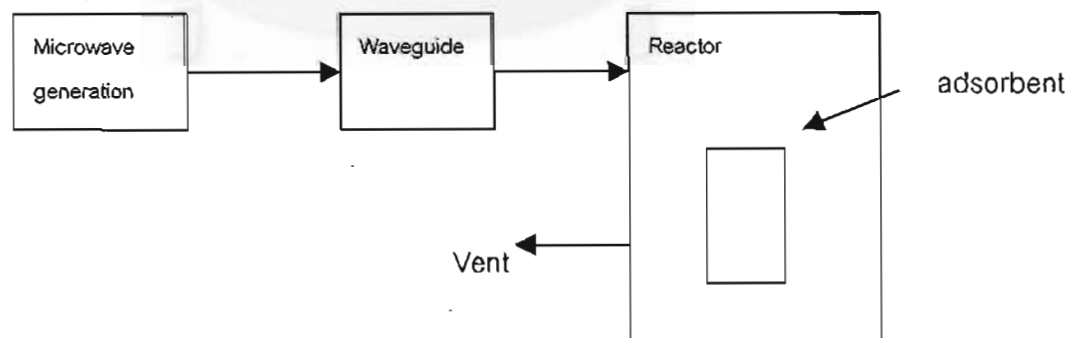
Parisa Monsef-Mirzai, Mythili Ravindran, William R. McWhinnie and Paul Burchill (1994) ศึกษาสารจำพวก CuO และ Fe₂O₃ และถ่านโคกโดยให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 2.45 GHz จะเกิดไพโรไลซิสในถ่านหิน ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารระเหยและน้ำมันชาร์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมี Fe₂O₃ ร้อยละ 27 โดยน้ำหนักและมี CuO ร้อยละ 49 โดยน้ำหนัก เมื่อมีออกไซด์ปรากฏจะเกิดจับกับออกไซด์ในถ่านชาร์จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ผลิตภัณฑ์เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

Cha, C. Y. and Kong, Y. (1995) ศึกษาถึงการใช้ถ่านชาร์นำมาดูดซับ NO_x แล้วนำไปฟื้นฟูสภาพด้วยพลังงานไมโครเวฟ พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถเหนี่ยวนำปฏิกิริยาการกำจัด NO_x ได้ โดยมีการใช้คาร์บอนไปในปฏิกิริยา ทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น โดยมีค่าสูงชันจาก 82 เป็น 800 ตารางเมตรต่อกรัม หลังจากผ่านกระบวนการดูดซับและฟื้นฟูสภาพมา 9 ครั้ง และจากการทดลองได้มีการทำชุดทดลองเปรียบเทียบโดยใช้ถ่านชาร์ให้ดูดซับอากาศแทน NO_x โดยใช้ภาชนะการทดลองเดียวกันกับการดูดซับ NO_x แล้วนำไปฟื้นฟูประสิทธิภาพ ด้วยพลังงานไมโครเวฟ พบว่า ถ่านชาร์ที่ใช้ก็มีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นจะน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้นำไปดูดซับ NO_x การที่

พื้นที่ผิวของถ่านซาร์ในชุดเปรียบเทียบเพิ่มขึ้นนำมาจาก การไล่สารระเหยออกจากถ่านซาร์และปฏิกิริยาระหว่างถ่านซาร์กับน้ำที่ดูดซับอยู่บนผิวถ่านซาร์
ปฏิกิริยาที่เกิด



Kong, Y. G. and Cha, C. Y. (1995) ได้ทำการศึกษาถึงการใชั ตัวดูดซับที่ทำจากคาร์บอน 6 ชนิดที่มาจากแหล่งต่างกัน เป็นถ่านหิน 3 ตัว ถ่านซาร์ 2 ตัว และถ่านกัมมันต์ 1 ตัว โดยศึกษาถึงผลที่ได้จากการนำตัวดูดซับไปดูดซับ NO_x ให้อิ่มตัวและทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพตัวดูดซับที่ได้จากคาร์บอนแตกต่างกันทั้ง 6 ชนิด เป็นจำนวน 9 รอบ พบว่าตัวอย่างตัวดูดซับทั้ง 6 ชนิด มีถ่านกัมมันต์เพียงชนิดเดียวที่ให้แนวโน้มในทางลบคือค่าพื้นที่ผิวมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากการเกิดรวมตัวของรูพรุนที่มีอยู่แล้วของถ่านกัมมันต์ ในขณะที่ตัวดูดซับตัวอื่นมีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในตัวอย่างมีผลต่อการดูดซับ NO_x ด้วย เพราะไนโตรเจนที่มีอยู่จะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยทำให้การดูดซับ NO_x มากขึ้น จากการศึกษากลไกการกำจัด NO_x พบว่าในบรรยากาศที่ประกอบด้วย ไอน้ำและออกซิเจน NO จะเปลี่ยนไปเป็น NO_2 และ HNO_3 บนผิวของตัวดูดซับ และการใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถกำจัด NO_x ที่ถูกดูดซับได้ถึงร้อยละ 90 โดยผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง



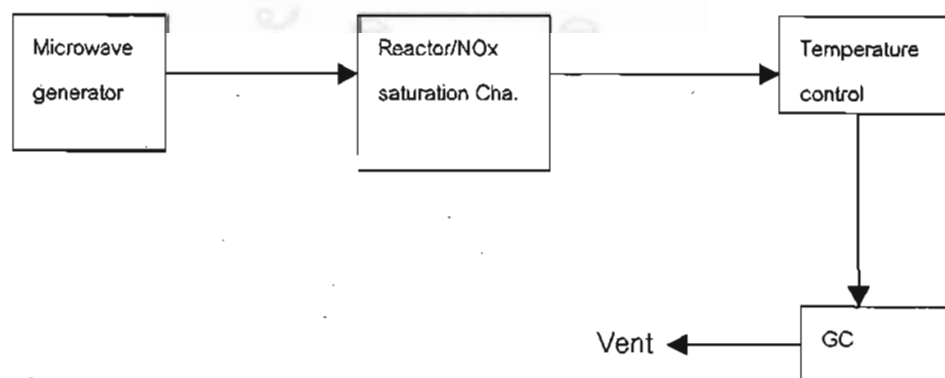
รูปที่ 2.5 ระบบของเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟที่เปรียบเทียบตัวดูดซับตัวอย่างคาร์บอนต่างๆ

Loren, M. Norman and Cha, C. Y. (1995) ศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินโดยใช้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สกระตุ้น ปัจจัยสำคัญคือการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างที่ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

จากการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยกำลังไฟฟ้าจากไมโครเวฟ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการอาร์เรเนียส ทำให้การวัดอุณหภูมิและคำนวณได้ง่าย โดยมักจะพิจารณา กำลังขาเข้าของเครื่องไมโครเวฟจะมีความจำเป็นต่อการคำนวณโดยคำนวณในรูปของอุณหภูมิแทนลงในสมการ เนื่องจากการวัดอุณหภูมิภายในอนุภาคของถ่านชาร์เป็นไปได้อย่าง การวัดอุณหภูมิจึงวัดได้ที่อุณหภูมิของบริเวณผิวเตาปฏิกรณ์เท่านั้น ซึ่งในการทดลองนี้วัดได้ 316 องศาเซลเซียส

สำหรับการวัดพื้นที่ผิวที่สามารถคำนวณได้จาก BET ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นตัวให้ความร้อน แก่ถ่านชาร์ที่ดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ พบว่าพื้นที่ผิวถ่านชาร์มีค่าประมาณ 400 ตารางเมตรต่อกรัม

Kong, Y. G. and Cha, C. Y. (1996) ศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟแก่ตัวอย่างถ่านชาร์ที่ดูดซับแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ พบว่าอุณหภูมิของแก๊สผลิตภัณฑ์จะใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาทีแรกเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์เป็น CO และ CO₂ เมื่อกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ พบว่าถ่านชาร์ที่ดูดซับแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะดูดซึมพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าถ่านชาร์ธรรมดาที่ไม่ผ่านการดูดซับแก๊สมาก่อน และบริเวณที่ถูกดูดซับนั้นจะดูดความร้อนขึ้นเร็วมากและจะเปลี่ยนเป็นจุดร้อนในเวลาอันสั้น ปฏิกิริยารีดักชันของถ่านชาร์ที่ดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะกลายเป็นจุดร้อน (hot spots) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะถูกกำจัดได้ประมาณ ร้อยละ 90



รูปที่ 2.6 ระบบการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

Deng, S. D. and Lin, Y. S. (1997) ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อน สำหรับสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยการกระจายตัวของส่วน แอททิฟ เข้าไปในรูพรุนของ ซีโอไลต์ ตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษาคือ CuO และ CuCl เพื่อใช้สำหรับกำจัด SO₂ ในอุตสาหกรรม ใช้ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ การดูดซับแก๊ส ไนโตรเจน เพื่อบอกถึงโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิว และการกระจายตัวของส่วน แอททิฟ บนผิวของตัวดูดซับ การใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อน ช่วยลดเวลาลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนแบบธรรมดา เช่นในการทดลองนี้ถ้าต้องการเตรียม DAY Zeolite ต้องใช้อุณหภูมิสูงที่ 850 °C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ในขณะที่การใช้พลังงานไมโครเวฟที่ 600 W. ใช้เวลาแค่ 60 นาที และจากการศึกษาด้วย XRD พบว่าลักษณะโครงสร้างของ ซีโอไลต์ ที่เตรียมได้จากทั้งสองวิธีมีโครงสร้างลักษณะเดียวกัน

Staven Bodman, Parisa Monsef-Mirzai, Harmindu Manale. and William R. McWhinnie (1997) ศึกษาการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนเพื่อแก้ปัญหาพิเศษทางวิทยาศาสตร์ ศึกษาพร้อมกับลักษณะเฉพาะตัวของถ่านหิน เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อนำไปใช้ได้ต่อไป โดยสนใจปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อส่วนประกอบต่างๆในถ่านหิน คือจะกำจัด กำมะถัน โดยไพโรไลซิสที่เกิดขึ้น การหาปริมาณความชื้น การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์

จากการทดลองพบว่าสามารถกำจัดกำมะถัน(Desulfurization)ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เมกาพาสคาล โดยใช้พลังงานพลังไมโครเวฟจะให้แก๊สผลิตภัณฑ์เป็น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของสัดส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจน สัดส่วนออกซิเจนต่อกำมะถัน และสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ที่เกิดจากไพโรไลซิส การศึกษาวิธีนี้ค่อนข้างอันตรายต้องใช้ความระมัดระวัง

1.การหาปริมาณความชื้นโดยใช้พลังงานไมโครเวฟที่ ความถี่ 2.8-3.8 GHz วัดปริมาณความชื้นได้ร้อยละ 0.46 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ใช้ขนาดอนุภาคถ่านซาร์ 12 มิลลิเมตร

2.การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ บนถ่านซาร์จะมีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ดูดซับอยู่ เมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนกับออกไซด์ ดังนั้นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จึงถูกกำจัดกลายเป็นกำมะถันและแก๊สไนโตรเจน พบว่าสามารถกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก และสามารถกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก

การดำเนินงานทดลอง

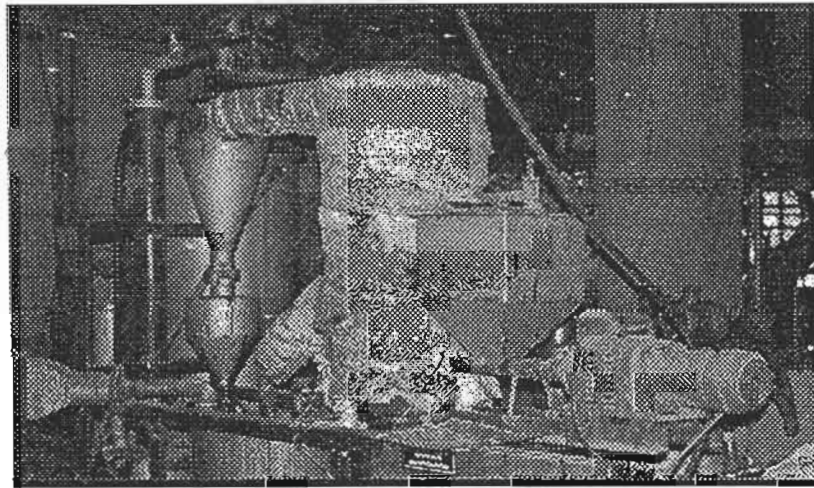
3.1 รูปแบบการศึกษา

เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้สมดุลบนถ่านชาร์ที่ ระดับความเข้มข้นเป็น 2000 พีพีเอ็ม ในเครื่องดูดซับแก๊สที่ออกแบบไว้ หลังจากนั้นทำการกระตุ้น ด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อศึกษาสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ และนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการ ผลิตและใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมต่อไป

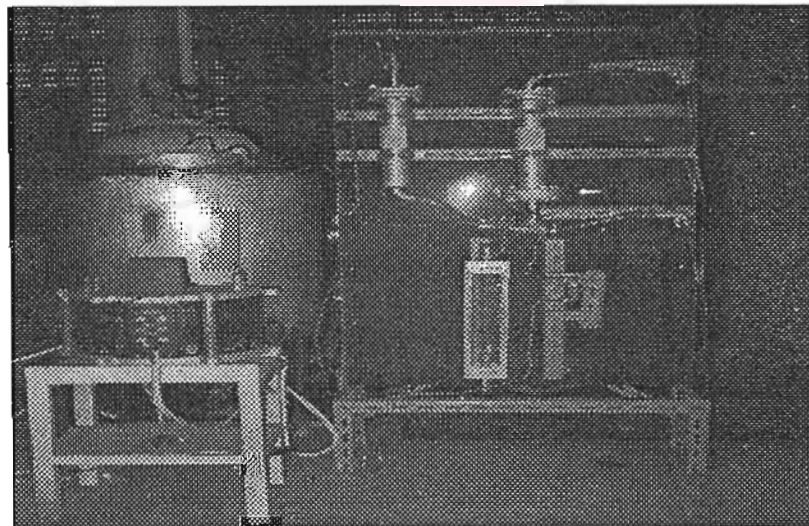
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องบดหยาบ (hammer mill)
2. เครื่องบดละเอียดรุ่น AEG.Lbi 07, 220 V, 1.5 KW (Germany)
3. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Seive shaker) EFL 1 mk3
4. ตะแกรงร่อนแยกขนาด มีขนาด 1.18 มิลลิเมตร
5. เครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg Sartorius รุ่น 1702 MP8
6. เตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) ยี่ห้อ cabolite 0 -1,200 ° F
7. ตู้อบ (Oven) ของ WT binder ช่วงอุณหภูมิ 0-250 °C
8. Soap-Flow flowmeter ของ Hewlett Packard, ขนาด 100 ml
9. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง UVVIS Spectrophotometer Jasco Model 7800
10. ครุฑเปิดพอร์ชเลน ความจุ 20 มิลลิลิตร พร้อมฝา
11. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
12. เตาอบไมโครเวฟ Output Power 800 W., Microwave Frequency 2450 MHz
13. หลอดแก้วทนไฟรูปตัวยู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร กว้าง 10 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่ภายในเตาไมโครเวฟเหนือระดับพื้นเตา 10 เซนติเมตร
14. เครื่องดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร
15. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) Orion model 900 A
16. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

