



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยย่อยที่ 1

“การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยเพื่อดูดซับโลหะหนัก”

โดย

ผศ.ดร. ศิริกาญจนา ทองมี และคณะ

ตุลาคม 2559

สัญญาเลขที่ RDG5850020

โครงการวิจัยย่อยที่ 1

“การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเพื่อดูดซับโลหะหนัก”

โดย

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. ผศ.ดร. ศิริกาญจนา ทองมี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 2. รศ. ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 3. ดร. สุพรรณิ จันทร์ภิรมย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการ: การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเพื่อดูดซับโลหะหนัก

เป้าหมาย

งานวิจัยส่วนใหญ่ ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด ขานอ้อย กะลาปาล์ม เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นส่วนใหญ่เป็นวิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง จึงเหมาะที่จะนำไปดูดกลืน ดูดสี หรือใช้ในกระบวนการแยกสาร (Separation processes) ตัวอย่าง อุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำตาล การทำน้ำให้บริสุทธิ์ อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม และอุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น

จากประโยชน์ของถ่านกัมมันต์จะเห็นว่า มีการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลคือ ขานอ้อย (Bagasse) ซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลชนิดหนึ่งที่เหลือจากการหีบนำอ้อยออกไปแล้ว และเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย ดังนั้น งานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาหาเงื่อนไขในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีต้นทุนต่ำ อีกทั้งยังสามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากขานอ้อยมากำจัดสีและกลิ่นในโรงงานน้ำตาล เพื่อช่วยบำบัดน้ำเสียในโรงงานด้วย

วิธีการ

ศึกษาหาอุณหภูมิคาร์บอนเซชัน ($400 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) ที่เหมาะสมในการนำขานอ้อยมาทำเป็นถ่านชาร์ จากนั้น นำถ่านชาร์ที่ได้มาศึกษาหาโครงสร้างทางสัณฐาน โดยใช้เครื่อง SEM และศึกษาหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (Surface area analysis, BET) นอกจากนี้ ศึกษาหาปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมทั้งของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectroscopy (AAS)

เมื่อได้ถ่านชาร์แล้วจึงนำถ่านชาร์มาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) ในงานวิจัยนี้ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการกระตุ้นถ่านชาร์เพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นคือ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 120 นาที จากนั้น จึงนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาศึกษาหาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมเช่นเดียวกับถ่านชาร์

ผลที่ได้จากงานวิจัย

ผลจากงานวิจัยแสดงถึงข้อมูลที่ได้ในการผลิตถ่านชาร์ด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชันเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านชาร์ ($400 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) อีกทั้งทราบถึงว่า ถ่านชาร์ชนิดไหนที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับ

โลหะโครเมียมได้ดี และทราบถึงพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของถ่านชาร์ในส่วน of ถ่านกัมมันต์นั้นได้ทราบถึงอุณหภูมิและเวลา ที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขาน้อย อีกทั้งยังทราบถึงพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และผลการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านกัมมันต์ ในงานวิจัยนี้ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากขาน้อยเป็นจำนวน 5 Kg.

โครงการการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเพื่อดูดซับโลหะหนัก

ศิริกาญญา ทองมี¹ ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ² สุพรรณิ จันทร์ภิรมย์³

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ขานอ้อยเป็นตัวอย่างหนึ่งของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมาก ซึ่งสามารถนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ได้โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยในช่วงแรกจะนำขานอ้อยมาอัดเป็นแท่งขนาดเล็กเพื่อให้ขานอ้อยอัดแท่งยังคงรูปร่างอยู่ได้หลังจากถูกกระตุ้นแล้ว ซึ่งถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยจะเตรียมโดยการ นำขานอ้อยอัดแท่งมาทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (400 – 600 °C) ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้น นำถ่านชาร์มาทำการกระตุ้นภายใต้บรรยากาศก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อได้ถ่านกัมมันต์แล้ว นำมาศึกษาหาโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีนอกจากนี้ ศึกษาการดูดซับโลหะโครเมียมจากสารละลายโครเมียมออกไซด์ โดยศึกษาหาค่า pH เวลาที่ใช้ในการดูดซับ และความเข้มข้นของโครเมียม ที่เหมาะสม ผลจากการทดลองพบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะโครเมียมมีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโครเมียมได้สูงที่สุด และค่าพื้นที่ผิวที่ดีที่สุดของถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 589.73 m²/g

Abstract

Sugarcane Bagasse (SB) is an example of agricultural wastes being generated in large quantities that can be converted into activated carbon. Activated carbon composed of a mixture of SB was prepared using the physical activation method. Initially, the SB raw materials were processed into rods to maintain a shape during activation. The activated carbons were prepared by carbonizing the raw fiber rods at different temperatures (400-600°C) under a nitrogen atmosphere for 1 hour. This was followed by activation using CO₂ atmosphere as a gasifying agent at 900 °C for 2 hours. Physical and chemical characterization of the prepared activated carbons was investigated. The adsorption of chromium VI from aqueous solution on SB activated carbon was performed. The adsorption process parameter pH, agitation time and adsorbent dose were optimized. The optimum efficiency showed that the chromium VI up take being attained at pH = 2. The best adsorption data was activated carbon which was carbonizing at 400°C. The highest surface area of 589.73 m²/g was achieved for activated carbon that was carbonizing at 600 °C.

สารบัญ

หน้าที่

บทสรุปผู้บริหาร	
บทคัดย่อ (ไทย-อังกฤษ)	
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ชานอ้อย	4
2.1.1 เซลลูโลส	5
2.1.2 เฮมิเซลลูโลส	6
2.1.3 ลิกนิน	6
2.2 ถ่านกัมมันต์	8
2.2.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์	8
2.2.2 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์	9
2.2.3 การผลิตถ่านกัมมันต์	12
2.2.3.1 การเผาให้เป็นถ่าน	13
2.2.3.2 การกระตุ้น	14
2.2.3.3 การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Stream Activation)	15
2.2.3.4 การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	16
2.2.3.5 การกระตุ้นด้วยสารประกอบเคมี	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
2.2.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์	19
2.4.4.1 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง	19
2.4.4.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน	19
2.4.4.3 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ	19
2.2.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์	20
2.3 กระบวนการการดูดซับ	21
2.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)	22
2.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)	22
2.3.3 กลไกการดูดซับ	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	24
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	25
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์	25
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	25
3.2 วิธีการทดลอง	27
3.2.1 การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของขานอ้อย	28
3.2.2 การเตรียมขานอ้อย การเตรียมถ่านชาร์ และการนำไปวิเคราะห์ผล	28
3.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์	33
3.2.4 การกระตุ้นถ่านชาร์เพื่อเป็นถ่านกัมมันต์	34
3.2.5 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์	35
3.2.6 การวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	39
4.1 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของขานอ้อยด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyser (TGA)	39
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ	41
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์	43
4.4 ผลการหาพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน	44
4.5 ผลการวิเคราะห์การดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์	45
4.6 ผลของระยะเวลาและความเข้มข้นที่ต้องการทดสอบการดูดซับโครเมียม (VI)	46
4.7 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	48
4.8 ผลของการทำถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)	49
4.9 ผลของการหาพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของกัมมันต์ (Activated Carbon)	53
4.10 ผลการวิเคราะห์การดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์	54
 บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	 59
บรรณานุกรม	66

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของซานอ้อย	4
ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของซานอ้อย	5
ตารางที่ 3 สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์	20
ตารางที่ 4 แสดงปริมาณธาตุต่างๆ และ Atomic percent ของถ่านชาร์ซานอ้อยที่ได้จากการเผา ที่อุณหภูมิ 400 - 600 °C	43
ตารางที่ 5 แสดงค่าขนาดของ Pore และพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ซานอ้อยทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	44
ตารางที่ 6 ผลจากการทำ Boehm's titration เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน	49
ตารางที่ 7 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
ตารางที่ 8 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ระยะเวลาต่างๆ	51
ตารางที่ 9 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ	52
ตารางที่ 10 สัญลักษณ์ที่ใช้ของถ่านกัมมันต์ซานอ้อย	53
ตารางที่ 11 แสดงค่าขนาดของ Pore และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ซานอ้อย	53
ตารางที่ 12 ค่าคงที่ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ในการดูดซับโครเมียมของ ถ่านกัมมันต์จากซานอ้อยที่เตรียมจากถ่านชาร์เริ่มต้นต่างอุณหภูมิกัน	58

สารบัญภาพ

หน้าที่

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน	7
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์ซึ่งในโครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้น	9
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างรูพรุนในถ่านกัมมันต์	10
ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงคาร์บอนอะตอมของถ่านชาร์ที่แต่ละอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน	11
ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์	12
ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์	13
ภาพที่ 2.7 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์ ฐานความรู้การจำกัดกลืน กรมการควบคุมมลพิษ	23
ภาพที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
ภาพที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน	26
ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณการดูดซับโลหะหนัก	26
ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนในการดำเนินการงานการผลิตถ่านกัมมันต์	27
ภาพที่ 3.5 ชานอ้อยอัดเป็นแท่งสำหรับการนำไปเผาเป็นถ่านชาร์	28
ภาพที่ 3.6 เตาเผาแบบปิด	29
ภาพที่ 3.7 ถ่านชาร์ชานอ้อยที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C, 500 °C และ 600 °C เป็นเวลา 60 นาที	29
ภาพที่ 3.8 การเตรียมสารละลายโครเมียม	30
ภาพที่ 3.9 การกวนถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ ที่แช่สารละลายโครเมียม	31
ภาพที่ 3.10 การกรองถ่านออกจากสารละลายโครเมียมด้วยเครื่องกรองสารระบบสุญญากาศ	31
ภาพที่ 3.11 การอบถ่านชาร์ชานอ้อยในเตาอบถ่านชาร์ในเตาอบสาร	32
ภาพที่ 3.12 ถ่านกัมมันต์ผสมกรดกัดทอง	32
ภาพที่ 3.13 ถ่านชาร์ใส่ในเตาเผา Tube furnace เพื่อกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ	34
ภาพที่ 3.14 ถ่านกัมมันต์ชานอ้อยหลังจากถูกกระตุ้นที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	35
ภาพที่ 3.15 งานวิจัยอ้อยและน้ำตาล เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2015	37
ภาพที่ 3.16 ผลผลิตถ่านกัมมันต์ชานอ้อยที่ได้จากการทดลอง	38
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงผลการการสลายตัวทางความร้อนของชานอ้อยโดย (a) การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (b) การเปลี่ยนแปลงของพลังงาน และ (c) อัตราการลดลงของน้ำหนักตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้าที่

ภาพที่ 4.2 ภาพ SEM ของถ่านชาร์ซันอ้อย ทำการเผาในสภาวะอับอากาศหรือคาร์บอนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ: (a) และ (b) 400 °C, (c) และ (d) 500 °C และ (e) และ (f) 600 °C เป็นเวลา 60 นาที	42
ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมของถ่านชาร์ซันอ้อยที่ได้จากการทำ EDX	43
ภาพที่ 4.4 ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะโครเมียม	45
ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 400 - 600 °C	46
ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.2 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	47
ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.6 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	48
ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 1 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	48
ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.2 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	54
ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.6 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	55
ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 1.0 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	55
ภาพที่ 4.12 ไอโซเทิร์มการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากซันอ้อยที่เตรียมจากถ่านชาร์เริ่มต้นต่างอุณหภูมิกัน ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม 0.2 - 1.0 Molar โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง AC 400, AC 500 และ AC 600 และสมการแลงเมียร์	57
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของไอโซเทิร์มตามสมการแลงเมียร์ของการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากซันอ้อยที่เตรียมจากถ่านชาร์เริ่มต้นต่างอุณหภูมิกัน ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายโครเมียม 0.2 - 1.0 Molar	57

บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทย ส่งผลให้เกิดการเพิ่มจำนวนโรงงาน อุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ขึ้นมากมาย น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ เพราะสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ ที่ปล่อยลงมานั้นมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต น้ำเสียเป็นมลพิษอย่างหนึ่งที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ โลหะหนักเป็นสารพิษหลักที่ปนเปื้อนอยู่ อันได้แก่ แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป ถ้าไม่มีการกำจัดที่ถูกต้อง อาจมีการรั่วไหลไปสู่ดินและแม่น้ำลำคลอง ไปสู่วงจรอาหารและต่อไปยังคน ก่อให้เกิดอันตรายต่อคนและสัตว์น้ำได้ ดังนั้น กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้ประกาศควบคุมกำหนดค่ามาตรฐานของปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักและสารอันตรายอื่นๆ ไว้ ดังนั้น จึงได้มีการนำเอาตัวดูดซับต่างๆ มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ เช่น ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ เรซิน เป็นต้น

ในที่นี้ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดหรือกำจัดมลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยอาศัยการดูดซับ ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความแตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง โดยทั่วไปแล้ว ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และวิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ตัวอย่างของวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ถ่านหิน ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง ชานอ้อย ชัง ข้าวโพด กะลามะพร้าว เป็นต้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง จึงเหมาะที่จะนำไปดูดกลืน ดูดสี หรือใช้ในกระบวนการแยกสาร (Separation processes) ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำตาล การทำน้ำให้บริสุทธิ์ อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม และอุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น

จากสถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย พบว่าในแต่ละปีมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในปริมาณสูง โดยในปี พ.ศ.2545 มีปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์ทั้งสิ้น 3,120 ตัน คิดเป็นมูลค่า สูงถึง 411,882,682 ล้านบาท (กรมศุลกากร (2545)) ทั้งนี้เนื่อง จากการผลิตถ่านกัมมันต์ ในประเทศมีไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน งานวิจัยนี้ จึงมุ่งศึกษาการเตรียม ถ่านกัมมันต์ จากวัสดุชีวมวล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย ซึ่งได้แก่ ชานอ้อย (Bagasse) จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2543 พบว่า มีปริมาณชานอ้อยจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ทั้งสิ้น 15,567,000 ตัน ซึ่งร้อยละ 80 ของชานอ้อยถูกนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และชานอ้อยส่วนที่เหลือถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ ใช้ทำผลิตภัณฑ์เส้นใย เป็นต้น แต่จากการสำรวจ ยังพบว่า มีชานอ้อยที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์สูงถึง 3,222,00 ตัน (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (2543)) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำชานอ้อย มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ และจากผลการศึกษาเตรียม ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยด้วยวิธีการกระตุ้นต่างๆ ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ได้ดี และจากผลการศึกษาการเตรียม ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยด้วยวิธีการกระตุ้นต่างๆ โดยนักวิจัยหลายกลุ่มเช่น Castro *et al.* (2000) พบว่า ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ได้ดี

นอกจากนี้ จากข้อมูลสถิติสิ่งแวดล้อม พบว่า ปัจจุบัน แหล่งน้ำสายหลักหลายสายของประเทศไทยมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก (วัชร (2542)) ดังนั้น หากไม่มีการกำจัดและควบคุมอาจเกิดการสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ตัวอย่างเช่น สารประกอบของโครเมียม (VI) ที่ละลายอยู่ในน้ำ โลหะโครเมียมพบมากในอุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมการฟอกหนัง เป็นต้น ถ้าได้รับโครเมียมทางระบบหายใจติดต่อกันเป็นระยะเวลานานจะทำให้ผื่นคันงูขึ้นจมูกทะลุ ปอด ท้อง และระบบขับถ่ายถูกทำลาย ถ้าผิวหนังสัมผัสกับของเหลวหรือของแข็งที่มีโครเมียม (VI) จะทำให้ผิวหนังบวมแดงเป็นตุ่ม ถ้าร่างกายได้รับโครเมียมในปริมาณสูง ดับและไตจะถูกทำลายก่อให้เกิดมะเร็งปอดและถ้าได้รับโครเมียมในปริมาณสูงอาจทำให้เสียชีวิตได้ นอกจากนี้ โครเมียมจะมีความเป็นพิษสูงแล้ว ยังพบว่า มีความยุ่งยากในการกำจัด เนื่องจากโครเมียม (VI) ละลายน้ำได้ดีและสามารถถูกรีดิวซ์ให้เป็นโครเมียม (III) โดยสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำได้ง่าย

จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ จึงมุ่งศึกษาเพิ่มเติมถึงการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปใช้ในการกำจัดโครเมียม (VI) เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้เป็นตัวดูดซับซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาในที่อับอากาศหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ของชานอ้อย ซึ่งถ่านที่ได้เรียกว่า ถ่านชาร์
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของถ่านชาร์จากชานอ้อยที่เตรียมได้