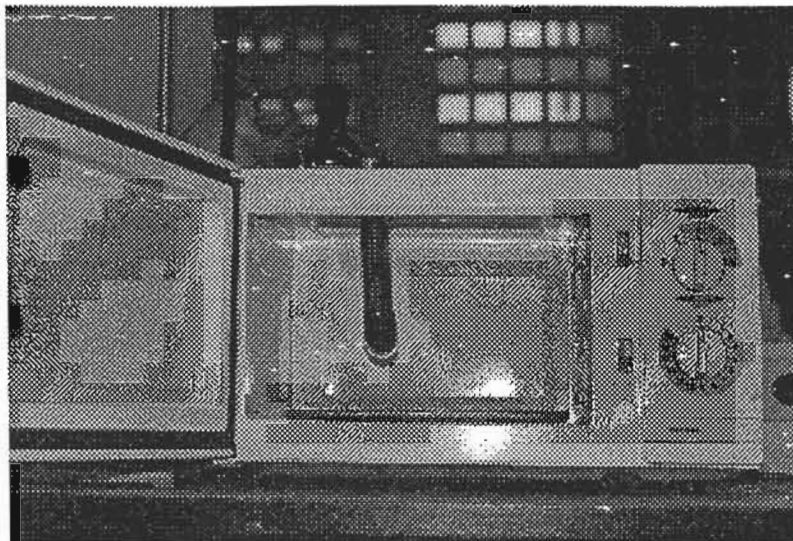
17. Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-6400
18. เครื่องวัดพื้นที่ผิวของบริษัท Micromeritics รุ่น Flow Sorb II 2300
19. เครื่องคาร์บอนเซอร์แบบเบดนิ่ง ตัวเตามีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม SS.316 หนา 4 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15.8 เซนติเมตร สูง 115 เซนติเมตร มีขดลวดความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 2,000 W. พันรอบตัวเตา ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมอัตโนมัติแบบเข็ม ในการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด โครเมต-อลูมินेत ชนิด เค



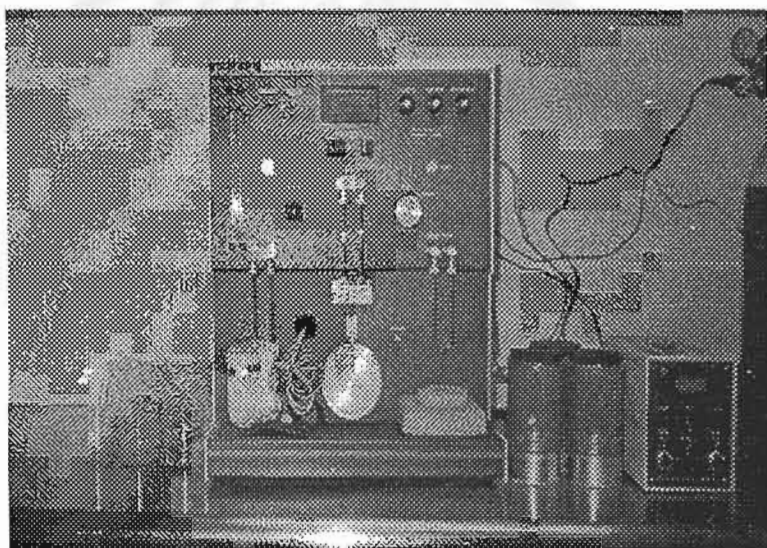
รูปที่ 3.1 เครื่องคาร์บอนเซอร์ แบบเบดนิ่งของภาควิชาเคมีเทคนิค



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือสำหรับดูดัชนีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์



รูปที่ 3.3 หลอดแก้วรูปตัวยู สำหรับใส่ตัวอย่างถ่านในการกระตุ้นติดตั้งอยู่ในเตาไมโครเวฟ



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดพื้นที่ผิว Micromeritics Flow Sorb II 2300 ของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ

3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

3.3.1 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกะลาปาล์มน้ำมัน ได้แก่

- ปริมาณสารระเหย (VM) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) ปริมาณเถ้า (A) และ ปริมาณความชื้น (M) ตาม ASTM D 1762-84

3.3.2 การคาร์บอนไนซ์ตัวอย่าง

- ชั่งตัวอย่างกะลาปาล์มน้ำมัน 500 กรัม ใส่ลงในตะกร้าที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม
- ทำการทดลองโดยทำอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที
- ให้ความร้อนแก่เครื่องคาร์บอนไนเซอร์ จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วใส่ตัวอย่างกะลาปาล์ม เมื่อครบเวลาที่ต้องการ นำถาดออกจากเตา ทิ้งให้เย็นในที่อับอากาศเพื่อป้องกันการถูกไหม้ของตัวอย่างถาด จากนั้นเก็บใส่ถุงปิดปากถุงให้สนิท ชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณของผลิตภัณฑ์
- ทำการวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านชาร์ตาม ASTM D 1762-84
- ทำการคาร์บอนไนซ์ตัวอย่างกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้ภาวะเหมาะสมที่ได้ในการคาร์บอนไนซ์ เพื่อนำไปหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และการกระตุ้นต่อไป

3.3.3 การปรับความเข้มข้นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2000 พีพีเอ็ม

- นำถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ไปบดด้วยเครื่องบดแล้วนำมาคัดขนาดใช้ขนาดเป็น 1.18 ถึง 2.36 มิลลิเมตร จากนั้นใช้ก้อนแม่เหล็กดูดเอาโลหะที่อาจจะมีในถ่านชาร์
- ในเครื่องดูดซับปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้นสูงมาก ดังนั้นจำเป็นต้องลดความเข้มข้นลงให้อยู่ในระดับ 2000 พีพีเอ็ม โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 2.50 ลิตรต่อนาที

3.3.4 การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้สมดุลบนอนุภาคถ่านชาร์

- ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้สมดุลบนถ่านชาร์ โดยนำถ่านชาร์ที่คัดขนาดไว้แล้วจำนวน 100 กรัมใส่ลงในเครื่องดูดซับที่ปรับความเข้มข้นไว้แล้ว ทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านชาร์ให้สมดุลโดยใช้เวลาประมาณ 420 นาที

3.3.4 การกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

- นำถ่านชาร์ที่คัดขนาดได้แล้วจำนวน 40 กรัม ไปศึกษาการกระตุ้นโดยมีตัวแปรคือ
- ระดับพลังงานที่ใช้ 225 วัตต์ 250 วัตต์ 450 วัตต์ 475 วัตต์ และ 500 วัตต์
- เวลา แปรเวลาที่ใช้ 30 นาที 60 นาที 90 นาที 120 นาที และ 180 นาที

- วิเคราะห์สมบัติถ่านชาร์ที่ได้ดังต่อไปนี้

ปริมาณร้อยละความชื้นตาม ASTM D 2867-95

ปริมาณร้อยละสารระเหยตาม ASTM D 5832-95

ปริมาณร้อยละเถ้าตาม ASTM D 2866-94

ค่าความหนาแน่นปรากฏตาม ASTM D 2854-89

ค่าความเป็นกรด-ด่างตาม ASTM D 3838-80

ค่าการดูดซับไอโอดีนตาม AWWA B 604-74

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูตาม JIS K 1474-1991

ค่าพื้นที่ผิวตาม ASTM C 819-77 (ทำการทดลองที่ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



ผลการวิจัย

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ในรูปแบบของตารางและกราฟ เรียงตามลำดับ ดังนี้

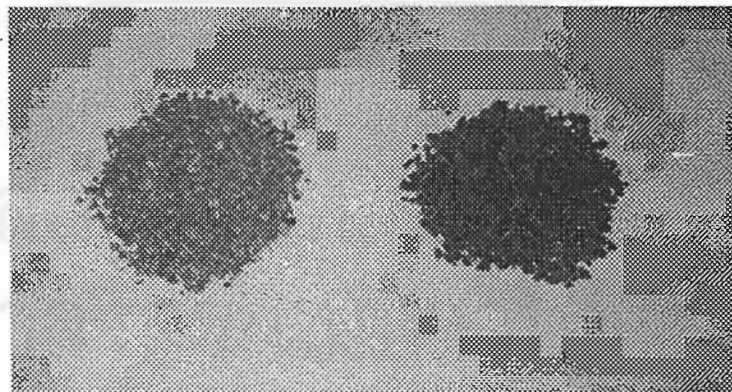
4.1 สมบัติของวัตถุดิบ

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของกะลาปาล์ม มีดังต่อไปนี้

ความชื้น (M)	ร้อยละ	7.49±0.05
ปริมาณเถ้า (A)	ร้อยละ	6.55±0.01
ปริมาณสารระเหย (VM)	ร้อยละ	79.44±0.15
ปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC)	ร้อยละ	4.12 ±0.21
ความเป็น กรด-ด่าง		4.99

4.1.2 สมบัติทั่วไปของกะลาปาล์มน้ำมันและถ่านกะลาปาล์มน้ำมัน

กะลาปาล์มน้ำมันมีลักษณะ แข็ง เหนียว สีน้ำตาลอ่อน ดังรูปที่ 4.1(ก) และเมื่อผ่านการ คาร์บอนไนซ์แล้วจะเปลี่ยนเป็นสีดำ แข็ง เปราะ ดังรูปที่ 4.1(ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกะลาปาล์มน้ำมันก่อนการคาร์บอนไนซ์ (ก) และหลังคาร์บอนไนซ์ (ข)

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์กะลาปาล์ม

จากผลการคาร์บอนไนซ์ตัวอย่างกะลาปาล์มน้ำมัน ที่วราวุฒิ ประชาศิริกุล ได้เสนอไว้พบว่า ภาวะที่ใช้ศึกษาสำหรับการคาร์บอนไนซ์กะลาปาล์มน้ำมัน 400 องศา เป็นเวลา 60 นาที จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ ได้แก่ปริมาณความชื้น (M) ปริมาณเถ้า (A) ปริมาณสารระเหย (VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการวิเคราะห์โดยประมาณของกะลาปาล์มน้ำมันและถ่านกะลาปาล์มน้ำมันที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ณ. ภาวะต่างๆ

ชนิดของ วัตถุดิบ	ภาวะการเตรียม วัตถุดิบ		YC (% wt)	M (% wt)	On dry basis		
	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (min)			A (% wt)	VM (% wt)	FC (% wt)
กะลา ปาล์มน้ำ มัน	-	-	-	7.49±0.05	6.55±0.01	79.44±0.15	4.12±0.21
ถ่านชาร์ (วราวุฒิ, 2541)	400	60	30.6	1.22±0.05	10.22±0.07	25.22±0.12	63.34±0.13
ถ่านชาร์	400	60	31.72	1.83±0.03	9.89±0.06	18.87±0.14	69.41±0.09

4.3 ภาวะที่ใช้ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านชาร์

จากขั้นตอนที่ 4.2 ใช้ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำถ่านชาร์ที่ได้มาคัดขนาดจากนั้นนำไปดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านชาร์ โดยให้อัตราการไหลของอากาศแห้งเป็น 2.50 ลิตรต่อนาที แล้วนำมาปรับหาค่าความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2000 พีพีเอ็ม เพื่อให้เป็นภาวะจริงของโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาปริมาณเฉลี่ยดังกล่าว พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จนถึงจุดสมดุลบนถ่านชาร์อยู่ที่ 420 นาที แล้วนำไปกระตุ้นในขั้นตอนต่อไป

4.4 ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจากการเปลี่ยนเวลาและพลังงานในการกระตุ้น

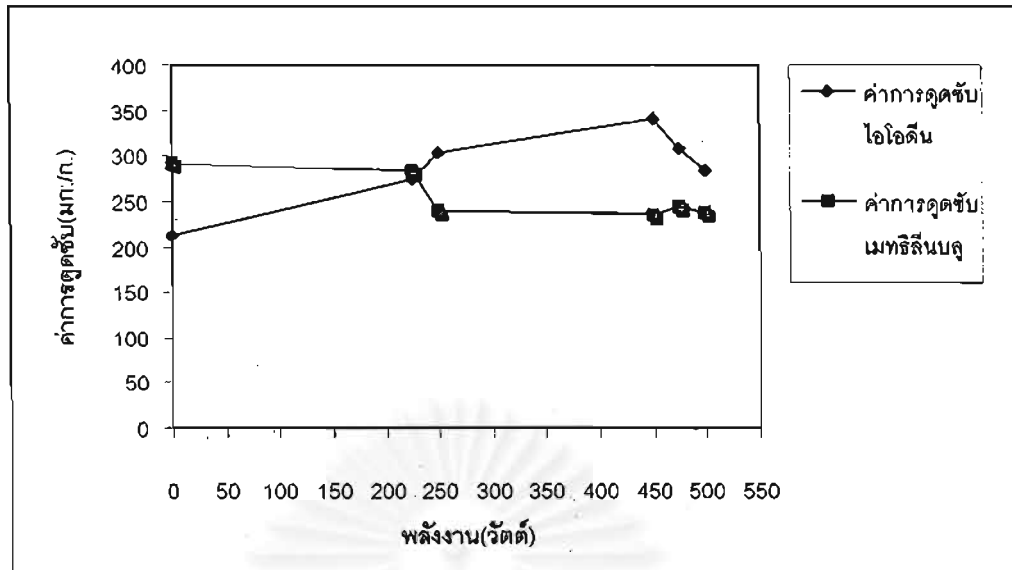
จากผลการดูดซับถ่านชาร์ด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นเวลา 420 นาที ได้ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็น 1995 พีพีเอ็ม แล้วนำมากระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ กำหนดพลังงานเป็น 225 วัตต์ โดยแปรเวลาที่ 30 นาที 60 นาที 90 นาที 120 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ พบว่าเวลาที่เหมาะสมอยู่ที่ 90 นาที จากนั้นกำหนดเวลาเป็น 90 นาที แล้วแปรพลังงานที่ 225 วัตต์ 250 วัตต์ 450 วัตต์ 475 วัตต์ และ 500 วัตต์ แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติการดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู และวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตดังแสดงในตารางที่ 4.2 – 4.3 แล้วนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของเวลาการกระตุ้นกับสมบัติของถ่านกัมมันต์ และพลังงานจากไมโครเวฟกับสมบัติของถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 – 4.7 พบว่าระดับพลังงานที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 450 วัตต์ ดังนั้นในการทดลองได้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ ระดับพลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที

ตารางที่ 4.2 ผลการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันที่ได้จากการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ความเข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม ครั้งที่ 1 ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นปรากฏ ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าพื้นที่ BET ณ. เวลาการกระตุ้นต่างๆ โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 225 วัตต์

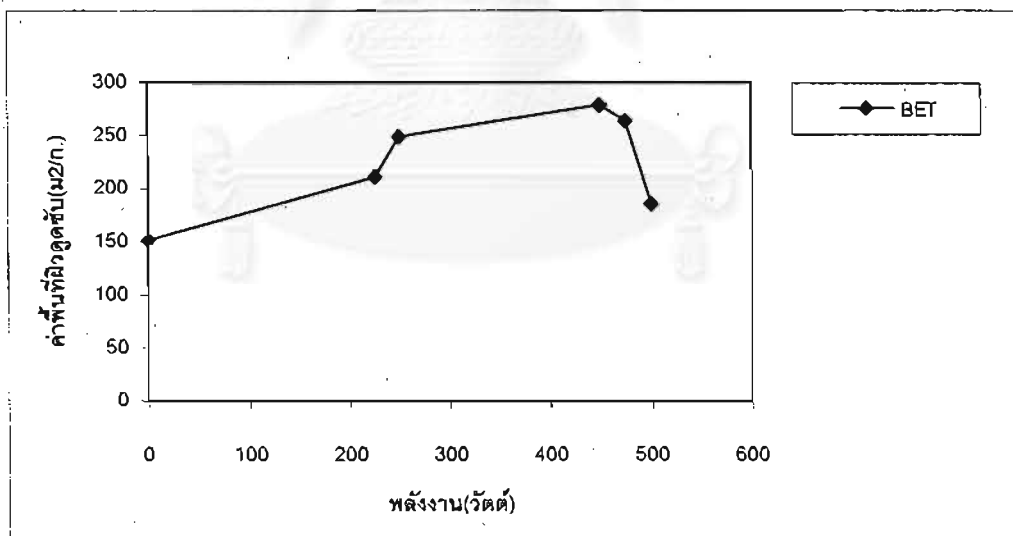
ภาวะในการกระตุ้น		ความเป็นกรด-ด่าง	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm ³)	การดูดซับไอโอดีน (mg/g)	การดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	S _{BET} (m ² /g)
ระดับพลังงาน (watt)	เวลา (min)					
0	0	8.14	0.832	212±4	291±6	152±4
225	30	8.07	0.781	274±4	283±7	211±8
225	60	8.06	0.774	326±6	240±6	272±14
225	90	7.53	0.754	367±8	234±3	302±10
225	120	7.96	0.758	360±8	237±5	301±8
225	180	8.04	0.764	325±6	240±6	280±9

ตารางที่ 4.3 ผลการกระตุ้นถ่านชาร์จากกะลาปาล์มน้ำมันที่ได้จากการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จนสมดุล ครั้งที่ 1 ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นปรากฏ ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าพื้นที่BET ณ.ระดับพลังงานการกระตุ้นต่างๆ โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที

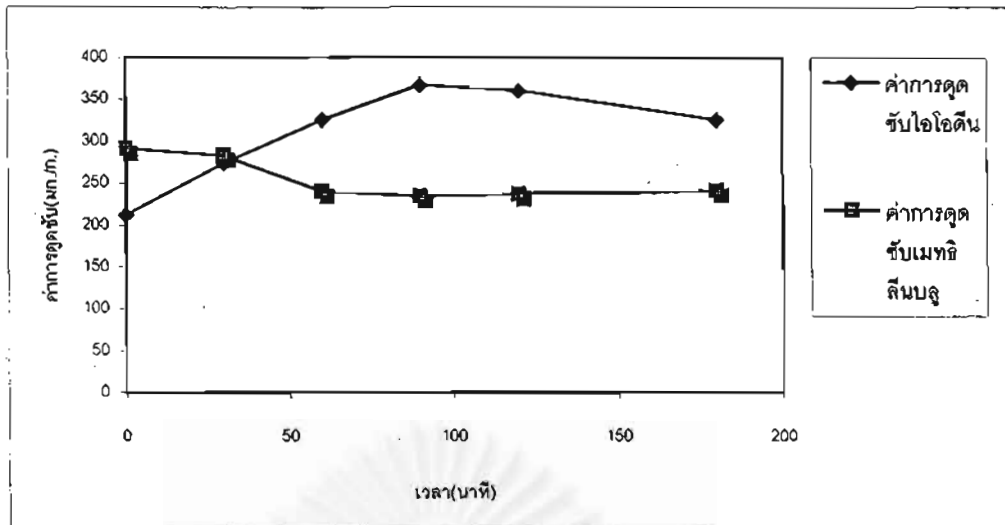
ภาวะในการกระตุ้น		ความเป็นกรด-ด่าง	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm ³)	การดูดซับไอโอดีน (mg/g)	การดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)	S _{BET} (m ² /g)
ระดับพลังงาน (watt)	เวลา (min)					
0	0	8.14	0.832	212±4	291±6	152±4
225	30	8.07	0.795	274±4	283±7	211±8
250	30	7.93	0.781	303±6	239±5	249±8
450	30	7.87	0.766	340±7	234±5	279±11
475	30	7.85	0.780	308±6	243±6	264±8
500	30	8.13	0.827	283±5	236±6	185±6



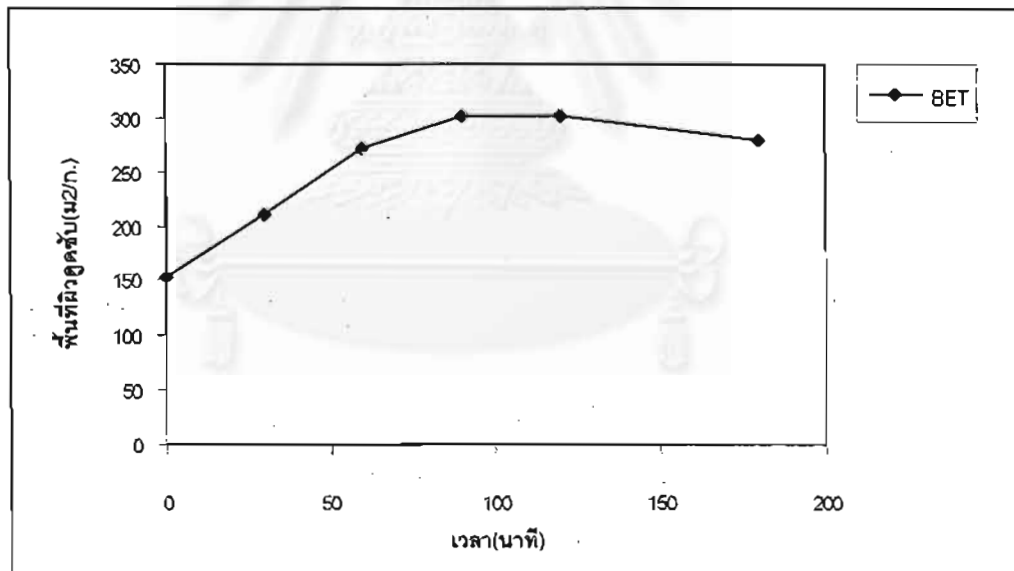
รูปที่ 4.2 ผลของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่ระดับพลังงานการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านซาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นที่ใช้เป็น 30 นาที



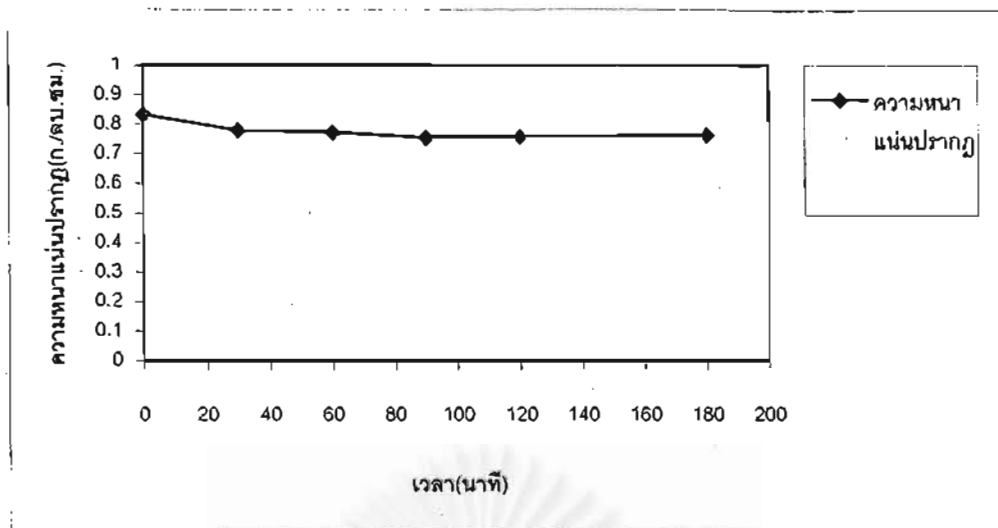
รูปที่ 4.3 ผลของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิว BET ที่ระดับพลังงานการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านซาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที



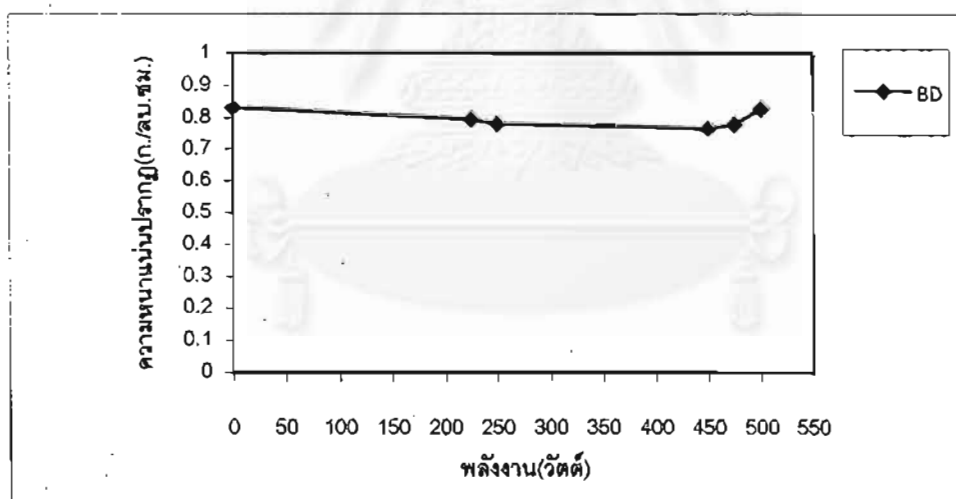
รูปที่ 4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่เวลาการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านซาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดระดับพลังงานการกระตุ้นเป็น 225 วัตต์



รูปที่ 4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิว BET ที่เวลาการกระตุ้นต่างๆ ใช้ถ่านซาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดระดับพลังงานการกระตุ้นเป็น 225 วัตต์



รูปที่ 4.6 ผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ ที่เวลาการกระตุ้นต่างๆ ใช้ ถ่านซาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดระดับพลังงานการกระตุ้นเป็น 225 วัตต์



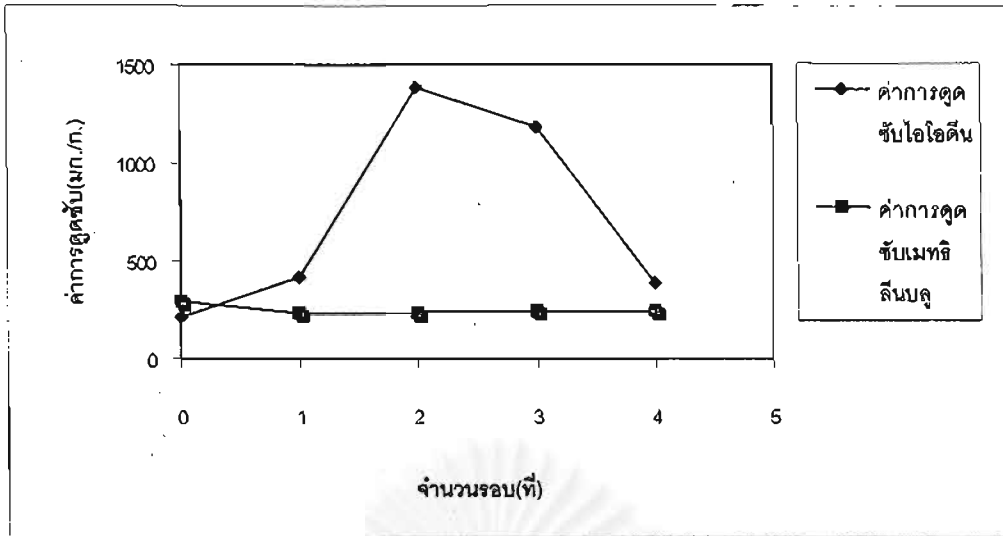
รูปที่ 4.7 ผลของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ ที่ระดับพลังงานต่างๆ ใช้ ถ่านซาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที

4.5 ภาวะรอบของการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

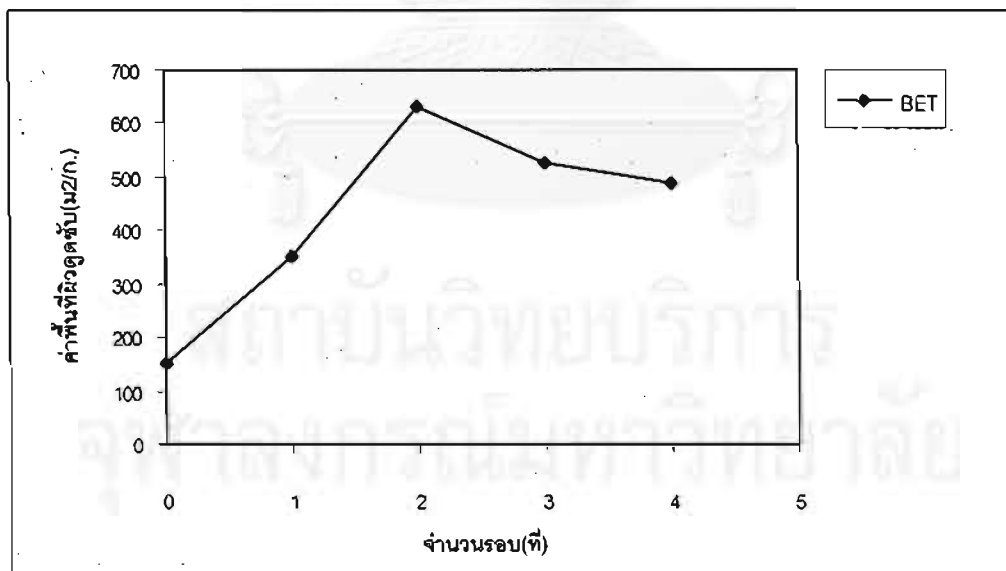
จากภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านชาร์ที่ผ่านมา โดยดูจากค่าการดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิว BET อยู่ที่ระดับพลังงานการกระตุ้น 450 วัตต์ และใช้เวลาในการกระตุ้นเป็น 90 นาที หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม จนเข้าสู่ภาวะสมดุล ใช้เวลานาน 420 นาที เพื่อศึกษาผลการดูดซับแล้วการกระตุ้นโดยทำซ้ำกันเป็นรอบที่ 2 , 3 และ 4 ตามลำดับ แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติการดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทธิลีนบลู และวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวเพื่อหารอบที่เหมาะสมในการกระตุ้นต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของจำนวนรอบที่ทำการดูดซับแล้วกระตุ้น กับสมบัติของถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 - 4.10 พบว่าจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่รอบที่ 2 เนื่องจากวิเคราะห์ได้ค่าการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุด

ตารางที่ 4.4 ผลการดูดซับถ่านกัมมันต์ด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นปรากฏ ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู และค่าพื้นที่ BET ณ.จำนวนรอบต่างๆ โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และเวลาการกระตุ้นเป็น 90 นาที