3. เพื่อศึกษาการดูดซับโลหะหนักของถ่านชาร์จากขานอ้อยที่เตรียมได้
4. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์ของขานอ้อย และศึกษาสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้
5. เพื่อศึกษาการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โดยทั่วไปนั้น สมบัติของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดย่อมแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะและวิธีการที่ใช้ในการเตรียม และยังเป็นที่ยอมรับกันว่าชนิดของวัตถุดิบก็ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดมีปริมาณองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขานอ้อยเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ในงานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นศึกษาในส่วนของการเตรียมถ่านชาร์ที่สภาวะอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่างๆ (400 – 600 °C) เนื่องจากถ่านชาร์ที่ได้จากการเตรียมที่แต่ละสภาวะเมื่อนำมากระตุ้นแล้วให้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองหลักๆ ในงานวิจัย มีดังนี้

1. เตรียมถ่านชาร์จากขานอ้อยที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 400, 500 และ 600 °C ภายใต้บรรยากาศการไหลผ่านด้วยแก๊สไนโตรเจนในเตาเผาแบบท่อแนวนอน เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติความพรุนถ่านชาร์โดยเครื่อง Surface area analysis (BET analysis)
2. กระตุ้นถ่านชาร์โดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะการกระตุ้นอุณหภูมิ 700 - 900 °C เป็นเวลา 60 นาที
3. วิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์โดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 °C โดยเครื่อง Surface area analysis (BET analysis)
4. นำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้ไปดูดซับโลหะโครเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆ และใช้เครื่อง Atomic Adsorption Spectroscopy (AAS)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นถ่านชาร์ เพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นคือ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งผลจากการทดลอง ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง สามารถดูดซับสีได้ดี และยังสามารถดูดซับโลหะได้ดีด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเป็นจำนวน 5 กิโลกรัม

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชานอ้อย

ชานอ้อยเป็นส่วนเส้นใยของลำต้นอ้อยหลังจากผ่านการบีบคั้นสกัดน้ำออกแล้วประกอบด้วย น้ำ เส้นใย และ ของแข็งที่ละลายได้จำนวนเล็กน้อย ปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์อ้อย อายุ วิธีการ เก็บเกี่ยว และประสิทธิภาพของโรงงาน แต่โดยเฉลี่ยจากการสำรวจผลวิเคราะห์ของชานอ้อยที่ได้จากใน และ ต่างประเทศ ได้ค่าดังนี้ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล (2541))

ความชื้น (Moisture) 46-52% (เฉลี่ย 50 %)

เส้นใย (Fiber) 43-52 % (เฉลี่ย 47.7 %)

ของแข็งละลายได้ (Brix) 2-6 % (เฉลี่ย 2.3 %)

เส้นใยของชานอ้อยจะเป็นส่วนประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนมากจะเป็นเซลลูโลส เพนโตแซน (Pentosan) และลิกนิน (Lignin) ตารางที่ 1 และตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบของชานอ้อย และส่วนประกอบ ทางเคมีของชานอ้อยตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของชานอ้อย

ส่วนประกอบของชานอ้อย	ร้อยละน้ำหนัก	ร้อยละการกระจายเซลล์
เส้นใยจริง	55	35
ท่อน้ำเลี้ยง	20	17
เยื่อหุ้มท่อน้ำเลี้ยง	20	35
ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย	5	13

ที่มา : (สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข (2541))

ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของขานอ้อย

ความสามารถในการละลายน้ำร้อน	3.4
ความสามารถในการละลาย alcohol - benzene	2.3
ความสามารถในการละลาย NaOH 1 %	32.0
เซลลูโลส	47.0
ลิกนิน	19.5
เพนโตแซน	25.1
เถ้า	1.4
SiO ₂	0.65
Fe ₂ O ₃	0.031
CaO	0.046
MgO	0.016

ที่มา : Fernandez et al. (1995) อ้างถึงใน “การใช้ประโยชน์ของกากอ้อย,” (สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข (2541))

2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของ β -glucose ต่อกันด้วยพันธะ β (1-4) ที่มีสูตรทั่วไปว่า $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืชโดยจะพบอยู่ร่วมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม (Gum) แทนนิน (Tannin) ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีโมเลกุลยาว และแข็ง การย่อยเซลลูโลสจะได้ Cellobiose และสุดท้ายจะได้ กลูโคสโดยเอนไซม์ β -glucosidase จำนวนกลูโคสที่มามีค่าต่อกันหรือ Degree of Polymerization (DP) จะมีค่าแตกต่างกัน และสามารถมีค่า DP สูงถึง 10,000 หน่วย และอาจมีน้ำหนักโมเลกุล 1,620,000 สำหรับเซลลูโลสของขานอ้อยมีค่า DP เท่ากับ 2000 – 3000 หน่วย รูปที่ 2.1 ก แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ถ้าใช้สมบัติการละลายในโซดาไฟ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ของเซลลูโลสสามารถแบ่งประเภทเซลลูโลสได้ 3 ประเภท

α -cellulose: ไม่ละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5% ที่อุณหภูมิห้อง

β -cellulose: ละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5% และตกตะกอนได้ง่ายเมื่อทำให้สารละลายเป็นกรด

γ -cellulose: ละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5 % ไม่ตกตะกอนในกรดแต่ตกตะกอนได้โดยแอลกอฮอล์เซลลูโลสมีความกว้างจำเพาะประมาณ 1.55 และมีเพียง α -cellulose เท่านั้นที่จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ ส่วนไฮโลเซลลูโลส (Holo-cellulose) จะเป็นคำที่ใช้เรียกคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดของพืชซึ่งได้ภายหลังจากแยกลิกนินแล้ว

2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเพนโตแซน (Pentosan)

เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนของพืชที่สามารถละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5% ที่อุณหภูมิต่ำได้ ซึ่งต่างจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยหน่วยน้ำตาลเพนโตสมากกว่ากลูโคส และมีค่า DP ต่ำกว่า (ประมาณ 40 หน่วย) ไม่ละลายน้ำ ส่วนเพนโตแซนเป็นรูปหนึ่งของเฮมิเซลลูโลสและสามารถละลายน้ำได้ เฮมิเซลลูโลสและเพนโตแซนส่วนมากจะเป็น Heteropolysaccharides ซึ่งจะประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลที่แตกต่างกัน 2-4 ชนิด ส่วนมากจะเป็นน้ำตาลไซโลส (Xylose) อะราบินโนส (Arabinose) และกรดยูโรนิค (Uronic acid) ถ้านำเพนโตแซนมาทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกเดือดจะได้เฟอร์ฟูรัล (Furfural) ภาพที่ 2.1 ข แสดงโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

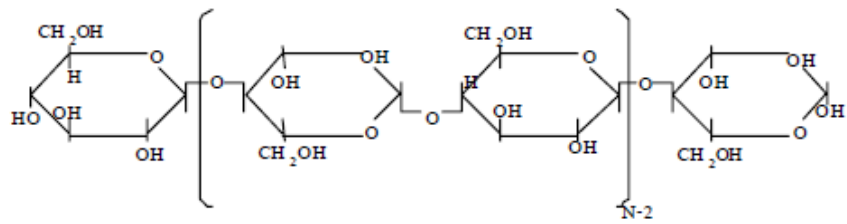
2.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส มีสูตรโมเลกุล $C_{49}H_{52}O_{14}$ โครงสร้างจะประกอบด้วยวงเบนซินที่มีหมู่ฟีนอลที่มี และไม่มีการเติมหมู่เมธิล ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ค

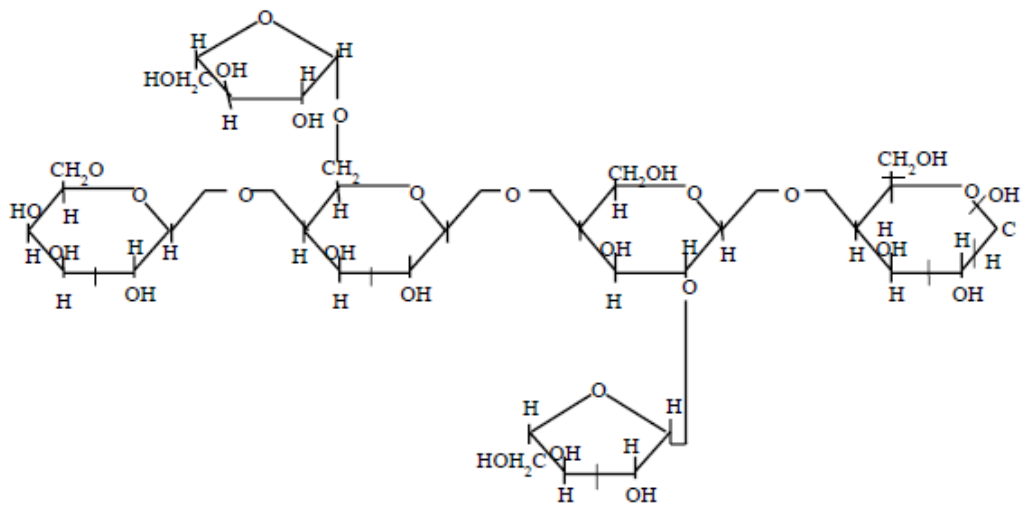
ลำต้นอ้อยประกอบด้วยเนื้อเยื่อเส้นใยหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุด 2 ชนิดที่พบในลำต้นอ้อยได้แก่

- เส้นใยจริง (True fiber) เป็นเซลล์รูปทรงกระบอกของเปลือกไม้ และเนื้อเยื่อลำเลียง มีผนังหนา และเหนียว
- เส้นหุ้มท่อลำเลียง (Pith) เป็น Parenchyma cell ของเนื้อเยื่อชั้นในของลำต้นมีรูปร่างไม่แน่นอน ผนังบาง และนิ่ม

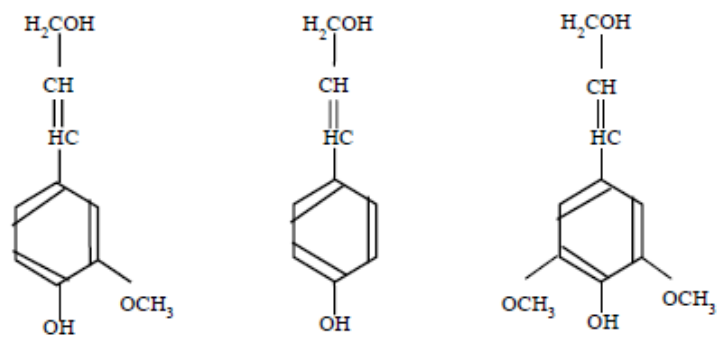
เส้นใยจริง และเส้นหุ้มท่อลำเลียงมีองค์ประกอบทางเคมีเกือบเหมือนกัน แต่ด้านโครงสร้างแล้วแตกต่างกันมาก เส้นใยจริงมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงประมาณ 70 : 1 เส้นใยจริงในสภาพเปียกเมื่อนำมาทำให้แห้งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยืด และหดตัวจะมีค่าสูงเส้นใยแต่ละเส้นจะอยู่ใกล้กันมาก และจะเชื่อมติดกัน ทำให้มีความแข็งแรงยึดติดได้ดี สมบัตินี้จึงได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมกระดาษ ส่วนท่อลำเลียงเส้นใยจะมีขนาด และรูปร่างไม่แน่นอน มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่ากับ 5 : 1 แต่ละเซลล์จะไม่เชื่อมติดกัน ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ แต่จะมีสมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดี สามารถดูดซึมน้ำได้หลายเท่า ของน้ำหนักของมัน แต่การใช้ประโยชน์ยังไม่แพร่หลาย ส่วนมากจะนำไปใช้เป็นสื่อผสมจากน้ำตาลในอาหารสัตว์



(ก) เซลลูโลส



(ข) เฮมิเซลลูโลส



(ค) ลิกนิน

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เซลลูโลส (ข) เฮมิเซลลูโลส และ (ค) ลิกนิน (Jagtoyen *et al.* (1998))

2.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นมาโดยผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากเกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมากซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อน และเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึก (Crystallites) อยู่บ้าง โดยส่วนใหญ่จะรวมกันอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งต่างจากแกรไฟต์ จากสมบัติเหล่านี้ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่น

2.2.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

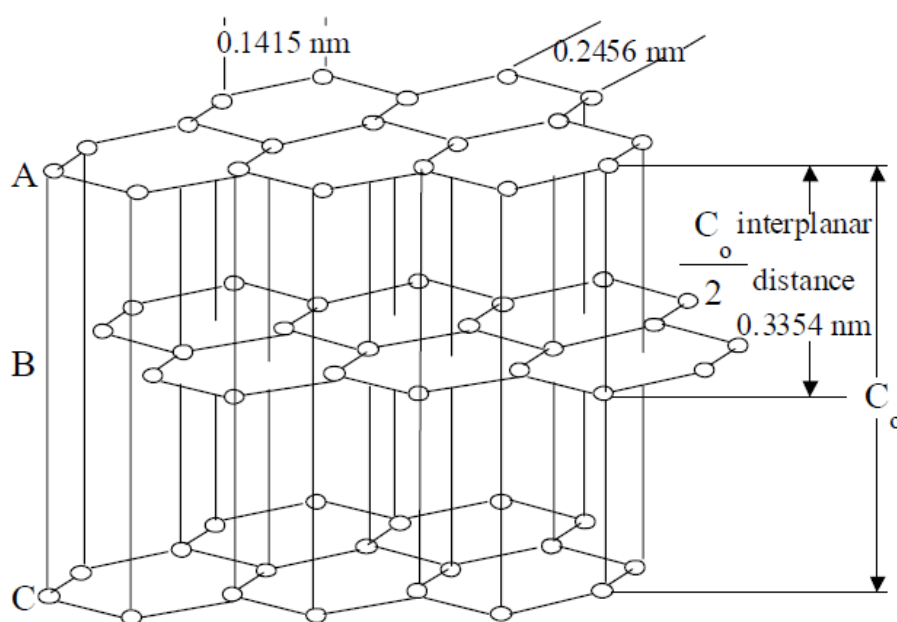
สมบัติในการดูดสีในของเหลวของถ่านเป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 15 แต่สมบัติในการดูดก๊าซเพิ่งจะได้มีผู้บันทึกไว้ในปี พ.ศ. 2328 แต่ก็ไม่มีผู้สนใจในสมบัติเหล่านั้น จนกระทั่งปี พ.ศ. 2354 พบว่าถ่านจากกระดูกสามารถดูดสีได้มากกว่าถ่านซึ่งได้มาจากไม้ จึงเป็นที่นิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกน้ำตาลทรายให้ขาวบริสุทธิ์กันมาก และได้มีการค้นคว้าพัฒนา ต่อมาจนกระทั่งปี พ.ศ. 2365 มีผู้พบว่า ถ่านที่ได้จากการเผาเลื่อยกับต่างซีเล้า (Potash) มีสมบัติในการดูดสีมากกว่าถ่านกระดูกถึง 20 - 50 เท่า แต่ไม่สามารถจะผลิตได้ปริมาณมากเพียงพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานได้ ต่อมาประมาณ พ.ศ. 2443 มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Ostreyko ชาวโปแลนด์ ค้นคิดวิธีผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่โดยเผาถ่านในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่งใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับเป็นผู้ริเริ่มให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ ชื่อต่างๆ เช่น ชื่อ “เอพโพนิท (Epornit)” ผลิตขึ้นในยุโรปในปี พ.ศ. 2452 “นอริท (Norit)” ผลิตในปี พ.ศ. 2454 และ “คาร์โบราฟฟิน (Carboraffin)” ผลิตในปี พ.ศ. 2458 และในอเมริกาได้ผลิต “ฟิลท์ชาร์ (Filtchar)” ขึ้นในปี พ.ศ. 2456 ได้มีการปรับปรุง และเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ๆ ไปเรื่อยๆ ถ่านที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ได้มีการศึกษาถึงการนำไปใช้ในการดูดสี ฟอกสี ในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ซึ่งใช้ได้ดีกว่าถ่านกระดูกมาก

สมบัติในการดูดกลิ่น และก๊าซของถ่านกัมมันต์ เริ่มเป็นที่สนใจกันในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งมีการนำไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ จากจุดนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจในสมบัติการทำ ก๊าซให้บริสุทธิ์ของถ่าน ซึ่งจากการทดลองโดยวิธีต่างๆ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตใช้ในการฟอกสีน้ำตาลนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันไอพิษเพราะมีลักษณะพอง เบา และจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีผู้พยายามผลิตถ่านชนิดใหม่ให้มีความหนาแน่นมากขึ้นสำหรับใช้ในการดูดก๊าซโดยเฉพาะ ซึ่งต่อมาเมื่อสงครามสิ้นสุดลงการค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จ และมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การดูดไอของสารละลาย

(Solvent) ดูดไอเบนซีน (Benzene) จากก๊าซอื่นๆ โดยทั่วไปถ่านที่ผลิตจากไม้ซี้เลื้อย พีท ลิกไนต์ และกากที่เหลือจากการทำเยื่อกระดาษจากใยเซลลูโลส จะได้ถ่านซึ่งมีลักษณะพอง และเบา เหมาะสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ฟอกของเหลว ส่วนกะลามะพร้าวจะได้ถ่านที่ใช้ในการดูดก๊าซได้ดี

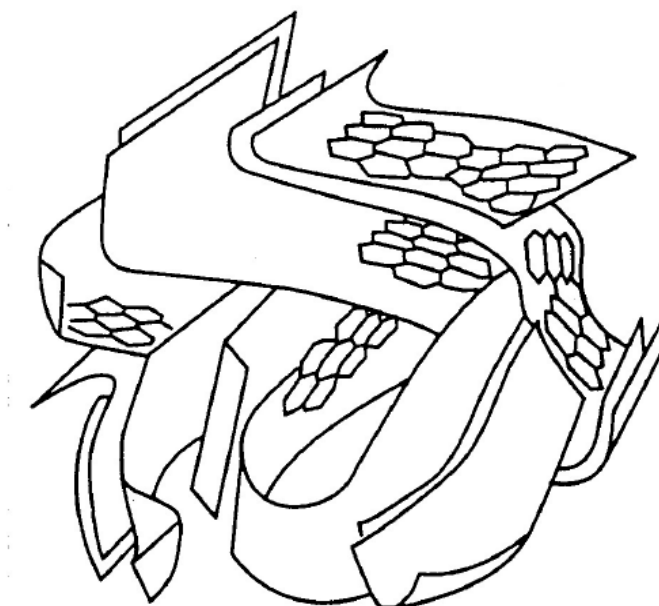
2.2.2 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไป ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์แต่มีความไม่เป็นระเบียบ (แสดงดังภาพที่ 2.2) เรียงตัวซ้อนกันประมาณ 3 - 30 ชั้น ต่อความหนา 10 - 100 อังสตรอม ชั้นนี้จะเรียงตัวกันอย่างไม่สมบูรณ์ทำมุมไม่แน่นอน และแต่ละชั้นซ้อนกันอย่างไม่มีระเบียบระยะห่างแต่ละชั้นประมาณ 3.6 อังสตรอม ซึ่งมากกว่าของแกรไฟต์ ในแต่ละชั้นของคาร์บอนยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ชนิดเอสพี 2 (sp² covalent bond) ในรูปวงหกเหลี่ยมคล้ายกับวงหกเหลี่ยมของสารประกอบอะโรมาติก ระหว่างอะตอมคาร์บอนยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's forces)



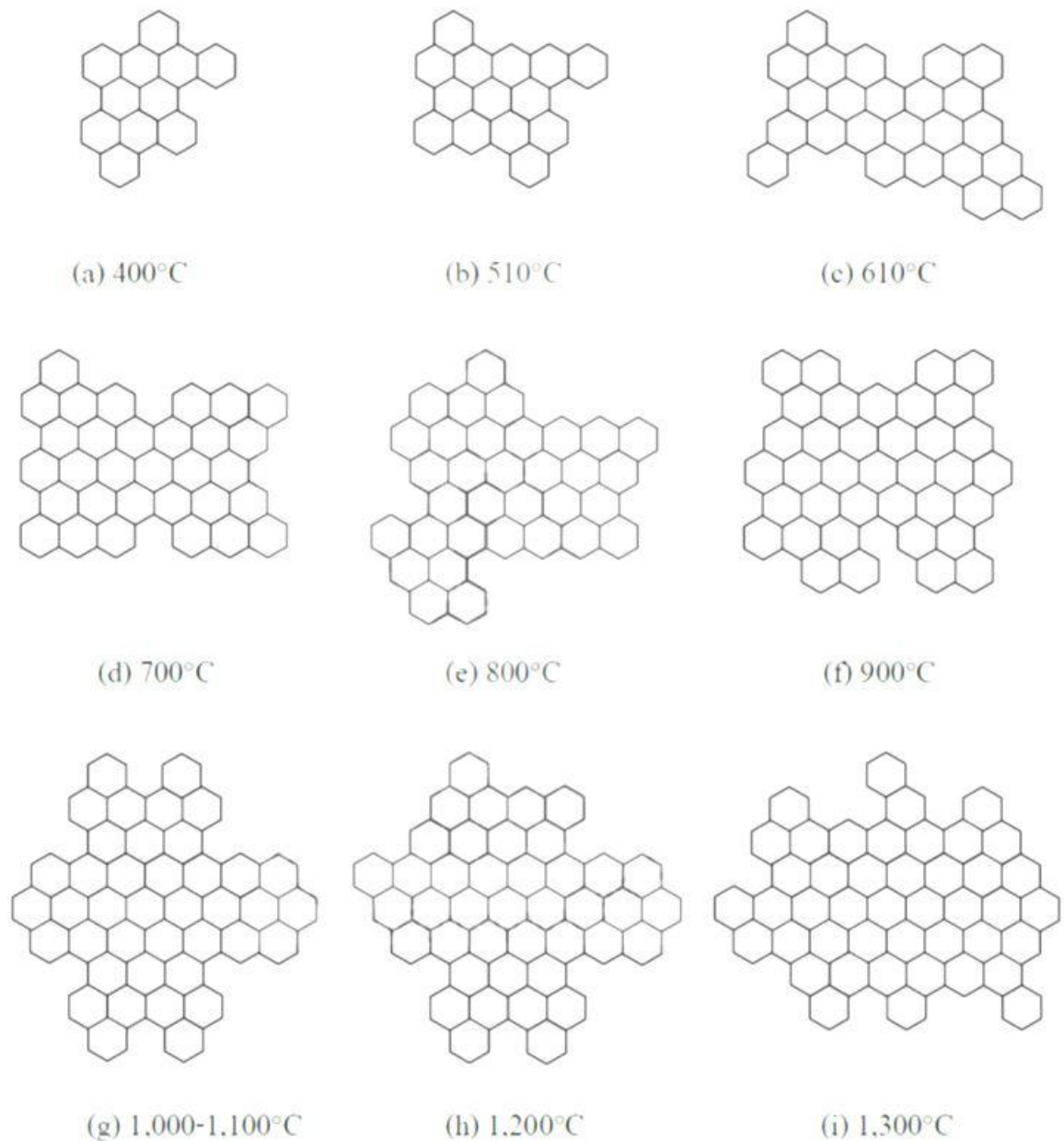
Hexagonal Structure of graphite

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์ซึ่งในโครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้น (Layered structure) (Othmer (1995))



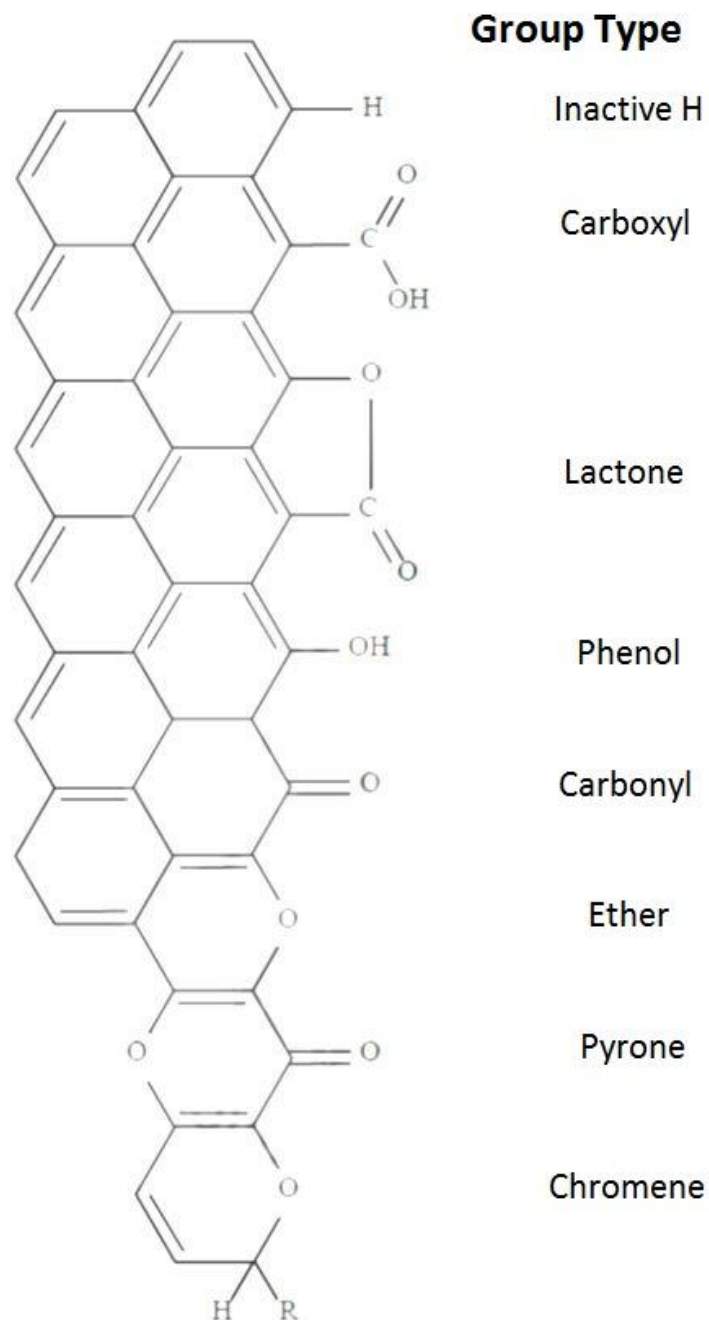
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างรูพรุนในถ่านกัมมันต์ (Bansal *et al.* (1988))

ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้น กระบวนการคาร์บอนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในการพัฒนารูพรุนเบื้องต้นของวัตถุดิบไปเป็นถ่านชาร์ โดยลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนของถ่านชาร์นี้ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียม ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงคาร์บอนอะตอมของถ่านชาร์ที่แต่ละอุณหภูมิคาร์บอนเซชัน (Hassler (1974))

นอกจากนี้ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะคล้ายกราฟิต์โดยประกอบไปด้วยชั้นอะตอมคาร์บอนที่ยึดโยงกันเป็นระนาบในชั้นกราฟิต์แล้ว ในระหว่างชั้นของแผ่นกราฟิต์ยังได้มีการเกาะติดของอะตอมต่างชนิดกันหลายชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เช่นเดียวกับสารอนินทรีย์ต่างๆ จากพวกโลหะออกไซด์และอนุภาคโลหะ อะตอมเหล่านี้พบได้ในรูปของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ เช่น คาร์บอกซิล แลคโตนฟีนอล คาร์บอนิล อีเทอร์ ไพโรน และโครมิน แสดงดังภาพที่ 2.5



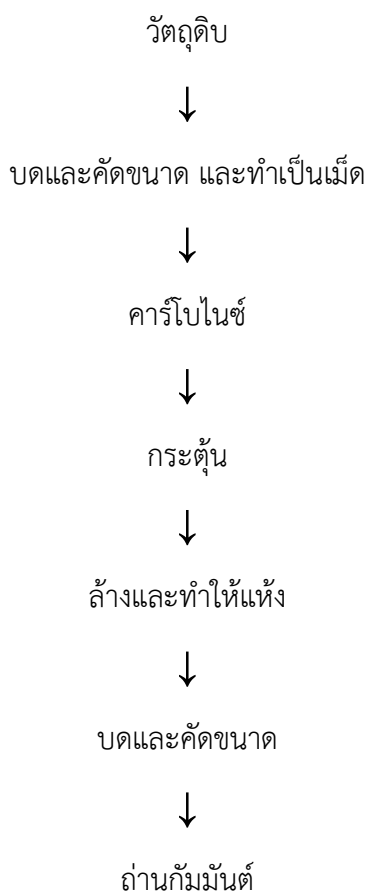
ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ (Leony *et al.* (1976))

2.2.3 การผลิตถ่านกัมมันต์

กรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะ และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยทั่วไปขั้นตอนในการผลิตถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

2.2.3.1 การเผาให้เป็นถ่าน

ขั้นตอนนี้ เป็นการแปรสภาพอินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่าน ทำโดยการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อยกว่าปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้สำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ในระยะแรก ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน จะสลายออกมาก่อนในรูปก๊าซ ทำให้ได้ถ่านที่มีสัดส่วนของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงขึ้น เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น สารอินทรีย์จะแตกสลายพร้อมกัลป์ปล่อยน้ำมันดิบ (Tar) และสารอื่นๆ เป็นจำนวนมากออกมา สีของวัตถุดิบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำ เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ของเซลลูโลสและลิกนิน เป็นหลัก เซลลูโลสจะสูญเสียมากที่สุดในช่วงนี้ ถ่านที่ได้มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะมีพื้นที่ผิวและรูพรุนน้อย และยังคงมีน้ำมันดิบบางส่วนตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านขั้นตอนการกระตุ้น เพื่อความสามารถในการดูดซับ



ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

กลไกในการทำให้เป็นถ่าน สามารถอธิบายได้โดย ระยะแรก วัตถุดิบจะถูกทำให้แห้งโดยการไล่ไอน้ำออกไป จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 170°C อินทรีย์วัตถุจะเริ่มแตกสลายบางส่วนพร้อมกับมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ กรดน้ำส้มออกมา จากนั้น ที่อุณหภูมิ ประมาณ 270 – 280 °C จะมีการแตกสลายของสารอินทรีย์เกิดเป็นน้ำมันดิน เมธานอล และสารอื่นๆ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 °C สีของไม้เริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำ โดยปฏิกิริยา คาร์บอนไนเซชันของเซลลูโลส และลิกนินเป็นหลัก ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดมาจาก Radical เป็นสำคัญ โดยมวลของเซลลูโลส จะสูญเสียมากที่สุดอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 300 - 400 °C ส่วนมวลของลิกนินจะค่อยๆ สูญเสียอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับเซลลูโลส จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C การสูญเสียมวลส่วนใหญ่ยังไม่สามารถจัด ไฮโดรเจน และออกซิเจนออกจากวัสดุได้หมดทำให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพไม่ดี ถ้าทำถ่านที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C พบว่าปริมาณร้อยละของคาร์บอนของถ่านที่ได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 600 °C จะทำให้ได้ผลผลิตต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 600 °C มาก ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านเพื่อให้ได้ผลผลิต และประสิทธิภาพในการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นถ่านสูงสุดก็คือ ช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 °C และควรเผาถ่านให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่สิ้นสุดโดยเร็ว เพื่อลดเวลาการสัมผัสของสารที่จะสลายตัว ควรควบคุมความสม่ำเสมอของความร้อนและอุณหภูมิของการทำคาร์บอนไนเซชันให้คงที่ด้วยจึงจะได้ถ่านที่มีคุณภาพดี ถ่านที่ได้จากการเผาในขั้นตอนนี้ สามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับหรือเชื้อเพลิงได้ มีการศึกษา การเผาถ่าน (คณิต และคณะ (2527)) ที่อุณหภูมิ 400 – 800 °C เป็นเวลา 0.5 – 6 ชั่วโมง จะได้ถ่านที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนสีและกลิ่นต่ำมาก เนื่องจากมีซิลิกาอยู่ เมื่อสกัดออกจะได้ถ่านที่มีคุณสมบัติดีขึ้น จึงเป็นที่น่าสังเกตว่า องค์ประกอบของวัตถุดิบที่จะมาผลิตถ่านมีความสำคัญ เช่นกัน การเผาถ่านอ้อยในที่อับอากาศ (Ruiz *et al.* (1971)) ที่อุณหภูมิ 500 – 550 °C เป็นเวลา 60 – 70 นาที จะได้ถ่านที่มีค่า pH เป็นกลางเหมาะสำหรับการดูดซับสีในน้ำตาล แต่มีพื้นที่ผิวเพียง 24.6 m²/g ซึ่งต่ำมาก จากการศึกษาถึง gross calorific value (Brattachatya *et al.* (1990)) พบว่า ชานอ้อยมีค่านี้เพียง 4322 kcal/kg แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ค่าจะเพิ่มเป็น 6834.66 kcal/g ซึ่งน่าจะนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิง