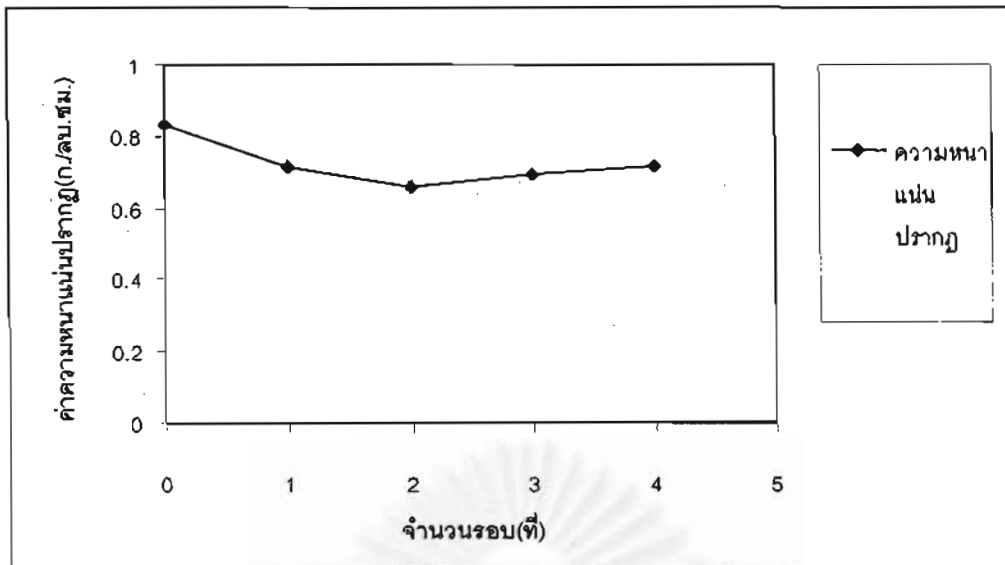
รอบที่	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าความหนาแน่นปรากฏ (g/cm ³)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (mg/g)	S _{BET} (m ² /g)
0	8.14	0.832	212±4	291±6	152±4
1	8.08	0.717	418±10	235±5	351±17
2	8.11	0.659	1385±11	235±6	1172±49
3	7.06	0.695	1184±6	239±6	984±38
4	7.22	0.713	390±9	249±5	489±19



รูปที่ 4.8 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ที่จำนวนรอบต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และเวลาการกระตุ้นเป็น 90 นาที



รูปที่ 4.9 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าพื้นที่ผิว BET ที่จำนวนรอบต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัม โดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และเวลาการกระตุ้นเป็น 90 นาที



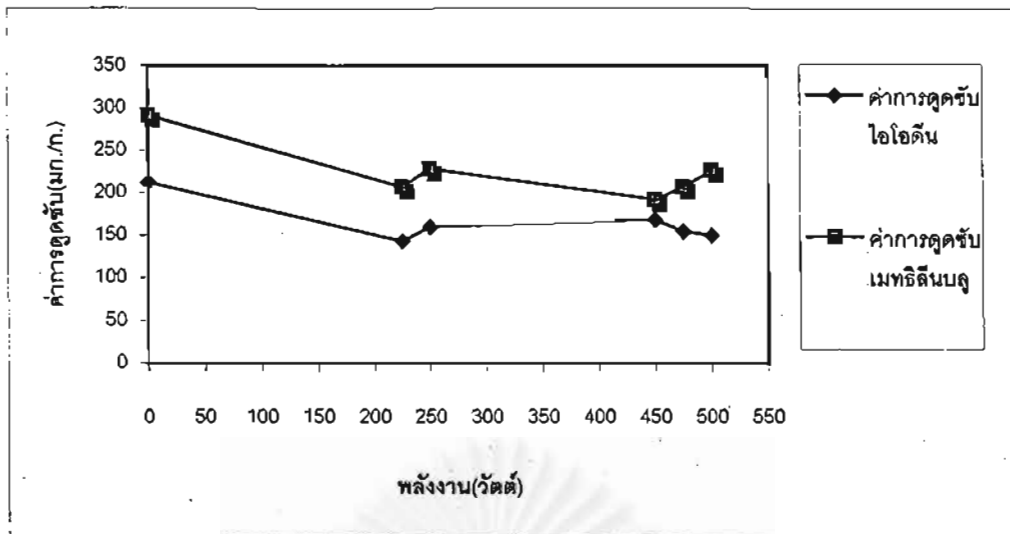
รูปที่ 4.10 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ ที่จำนวนรอบต่างๆ ใช้ถ่านชาร์หนัก 40 กรัมโดยกำหนดพลังงานการกระตุ้นเป็น 450 วัตต์ และ เวลาการกระตุ้นเป็น 90 นาที

4.6 ผลจากการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบตถ่านซารีในเวลาเดียวกัน

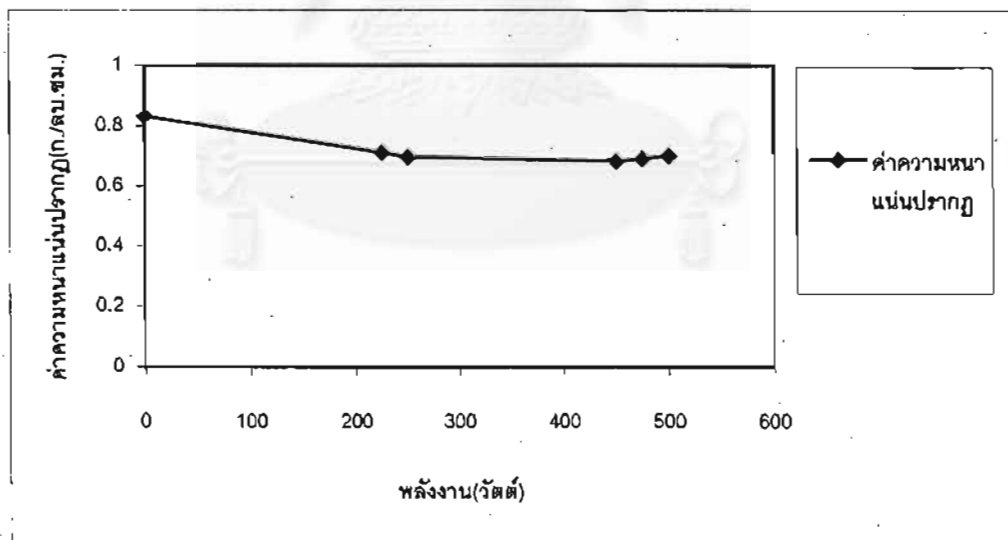
เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลของการดูดซับถ่านซารีด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วนำไปกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ กับผลของการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบตถ่านซารีในเวลาเดียวกัน ว่าแบบใดให้ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นได้ดีกว่า โดยพิจารณาจากความสามารถในการดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู ดังแสดงในตารางที่ 4.5 แล้วนำข้อมูลที่นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้กระตุ้นกับสมบัติของถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ยังคงพบว่าแนวโน้มของพื้นที่ผิวดูดซับมีค่ามากที่สุดที่ ระดับพลังงาน 450 วัตต์ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการกระตุ้นครั้งที่ 1 เมื่อทำการดูดซับถ่านซารีด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม แล้วกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์พร้อมกับการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟในเวลาเดียวกันค่าพื้นที่ผิวดูดซับลดลงมาก

ตารางที่ 4.5 ผลจากการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบตถ่านซารีพร้อมในเวลาเดียวกัน ที่มีต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่นปรากฏ ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ณ ระดับพลังงานการกระตุ้นต่างๆ โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที

ระดับพลังงาน(watt)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความหนาแน่นปรากฏ(g/cm ³)	ค่าการดูดซับไอโอดีน(mg/g)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู(mg/g)
225	7.22	0.792	143±3	207±4
250	8.19	0.697	160±4	228±6
450	8.14	0.683	168±3	191±6
475	8.26	0.691	155±3	206±5
500	9.29	0.703	150±5	225±6



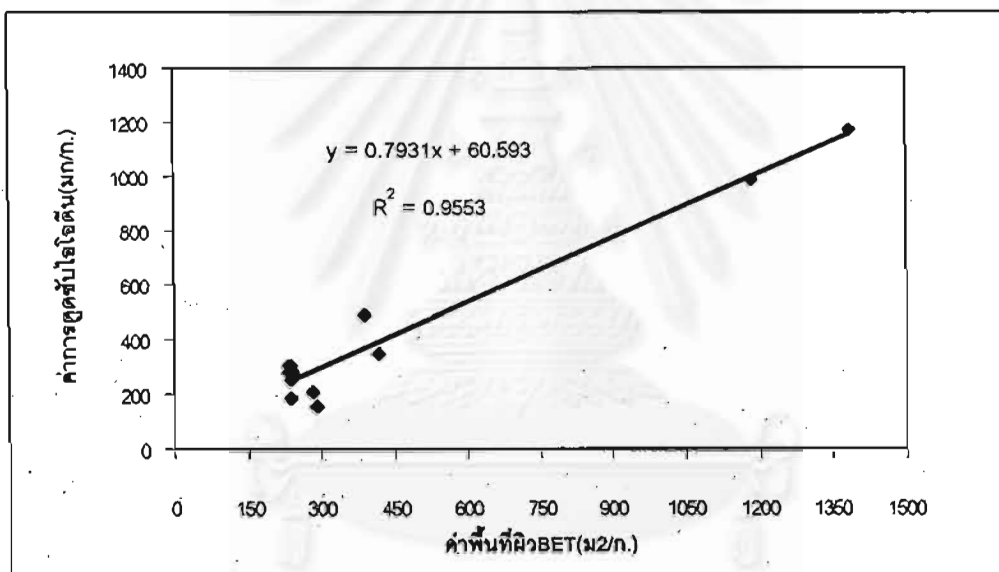
รูปที่ 4.11 ผลของการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบตถ่านซารีในเวลาเดียวกันที่มีต่อค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทธีนีนบลู ที่ระดับพลังงานต่างๆ ใช้ถ่านซารีหนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที



รูปที่ 4.12 ผลของการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบตถ่านซารีในเวลาเดียวกันที่มีต่อค่าความหนาแน่นปรากฏที่ระดับพลังงานต่างๆ ใช้ถ่านซารีหนัก 40 กรัม โดยกำหนดเวลาการกระตุ้นเป็น 30 นาที

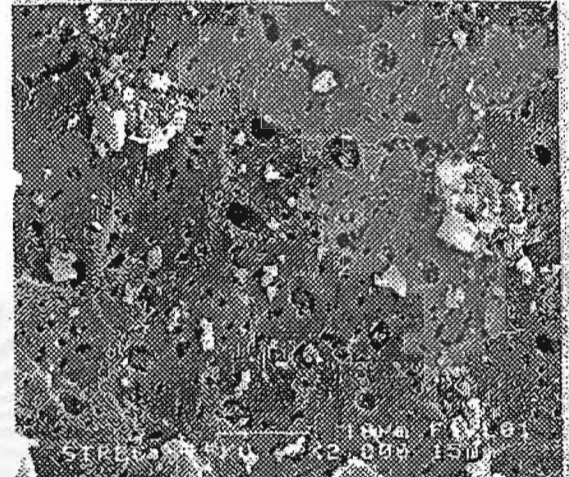
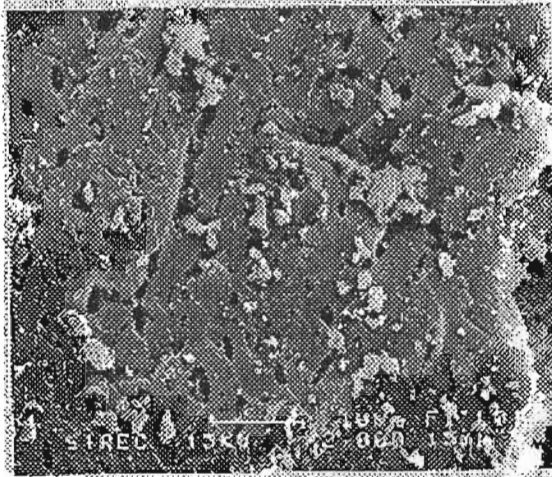
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับค่าพื้นที่ผิว BET ณ ภาวะต่างๆ

เป็นการศึกษาผลของการใช้ระดับพลังงานของการกระตุ้นและเวลาในการกระตุ้นที่ภาวะต่างๆ เพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับค่าพื้นที่ผิว BET ซึ่งสามารถบอกถึงสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง คือพบว่าเมื่อค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ผิว BET ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับค่าพื้นที่ผิว BET



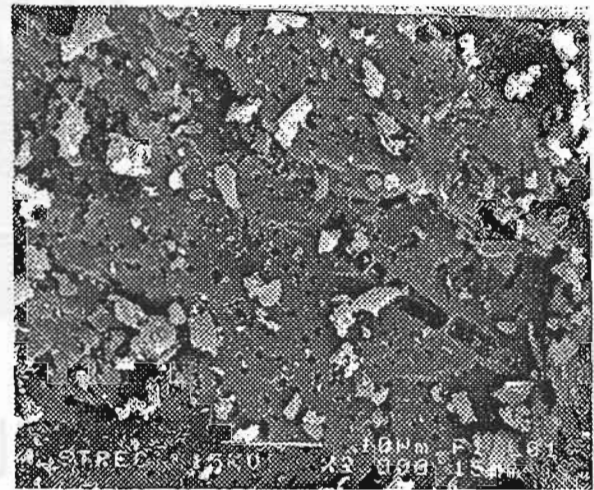
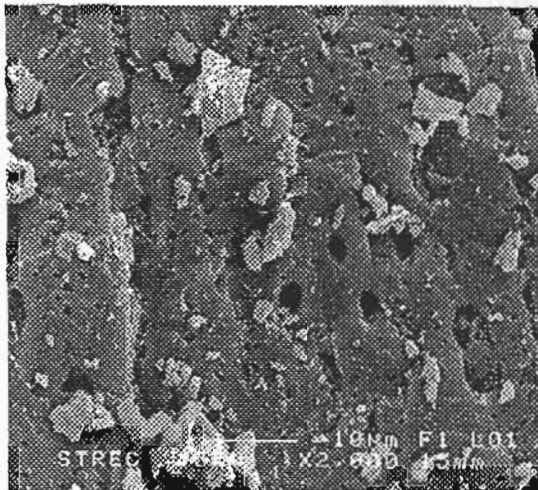
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับค่าพื้นที่ผิว BET ณ ภาวะต่างๆ

4.8 รูปลักษณะพื้นผิวของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่ภาวะต่างๆ โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคปกำลังขยาย 2000 เท่า



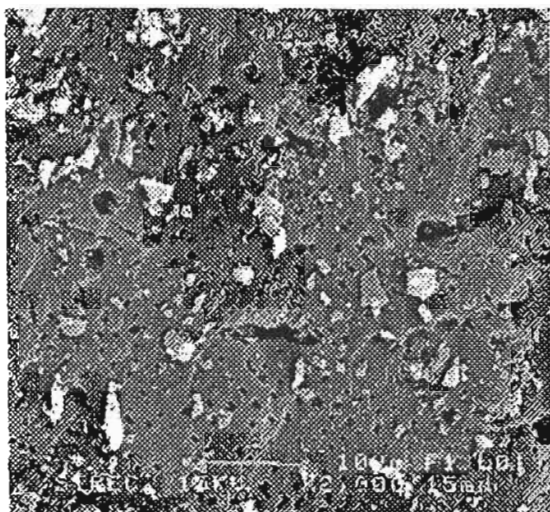
รูปที่ 4.14 ผิวถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

รูปที่ 4.15 ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้น ด้วยพลังงานไมโครเวฟ 225 วัตต์ เป็นเวลา เป็นเวลา 30 นาที