2.2.3.2 การกระตุ้น

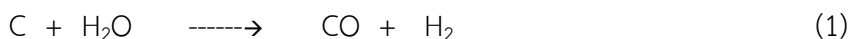
การกระตุ้น คือ ขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการทำให้สารมีรูพรุนมากขึ้น และเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก

- การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจการดูดซับขึ้นมาแทน
- การเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างให้ใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- การกำจัดอินทรีย์วัตถุหรือ อนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active centers)

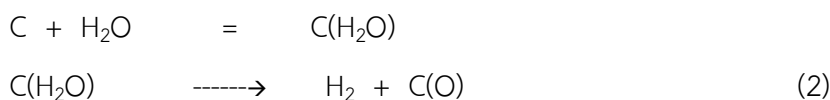
นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบด้วย รวมถึงวิธีการเตรียมสารก่อนการกระตุ้นด้วย ซึ่งการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การกระตุ้นแบบกายภาพ วิธีทำต้องใช้ออกซิไดส์ซึ่งก๊าซไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันดิบ และอะตอมของถ่านบางอะตอมในบางผลึกให้หลุดออกไป ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจึงสูงขึ้น ก๊าซที่นิยมใช้ได้แก่ ไอน้ำ (อุไรวรรณ และคณะ (2523), วาทิน และคณะ (2526), กมล และคณะ (2528), Singh *et al.* (1976), Kato (1965) และ Hashimoto *et al.* (1979)) ออกซิเจน อากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Hashimoto *et al.* (1979)) และก๊าซโอเลฟินจากการเผาไหม้ (วาทิน และคณะ (2526)) ตัวแปรที่ใช้ในการออกซิไดส์ซึ่งก๊าซ ความเข้มข้นของออกซิไดส์ซึ่งก๊าซที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา ระยะเสลาของปฏิกิริยา ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบในวัตถุดิบที่ใช้ อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 800 – 900 °C การกระตุ้นด้วยออกซิไดส์ซึ่งก๊าซ มีวิธีในการผลิต 2 วิธี คือ ทางตรง หมายถึง การใช้ก๊าซเหล่านี้ผ่านเข้าไปในวัตถุดิบโดยตรง ที่ใช้กันมากคือ ไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ทางอ้อม หมายถึง การใช้สารเคมีชนิดชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ ในการกระตุ้นแล้ว จะให้ก๊าซออกซิไดส์ออกมา เช่น หินปูน โดโลไมต์ และซัลเฟต

2.2.3.3 การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Stream Activation)

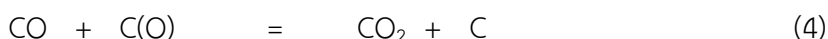
การกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นวิธีการกระตุ้นทางกายภาพแบบหนึ่ง ทำได้โดยใช้ ไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) ผ่านเข้าไปในถ่าน ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 750 – 950 °C และเผาอยู่ในที่อัดอากาศ หรือมีอากาศเข้าไปได้น้อยที่สุด โดยใช้เวลาและความดันที่เหมาะสม ขณะที่ถ่านสัมผัสกับไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังนี้



กลไกของปฏิกิริยา มีดังนี้



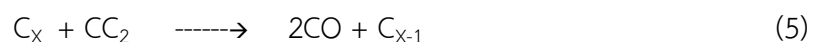
H₂ และ CO ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ จะหลุดออกไปทำให้เกิดรูพรุน แต่ CO ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยาให้ CO₂ และ C ดังสมการ



ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำมีคาร์บอนประมาณร้อยละ 97 - 98 และยังคงมีรูปร่างเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถตรวจชนิดของวัตถุที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์ได้จากกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นชนิดของ วัตถุที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์จึงสำคัญยิ่ง ถ่านกะลามะพร้าวที่ได้จากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (อุไรวรรณ และคณะ (2523)) จะมีปริมาณน้อยลงเมื่อใช้เวลามากและอุณหภูมิสูงขึ้น จากการศึกษาของ (Singh *et al.* (1976)) พบว่า ที่ 800 °C และเวลา 20 นาที อัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 7 g/h cm² ได้ค่าตัวเลขไอโอดีน 0.9 g/g ถ่าน และได้ผลผลิต 52% (weight basis) แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นผลผลิตจะลดลง การสัมผัสของไอน้ำ กับถ่านที่จะทำการกระตุ้นมีผลต่อการปฏิกิริยาของน้ำกับก๊าซที่เกิดบนอนุภาคถ่าน (Kato (1965)) ซึ่งจะก่อให้เกิดรูพรุนบนผิวของถ่าน พบว่า ถ้าไอน้ำสัมผัสกับถ่านโดยตรงที่ 1000 °C จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มี รูพรุนขนาดใหญ่ และที่ 850 °C จะให้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็กในเตาเผาอาจมีการปรับให้อากาศเข้าได้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยากระตุ้นถ่านให้ได้ความพรุนเพิ่มขึ้นคือ ปฏิกิริยา $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการกระตุ้น (Hashimoto *et al.* (1979)) ชนิดของ วัตถุดิบที่นำมาผลิตและการเผาให้เป็นผลึกถ่านก่อนที่จะนำมาทำการกระตุ้นมีผลต่อลักษณะของรูพรุนที่เกิด หลังการกระตุ้นด้วย ซึ่งเป็นจุดที่น่าสนใจ การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีนี้มีข้อดีคือหลังการกระตุ้นแล้วสามารถ นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปใช้ได้เลย แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงในการกระตุ้น ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก

2.2.3.4 การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยานี้ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับถ่านที่อุณหภูมิประมาณ 800 - 900 °C ปฏิกิริยานี้เป็นแบบดูดความร้อนมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาประมาณ 38.2 Kcal/g mol ของถ่าน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



สำหรับปฏิกิริยานี้ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยผู้ศึกษาหลายท่าน ให้ข้อสรุปว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเป็นอันดับหนึ่งเทียบกับความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่ำกว่า 1 บรรยากาศ และอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเป็นอันดับศูนย์ที่ความดันสูงขึ้น (Dutta *et al.* (1977)) อัตราเร็วของปฏิกิริยาเขียนแทนด้วยสมการ (Blackwood *et al.* (1959))

$$\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยา} = \frac{K_1 N P_{CO_2}}{1 + (K_2/K_3)P_{CO} + (K_1/K_3)P_{CO_2}} \quad (6)$$

เมื่อ N = จำนวน active site มีหน่วยเป็น โมลของคาร์บอนต่อโมลของคาร์บอนเริ่มต้น
 K_1, K_2, K_3 = ค่าคงที่
 P_{CO_2}, P_{CO} = ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตามลำดับ

2.2.3.5 การกระตุ้นด้วยสารประกอบเคมี

วิธีการนี้จะเติมสารเคมีที่เรียกว่าสารกระตุ้น activating agent ลงไปซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของถ่านบางอะตอมในผลึก โดยใช้คุณสมบัติในการเผาต่ำกว่า สารกระตุ้นที่ใช้เช่น สารประกอบของโพแทสเซียมหรือโซเดียม (ดำรง และคณะ (2533), กรมวิทยาศาสตร์บริการ (2523) และ Khummongkol *et al.* (1992)) สารประกอบคาร์บอนेट ซัลไฟต์ และไฮโอไซยาเนต โลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์ (สมศักดิ์ และคณะ (2523)), กองการวิจัยกรมวิทยาศาสตร์บริการ (2527) และ นราพร และคณะ (2529) กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟิวริก เป็นต้น หลักการผลิตโดยวิธีนี้คือนำวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งผสมสารละลายที่มี ไอออนของสารกระตุ้น (K^+, Na^+) อีออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $700^\circ C$ โมเลกุลของน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ และ ออกซิเจนจะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ต้องการโดยสารกระตุ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง และยังลดปริมาณของน้ำมันดินและสารระเหยให้น้อยลง เนื่องจากสารกระตุ้นเหล่านี้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพอยู่รอบๆ ถ่าน และแทรกอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดได้จำกัด เมื่อนำมาสกัดเอาสารอินทรีย์ออกก็จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้นในถ่านได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีขึ้น จากการศึกษาพบว่าสารเคมีที่ใช้กันมากคือ ซิงค์คลอไรด์ เพราะทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กดีกว่าสารตัวอื่นๆ การดูดซับจึงดีกว่า วิธีการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ ผสมสารเคมีกับวัตถุดิบโดยตรงแล้วทำ Carbonization และ Activation ครึ่งเดียวติดต่อกันไปเลย (ดำรง และคณะ (2533)), กรมวิทยาศาสตร์บริการ (2523) และ Khummongkol *et al.* (1992)) หรือ Carbonization ให้ได้ผลึกของถ่านเสียก่อนแล้วจึงเติมสารเคมีทำ Activation อีกทีหนึ่ง (สมศักดิ์ และคณะ (2523), กองการวิจัยกรมวิทยาศาสตร์บริการ (2527) และ นราพร และคณะ (2529)) สำหรับวิธีการแรกมีความลำบากตอนที่ล้างสารประกอบที่เกิดขึ้นอยู่ตามรูพรุนซึ่งล้างออกได้ยากยิ่งกว่าวิธีหลัง ตัวแปรที่สำคัญคือ อัตราส่วนของสารเคมีกับวัตถุดิบหรือถ่าน ส่วนตัวแปรอื่นๆ ก็เหมือนกับตัวแปรของการกระตุ้นแบบกายภาพ ข้อดีของการใช้สารประกอบเคมีก็คือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนสูง ใช้คุณสมบัติในการผลิตไม่สูง แต่จะต้องล้างสารเคมีที่ใช้กระตุ้นออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เพื่อความปลอดภัย ในการนำไปใช้งานจึงเป็นการสิ้นเปลืองเวลาและแรงงาน สารเคมีที่ใช้มีราคาสูง และสารบางตัวมีฤทธิ์กัดกร่อนภาชนะทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือสั้น

จากผลข้างต้น จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล เช่น Valix *et al.* (1999), Castro *et al.* (2000), Selvi *et al.* (2001), Girgis *et al.* (2002) และ Kobya (2004) ได้รายงานผลการวิจัยว่า ชานอ้อยและวัสดุชีวมวลเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ได้ดี โดยส่วนใหญ่ใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติการดูดซับที่ดี

ในแต่ละปีมีชานอ้อยเหลือทิ้งจากกระบวนการการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศเป็นปริมาณ 15 ล้านตันต่อปี (คิดที่ความชื้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ถึงแม้ว่า ชานอ้อยจะถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานหรือนำไปทำเป็นเยื่อกระดาษ ปริมาณที่เหลือก็ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่น การนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อเป็นตัวดูดซับที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหรือบำบัดน้ำเสีย โดย Gupta and Ali (2000) พบว่า ถ่านกัมมันต์จากชั้เถ้าอ้อยได้การศึกษาการใช้ประโยชน์จากชั้เถ้าชานอ้อยมากำจัดโลหะหนักพวกทองแดงและสังกะสีออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการดูดซับ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมดูดซับ คือ ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลาย ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ โดยพบว่า ชั้เถ้าชานอ้อยที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีในสภาวะที่เหมาะสม คือ สารละลายมีค่าความเป็นกรดและมีอุณหภูมิสูง ส่วนปริมาณตัวดูดซับที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโลหะทองแดงและสังกะสีที่อยู่ในสารละลาย

นอกจากนี้ Gupta *et al.* (2002) ยังได้มีการศึกษาต่อเนื่อง โดยการใช้ชั้เถ้าชานอ้อยในการกำจัดสารพิษที่เป็นองค์ประกอบในยาปราบศัตรูพืชซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับได้แก่ สภาวะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรด ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นตามด้วย โดยจะเพิ่มมากในช่วงแรกของการทดลอง ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทั้งนี้ ชั้เถ้าชานอ้อยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารพิษเหล่านี้สูงถึง 94-95% ได้มีการศึกษาการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมจากสารละลาย ด้วยตัวดูดซับที่เป็นชั้เถ้าชานอ้อยเปรียบเทียบกับชานอ้อยและถ่านกัมมันต์

Rao *et al.* (2003) พบว่า ชั้เถ้าชานอ้อยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ได้ดีรองจากตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีการศึกษาสนับสนุนว่า ชั้เถ้าชานอ้อยสามารถดูดแคดเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียได้สูงถึง 90% ภายในช่วงระยะเวลาการดูดซับ 60 - 80 นาที (Gupta *et al.* (2002)) และสามารถดูดซับโครเมียมและตะกั่วได้ถึง 96 - 98% (Gupta and Ali (2004))

Ouki and Neufeld (1997) ได้รายงานผลการวิจัยว่า ในการใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับโครเมียมจากสารละลายนั้น มีปรากฏการณ์เกิดขึ้นสองอย่างภายใต้สภาวะที่สารละลายในน้ำมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำ ได้แก่ การดูดซับไอออนโครเมียมบนพื้นที่ผิวที่ว่องไวและปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) จากกลไกการเกิดปฏิกิริยานี้ Selomulya *et al.* (1999) อธิบายว่า กลไกการกำจัดโครเมียมจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์จะขึ้นกับชนิดของถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายและปริมาณโครเมียมที่มีอยู่ใน

สารละลายโดยค่าความเป็นกรดต่างที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมนั้นต้องพิจารณาทั้งจากโครงสร้างทางเคมีและปฏิกิริยารีดักชันจากโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) ด้วย

2.2.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด

2.2.4.1 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง

1. แบบผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 mm ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลืนในสารละลายได้หลายชนิด
2. แบบเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 mm ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด ใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ หรือเป็นการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้ทำหน้ากักป้องกันก๊าซและไอพิษต่างๆ

2.2.4.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน

1. Micro Pores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุน ประมาณ 1.5 nm มักนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับก๊าซและไอระเหย
2. Meso Pores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 100 nm มักนำไปใช้ประโยชน์ ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction) ดูดซับที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี
3. Macro Pore เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนมากกว่า 100 nm โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและผลิตยา

2.2.4.3 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

1. Gas Adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Hard Artificial Char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้และถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง
2. Color Adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการเผาประเภท Soft Artificial Char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านขานอ้อย ถ่านจากแกลบ และถ่านจากกากน้ำตาล
3. Metal Adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลทินัมจากแร่

2.2.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน ทั้งในด้านการจัดสาร การแยกสาร หรือการทำให้บริสุทธิ์นั้น ย่อมมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ซึ่งสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (Harry (2001))

สมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์	ค่า
1) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส	
- พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	500-2,500
- ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ (cm^3/g)	0.5-2.5
2) ค่าความแข็ง	50-100
3) ปริมาณเถ้า (wt%)	1-20
4) ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์	35-125
5) ค่าไอโอดีน	500-1,200
6) ค่าโมลาส	300-1,500
7) ค่าความจุความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส (J/g-K)	0.84-1.3
8) การนำความร้อน (W/m-K)	0.05-0.1

โดยการพิจารณาค่าสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ ดังนี้

ค่าไอโอดีน (Iodine Number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้ในการประเมินค่าความพรุนของรูพรุนขนาดเล็ก (microporosity) จากการดูดซับไอโอดีน (0.04 - 0.1 อังสตรอม) (Henning and Schäfer (2007)) โดยจะพิจารณาที่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ซึ่งถ้าค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่า 1000 ชี้ให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง ดังนั้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยจะระบุในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม

ค่าโมลาส (Molass Number) เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อังสตรอม โดยทั่วไปค่าโมลาสนัมเบอร์ควรมีค่ามากกว่า 400 ในการพิจารณาค่าโมลาสนัมเบอร์นี้ต่างจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เนื่องจากเมื่อค่าโมลาสนัมเบอร์มีค่ามาก นั้นหมายถึงว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง แต่ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากนี้ จะสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่อย่างเช่นโมเลกุลสีได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็ก

แทนนิน (Tannin) เป็นสารโมเลกุลที่มีทั้งขนาดใหญ่และขนาดกลาง โดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ค่าปริมาณการดูดซับสารแทนนินของถ่านกัมมันต์นั้น เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่และขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ ซึ่งควรมีค่าอยู่ในช่วง 200-362 พีพีเอ็ม

เมทิลีนบลู (Methylene Blue) เป็นสารให้สีที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ถูกนำมาใช้เป็นสารถูกดูดซับ สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดที่มีรูพรุนขนาดไม่ใหญ่มากหรือมีรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งค่าเมทิลีนบลูจะระบุในหน่วย น้ำหนักกรัมของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 100 กรัม

ความหนาแน่น (Apparent Density) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ จะเป็นถ่านที่มีปริมาตรรูพรุนสูง ทำให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

ค่าความแข็งและค่าการขัดถู (Hardness and Abrasion Number) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความต้านทาน การสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ ความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของ ถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและ สภาพที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยส่วนใหญ่ ค่าความแข็งและค่าการขัดถูนี้จะใช้สำหรับคาร์บอนที่มีการ ใช้แบบใช้ซ้ำ โดยอาศัยกระบวนการฟื้นฟูสภาพ (reactivation) ของถ่านกัมมันต์

ปริมาณเถ้า (Ash Content) โดยทั่วไปในการผลิตถ่านกัมมันต์จะเลือกใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้ว จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวสูงเหมาะกับการนำไปใช้ดูดซับ สาร

ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride Activity) คาร์บอนเตตระคลอไรด์จัดเป็นกลุ่ม สารอินทรีย์อันตรายที่ระเหยง่าย ในการดูดซับไอของสารที่สภาวะอิ่มตัวด้วยถ่านกัมมันต์นั้น จะทำให้ทราบ สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์

ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ถ่านนั้น เกี่ยวข้องกับขนาดความละเอียดของถ่านกัมมันต์ กล่าวคือ ถ่านมีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะเป็นการ เพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านให้มากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ได้เร็วขึ้น

2.3 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลสารถูกดูดซับ (adsorbate) ในสภาวะแก๊สหรือของเหลวถูก ดึงให้มาเกาะจับและติดที่บริเวณผิวของของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับนี้นับเป็น กระบวนการแยกองค์ประกอบของสารออกจากสารละลายหรือแก๊สวิธีหนึ่ง ความสามารถในการดูดซับสาร ที่ต่างกัน ขึ้นกับลักษณะและความมีขรุขระของผิว โดยแบ่งตัวดูดซับตามลักษณะผิวของผิวได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีผิว ใต้แก่ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล และอะลูมินาออกไซด์ เป็นต้น และชนิดที่ไม่มีผิว ใต้แก่ ถ่านกัมมันต์ และพอลิเมอร์ ดูดซับ เป็นต้น ดังนั้น ในการที่จะแยกสารองค์ประกอบใดๆ จึงควรเลือกใช้ตัวดูดซับให้เหมาะสมกับสารนั้นๆ

การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ จะทำให้ทราบถึงชนิดของการดูดซับได้ เนื่องจากสารองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายหรือแก๊สมีแรงดึงดูด กับตัวดูดซับได้ไม่เท่ากันและมีความสามารถในการกระจายบนผิวที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยการดูดซับสามารถแบ่งตามความแตกต่างของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในการดูดซับได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน เป็นกระบวนการคายความร้อนที่มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ ทำให้กระบวนการสามารถผันกลับ (reversible) ไปมาได้ ส่งผลให้ตัวดูดซับฟื้นฟูสภาพ (regenerate) ได้ง่ายขึ้น ที่ความดันสูงจะสามารถเกิดการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น ซึ่งจำนวนชั้นของสารถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ แต่ที่ความดันต่ำ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้แบบชั้นเดียว ดังนั้น การเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดันภายในระบบ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับลดลง เกิดการปล่อยหรือคายสารที่ดูดซับออกมา (desorption) ซึ่งการปลดปล่อยนี้จะไม่ผลทำให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงไปแต่ประการใด

2.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการดูดซับที่มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารถูกดูดซับ มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงที่มากกว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยเกิดจากการที่หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำ ปฏิกิริยาเคมีกับสารถูกดูดซับ เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างกัน ทำให้มีค่าพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องส่งผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น ซึ่งเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว สารถูกดูดซับจะไม่สามารถหลุดออกมาจากผิวตัวดูดซับได้ ซึ่งจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้

2.3.3 กลไกการดูดซับ

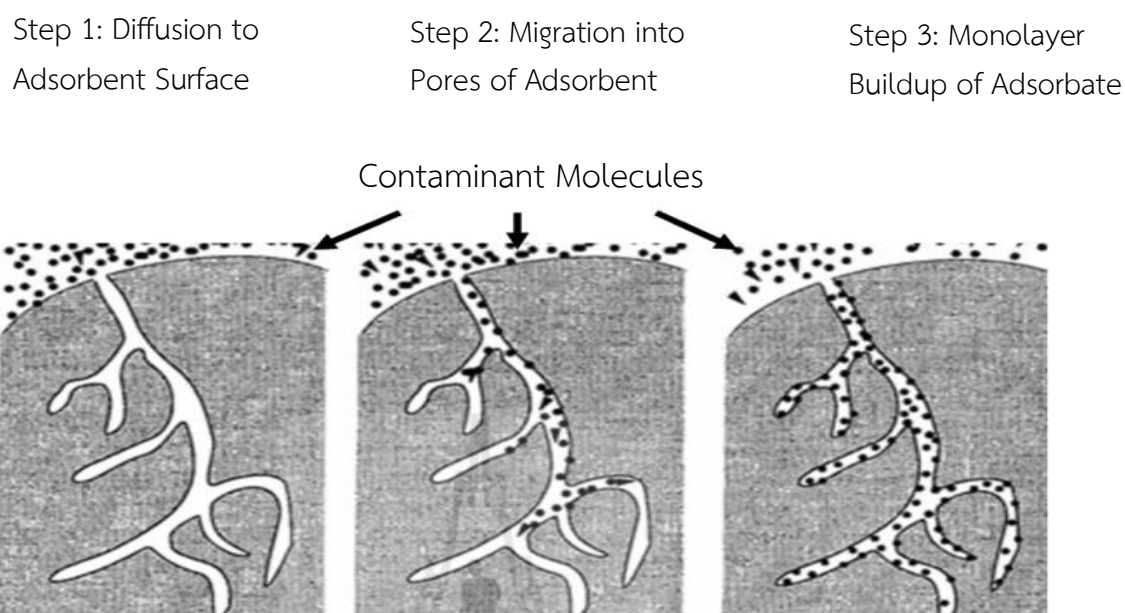
ในกระบวนการดูดซับโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้นตอนของการดูดซับและขั้นตอนการคืนสภาพของตัวดูดซับหรือที่เรียกว่า การคายซับ (desorption) ในขั้นตอนการดูดซับนี้สารละลายจะถูกส่งผ่านไบนตัวดูดซับอย่างต่อเนื่องกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้งานของตัวดูดซับ จึงได้มีการคืนสภาพให้กับตัวดูดซับนั้น ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดันของระบบ ขั้นตอนของการดูดซับบนถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน (Kenneth *et al.* (1992)) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับให้เข้ามาติดกับผิวนอกของตัวดูดซับ โดยสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะเคลื่อนที่ตามธรรมชาติเข้าหาตัวดูดซับหรือเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ซึ่งการแพร่กระจายจะทำให้สารที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่าและมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า แต่สำหรับสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนนั้น สารจะเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ตามทิศทางการไหลของของไหล การแพร่กระจายในระดับโมเลกุลจะเกิดขึ้นน้อยมากโดยที่ขนาดและน้ำหนักของสารถูกดูดซับจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตะกอนและติดค้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกตะกอนในทิศทางที่กำลังเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้น ขนาดและการกระจายขนาด (size distribution) จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการเคลื่อนย้ายของสารถูกดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน Pre-diffusion เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้ว ถ่านกัมมันต์นี้จะมีฟิล์มของของไหลห่อหุ้มอยู่คล้ายเยื่อบางๆ โดยรอบ เมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้ามายังถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะสามารถเข้าไปในผิวถ่านกัมมันต์ได้จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น เนื่องจาก ถ่านกัมมันต์นี้ จะมีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ภายในโพรงที่เรียกว่า รูพรุน โดยภายในรูพรุนนี้จะมีช่องเป็นโพรงลัดเลี้ยวไปมา

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการเกาะติด โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องเกาะติดบนผิวภายในของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป ซึ่งเป็นขั้นตอนที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวภายในรูพรุนอย่างสมบูรณ์

ซึ่งขั้นตอนของการดูดซับบนถ่านกัมมันต์สามารถแสดงกลไกการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์ฐานความรู้จากการกำจัดกลิ่น กรมควบคุมมลพิษ (2547)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเพื่อดูดซับโลหะหนักมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะโครเมียม โดยเน้นศึกษาในส่วน of ขั้นตอนการเตรียมถ่านชาร์ด้วยกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่าง ๆ และกระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์ รวมทั้ง ศึกษาผลของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยต่อการดูดซับโลหะโครเมียม ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้เริ่มตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจากขานอ้อย จากนั้น นำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ได้ผลิตถ่านกัมมันต์

จากการค้นคว้าหาข้อมูลในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย พบว่า โดยส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคทางเคมีในการผลิต โดย Kalderis (2008) ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยและแกลบ โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2 , NaOH และ H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 °C โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2 ให้ค่าพื้นที่ผิวที่มากที่สุด ถ่านกัมมันต์จากแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 มีพื้นที่ผิว 750 m^2/g ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 มีพื้นที่ผิว 674 m^2/g นอกจากนี้ Purnomo *et al.* (2011) ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วย ZnCl_2 โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 - 900 °C ซึ่งเป็นการพัฒนาโครงสร้างภายในที่เป็น รูพรุน โดยมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.528 cc/g ปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง 0.106 cc/g และมีพื้นที่ผิว 1200 m^2/g ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แล้วนำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมของ Norit® SX Plus

Gupta and Ali (2000) พบว่า ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าอ้อยได้การศึกษาการใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าขานอ้อยมากำจัดโลหะหนักพวกทองแดงและสังกะสีออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการดูดซับ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการดูดซับ คือ ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลาย ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้

นอกจากนี้ Rao *et al.* (2003) พบว่า ขี้เถ้าขานอ้อยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ได้ดีรองจากตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีการศึกษานับเสนอว่า ขี้เถ้าขานอ้อยสามารถดูดแคดเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียได้สูงถึง 90% ภายในช่วงระยะเวลาการดูดซับ 60 - 80 นาที (Gupta *et al.* (2002)) และสามารถดูดซับโครเมียมและตะกั่วได้ถึง 96 - 98% (Gupta and Ali (2004))

ในงานวิจัยนี้ ได้จะใช้เทคนิคการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

การผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์ต่างๆ โดยจำแนกอุปกรณ์และเครื่องมือในขั้นการเตรียมและการวิเคราะห์หลักๆ ดังนี้

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

- ชุดเครื่องอัดขานอ้อยให้เป็นแท่ง
- ชุดตะแกรงร่อน
- ตู้อบไล่ความชื้น
- เตาเผาสำหรับทำกระบวนการคาร์บอนที่อุณหภูมิคาร์บอนเซชันต่างๆ
- เตาเผาแบบท่อแนวนอนสำหรับการทำการ activate (CTF 12/75-Carbolite, UK)

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope, SEM (SEM FEI QUANTA 450)
- เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (micromeritics, ASAP 2010)
- เครื่องวัดปริมาณการดูดซับโลหะหนัก Atomic absorption spectroscopy (AAS) (Analyse 800 Perkin)
- เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนชนิด Thermogravimetric analyzer (TGA) (SDT 2960 simultaneous DSC-TGA model, TA Instruments)



ภาพที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM FEI QUANTA 450)



ภาพที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (micromeritics, ASAP 2010)



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณการดูดซับโลหะหนัก (AAS) (Analyse 800 Perkin)

3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยเริ่มการทดลองตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมขานอ้อย การทำให้เป็นถ่านชาร์ และการกระตุ้นถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งในการทดลองนี้ยังรวมถึงการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของถ่านชาร์ขานอ้อยและถ่านกัมมันต์ขานอ้อย โดยกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์และการวิเคราะห์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนในการดำเนินการผลิตถ่านกัมมันต์

3.2.1 การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของขานอ้อย

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของขานอ้อยด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติ ทางความร้อน (TGA) ทำโดยการวางตัวอย่างขานอ้อยลงในถ้วยรับตัวอย่างในเครื่องวิเคราะห์และทำการปรับ ตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ ควบคุมการทำงานของเครื่อง จากนั้นเริ่มทำการวิเคราะห์ โดยในระหว่างการวิเคราะห์นี้ระบบจะทำการบันทึกค่าน้ำหนักของถ่านชาร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลา โดยมีวิธีและขั้นตอนในการวิเคราะห์ ดังนี้

1. บรรจุขานอ้อยปริมาณ 30 mg ลงในถ้วยอะลูมินาสำหรับใส่ตัวอย่างที่วางอยู่บนแขนตาชั่งของเครื่องวิเคราะห์ จากนั้นให้ความร้อนที่อัตรา 5 °C/min ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 100 ml/min จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 110 °C โดยคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 30 นาที
2. ปรับเพิ่มอัตราการให้ความร้อนเป็น 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 850 °C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 7 นาที
3. เปลี่ยนการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็นอากาศที่อัตราการไหล 100 ml/min พร้อมทั้งปรับลดอุณหภูมิลงมาที่ 800 °C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว จากนั้นทำการปิดเตาและปล่อยให้ระบบเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง
4. นำผลการวิเคราะห์มาพิจารณาค่าการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบปริมาณองค์ประกอบแบบประมาณของขานอ้อย ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า

3.2.2 การเตรียมขานอ้อย การเตรียมถ่านชาร์ และการนำไปวิเคราะห์ผล

1. นำขานอ้อยจากโรงงาน น้ำตาลบ้านโป่ง จ.ราชบุรี มาอัดเป็นแท่งแล้วนำไปผึ่งแดด เพื่อไล่ความชื้นออกไป แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขานอ้อยอัดเป็นแท่งสำหรับการนำไปเผาเป็นถ่านชาร์

2. จากนั้นนำแท่งขานอ้อยที่ได้ มาทำการเผาในสภาวะอัดอากาศหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนเผาได้ทำการ flow gas Nitrogen หรือ Argon ที่ปริมาตร 1000 ml/min เข้าไปในเตาเผา เพื่อไล่อากาศออกไปเป็นเวลา 20 นาที จากนั้น จึงเริ่มกระบวนการเผาโดยใช้เตาเผาที่แสดงดังภาพที่ 3.6 สถานที่ที่ใช้ในการเผาถ่านคือ เตาเผาที่ ภาควิชาวิศวกรรมงานเชื่อม คณะวิทยาลัยอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ภาพที่ 3.6 เตาเผาแบบปิด

3. หลังจากทำการเผาแท่งขานอ้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือ 60 นาที จะได้ถ่านชาร์ขานอ้อย ออกมา 3 อุณหภูมิคือ 400 °C, 500 °C และ 600 °C ตามลำดับ ขานอ้อยอัดแท่งที่ผ่านการเผาแล้วนั้น จะได้ ออกมาเป็นถ่านชาร์ ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิจะได้ถ่านชาร์ขานอ้อยออกมามีลักษณะที่คล้ายกัน ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ถ่านชาร์ขานอ้อยที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C, 500 °C และ 600 °C เป็นเวลา 60 นาที

4. เมื่อเสร็จกระบวนการการผลิตถ่านชาร์ นำถ่านชาร์ซ่านอ้อยที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (400 °C, 500 °C และ 600 °C) มาศึกษาหาปริมาณคาร์บอนของถ่านชาร์ซ่านอ้อยที่ได้จากกระบวนการคาร์บอไนเซชัน โดยใช้ EDX analysis หาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ซ่านอ้อยถูกศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

5. หาขนาดของ pore และ พื้นที่ผิวของถ่านชาร์ซ่านอ้อย ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิ 400°C, 500 °C และ 600 °C จากกระบวนการคาร์บอไนเซชันโดยใช้เครื่อง Surface area analyzer (BET equation)

6. หาปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมโดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS) ซึ่งมีวิธีการเตรียมถ่านชาร์ซ่านอ้อยเพื่อกระบวนการการดูดซับโลหะโครเมียม ดังนี้

6.1 เตรียมสารละลายโครเมียมไตรออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.2 M, 0.6 M และ 1.0 M ในขวดปรับปริมาตร โดยมีนิสิตปริญญาโทและปริญญาเอก ชื่อ นายวุฒิชัย สมยานนทกุล และ นาย พุฒิพล นาคะรังษี ช่วยในการทดลอง แสดงได้ ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การเตรียมสารละลายโครเมียม

6.2 นำถ่านชาร์ ที่เตรียมไว้ในสภาวะต่างๆ มาบดด้วยครกบดสาร ชั่งถ่านชาร์ที่บดแล้วมาจำนวน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วเติมสารละลายโครเมียม 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวน ด้วยเครื่องกวนสาร เวลาที่ใช้ในการกวนสารเป็น 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การกวนถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ ที่แช่สารละลายโครเมียม