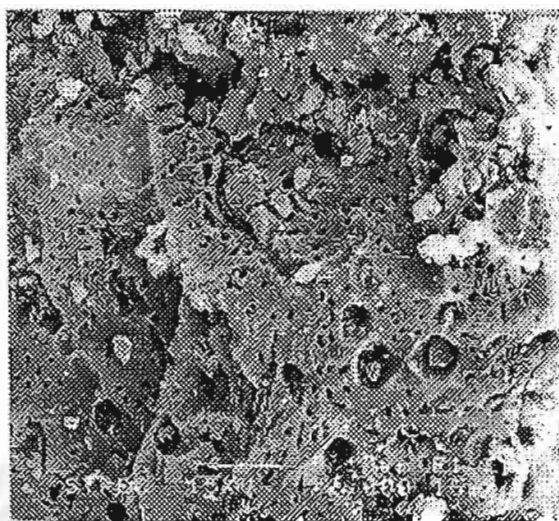


รูปที่ 4.16 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น ด้วยพลังงาน 225 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที

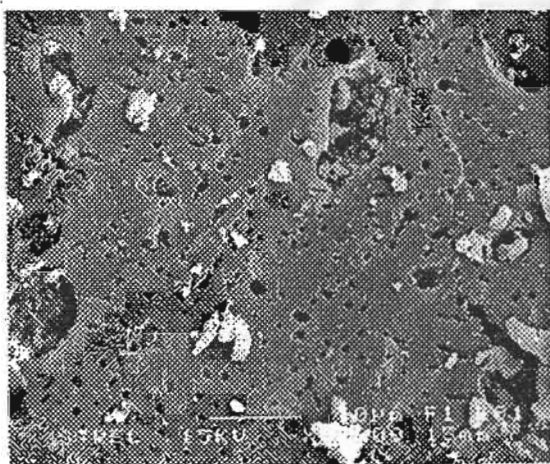
รูปที่ 4.17 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น ด้วยพลังงาน 225 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที



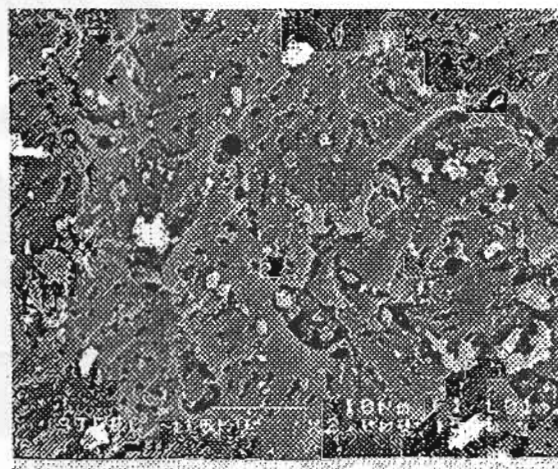
รูปที่ 4.18 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 225 วัตต์ เป็นเวลา 120 นาที



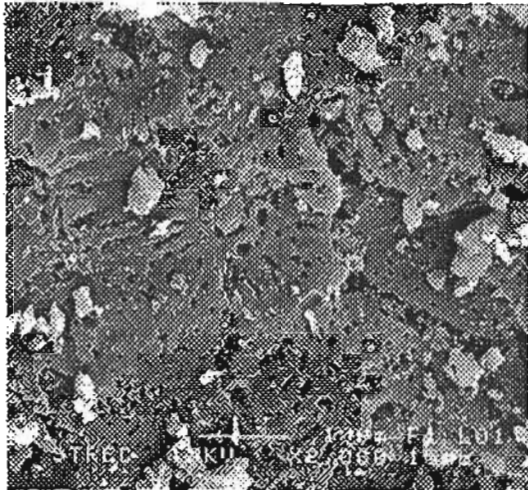
รูปที่ 4.19 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 225 วัตต์ เป็นเวลา 180 นาที



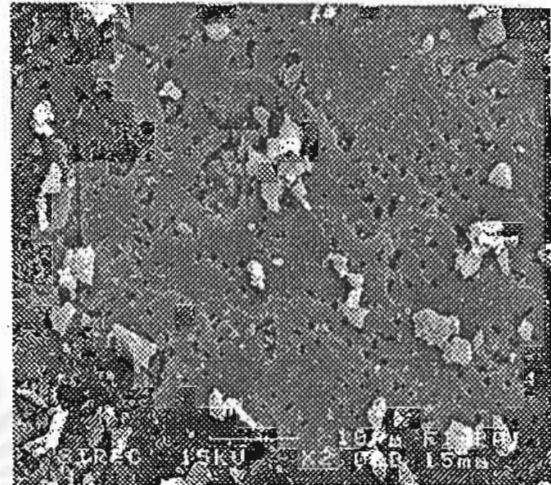
รูปที่ 4.20 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 250 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที



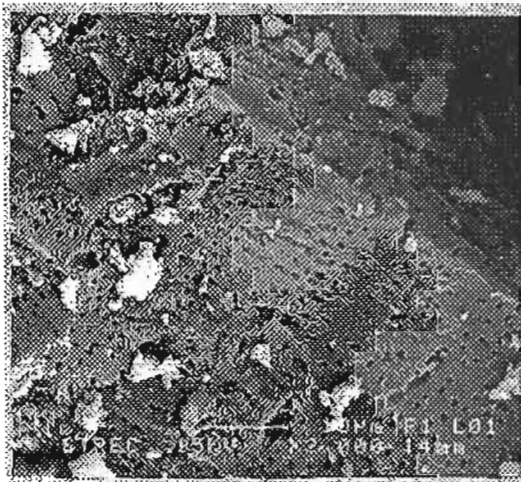
รูปที่ 4.21 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที



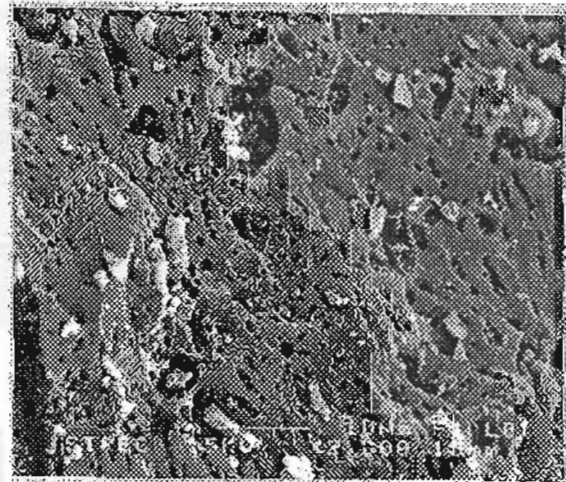
รูปที่ 4.22 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 475 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที



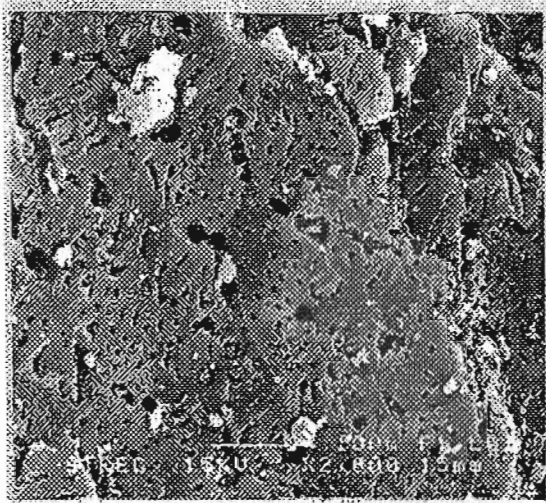
รูปที่ 4.23 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 500 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที



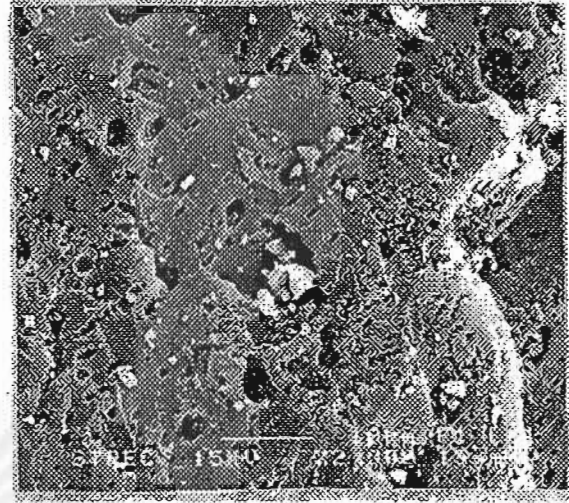
รูปที่ 4.24 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที
รอบที่ 1



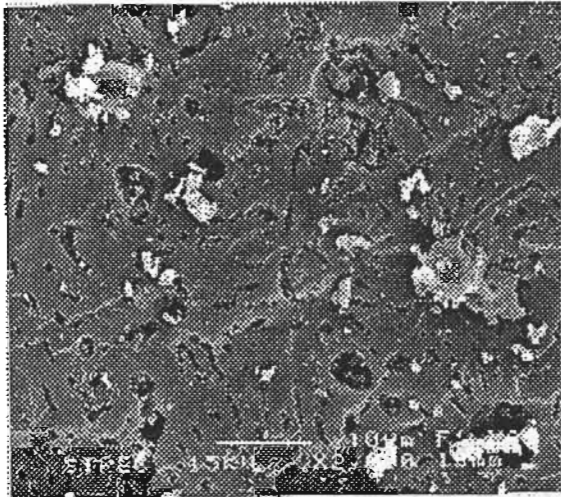
รูปที่ 4.25 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที
รอบที่ 2



รูปที่ 4.26 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที
รอบที่ 3



รูปที่ 4.27 ผิวถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้น
ด้วยพลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที
รอบที่ 4



รูปที่ 4.28 ผิวถ่านกัมมันต์จากการดูดซับพร้อม
กับการกระตุ้นที่พลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 30
นาที

อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การเลือกภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอน

การทดลองในการคาร์บอนของงานวิจัยนี้ได้เลือกจากผลการทดลองของ วราวุฒิ ประชาศิริสกุล(2541) ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิและเวลา ซึ่งมีผลต่อสมบัติของถ่านชาร์ที่ผลิตคือ ปริมาณผลิตภัณฑ์(Y) ปริมาณเถ้า(A) ปริมาณสารระเหย(VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว(C)

5.1.1 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอน(วราวุฒิ ประชาศิริสกุล, 2541)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นพบว่าปริมาณสารระเหยจะลดลง เพราะว่าที่อุณหภูมิสูงความร้อนจะพาเอาสารระเหยออกมาจากอนุภาคถ่านชาร์ ทำให้ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์ลดลง และจากการทดลองของ วราวุฒิ ประชาศิริสกุล พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมเป็น 400 องศาเซลเซียส

5.1.2 ผลของเวลาการคาร์บอน(วราวุฒิ ประชาศิริสกุล, 2541)

เมื่อเพิ่มเวลาการทำคาร์บอนให้มากขึ้น ปริมาณสารระเหยในอนุภาคถ่านชาร์จะถูกไล่ออกมาได้มากขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าสารระเหยและปริมาณผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย การทำการคาร์บอนได้เวลาที่เหมาะสมที่สุดเป็น 1 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาถ่านชาร์จากการคาร์บอน พบว่าถ่านชาร์ที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นควรมีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก(บุญชัย ตระกูลมหาชัย, 2537) และจากตารางที่1 ในการทดลองของงานวิจัยนี้ เห็นได้ว่า ภาวะที่เลือกสำหรับขั้นตอนการคาร์บอนที่กะลาปาล์มน้ำมันที่เหมาะสม อุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที เนื่องจากทั้งเวลาและอุณหภูมิไม่สูงมากนัก และได้สมบัติดังนี้ ร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 31.72 โดยน้ำหนัก ร้อยละสารระเหยเท่ากับ 18.87 ± 0.03 โดยน้ำหนัก ร้อยละคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 69.41 ± 0.09 โดยน้ำหนัก ร้อยละเถ้าเท่ากับ 9.89 ± 0.06 โดยน้ำหนัก เมื่อนำไปวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีของBET. เท่ากับ 152 ± 4 ตารางเมตรต่อกรัม

5.2 การเตรียมถ่านซารีให้สมดุลด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2000 พีพีเอ็ม

เนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงมากจึงต้องทำการลดความเข้มข้นให้เหลือในระดับความเข้มข้นอยู่ในช่วงประมาณ 2000 พีพีเอ็ม เพราะเป็นภาวะจริงแก๊สที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง เนื่องจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้ปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้นดังกล่าว ดังนั้นจึงต้องออกแบบการทดลองโดยสร้างเครื่องมือเพื่อลดความเข้มข้นของปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้เหลือความเข้มข้นตามต้องการ และยังออกแบบมาเพื่อใช้ดูดซึมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนถ่านซารีในเบดนิ่งได้ด้วย

ในการเตรียมความเข้มข้นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำได้โดยทำการทดลองวิธีเดียวกับของ พรพนทวิ ธรรมธรราร, 2539 และในงานวิจัยนี้ต้องทำการตรวจสอบว่าความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าความเข้มข้นในช่วงที่เราต้องการในช่วง 2000 พีพีเอ็ม การทำคือต้องมีการปรับวาล์วของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งต้องระวังอย่างสูงเนื่องจากอาจเกิดการรั่วซึมของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สู่บรรยากาศได้ แต่ในการทดลองเพื่อทำการดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้นประมาณ 2000 พีพีเอ็ม ซึ่งวัดได้ได้จากอุปกรณ์ชั่งตัวอย่างแก๊ส และในการปฏิบัติการในห้องทดลองใช้เวลาประมาณ 420 นาที หรือ 7 ชั่วโมง

ข้อดีของการใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อการศึกษาโดยใช้เทคนิคพลังงานไมโครเวฟ (Steven Bodman, 1997) คือ

1. สามารถกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์บนอนุภาคถ่านซารีได้สูงถึงร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก
2. ใช้อุณหภูมิไม่สูงเกินไปคือไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 2.45 GHz
3. แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีมากในปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง

5.3 ผลการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจากการเปลี่ยนพลังงานและเวลาในการกระตุ้น

ถ่านซารีที่เตรียมจากการคาร์บอนไนซ์กะลาปาล์ม มีสมบัติดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.14 ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.832 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีน 212 ± 4 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 291 ± 6 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิว BET 151 ± 4 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จะเห็นว่าพื้นที่ผิวของถ่านซารีที่เตรียมมีค่าต่ำมากเมื่อพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าพื้นที่ผิวที่วัดได้ เนื่องจากสารระเหยและน้ำมันที่ได้อาจจากการเผาผลาญ อุดตันในรูพรุนของ

ถ่านชาร์ ดังนั้นจึงมีการศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มพื้นที่ของการดูดซับให้สูงขึ้น และพบว่าเมื่อกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟทำให้ถ่านชาร์มี

1. สมบัติการดูดซับสูงขึ้น
2. พื้นที่การดูดซับสูงขึ้น
3. มีการพัฒนารูพรุนภายในอนุภาคถ่านชาร์สูงขึ้น

5.3.1 ผลของระดับพลังงานในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเมื่อยังไม่ให้พลังงานการกระตุ้นจากนั้นจึงเพิ่มพลังงานการกระตุ้นจนถึง 225 วัตต์ ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 21.88 และค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นร้อยละ 25.81 พบว่าค่าที่สูงขึ้นยังไม่มากในตอนแรก เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟเริ่มทำให้สารระเหยออกมาจากถ่านชาร์และปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกไซด์ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่บริเวณรูพรุนที่เริ่มเกิดยังไม่รุนแรง ในช่วงต่อมาเมื่อเพิ่มพลังงานขึ้นจาก 225 วัตต์ไปเป็น 250 วัตต์ ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 116 และค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นร้อยละ 125 จะเห็นว่าค่าที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นสูงกว่าช่วงแรกมากเนื่องจากพลังงานการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟไปทำให้สารระเหยออกมามากกว่าเดิมทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิว BET สูงขึ้นมาก และเมื่อเพิ่มพลังงานการกระตุ้นขึ้นอีกจาก 250 วัตต์ไปเป็น 450 วัตต์ ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.39 และค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นร้อยละ 19.05 สาเหตุที่ค่าของทั้งสองยังเพิ่มขึ้นอีกแต่เพิ่มขึ้นไม่สูงเหมือนเดิมเพราะปริมาณสารระเหยออกไปมากแล้วในช่วงที่ผ่านมา หลังจากนั้นเมื่อยังเพิ่มพลังงานการกระตุ้นให้สูงอีกจาก 450 วัตต์ไปเป็น 500 วัตต์ ค่าการดูดซับไอโอดีนจะลดลงร้อยละ 106.67 และค่าพื้นที่ผิว BET ก็ลดลงร้อยละ 185.71 แสดงว่าทั้งค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิว BET สูงที่สุดที่ระดับพลังงานการกระตุ้น 450 วัตต์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารุนแรงที่บริเวณรูพรุนขนาดเล็กจนทำให้รูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิว BET ลดลง ส่วนค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูจะบอกถึงปริมาณรูพรุนขนาดกลาง(15 ไมโครเมตร)(Hassler, 1974) ส่วนปริมาณสารระเหยและน้ำมันที่เคลือบอยู่ จะหลุดออกมาอีกทำให้รูพรุนในตอนแรกที่มีน้อยจะเพิ่มมากขึ้น ดูได้จากค่าของพื้นที่ผิว BET ที่พลังงาน 450 วัตต์ พบว่ามีรูพรุนปริมาณมากที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังสมการของ Richer $C + SO_2 = CO_2 + S$ ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้น ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kong Y. And Cha Y. A., 1996 เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางจะกลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งไม่มีผลต่อการดูดซับจะเป็นแค่ทางผ่านของแก๊สเท่านั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นปรากฏลดลงต่ำสุดที่ระดับพลังงาน 450 วัตต์ ซึ่งสอดคล้อง

คล้อยกับค่าดูดซับไอโอดีน นั่นคือที่ 450 วัตต์ ค่าของพื้นที่ผิวการดูดซับสูงสุด ยังพบว่า การเพิ่มพลังงานทำให้ค่าความหนาปรากฏลดลงเนื่องจากปริมาณรูพรุนสูงขึ้นนั่นเอง

ผลของพลังงานต่อค่าพื้นที่ผิว BET พบว่ามีแนวโน้มตามค่าการดูดซับไอโอดีนคือ เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้ค่า พื้นที่ผิวสูงขึ้น และค่าพื้นที่ผิวมากที่สุดที่พลังงาน 450 วัตต์ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มพลังงานอีกพบว่าสมบัติการดูดซับต่างๆ ลดลง

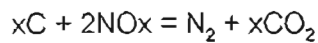
5.3.2 ผลของเวลาต่อการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เมื่อยังไม่ใช้เวลาในการกระตุ้นจนเพิ่มเวลาในการการกระตุ้นให้สูงขึ้นถึง 90 นาที ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 48.72 และค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นร้อยละ 45.33 ขณะที่การดูดซับเมทิลีนบลูลดลงร้อยละ 68 เพราะว่าภายในโครงสร้างของรูพรุนเกิดปฏิกิริยาแก๊สซีพีเคชัน เนื่องจากการดูดซับของไอโอดีนจะเป็นตัวบ่งบอกปริมาณรูพรุนได้ และจากงานวิจัยของ Cha C. Y., 1996 บอกว่าค่าพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น และค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดที่เวลา 90 นาทีจะเป็นการพัฒนารูพรุนบนอนุภาคถ่านชาร์คือจะมีรูพรุนขนาดเล็กมากที่สุด ค่าที่ได้สอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการวัดค่าพื้นที่ผิว BET ค่าพื้นที่ผิวทั้งสองมากที่สุดที่เวลาในการกระตุ้น 90 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นให้สูงขึ้นอีกจาก 90 นาที จนถึง 180 นาทีพบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงร้อยละ 46.67 และค่าพื้นที่ผิว BET ลดลงร้อยละ 24.44 เพราะขณะที่เพิ่มเวลาในการกระตุ้นขึ้นอีกพลังงานไมโครเวฟจะให้ความร้อนที่รูพรุนที่มีอยู่จะทำให้รูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลางเปลี่ยนเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้ค่าการดูดซับและค่าพื้นที่ผิวของถ่านลดลงนั่นเอง

5.4 ผลของการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยเพิ่มจำนวนรอบของการกระตุ้น

ผลการทดลองจากการออกแบบให้ถ่านชาร์ผ่านการดูดซับแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้นประมาณ 2000 พีพีเอ็ม เป็นเวลานาน 7 ชั่วโมงหรือทำให้ถ่านชาร์อยู่ในภาวะสมดุลด้วยแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนที่จะนำมากระตุ้น โดยภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมคือใช้พลังงาน 450 วัตต์ และกระตุ้นเป็นเวลานาน 90 นาทีจากนั้นเมื่อนำมาทำซ้ำโดยเพิ่มจำนวนรอบของการดูดซับแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์และการกระตุ้น แสดงผลดังตารางที่ 4.4 โดยพิจารณาสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ พบว่าในรอบที่ 2 ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุดถึง 1385 ± 11 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าพื้นที่ผิว BET เป็น 1172 ± 49 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นการบอกว่าในรอบที่ 2 ของการทำดูดซับและการกระตุ้นให้ค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงที่สุดหรือสามารถกล่าวได้ว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น 6.53 เท่า และค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้น 7.71 เท่า จากภาวะเดิมของถ่านชาร์ที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น

เลย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา $C + SO_2 = CO_2 + S$ (Challa, S little, W. E. And Cha C. Y., 1994) เกิดดีที่สุดในทำให้ปริมาณรุกรุนสูงขึ้นมากที่สุดและสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Cha, C. Y. And Kong, Y., 1995 แต่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ บนถ่านชาร์แล้วนำไป กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อศึกษาการกำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์บนถ่านชาร์กลายเป็นแก๊ส ไนโตรเจน และยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับอนุภาคถ่านชาร์เป็น 800 ตารางเมตรต่อกรัม และ ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันเป็นดังนี้



งานวิจัยนี้ยังพบว่าสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ถ่านชาร์จากเดิมเมื่อยังไม่ผ่านการดูดซับและยังไม่ผ่านการกระตุ้นมีพื้นที่ผิว BET เพียง 151 ± 4 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อนำมาผลิตตามภาวะที่เหมาะสมแล้วพบว่าค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นเป็น 1172 ± 49 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นการพัฒนารุกรุนให้เพิ่มมากขึ้นได้ตรงสมมติฐานที่ตั้งไว้

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 พบว่ารอบที่ 2 ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดและค่าการดูดซับเมทธิลินบนลูต้าที่สุดซึ่งสอดคล้องกัน ที่รอบที่ 2 รุกรุนในอนุภาคถ่านชาร์สามารถดูดซับแก๊สได้สูงที่สุด พิจารณาช่วงแรกถ่านชาร์ที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นจากนั้นได้ใช้ภาวะที่เหมาะสมทดลองที่ 450 วัตต์ และใช้เวลากระตุ้น 90 นาที โดยทุกครั้งก่อนการกระตุ้นต้องทำการดูดซับแก๊สซิลเฟอไรด์ออกไซด์ให้สมดุลบนถ่านชาร์ก่อน เมื่อยังไม่ได้ทำการกระตุ้นแล้วทำการกระตุ้นรอบที่ 1 พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น 1.97 เท่า และค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้น 2.31 เท่า แสดงว่าเมื่อปริมาณสารระเหยลดลงปริมาณรุกรุนเพิ่มสูงขึ้นอีก แต่เมื่อทำซ้ำในรอบที่ 2 พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจากการทำการกระตุ้นรอบแรก 3.31 เท่า และค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้น 7.71 เท่า จะเห็นได้ว่าในตอนแรกการเพิ่มของพื้นที่ผิวบนถ่านกัมมันต์มีค่าน้อยกว่าช่วงที่ 2 เนื่องจากในตอนแรกนั้นสารระเหยเริ่มออกมาจากรุกรุนในปริมาณไม่สูงเป็นเพียงการเริ่มต้นของการเปิดรุกรุน เมื่อทำการทดลองต่อไป ณ ภาวะรอบที่ 3 ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงจากค่าที่สูงที่สุด 1.17 เท่า และค่าพื้นที่ผิว BET ลดลง 1.19 เท่า และเมื่อทำการกระตุ้นต่อไปในรอบที่ 4 พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงจากการทำการกระตุ้นรอบที่ 3 อีก 3.04 เท่าและค่าพื้นที่ผิว BET ลดลง 2.01 เท่า ปริมาณสารระเหยในการทำการกระตุ้นรอบที่ 4 ก็ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 13.68 ดังตารางที่ 5.1 ทั้งค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิว BET ก็ลดลงกว่าเดิมทั้งนี้เนื่องจากภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีอัตราการสลายของรุกรุนขนาดเล็กและขนาดกลางไปเป็นรุกรุนขนาดใหญ่เพิ่มมากกว่าอัตราการการเกิดรุกรุนขนาดเล็ก และพบว่าปริมาณสารระเหยภายในถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลงสำหรับการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่กำหนด

ตารางที่ 5.1 ค่าปริมาณสารระเหย ณ จำนวนรอบของการกระตุ้นต่างๆ

รอบที่	0	1	2	3	4
ร้อยละของปริมาณสารระเหย (VM)	18.89±0.14	17.79±0.18	20.70±0.05	21.38±0.11	13.68±0.21

ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ภาวะเหมาะสมที่สุดคือใช้พลังงาน 450 วัตต์ และกระตุ้นเป็นเวลา 90 นาที โดยทำการดูดซับและการกระตุ้น รอบที่ 2 ให้ผลดังนี้

1. ค่าการดูดซับไอโอดีน 1385±11 มิลลิกรัมต่อกรัม
2. ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู 235±6 มิลลิกรัมต่อกรัม
3. ค่าพื้นที่ผิว BET 1172±49 ตารางเมตรต่อกรัม

5.5 ผลการกระตุ้นโดยผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเบดถ่านซารีในเวลาเดียวกัน

ในการทำการทดลองนี้เพื่อเปรียบเทียบผลกับการที่นำถ่านซารีมาดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วนำมากระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ การออกแบบการทดลองนี้ให้ผลของทั้งค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิวต่ำลงมาก ตามตารางที่ 4.5 เมื่อควบคุมเวลาในการกระตุ้นให้เป็น 30 นาที เหมือนกับการทดลองตามตารางที่ 4.3 แนวโน้มของผลการทดลองเหมือนเดิม คือเมื่อเริ่มทดลองยังไม่ให้พลังงานจากนั้นเริ่มให้พลังงานไมโครเวฟจนพลังงานเป็น 450 วัตต์ ค่าการดูดซับไอโอดีนยังสูงกว่าที่ระดับพลังงานอื่นๆ ผลการทดลองเป็นดังนี้ ในการดูดซับแล้วกระตุ้นค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 28.44 แต่เมื่อนำมาผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์พร้อมกับการกระตุ้นในเวลาเดียวกัน ค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.11 จะเห็นว่าค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจาก

1. เมื่อให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผ่านในหลอดทดลองรูปตัวยูภายในเครื่องไมโครเวฟ ขณะให้ความร้อนเกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคถ่านซารีออกมา
2. เมื่อพิจารณาจากรูปถ่ายจาก กล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป กำลังขยาย 2000 เท่า ที่บริเวณผิวของอนุภาคถ่านซารีมีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ เป็นสาเหตุที่ทำให้รูพรุนขนาดเล็กที่ใช้ในการดูดซับ

แก๊สลดลง ดังนั้นทั้งค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวมีค่าต่ำมาก และยังพบว่าค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงกว่ามากเนื่องจากดูดซับที่รูพรุนขนาดกลางที่มีมากกว่ารูพรุนขนาดเล็ก

3. ภาวะในการทดลองนี้จะแตกต่างจากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 เนื่องจากใช้เวลาในการกระตุ้นเพียง 30 นาที และทำการผ่านแก๊สแค่ 30 นาที แตกต่างจากการทดลองโดยตอนแรกให้ถ่านชาร์ดูดซับแก๊สนานถึง 7 ชั่วโมง ที่แล้วเมื่อนำมากระตุ้นเป็นเวลา 30 นาที จึงให้ผลการทดลองที่ดีกว่า ดังนั้นจากผลงานวิจัยครั้งนี้ควรหลีกเลี่ยงการทำการดูดซับแก๊สพร้อมกับการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ เนื่องจากผลที่ได้ไม่ดี ดังนี้

1. ค่าการดูดซับไอโอดีน 168 ± 3 มิลลิกรัมต่อกรัม
2. ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 191 ± 6 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.6 ผลการสร้างกราฟจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนกับค่าพื้นที่ผิว BET

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้พลังงานและเวลาในการกระตุ้นที่ภาวะต่างๆ เพื่อดูแนวโน้มว่าภาวะใดที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ จากนั้นจึงได้นำค่าการดูดซับไอโอดีนและค่าพื้นที่ผิว BET จากภาวะทั้งหมดที่ทดลองมาสร้างกราฟ ปรากฏว่าได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงที่มีค่า $R^2 = 0.9553$ และได้สมการเส้นตรง $Y = 0.7931X + 60.593$

โดยที่ X = ค่าพื้นที่ผิว BET (ตารางเมตรต่อกรัม)

Y = ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)

จากการสร้างความสัมพันธ์นี้จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าของการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นค่าของพื้นที่ผิว BET ก็เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับการใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟในการกระตุ้นถ่านจากกะลาปาล์มน้ำมัน

วราวุฒิ ประชาศิริสกุล(2541)	รังสรรค์ ละวรรณ(2542)	
วัตถุประสงค์ : กะลาปาล์มน้ำมัน ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ : เบนนิ่ง	วัตถุประสงค์ : กะลาปาล์มน้ำมัน ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ : เบนนิ่ง	
ภาวะในการกระตุ้น : อัตราการไหลแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 0.2 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น : 1.125 ยูนิต ปริมาณไฟฟ้าที่ต่อกรัมถ่านที่กระตุ้นได้เท่ากับ : 0.03 ยูนิตต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวถ่าน : 476 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน : 411 มิลลิกรัมต่อกรัม	ภาวะในการกระตุ้น : อัตราการไหลแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 0.2 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 30 นาที ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น : 0.675 ยูนิต ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ต่อกรัมถ่านที่กระตุ้นได้เท่ากับ : 0.03 ยูนิตต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน : 168 มิลลิเมตรต่อกรัม	ภาวะในการกระตุ้น : พลังงาน 450 วัตต์ เวลา 90 นาที โดยดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนเป็นเวลา 420 นาที ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น : 0.675 ยูนิต ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ต่อกรัมถ่านที่กระตุ้นได้เท่ากับ : 0.03 ยูนิตต่อกรัม ค่าพื้นที่ผิวถ่าน : 1172 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน : 1385 มิลลิกรัมต่อกรัม