6.3 นำถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่กวนในสารละลายโครเมียม ตามขั้นตอน 6.2 นำมากรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.2 ไมครอน ด้วยเครื่องกรองสาร ระบบสุญญากาศ โดยล้างด้วยน้ำ DI จนกว่าสีของสารละลายโครเมียมจางลง แสดงได้ ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การกรองถ่านออกจากสารละลายโครเมียมด้วยเครื่องกรองสารระบบสุญญากาศ

6.4 นำถ่านชาร์ที่กรองแล้ว ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 3.11 จากนั้นนำถ่านชาร์ไปเก็บในโถดูดความชื้น



ภาพที่ 3.11 การอบถ่านชาร์ชานอ้อยในเตาอบสารอบถ่านชาร์ในเตาอบสาร

6.5 เตรียมกรดกัดทอง โดยการผสมกรดไฮโดรคลอริก 4 ส่วน ต่อ กรดไนตริก 1 ส่วน ชั่งถ่านชาร์ ที่จะใช้สำหรับดูดซับโครเมียม โดยชั่งถ่านชาร์มาปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติมกรดกัดทอง ลงไป 10 มิลลิลิตร ปิดหลอดทดลองให้สนิท เขย่าให้สารผสมกัน แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเก็บสารผสมไว้ในตู้ดูดควัน แสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ถ่านกัมมันต์ผสมกรดกัดทอง

6.6 เมื่อครบกำหนดเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว ทำการเขย่าหลอดแก้วที่มีสารละลายและผงถ่านชาร์ ชานอ้อยที่ดูดซับโครเมียมแล้วเพียงเล็กน้อย แล้วจึงดูดสารละลายที่มีโครเมียมอยู่ออกมาปริมาณ 1 ml ใส่ในขวดแก้ว เพื่อที่จะนำไปทำการหาปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมโดยใช้เครื่อง AAS analysis

3.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์นั้นเป็นการศึกษาความว่องไวของถ่านชาร์ต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในขั้นตอนการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์โดยการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของถ่านชาร์ ทำได้โดยวิธีออกซิเดชันถ่านชาร์ด้วยอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดติดไฟ โดยปริมาณและชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะเป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมถึงความว่องไว (Reactivity) ของถ่านชาร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปริมาณหมู่ฟังก์ชันได้ด้วยวิธีการไทเทรตของโบห์ม (Boehm titration method) โดยหมู่ฟังก์ชันที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันเบส หมู่ฟังก์ชันกรดรวม หมู่ฟังก์ชัน carboxylic หมู่ฟังก์ชัน lactonic และหมู่ฟังก์ชัน phenolic อธิบายวิธีการทดลองได้ดังนี้ทำ Boehm's Titration เพื่อยืนยัน (confirm) ผลการดูดซับของโครเมียม ซึ่งมีขั้นตอนการทำไทเทรตดังนี้

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1 โมลาร์
2. ชั่งถ่าน 1 กรัมลงในสารละลายแต่ละชนิด ชนิดละ 50 มิลลิลิตร
3. คนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 คืน
4. กรองถ่านออกจากสารละลาย
5. หยดอินดิเคเตอร์ลงในสารละลาย 3 – 4 หยด โดยที่สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตจะใช้โบรโมไธมอลบลูเป็นอินดิเคเตอร์ ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะใช้เมธิลเรดเป็นอินดิเคเตอร์
6. ทำการไทเทรตโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์
7. เมื่อสารละลายเบสทั้งทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไฮโดรคลอริกจะทำให้สารละลายเปลี่ยนสีเป็นสีเดียวกับอินดิเคเตอร์ที่เติมลงไป
8. คำนวณหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันกรดทั้ง 3 ชนิดจากปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ลดลงไป
9. ปริมาณของกรดคาร์บอกซิลิกสามารถหาได้จากความเข้มข้นที่ลดลงไปของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต
10. ปริมาณของกรดแลคโตนิกสามารถหาได้จากปริมาณความเข้มข้นที่ลดลงไปของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลบด้วยความเข้มข้นที่ลดลงไปของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต
11. ปริมาณของกรดฟีนอลิกสามารถหาได้จากความเข้มข้นที่ลดลงไปของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลบด้วยความเข้มข้นที่ลดลงไปของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต

3.2.4 การกระตุ้นถ่านชาร์เพื่อเป็นถ่านกัมมันต์

ในขั้นตอนนี้ เป็นขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในเตาเผาแบบท่อแนวนอน (tube furnace) โดยใช้ถ่านชาร์ที่เตรียมจากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ ในช่วง 400 - 600 °C โดยมีขั้นตอนการกระตุ้นดังนี้

1. นำถ่านชาร์น้ำหนัก 40 g ไปเผาในเตาเผาแบบท่อแนวนอนที่อุณหภูมิ 750 - 950 °C ภายใต้บรรยากาศการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหลของแก๊ส 70 ml/min และอัตราการให้ความร้อนที่ 5 °C/min โดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Activation) ในเตาเผา (Tube Furnace) ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ถ่านชาร์ใส่ในเตาเผา Tube furnace เพื่อกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ

2. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิกระตุ้นที่ต้องการ (750 - 950 °C) เปลี่ยนการไหลผ่านของแก๊สไนโตรเจนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เวลาในการกระตุ้น 120 นาที สำหรับทุกอุณหภูมิกระตุ้นที่ใช้

3. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการแล้ว ทำการปิดเตาและเปลี่ยนการไหลผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สไนโตรเจน จากนั้น ปล่อยให้อุณหภูมิภายในเตาเย็นตัวลง จะได้ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ซึ่งแสดงได้ ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 ถ่านกัมมันต์ขานอ้อยหลังจากถูกกระตุ้นที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่หายไป และนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ต่อไป

3.2.5 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ในการวิเคราะห์ผลของถ่านกัมมันต์จะทำคล้ายๆ กับถ่านชาร์ คือ

1. นำถ่านกัมมันต์ที่ทำทุกเงื่อนไข มาทำการวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ด้วยเครื่อง Surface area โดยใช้วิธี Brunauer – Emmet – Teller (BET) เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวของถ่าน ก่อนทำการกระตุ้นและหลังทำการกระตุ้น

2. นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ทุกเงื่อนไขมาทำการดูดซับโลหะโครเมียม โดยขั้นตอนในการทำเหมือนกับการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์ ดังในข้อ 6.1 - 6.6

3.2.6 การวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์

ในการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการวิเคราะห์การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 °C ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนจากนั้น นำข้อมูลไอโซเทิร์ม ของการดูดซับที่ได้มาคำนวณหาสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์นี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนด้วยกัน คือในขั้นตอนแรกจะเป็นการไล่แก๊ส (degassing) จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่จะทำการวิเคราะห์ใส่ลงไปในหลอดบรรจุตัวอย่างประมาณ 0.27-0.28 กรัม แล้วประกอบเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ในส่วนของการไล่แก๊ส จากนั้นทำการไล่แก๊สที่อุณหภูมิ 200 °C กระทั่งค่าความดันในหลอดบรรจุตัวอย่างต่ำกว่า 50 ไมโครเมตรปรอท ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง

2. เมื่อไล่แก๊สเสร็จแล้ว ทำการชั่งน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่เหลือและบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม พร้อมทั้งตั้งค่าสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ จากนั้น จึงเริ่มการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ โดยค่าความดันสัมพัทธ์สูงสุด 0.98

3. หลังจากการวิเคราะห์ ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติความพรุนต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งแสดงข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้นำมาใช้คำนวณหาสมบัติความพรุนต่างๆ ดังนี้

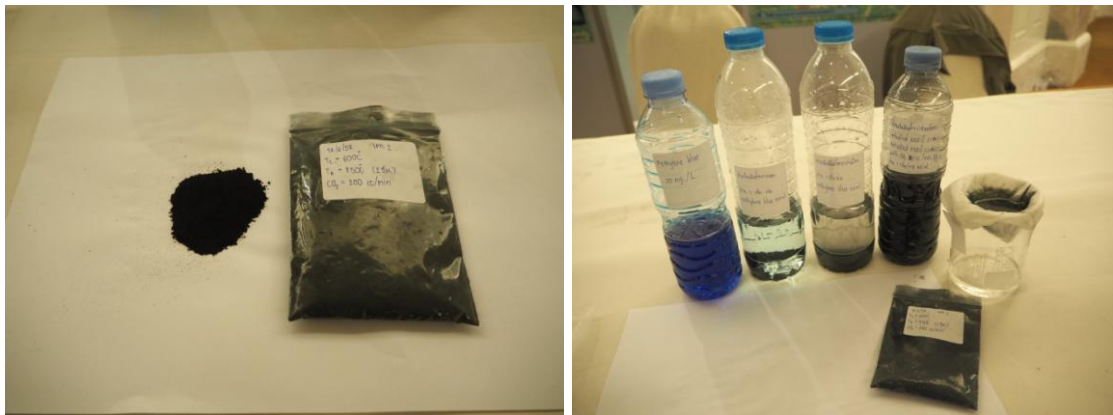
- ค่าพื้นที่ผิวจา เพาะคำนวณด้วยสมการ BET
- ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดคำนวณจากปริมาตรการดูดซับที่ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P°) เท่ากับ 0.98 แล้วแปลงให้เห็นปริมาตรของ N_2 ที่สถานะของเหลว
- ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กด้วยสมการ Dubinin-Radushkevich (DR)
- ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางจากการพิจารณาการกระจายขนาดรูพรุน (pore size distribution) โดยใช้ทฤษฎี Density functional theory (DFT) (Olivier, 1995)
- ขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณด้วยสมการ $4V/A$
เมื่อ V = ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)
 A = เท่ากับพื้นที่ผิวจา เพาะ (BET S , ตารางเมตรต่อกรัม)

นอกจากนี้ได้มีการนำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในงาน งานวิจัยอ้อยและน้ำตาล (Thailand Cane and Sugar Research 2015) เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2015 ณ โรงแรมรามาคาร์เด็นส์ ซึ่งแสดงได้ ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 งานวิจัยอ้อยและน้ำตาล (Thailand Cane and Sugar Research 2015) เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2015 ณ โรงแรมรามาคาร์เด็นส์

ส่วนภาพที่ 3.16 คือผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยที่นำเสนอนี้ งานวิจัยอ้อยและน้ำตาล (Thailand Cane and Sugar Research 2015) เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2015 ณ โรงแรมรามารการ์เด็นส์ โดยการนำถ่านกัมมันต์ชานอ้อยที่เตรียมได้มาทดลองทำการดูดซับสีของเมทิลีนบลู ซึ่งผลการทดลองที่ได้ เป็นที่น่าพอใจและถ่านกัมมันต์ชานอ้อยที่เตรียมได้สามารถดูดซับสีของเมทิลีนบลูได้จนหมด จนกลายเป็นสีใสเหมือนน้ำ โดยการใช้กระดาษกรอง กรองเอาผงถ่านกัมมันต์ชานอ้อยออก



ภาพที่ 3.16 ผลผลิตถ่านกัมมันต์ชานอ้อยที่ได้จากการทดลอง

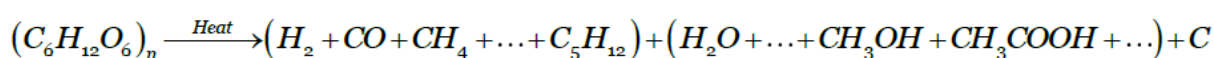
บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนเซชันในการเตรียมถ่านชาร์ ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของขานอ้อย และ ผล การวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ โดยถ่านชาร์ที่นำมาวิเคราะห์นี้ถูกเตรียมขึ้นที่อุณหภูมิ คาร์บอนเซชันต่างๆ ได้แก่ 400, 500 และ 600 °C จากนั้นนำถ่านชาร์ที่ได้ไปกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ 750 – 950 °C เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งข้อมูลจากงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายการเกิดขึ้นและการพัฒนาของรูพรุน ในถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังทำให้ทราบสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย เพื่อให้ได้ ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งานในกระบวนการดูดซับโลหะ

4.1 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของขานอ้อยด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyser (TGA)

ชีวมวลโดยทั่วไปมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส มีโมเลกุลสารอินทรีย์ ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยในชีวมวลต่างชนิดกันจะมีปริมาณของ องค์ประกอบเหล่านี้ต่างกันและความสามารถในการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ในสภาพไร้อากาศต่างกัน เนื่องจากในแต่ละองค์ประกอบมีโครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งองค์ประกอบลิกนินจะเริ่มสลายตัว ได้ที่อุณหภูมิต่ำโดยจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ส่วนเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ของแข็งจากกระบวนการนี้เรียกว่า **ถ่านชาร์** ซึ่งกระบวนการการ สลายตัวทางความร้อนนี้สามารถเขียนอธิบายด้วยสมการปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น ได้ดังนี้



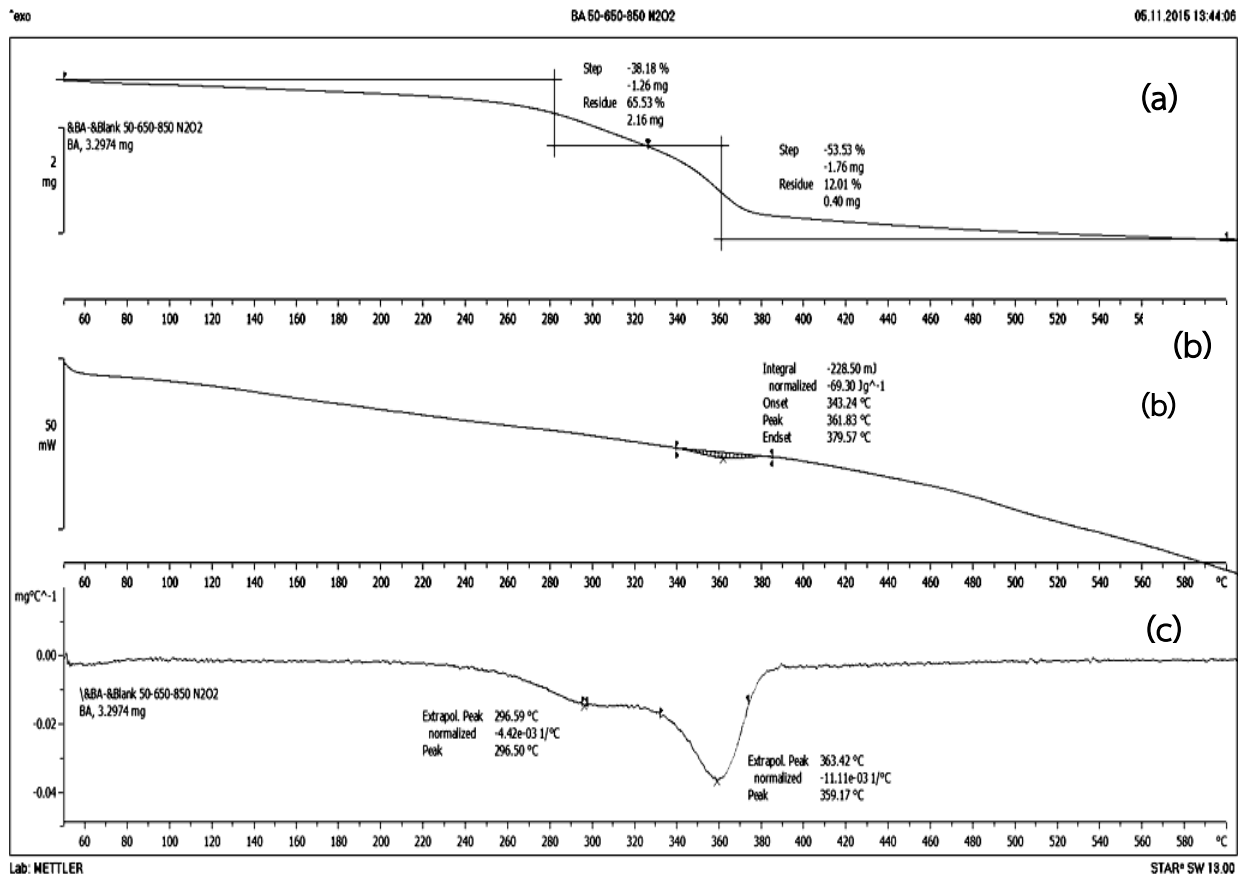
ชีวมวล

แก๊ส

ของเหลว

ถ่าน

เพื่อเป็นการหาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชันขานอ้อย จึงได้นำขานอ้อย มาทำการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA) ผลที่ได้ แสดงดังภาพที่ 4.1