การใช้พลังงานความร้อนจากไมโครเวฟจะช่วยลดเวลาลงอย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้ความร้อนแบบธรรมดา เพราะว่าการใช้ความร้อนแบบธรรมดาคงต้องใช้เวลาอีกมากเพื่อจะได้อุณหภูมิที่ต้องการ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลงานวิจัย

6.1.1 สมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ(กะลาปาล์มน้ำมัน)

- ปริมาณความชื้น(M) ร้อยละ 7.49±0.05
- ปริมาณเถ้า(A) ร้อยละ 6.55±0.01
- ปริมาณสารระเหย(VM) ร้อยละ 79.44±0.15
- ปริมาณคาร์บอนคงตัว(FC) ร้อยละ 4.12±0.21
- ความเป็นกรด-ด่าง 4.99

6.1.2 สมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ปริมาณความชื้น(M) ร้อยละ 1.83±0.03
- ปริมาณเถ้า(A) ร้อยละ 9.89±0.06
- ปริมาณสารระเหย(VM) ร้อยละ 18.87±0.14
- ปริมาณคาร์บอนคงตัว(FC) ร้อยละ 69.41±0.09
- ค่าพื้นที่ผิวBET 152±4 ตารางเมตรต่อกรัม

6.1.3 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ในการทดลองนี้คือ การใช้ขนาดอนุภาคเท่ากับ 1.18-2.36 มิลลิเมตร โดยการดูดซับด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1995 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 420 นาที แล้วกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที เมื่อทำซ้ำกันพบว่าในรอบที่ 2 ให้ผลของการดูดซับสูงที่สุดซึ่งได้สมบัติดังนี้

- ค่าการดูดซับไอโอดีน 1385±11 มิลลิกรัมต่อกรัม
- ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 235±6 มิลลิกรัมต่อกรัม
- ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.717 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ค่าพื้นที่ผิวBET 1172±49 ตารางเมตรต่อกรัม

ผลการดูดซับด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้อยู่ในภาวะสมดุลเป็นเวลา 420 นาที แล้วทำการกระตุ้นที่ระดับพลังงาน 450 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที เมื่อทำซ้ำกัน 4 รอบ พบว่าในรอบที่ 2 เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยเปลี่ยนภาวะในการทดลองคือ เมื่อทำการดูดซับถ่านชาร์ด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ให้เป็นกรดซัลฟูริกแทนซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย แล้วกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพราะจากการศึกษาของ Kong Y. And Cha C. Y., 1996 พบว่ากรดซัลฟูริกมีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ในรูปของจุดร้อนภายในโครงสร้างซึ่งจะเปลี่ยนเป็นรูพรุนขนาดเล็กได้ในภายหลัง
2. ควรมีการศึกษาผลของการกระตุ้นกะลาปาล์มน้ำมันด้วยสารเคมี เช่น $ZnCl_2$, H_3PO_4 , และ H_2SO_4 ร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากการใช้สารกระตุ้นเหล่านี้ สามารถทำได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากประมาณ 120-300 องศาเซลเซียส (Hassler, 1974)
3. ควรมีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้แก๊สดูดซับตัวอื่น มาเปรียบเทียบผลเช่น แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นแก๊สพิษเหลือทิ้งจากปฏิกิริยาการเผาไหม้เหมือนกันเพราะจากการศึกษาของ Cha C. Y., 1993 ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวิธีการและเครื่องปฏิกรณ์เดียวกัน ให้สมบัติทางโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นได้แตกต่างกัน เนื่องจากคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จะมีปฏิกิริยาที่เฉพาะเจาะจงกับสารบางตัวที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ต่อสมบัติทางโครงสร้างที่เปลี่ยนไป

6.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

1. เนื่องจากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้ในการดูดซับเข้มข้นสูง แต่ขณะทำการดูดซับ ในงานวิจัยนี้ต้องการความเข้มข้นต่ำเป็น พีพีเอ็ม ดังนั้นจึงต้องทำการลดความเข้มข้นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลง ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ในการดูดซับที่ออกแบบไว้ ปัญหาพบว่าบางครั้งเกิดการรั่วซึมของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่บริเวณข้อต่อทำให้แก๊สฟุ้งกระจายเป็นอันตรายต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิต และต้องมีการปรับวาล์วบ่อยครั้งเพื่อปรับให้ความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่ต้องการ จึงทำให้เกิดปัญหาคือเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊สจริงไม่ได้เป็นไปตามที่กำหนด
2. ไม่สามารถทำการวัดอุณหภูมิภายในอนุภาคถ่านชาร์ได้ เพราะภายในบริเวณสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟถ้ามีโลหะอยู่จะเกิดประกายไฟขึ้น จึงยากมากที่จะวัดอุณหภูมิที่แท้จริงขณะเกิดปฏิกิริยาภายในอนุภาคถ่านชาร์ จึงไม่สามารถติดตามผลขณะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง แต่การแก้ปัญหาทำได้โดยพิจารณาระดับพลังงานที่ใช้แทน
3. ในผลงานวิจัยขณะที่ทำการผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์พร้อมกับการกระตุ้นในเบดถ่านชาร์ในเวลาเดียวกันนั้น พบว่าพื้นที่ผิวส่วนใหญ่จะลดลงมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 420 นาที แล้วกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 30 นาที ที่ระดับพลังงานต่างๆ เนื่องจากเมื่อทำการผ่านแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์พร้อมกับการกระตุ้นเป็นเวลา 30 นาที จะไม่เกิดการดูดซับแต่จะดูดซึมเฉพาะที่ผิวถ่านเท่านั้น และเวลาที่ใช้นี้ไม่สูง ลักษณะของรูพรุนที่เกิดจึงมีขนาดใหญ่ เป็นเพียงทางผ่านของแก๊สเท่านั้น ไม่ใช่เป็นบริเวณที่จะเกิดการดูดซับแก๊สไว้ ดังนั้นเป็นผลทำให้พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ลดลง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- นิชชรี นิลนนท์. การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมัลชันยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- บุญชัย ตระกูลนหทัย. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- บุญพุกษ์ จาฎามระ. วิทยาศาสตร์น้ำรู้. กรุงเทพมหานคร: อักษรเจริญทัศน์, 2530.
- พรรณทวี ธรรมธราธาร. การดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยถ่านลอยอัดเม็ดในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก. กรรมวิธีแปรรูปอาหาร. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์, 2532.
- ภัทรา ปัญญาวัฒน์กิจ. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยกระตุ้นด้วยไอน้ำอิมัลชันยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2540.
- วรารุณี ประชาศิริกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- ศุลกากร, กรม. สถิติการนำเข้าและส่งออกของกรมศุลกากร. กรุงเทพมหานคร: กรมศุลกากร, 2530-2542.

ภาษาอังกฤษ

- American Standard of Testing Material. Standard test method for Surface area of activated carbon ASTM C 819-77. (1996): 552-557.
- American Standard of Testing Material: Standard test method for Chemical Analysis of Wood Charcoal ASTM D 1762-84. (1996): 281-282.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for Apparent Density of Activated Carbon ASTM D 2854 - 89. (1996): 491-493.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for total ash content of activated carbon ASTM D 2866 - 94. (1996): 498-499.

- American Standard of Testing Material. Standard test method for moisture in activated carbon ASTM D 2867 -95. (1996): 500-502.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for pH of activated carbon ASTM D 3838 - 80. (1996): 531-532.
- American Standard of Testing Material. Standard test method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Sample ASTM D 5832-95. (1996): 570-571.
- American Water Works Association. Standard test for determination of iodine number of granular Activated Carbon AWWA B604-74. (1974): 674-679.
- Anthony, A. Lizzo* and Joseph, A. DeBarr*. Effect of surface area and chemisorbed oxygen on the SO₂ adsorption capacity of activated char. Fuel 75 (1996): 1515-1522.
- Anthony, A. Lizzo*., Joseph, A. DeBarr*.and Carl W. Kruse. Production of Activated Char from Illinois Coal for Flue Gas Cleanup. Energy & Fuels 11 (1997): 250-259.
- Bates, Andrew. The interaction of coal with microwave energy. Proc. First Australian Symposium on Microwave Power Applications Feb. 15-17, (1989): 84-115.
- Berkowitz, N. The Chemistry of Coal. New York: Elsevier, 1985.
- Cha, C. Y. Microwave induced Reactions of SO₂ and NO_x Decomposition in the Char-bed. Res. Chem. Intermed. 20 (1994): 13-28.
- Cha, C. Y., Kim, B. K., Lumpkin, R. E. and Quinga, E. Electromagnetic Enhancement of Chemical Reactions (Devolatilization of Char and Coal). Fuel Science and Technology International 11 (1993): 1,175-1,202.
- Cha, C. Y. and Kong, Y. Enhancement of NO_x Adsorption capacity and rate of Char by Microwaves. Carbon 33 (1995): 1,141-1,146.
- Challa, S., Little, W. E. and Cha, C. Y. Measurement of the Dielectric Properties of Char at 2.45 GHz. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 29 (1994): 131-137.
- Deng, S. G. and Lin, Y. S. Microwave Heating synthesis of supported sorbents. Chemical Engineering Science 52 (1997): 1,563-1,575.
- Ergun, S. and Mentser M. Reactions of Carbon with Carbon dioxide and Steam. Chemistry and Physics of Carbon: A Series of Advances 21 (1965): 204-240.

- Gergova, K., Petrov, N., Butuzova, L., Minkova, V. and Isaeva, L. Evolution of the Active Surface of Carbons Produced from Various Raw Materials by Steam Pyrolysis/Activation. J.Chem.Tech. Biotechnol. 58 (1993): 321-330.
- Gergova, K., Petrov, N. and Minkova, V. A comparison of adsorption characteristics of various activated carbons. J.Chem.Tech.Biotechnol. 56 (1993): 77-82.
- Gonzalez-Serrano, E., Cordero, T., Rodriguez-Mirasol, J. and Rodriguez, J. J. Development of Porosity upon Chemical Activation of Kraft Lignin with $ZnCl_2$. Ind. Eng. Chem. Res. 36(1997): 4,832-4,838.
- Hassler, John W. . Purification with Activated Carbon: Industrial Commercial Environmental. 2nd ed. New York: Chemical Publishing., 1974.
- Hsisheng Teng, Jui-an Ho, Yung-Fu Hsu, and Chien-To, Hsieh. Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coals with CO_2 Activated. 1. Effects of Oxygen Content in Raw Coals. Ind. Eng. Chem. Res. 35 (1996): 4,043-4,049.
- Japanese Industrail Standard. Standard test method for Activated Carbon JIS K 1474-1991. (1991): 1-13.
- Jankowska Helena, Andrzej Swiatkowski and Jerzy Choma. Active Carbon. 1st ed. English: Ellis Horwood limited, 1991.
- Jesch, L.R. and McLaughlin, H. R. Dielectric measurement of oil shale as functions on temperature and frequency. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2 (1984): 99-105.
- Kirubakaran, C. John, Krishnaiah, K., and Seshadri, S. K. Experimental Study of the Production of Activated Carbon from Coconut Shells in Fluidized Bed Reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 30 (1991): 2,411-2,416.
- Kong, Y. and Cha, C. Y. NO_x Abatement with Carbon Adsorbents and Microwave Energy. Energy & Fuels 9 (1995): 971-975.
- Kong, Y. and Cha, C. Y. Microwave-induced regeneration of NO_x -saturated char. Energy&Fuel 10 (1996): 1,245-1,249.
- Kong, Y. and Cha, C. Y. Reduction of NO_x Adsorbed on Char with Microwave energy. Carbon 34 (1996): 1,035-1,040.
- Loren, M. Norman, and Cha, C. Y. Production of Activated Carbon from Coal Chars Using Microwave energy. Chem.Eng.Comm. 140 (1996): 87-110.

- Mattson, J. S. and Mark, H. B. Activated Carbon Surface Chemistry and Adsorption from solution. New York: Marcel Dekker, Inc. ,1971.
- Mohd Zobir Hussein, Zulkarnain Zainal, Ramli Ibrahim, and Khor K. Kheong. The Preparation of Activated Carbons from Chips of Oil Palm Trunk Catalyzed by $ZnCl_2/CO_2$: Surface Area and Porosity Studies. J.Chem.Tech.Biotechnol. 64 (1995): 35-40.
- Parisa, M. M., Mythili, R., William, R. M., and Paul, B. Rapid microwave pyrolysis of coal. Methodology and examination of the residual and volatile phases. Fuel 74 (1995): 20-27.
- Potter, Norman N. Microwave Heating in Food Science. 3rd ed. (n.p.): Avi Publishing Co., 1978.
- Rist, Lance, P. , and Douglas P. Harrison. Surface Area and Pore Development during Lignite Activation. Fuel 64 (1985): 291-296.
- Rodriguez-Reinoso, F. and Linares-Solano. Microporous structure of Activated Carbon as revealed by Adsorption method. Chemistry and Physics of Carbon: A Series of Advances. 21 (1965): 1-37.
- Steven Bodman, Parisa Monsef-Mirzai, Harmindu Manak and Willium, R McWhinnie. Does microwave heating have a role in functional group reactions of coal. Fuel. 70 (1997): 1,315-1,318.
- Suzuki, M. Adsorption Engineering. Chemical Engineering Monographs Vol.25. Tokyo: Kodansha, 1990.
- Zhang, D. X., Yu, A. M., and Jin, Q. H. Studies on microwave-carbon reduction method for the treatment of nitric oxide. Chemical Journal of Chinese Universities-Chinese 18 (1997): 1,245-1,249.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของกะลาปาล์มน้ำมันและถ่านกะลาปาล์มน้ำมัน

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ (Proximate analysis)

วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของกะลาปาล์มน้ำมันและถ่านกะลาปาล์มน้ำมัน ตามวิธี ASTM D 1762-84 โดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศ และคำนวณเพื่อรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) ยกเว้นค่าความชื้นที่รายงานเทียบน้ำหนักของสารที่แห้งในอากาศ (Air dry basis) วิธีวิเคราะห์ครอบคลุมการ วิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย และแก็บ รายละเอียดการวิเคราะห์ มีดังต่อไปนี้

การเตรียมสารตัวอย่าง

- บดตัวอย่างอย่างรวดเร็วและคัดขนาดของตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด No.20 mesh (850 μm) โดยการบดต้องไม่ใช้เวลานานนักเพราะอาจทำให้เกิดความร้อนขึ้นทำให้มีการสูญเสียของความชื้นและสารระเหยได้ นอกจากนั้นยังทำให้ตัวอย่างมีขนาดเล็กลงซึ่งถ้ามีขนาดเล็กมาก ๆ (ต่ำกว่า 150 μm) จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้เนื่องจากอาจมีการสูญเสียไปจากถ้วยกระเบื้องในระหว่างการไล่สารระเหย

- นำตัวอย่างที่บดได้มาผสมรวมกันและเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

1. วิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture, M)

- เฝาด้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัมให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา บันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างก่อนอบแห้ง รวมน้ำหนักของขวดชั่งและฝา (A)

- นำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังอบแห้ง รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (B)