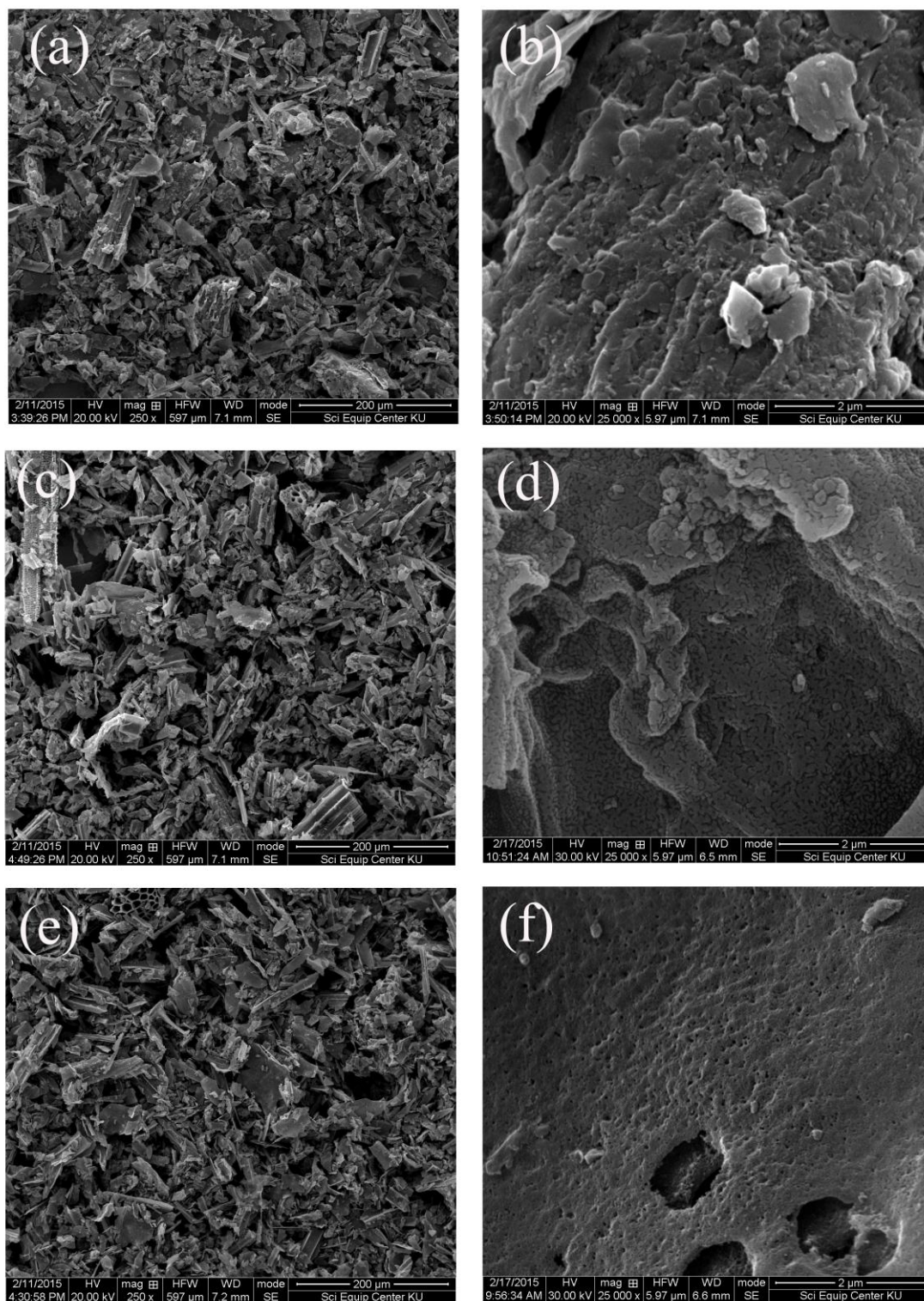
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงผลการการสลายตัวทางความร้อนของชานอ้อยโดย (a) การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก, (b) การเปลี่ยนแปลงของพลังงาน และ (c) อัตราการลดลงของน้ำหนักตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.1 จะพบว่า ในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นถึง 280 °C ค่าน้ำหนักของสารลดลงอย่างช้าๆ ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากนั้นค่าน้ำหนักจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 280 °C ถึง 380 °C โดยจุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด สังเกตได้จากพีค (Peak) ที่เกิดขึ้นในรูป ที่ 4.1(c) คือที่อุณหภูมิ 360 °C จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 380 °C ไปจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 570 °C ค่าน้ำหนักลดลงอย่างช้าๆ และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 570 °C ถึง 600 °C ดังนั้นอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 400 °C ถึง 600 °C ซึ่งเป็นช่วงที่องค์ประกอบที่ระเหยได้ (Volatile organic compounds) ในชานอ้อย โดยส่วนใหญ่สลายตัวแล้ว แต่อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิ 400 °C และใกล้เคียง ยังคงมีองค์ประกอบที่ระเหยได้บางส่วนที่ยังเหลืออยู่ ซึ่งสังเกตได้จากค่าน้ำหนักที่ยังคงมีการลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.1(a) การที่มีองค์ประกอบสารระเหยหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างถ่านชาร์ที่ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 °C อาจส่งผลให้โครงสร้างถ่านชาร์มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์มากกว่าถ่านชาร์ที่คาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ซานอ้อยถูกศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) สถานที่ที่ใช้ในการทดลอง คือ ศูนย์เครื่องมือของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง SEM ของถ่านชาร์ ที่เผาในสภาวะอับอากาศหรือคาร์บอนเซชัน (Carbonization) โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C, 500 °C และ 600 °C เป็นเวลา 60 นาที แสดงได้ ดังภาพที่ 4.2

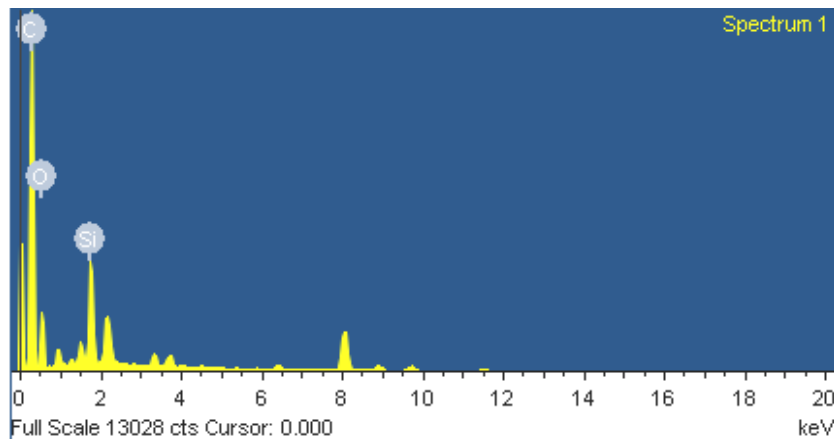
จากภาพจะพบว่า โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ซานอ้อยเผาที่อุณหภูมิ 400 – 600 °C ดังภาพที่ 4.2 (a), 4.2 (c) และ 4.2 (e) นั้น มีลักษณะคล้ายๆ กัน แต่เมื่อเพิ่มกำลังขยายจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 400 °C ถ่านชาร์ซานอ้อย เริ่มจะมีรูพรุนหรือมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.2 (b) แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 500 °C และ 600 °C ถ่านชาร์ซานอ้อยมีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก แสดงได้ในภาพที่ 4.2 (d) และ 4.2 (f)



ภาพที่ 4.2 ภาพ SEM ของถ่านชาร์ซันอ้อย ทำการเผาในสภาวะอับอากาศหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ: (a) และ (b) 400 °C, (c) และ (d) 500 °C และ (e) และ (f) 600 °C เป็นเวลา 60 นาที

4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์

นำถ่านชาร์ซ่านอ้อยที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (400 – 600 °C) มาศึกษาหาปริมาณคาร์บอน โดยใช้เครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ผลจากการทดลอง แสดงได้ ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัม (Spectrum) ของถ่านชาร์ซ่านอ้อยที่ได้จากการทำ EDX

จากภาพที่ 4.3 จะพบว่า spectrum ของถ่านชาร์ซ่านอ้อยวัดในทุกอุณหภูมิ (400 – 600 °C) มีลักษณะเหมือนกัน ส่วน Atomic % ของคาร์บอนในถ่านชาร์เผาที่อุณหภูมิ 600 °C จะมีค่าสูงสุด คือ 87.98% มีปริมาณของออกซิเจน 9.13 % และปริมาณของ ซิลิกอน 2.88% แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณธาตุต่างๆ และ Atomic percent ของถ่านชาร์ซ่านอ้อยที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 – 600 °C

Temperature	400 °C	500 °C	600 °C
Element	Atomic %	Atomic %	Atomic %
C K	79.27	82.20	87.98
O K	17.25	13.95	9.13
Si K	3.47	3.85	2.88
Totals	100	100	100

ส่วนปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์เผาที่อุณหภูมิ 400 °C นั้น จะมีปริมาณน้อยกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C และ 600 °C ทั้งนี้เป็นเพราะว่าที่อุณหภูมิ 400°C นั้น การเผาไหม้ยังไล่สารอื่นออกไปไม่หมด นั่นคือ ยังมีสารหรือธาตุอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอน เหลือปะปนอยู่ จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้ค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อทำการเผาขานอ้อยที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบว่า ขานอ้อยที่เผาไหม้นั้นจะเป็นสีดำทั้งหมด นี่แสดงให้เห็นว่า ขานอ้อยนั้นเผาไหม้ได้สมบูรณ์และสามารถไล่สารหรือธาตุอื่น ที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไปได้หมด จึงทำให้ได้ค่าปริมาณคาร์บอนที่สูงและให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 600 °C

4.4 ผลการหาพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน

เพื่อเป็นการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่สภาวะก่อนกระตุ้น จึงได้ทำการทดลองโดยการนำถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างกันไปวิเคราะห์หาสมบัติความพรุนด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 °C โดยใช้เครื่อง Surface area analyzer (BET equation) สถานที่ที่ใช้ในการทดลอง คือ ศูนย์เครื่องมือของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผลจากการทำ BET ทำให้เราสามารถทราบขนาดของ pore และพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ขานอ้อย ซึ่งผลต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าขนาดของ pore และพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ขานอ้อยทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

Carbonization temperature (°C)	Average pore diameter (nm)	BET surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)
400	4.8854	130.92	0.1159
500	2.7890	178.67	0.1246
600	2.9035	187.51	0.1361

โดยทั่วไปแล้ว ขนาดรูพรุน (Pore size) ของถ่านกัมมันต์จะแยกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนี้

Diameter < 2 nm เรียกว่า micropore

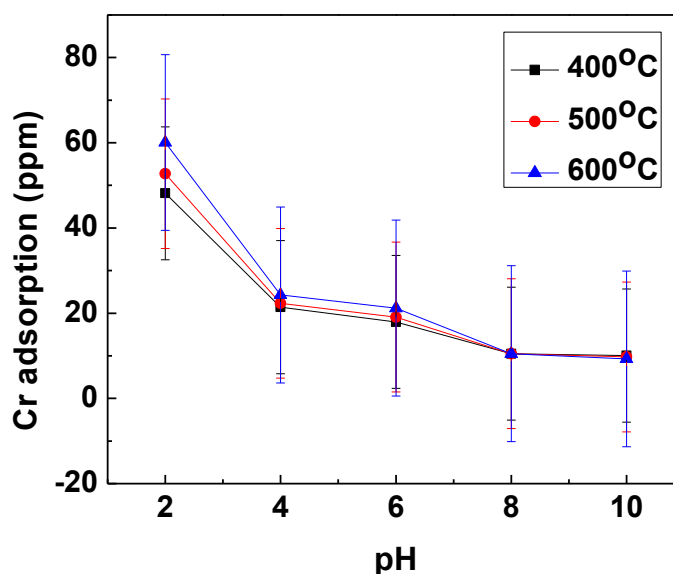
Diameter = 2 -50 nm เรียกว่า mesopores

Diameter > 50 nm เรียกว่า macropores

ผลจากการจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 400 °C ขนาดของ pore มีค่าเท่ากับ 4.8854 nm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 500 °C และ 600 °C ตามลำดับ ที่อุณหภูมิต่ำ รูพรุนของ micropore จะมีปริมาณน้อย รูพรุนส่วนใหญ่จะเป็น mesopores และ macropores จึงทำให้ได้ค่าของรูพรุนที่สูง ส่วนที่อุณหภูมิ 500 °C และ 600 °C ขนาดของรูพรุนค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่ารูพรุนที่ได้ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากว่า มีจำนวนรูพรุนของ micropore อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จาก SEM จึงทำให้ค่าขนาดของรูพรุนมีค่าน้อย อีกทั้งผลจากพื้นที่ผิวก็เกิดขึ้นมาจากพื้นที่ของ micropore ดังนั้น จะเห็นว่า พื้นที่ผิวของถ่านชาร์ซานอ้อย ที่อุณหภูมิ 600 °C จะมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ $187.51 \text{ m}^2/\text{g}$ และพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ซานอ้อยเผาที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่า $130.92 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งมิต้าน้อยที่สุด ทั้งนี้ เนื่องจากซานอ้อย ได้ถูกนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงๆ สารระเหยต่างๆ เกิดการสลายตัวออกไปในปริมาณมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าทั้งเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเกิดการสลายตัวออกไปจนหมด ส่วนลิกนินอาจจะยังมีเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย ทำให้สมบัติความพรุนของถ่านชาร์ที่ได้นี้มีค่าไม่ต่างกันมากนัก

4.5 ผลการวิเคราะห์การดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์

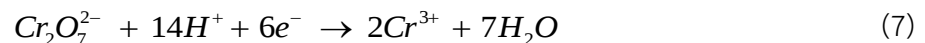
ในการหาปริมาณการดูดซับของโลหะของถ่านชาร์หรือถ่านกัมมันต์ ที่ผ่านการกระตุ้นแล้วจะใช้ เครื่อง Atomic Adsorption Spectroscopy (AAS) ในการวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับโลหะ ในที่นี้ เราได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับปริมาณการดูดซับโลหะเพื่อที่จะเลือกค่า pH ที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลอง ซึ่งค่า pH มีผลต่อการดูดซับโลหะโครเมียม โดยเริ่มต้นเราใช้ความเข้มข้นของโครเมียม $[\text{Cr(VI)}]$ เป็น 0.2 Molar และใช้ถ่านชาร์ปริมาณ 1 กรัมในการดูดซับโลหะโครเมียม นอกจากนี้ ได้ทำการเปลี่ยนค่า pH จาก 2 – 10 ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดง ดังภาพที่ 4.4



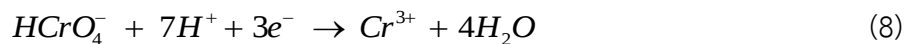
ภาพที่ 4.4 ค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะโครเมียม

จากผลการทดลองจะพบว่า ที่ pH เท่ากับ 2 สามารถดูดซับโลหะโครเมียมได้ถึง 60 ppm และเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงที่ pH เท่ากับ 8

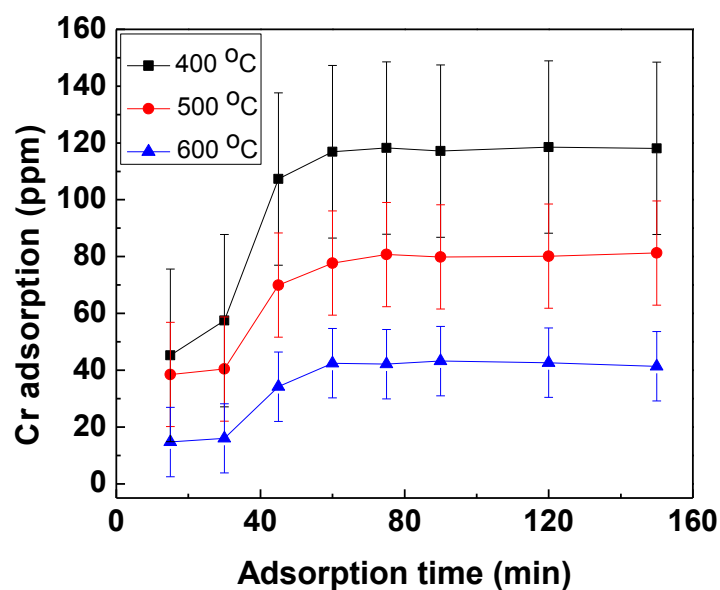
โดยปกติแล้ว ค่า pH ขึ้นอยู่กับการดูดซับของโลหะ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดและพันธะไอออนิกของหมู่ฟังก์ชัน (functional group) สารละลายโลหะในทางเคมีอธิบายว่า (More et. Al., 2007) ที่ค่า pH ต่ำ สมการการดูดซับจะเป็น