- คำนวณค่าความชื้นดังนี้

- ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ($\text{Moisture}\% = [(A-B)/A]*100$)

2. วิธีหาปริมาณสารระเหย (Volatile matter, VM)

- เผาเตาเผาไว้ที่ 950 องศาเซลเซียส ทำการให้ความร้อนกับถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างที่ใช้ในการหาความชื้นในขั้นตอนที่ 1. ดังนี้

วางไว้หน้าเตาเผาเป็นเวลา 2 นาที (อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำเข้าเตาเผาเป็นเวลา 6 นาที

- นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังอบเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (B)
- คำนวณหาค่าสารระเหยดังนี้
- สารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Volatile matter % = $[(B-C)/B]*100$)

3. ค่าเถ้า (Ash content, A)

- ทำการให้ความร้อนกับถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างที่ใช้ในการหาสารระเหยในขั้นตอนที่ 2 ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งและบันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังอบเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (C)
- คำนวณหาค่าเถ้าดังนี้
- ค่าเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Ash % = $[D/B]*100$)

4. ค่าถ่านคงตัว (Fixed carbon, FC)

$$FC \text{ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = 100 - A - VM - M$$

วิธีวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

วิธีวิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture.M)

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2867 -95 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด No.20 mesh (850 μ m)
- ชั่งตัวอย่างถ่าน 1 กรัมให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่4 ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด ที่อบแห้งและรู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้ว

- อบแห้งตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 145-155 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และคำนวณความชื้นได้จากสูตร

$$\text{ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = [(C-D)/(C-B)]*100$$

โดยที่ C คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (กรัม)

D คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่าน (กรัม)

B คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่านหลังอบแห้ง (กรัม)

วิธีวิเคราะห์ค่าสารระเหย(Volatile Matter.VM)

วิเคราะห์ปริมาณสารระเหยในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 5832-95 มีรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด No.20 mesh (850- μ m)
- ชั่งตัวอย่างถ่าน 1 กรัมให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่4 ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด ที่อบแห้งและรู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้ว

- วางถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่บรรจุถ่านในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที

- นำออกจากเตาเผาและทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นชั่งน้ำหนัก และคำนวณร้อยละสารระเหยได้จากสูตร

$$\text{ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปเท่ากับ } [(C-D)/(C-B)]*100$$

โดยที่ C คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่าน (กรัม)

D คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักถ่านหลังให้ความร้อน (กรัม)

B คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (กรัม)

สารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก) = ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไป-ร้อยละความชื้น

วิธีวิเคราะห์ค่าแฉา (Ash,A)

วิเคราะห์ปริมาณแฉาในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2866-94 โดยวิเคราะห์ และรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด No.20 mesh (850 μ m)
- เเผาด้วยกระบี่อบความร้อน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่ง ด้วยกระบี่อบความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ (X_0)
- ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งที่ 150 ± 5 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง ใส่ในถ้วยกระบี่อบความร้อน ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงเทคนิคตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ รวมน้ำหนักของถ้วยกระบี่อบความร้อน (X_1)

- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 ± 25 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ใช้เวลาประมาณ 3-16 ชั่วโมง

- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ค่อย ๆ เปิดฝานหม้อดูดความชื้น เพื่อป้องกันไม่ให้แฉาที่ได้ฟุ้งกระจาย ชั่งบันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระบี่อบความร้อน (X_2)

- คำนวณค่าแฉาดังนี้

$$\text{แฉา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = [(X_2 - X_0) / (X_1 - X_0)] * 100$$

วิธีวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density ,BD.)

วิเคราะห์ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2854-89 รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- อบอุ่นตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 -120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งน้ำหนักกระบอกตวงที่มีความจุ 10 มิลลิเมตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่

2 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม) บันทึกผล (X_0)

- ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวง จนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่

- ถ้าระดับที่คงที่นั้นไม่เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ให้ตัดตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวง แล้วกระแทกกันกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิเมตร

- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกผล (X_1)

- คำนวณความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จาก

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = (X_1 - X_0) / 10$$

วิธีวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านกัมมันต์ (pH)

วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 3838-80 รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังนี้

- ชั่งตัวอย่างถ่านที่อบแห้ง 10.00 กรัม ใส่ในขวดกลั่น
- ใส่น้ำเดือดลงในขวดกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้ม Reflux เป็นเวลา 15 นาที
- กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 1 ทิ้งสารละลายให้เย็น แล้วนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วย เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

- กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง ล้างปิเปตที่ใช้ดูดสารละลายด้วยสารละลายที่กรองได้ประมาณ 20 มิลลิลิตร
- ผสมสารละลายที่ได้ให้เข้ากัน ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตรด้วยปิเปต
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์จนถึงจุดยุติ (สารละลายไม่มีสี) บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร (S)
- คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีนได้จาก (C) ได้จาก

$$\text{Iodine Number} = (X/M) \cdot D$$

โดยที่

$$X/M = [A - (2.2B \cdot S)] / W$$

$$C = (N_2 \cdot S) / 50$$

$$X/M = \text{มิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ}$$

$$N_1 = \text{ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต}$$

$$N_2 = \text{ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน}$$

$$A = N_1 \cdot 12693.0$$

$$B = N_2 \cdot 126.93$$

$$C = \text{ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้}$$

$$D = \text{แฟคเตอร์แก้ไข}$$

$$W = \text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้}$$

$$S = \text{ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้}$$

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (N_1)

ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 กรัมละลายให้เข้ากัน จากนั้นใส่สารละลายกรดไฮดรอกลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 5 ลงไป 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต และเมื่อสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อนให้ใส่สารละลายน้ำแบ่งลงไปเป็นตัวบ่งชี้จุดยุติ 2-3 หยด จุดยุติคือจุดที่สารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นใสไม่มีสี คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายได้จากสูตร

$$N_1 = (P \cdot R) / S$$

โดยที่ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดต (นอร์มัล)

R = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไอโอดีน (N_2)

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต และเมื่อสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อนให้ใส่สารละลายน้ำแป้งลงไปเป็นตัวบ่งชี้จุดยุติ 2-3 หยด จุดยุติคือจุดที่สารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นใสไม่มีสี คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายได้จากสูตร

$$N_2 = (S \cdot N_1) / I$$

โดยที่ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)

S = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

I = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

Correction Factor D for Iodine Number Test

Residual Filtrate Normality C	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.0080	1.1625	1.1613	1.1600	1.1575	1.1550	1.1538	1.1513	1.1500	1.1475	1.1463
0.0090	1.1438	1.1425	1.1400	1.1375	1.1363	1.1350	1.1325	1.1300	1.1268	1.1275
0.0100	1.1250	1.1238	1.1225	1.1213	1.1200	1.1175	1.1163	1.1150	1.1138	1.1113
0.0110	1.1100	1.1088	1.1075	1.1063	1.038	1.1025	1.1000	1.0988	1.0975	1.0963
0.0120	1.0950	1.0938	1.0925	1.0900	1.0888	1.0875	1.0863	1.0850	1.0838	1.0825
0.0130	1.0800	1.0788	1.0775	1.0763	1.0750	1.0738	1.0725	1.0713	1.0700	1.0688
0.0140	1.0675	1.0663	1.0650	1.0625	1.0613	1.0600	1.0588	1.0575	1.0563	1.0550
0.0150	1.0538	1.0525	1.0513	1.500	1.0488	1.0475	1.0463	1.0450	1.0438	1.0425
0.0160	1.0413	1.0400	1.0388	1.0375	1.0375	1.0363	1.0350	1.0333	1.0325	1.0313
0.0170	1.0300	1.0288	1.0275	1.0263	1.0250	1.0245	1.0238	1.0225	1.0208	1.0200
0.0180	1.0200	1.0188	1.0175	1.0163	1.0150	1.0144	1.0138	1.0125	1.0125	1.0113
0.0190	1.0100	1.0088	1.0075	1.0075	1.0063	1.0050	1.0050	1.0038	1.0025	1.0025
0.0200	1.0013	1.000	1.000	0.9988	0.9975	0.9975	0.9963	0.9950	0.9950	0.9938
0.0210	0.9938	0.9925	0.9925	0.9913	0.9900	0.9900	0.9888	0.9875	0.9875	0.9863
0.0220	0.9863	0.9850	0.9850	0.9838	0.9825	0.9825	0.9813	0.9813	0.9800	0.9788
0.0230	0.9788	0.9775	0.9775	0.9763	0.9763	0.9750	0.9750	0.9738	0.9738	0.9725
0.0240	0.9725	0.9708	0.9700	0.9700	0.9688	0.9688	0.9675	0.9675	0.9663	0.9663
0.0250	0.9650	0.9650	0.9638	0.9638	0.9625	0.9625	0.9613	0.9613	0.9606	0.9600
0.0260	0.9600	0.9588	0.9588	0.9575	0.9575	0.9563	0.9563	0.9550	0.9550	0.9538
0.0270	0.9538	0.9525	0.9525	0.9519	0.9513	0.9513	0.9506	0.9500	0.9500	0.9488
0.0280	0.9488	0.9475	0.9475	0.9463	0.9463	0.9463	0.9450	0.9450	0.9438	0.9438
0.0290	0.9425	0.9425	0.9425	0.9413	0.9413	0.9400	0.9400	0.9394	0.9388	0.9388
0.0300	0.9375	0.9375	0.9375	0.9363	0.9363	0.9363	0.9363	0.9350	0.9350	0.9346
0.0310	0.9333	0.9333	0.9325	0.9325	0.9325	0.9319	0.9313	0.9213	0.9300	0.9300
0.0320	0.9300	0.9294	0.9288	0.9288	0.9280	0.9275	0.9275	0.9275	0.9270	0.9270
0.0330	0.9263	0.9263	0.9257	0.9250	0.9250					

ภาคผนวก ค.

วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมติว่าเป็นสารพิษในน้ำตามวิธี AWWA B 604-74 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังนี้

สารเคมีที่ใช้

- สารละลายไอโอดีนมาตรฐานเข้มข้น 0.2000 นอร์มัล ละลาย 12.7 กรัม ของไอโอดีน (เกรดงานวิเคราะห์) และ 19.1 กรัม ของโพแทสเซียมไอโอไดด์ ด้วยน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลายที่ได้ในขวดสีชา
- สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เข้มข้น 0.1000 นอร์มัล
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร เทใส่น้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
- น้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งแป้ง 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนักเป็น 10 กรัม น้ำแข็งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น

วิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 325 mesh
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด โดยน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ประมาณ 1.000 ถึง 1.600 กรัม
- ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 จำนวน 10 มิลลิลิตร (ตวงด้วยปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบา ๆ เพื่อให้ผลถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลายเพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
- ใส่สารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 30 วินาที

วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในน้ำตามวิธี JIS K 1474-1991 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้
เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV/VIS Spectrophotometer Jasco Model 7800
2. เครื่องเขย่าตามแนวราบ

วิธีเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- อบโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์นาน 20 นาที

- ชั่งมา 9.08 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ A

- อบไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ถึง 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์ นาน 20 นาที

- ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ B

- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 มิลลิลิตรรวมให้เข้ากันจะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

2. สารละลายเมทิลีนบลู

2.1 การเตรียม อบสารเมทิลีนบลู ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์ นาน 20 นาที ชั่งมา 1.2000 กรัม ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1 จนมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

2.2 การสร้างกราฟมาตรฐาน ดูดสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้มา 1.0 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร จากนั้นดูดสารละลายที่เตรียมได้มา 0.5 มิลลิลิตร 1 มิลลิลิตร 2 มิลลิลิตร 5 มิลลิลิตร และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.48 มิลลิกรัมต่อลิตร 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูด

กลืนแสง แล้วนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบคือความเข้มข้นในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร แกนตั้งฉากคือค่าการดูดกลืนแสง จะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

วิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 60 เมช (0.246 มิลลิเมตร)
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 300 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด
- ใส่สารละลายเมทธิลีนบลู 25 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วนำไปเขย่า 30 นาที
- ดูดสารละลายมา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร จากนั้นดูดสารละลายที่ได้มา 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ จนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในกรณีนี้เป็นความเข้มข้นของเมทธิลีนบลูที่ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร
- นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ เป็นตัวเปรียบเทียบ
- ค่าเมทธิลีนบลู (Methylene blue adsorption, MB) คำนวณได้จาก

$$Q = ((1200-C)*0.025)/S$$
 โดย C = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสารละลาย เมทธิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 S = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
 1200 = ความเข้มข้นของสารละลาย เมทธิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 Q = จำนวนค่าเมทธิลีนที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

2.3 การวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู

นำค่าการดูดซับเมทธิลีนที่ได้จากการคำนวณข้างต้น (Q) และค่าความเข้มข้นของเมทธิลีนบลูที่เหลือ (C) อยู่มาสร้างกราฟแบบ ลอกรีท จะได้เส้นไอโซเทอมของการดูดซับ จากเส้นไอโซเทอมจะได้ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู โดยลากจุดจากความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปตัดเส้นไอโซเทอม แล้วลากไป หาค่าการดูดซับ

ภาคผนวก จ.

การหาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

เครื่องมือที่ใช้

- ชุดเครื่องมือชั่งตัวอย่างแก๊ส

สารเคมี

- น้ำกลั่น
- 80 % ไฮโดรฟรอนอล โดยเติมไฮโดรฟรอนอล 800 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร
- 6 % ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเจือจางด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 % ด้วยน้ำกลั่นในอัตรา 1 ต่อ 4
- 0.01 นอร์มอลแบเรียมคลอไรด์ โดยละลาย 1.2216 กรัม แบเรียมคลอไรด์ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายไฮโดรฟรอนอล

Thorin indicator โดยละลาย 0.2 กรัม Thorin indicator ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

1. แบ่งสารละลาย 6 % H_2O_2 ที่ทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วมา 5 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย 20 % มิลลิลิตร
3. หยด Thorin indicator 6 หยด
4. ไตเตรตด้วยสารละลาย 0.01 alcoholic barium chloride
5. สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีชมพู
6. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$(\text{SO}_2) = \frac{(\text{ml. BaCl}_2)(\text{N. BaCl}_2)(0.032)(\text{Sample volume})}{\text{Aqout volume}}$$

เมื่อ	ml. BaCl ₂	=	ปริมาตรสารละลาย BaCl ₂ ที่ไตรเตรตได้(มิลลิตร)
	N. BaCl ₂	=	ความเข้มข้นสารละลาย BaCl ₂ ที่ใช้
	0.032	=	ค่าคงที่(กรัม.ลิตร/โมล/มิลลิตร)
	Sample volume	=	ปริมาตรของสารละลาย H ₂ O ₂ ที่ใช้ในการจับแก๊ส(มิลลิตร)
	Aqout volume	=	ปริมาตรของสารละลาย H ₂ O ₂ ที่แบ่งมาไตรเตรต(มิลลิตร)
	Flow rate	=	อัตราการไหลของแก๊สผ่านสารดูดซึมเข้าหลอดแก้วพักตัวอย่าง(ลิตรต่อนาที)

และสูตรที่ใช้เปลี่ยนในการคำนวณ

$$\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} = \text{ppm} \cdot \frac{\text{MW}}{0.0245}$$

ประวัติผู้เขียน

นายรังสรรค์ ละวรรณ เกิดวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดลำพูน สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต เคมีเทคนิค ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540