ส่วนที่ค่า pH ที่ค่อนข้างสูง สมการการดูดซับจะเป็น



จากสมการข้างต้นจะพบว่า ที่ค่า pH ต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) จำนวนมาก และตัว H^+ นี้จะเป็นตัวกลางในการทำให้ประจุลบเป็นตัวดูดซับที่ผิว ซึ่งเป็นตัวสำคัญในการช่วยลดการขัดขวางการดูดซับไดโครเมทไอออน (Samanta et.al. 2000 และ Bishnoi et. Al. 2004) และการที่ pH ต่ำๆ สามารถดูดซับโลหะโครเมียมได้ปริมาณนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของโครเมียมและพื้นที่ผิวของสารที่ใช้ในการดูดซับด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกค่า pH เท่ากับ 2 มาใช้ในการทดลอง หาเวลาที่ถ่านชาร์ใช้ในการดูดซับโลหะโครเมียม ผลการทดลองแสดงได้ ดังภาพที่ 4.5

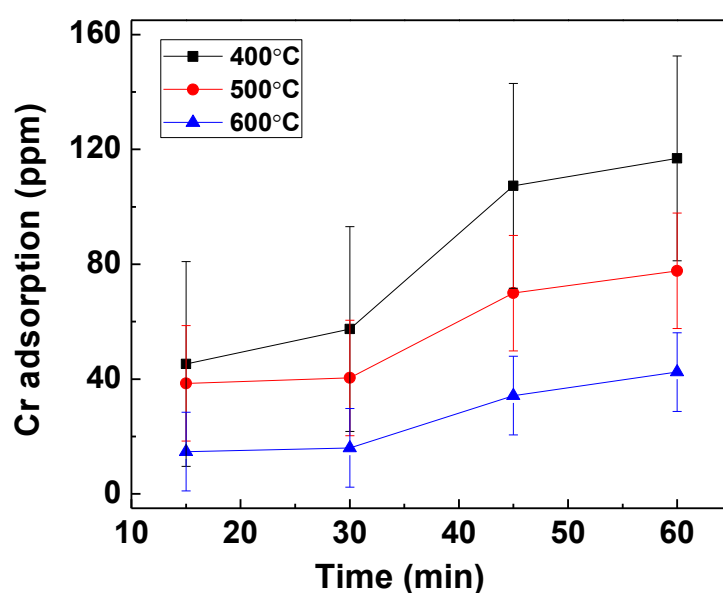


ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 400 – 600 °C

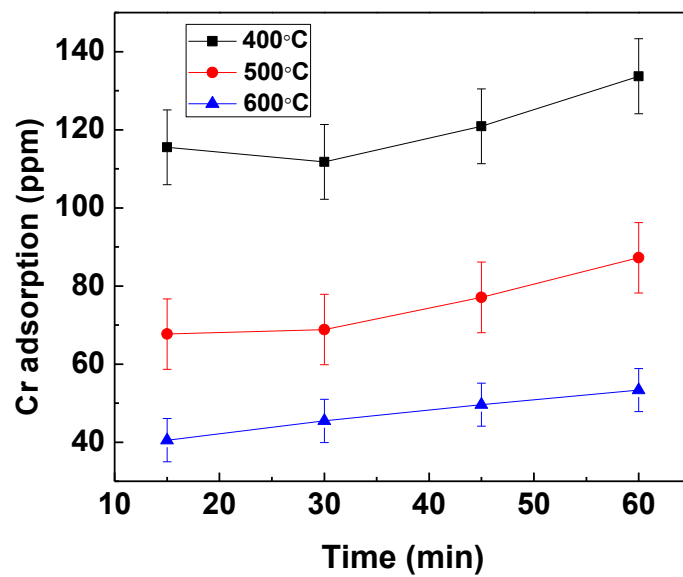
ผลจากการทดลองพบว่า ในช่วงแรก ถ่านชาร์ที่ทุกอุณหภูมิเริ่มมีการดูดซับโลหะโครเมียมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงเวลา 75 นาที จากนั้นปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมเริ่มคงที่ นี่แสดงให้เห็นว่า ถ่านชาร์มีความอิ่มตัวในการดูดซับโลหะโครเมียมแล้วที่เวลา 60 นาที

4.6 ผลของระยะเวลาและความเข้มข้นที่ต้องการทดสอบการดูดซับโครเมียม (VI)

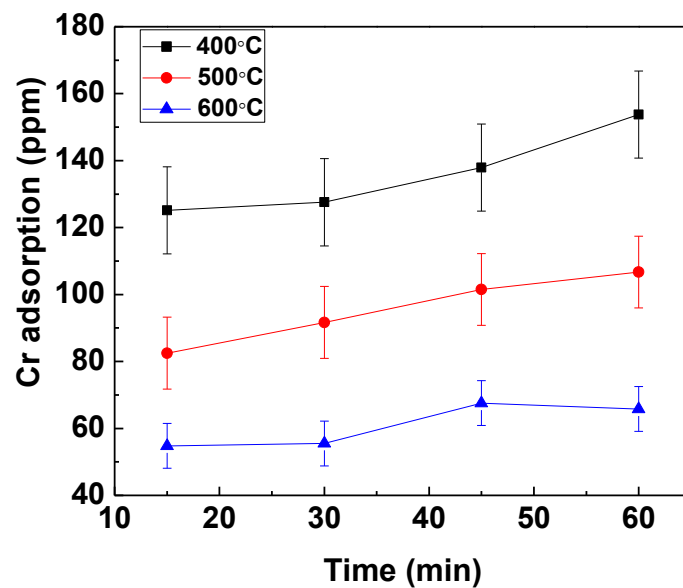
จากการนำถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 400 - 600 °C มาทำการดูดซับโลหะโครเมียมโดยใช้ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.6 Molar และเพิ่มเวลาในการดูดซับไปทุกๆ 15 นาที จนถึงเวลา 60 นาที สามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 4.6 – 4.8



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.2 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที



ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.6 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที



ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 1 Molar ของถ่านชาร์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากผลการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะโครเมียม ในกราฟทั้ง 3 รูป จะเห็นว่า การดูดซับโครเมียมของถ่านชาร์ขานอ้อยที่เผาแบบอับอากาศหรือคาร์บอนไอเซชัน ที่อุณหภูมิ 400 – 600 °C ก่อนการกระตุ้นแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 400 °C นั้นมีการดูดซับโครเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งขัดแย้งกับผลการวัดค่าพื้นที่ผิว

ของการดูดซับที่ได้จากผลการทดลองอื่น ๆ จากข้อสันนิษฐานเบื้องต้น คาดว่าสาเหตุมาจากการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากผิวถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C นั้น มีสารชนิดอื่นที่ไม่ได้ถูกขจัดออก ในระหว่างกระบวนการเผาแบบอับอากาศหรือคาร์บอนเซชันติดอยู่ และทำให้เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันทางเคมีชนิดต่าง ๆ ซึ่งทำปฏิกิริยาจับกับสารโครเมียม ทำให้มีการดูดซับโครเมียมที่ดีกว่าถ่านที่ถูกเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 500 °C และ 600 °C ซึ่งเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ จึงได้ทำการไทเทรตด้วยวิธีของโบห์ม เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น

4.7 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

เมื่อพิจารณาถึงหมู่ฟังก์ชันที่จะทำปฏิกิริยาเคมีกับโครเมียมได้นั้นทำให้ทราบว่าหมู่ฟังก์ชันนั้นควรจะมีคุณสมบัติเป็นกรด โดยวิธีที่จะใช้ในการพิสูจน์ข้อสันนิษฐานนี้คือ การไทเทรตด้วยวิธีของโบห์ม โดยวิธีนี้สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันกรดที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านภายใต้ข้อสมมติว่า สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาพอดีกับหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิก กรดฟีนอลิก และกรดแลคโตนิก, สารโซเดียมคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยาพอดีกับหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกและกรดฟีนอลิกเท่านั้น และสารโซเดียมไบคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยาพอดีกับหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกเท่านั้น ซึ่งผลจากการทำ Boehm's titration แสดงได้ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลจากการทำ Boehm's titration เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน

อุณหภูมิ	กรดฟีนอลิก	กรดแลคโตนิก	กรดคาร์บอกซิลิก
400 °C	30 mM	40 mM	-
500 °C	-	-	-
600 °C	-	-	-

ผลจากการไทเทรตด้วยวิธีของโบห์ม สามารถยืนยันข้อสันนิษฐานเบื้องต้นได้ว่า ถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C นั้น มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดอยู่จริง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันกรดที่พบคือ กรดฟีนอลิก และกรดแลคโตนิก แต่ไม่พบกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งกรดฟีนอลิกและกรดแลคโตนิกนี้จะทำปฏิกิริยาเคมีดูดซับกับสารโครเมียมทำให้ถ่านที่อุณหภูมิ 400 °C นี้มีการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้นจากเดิม นอกเหนือจากการดูดซับผ่านพื้นผิวรูพรุน แต่เมื่อพิจารณาถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 °C แล้วพบว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันกรดทั้ง 3 ชนิดอยู่บนพื้นผิว แต่กลับมีการดูดซับโครเมียมที่ดีกว่าถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 600 °C ข้อสรุปที่เป็นไปได้ก็อย่างหนึ่งคือ อาจจะมีหมู่ฟังก์ชันกรดชนิดอื่นนอกจากหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด 3 ชนิดนี้อยู่บนผิวถ่านอีก เนื่องจากการไทเทรตด้วยวิธีของโบห์มนั้นสามารถทดสอบหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันของกรดได้เพียง 3 ชนิดนี้เท่านั้น

4.8 ผลของการทำถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ในการกระตุ้นถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศหรือคาร์บอนในเซชันนั้น จำเป็นต้องหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการกระตุ้นก่อน โดยเงื่อนไขในการกระตุ้นที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์นั้นได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น, ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น และอัตราการไหลของแก๊สที่ใช้ในการกระตุ้น ในการทดลองนี้เลือกใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ใช้ในการกระตุ้น และใช้อัตราการไหล 70 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีต่อปริมาณถ่าน 40 กรัม ผลที่ใช้ในการวัดความสามารถในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์คือ ค่า %yield ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\%Yield = \frac{\text{น้ำหนักถ่านที่เหลือหลังถูกกระตุ้น}}{\text{น้ำหนักของถ่านก่อนถูกกระตุ้น}} \times 100\% \quad (9)$$

โดยที่ Yield of activated carbon (wt %) คือ ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ (wt %)
Weight of activated carbon คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์
Weight of char คือ น้ำหนักของถ่านชาร์

ค่า %yield เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านก่อนถูกกระตุ้นกับปริมาณถ่านหลังถูกกระตุ้น แสดงดังตารางที่ 7 โดยถ้าค่า %yield มีค่าน้อย ยิ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของถ่านหลังการกระตุ้นแล้วมีปริมาณลดลง เนื่องจากถ่านที่ผ่านการกระตุ้นนั้นจะถูกทำให้สารที่อุดอยู่ตามพื้นที่ผิวรูพรุนนั้นหลุดออกไป ส่งผลให้น้ำหนักของถ่านหลังการกระตุ้นมีน้ำหนักลดลง ดังนั้นถ่านที่ผ่านกระตุ้นยิ่งเหลือน้ำหนักน้อยลง จะยิ่งมีแนวโน้มว่ามีพื้นที่ผิวรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการดูดซับที่ดีขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ก็ยังมีผลของปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งจะถูกใช้ในการพิจารณาและวิเคราะห์ผลการดูดซับด้วยวิธีอื่น ๆ ต่อไป

ตารางที่ 7 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น	%yield
750 °C	81.83
800 °C	75.90
850 °C	68.84
900 °C	55.00
950 °C	46.81

จากตารางค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ถ่านที่ผ่านการเผาแบบอากาศที่อุณหภูมิ 600 °C แล้วทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 120 นาที เท่า ๆ กัน พบว่า ยิ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่า %yield ที่ได้ยิ่งมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ มีแนวโน้มว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะสามารถดูดซับได้ดีขึ้น เนื่องจากการลดลงของปริมาณของสารที่ดูดซับตามพื้นที่ผิวรูพรุน ส่งผลให้น้ำหนักของถ่านหลังการกระตุ้นลดลง แต่เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของถ่านหลังการกระตุ้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าถ่านที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 950 °C มีเถ้าเกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง ซึ่งเถ้าที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการเผาไหม้เนื้อถ่าน และส่งผลให้น้ำหนักถ่านนั้นหายไปด้วย ซึ่งการเกิดเถ้านี้ไม่เป็นผลดีต่อการทำถ่านกัมมันต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์นั้นมิแนวโน้มว่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับที่ดียิ่งขึ้น โดยอุณหภูมิที่ค่าว่าดีที่สุดคือที่อุณหภูมิ 900 °C เนื่องจากมีค่า %yield ดีที่สุดและเมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่าพบว่าไม่มีเถ้าเกิดขึ้น

ตารางที่ 8 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ, ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น	%yield
850 °C, 60 นาที	75.64
850 °C, 120 นาที	68.84
850 °C, 180 นาที	60.39
900 °C, 60 นาที	68.14
900 °C, 120 นาที	55.00
900 °C, 180 นาที	47.05

ตารางที่ 8 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยใช้ถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 600 °C แล้วทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C นั้นเองระยะเวลา 60, 120 และ 180 นาที พบว่า ยิ่งระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นมากขึ้น น้ำหนักของถ่านที่ผ่านกระตุ้นยิ่งลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณสารที่ดูดซับตามพื้นที่ผิวรูพรุนนั้นหลุดออกไปนั่นเอง และเมื่อเปรียบเทียบผลจากการกระตุ้นของทั้ง 2 อุณหภูมิพบว่า มีแนวโน้มว่าที่อุณหภูมิต่างกัน 50 °C ถ่านที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะต้องใช้เวลาเพิ่ม 60 นาทีจึงจะมีค่า %yield ที่ได้ใกล้เคียงกับถ่านที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า โดยเปรียบเทียบได้จากค่า %yield ที่ใกล้เคียงกันระหว่างถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 120 นาที ให้ค่า %yield ที่ใกล้เคียงกับถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 60 นาที คือ 68.84% และ 68.14% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่า %yield ของถ่านที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 180 นาทีกับค่า %yield ของถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 120 นาทีจากตารางค่า %yield ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ

ต่าง ๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันได้แก่ 47.05% และ 46.81% ตามลำดับ สอดคล้องกับผลของการสังเกตด้วยตา ซึ่งเปล่าพบว่า ถ่านที่ผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 180 นาทีนั้นมิได้เกิดขึ้นมาเช่นเดียวกับการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิกระตุ้นที่ดีที่สุดคือ 900 °C และระยะเวลาสำหรับการกระตุ้นที่ดีที่สุดคือ 120 นาที เนื่องจากผลของ %yield ที่ได้นั้นดีที่สุด และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าไม่พบการเกิดขึ้น แต่ทั้งนี้ยังคงต้องทำการวิเคราะห์และยืนยันผลจากขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 9 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิในการเผาแบบอับอากาศ	%yield
400 °C	41.29
500 °C	56.56
600 °C	55.00

ตารางที่ 9 แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากตารางพบว่า ค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงค่า %yield ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 120 นาทีจากถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศเป็นอุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่า %yield ดีที่สุดคือ 41.29% แต่เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าหลังจากการกระตุ้นพบว่าถ่านบางส่วนกลายเป็นเถ้า ซึ่งคาดว่าเกิดจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแบบอับอากาศนั้นน้อยเกินไป ส่งผลให้มีสารอื่นปะปนอยู่ เมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง สารเหล่านั้นจึงก่อให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ และเกิดเป็นเถ้า ส่งผลให้น้ำหนักหลังการกระตุ้นลดลงไปมาก ดังนั้นการกระตุ้นถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C นี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ และเมื่อพิจารณาการกระตุ้นถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 500 และ 600 °C แล้วพบว่าค่า %yield ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันได้แก่ 56.56% และ 55.00% ตามลำดับ โดยที่ถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 600 °C นั้นมีค่าดีกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแบบอับอากาศก่อนนำมากระตุ้นนั้นจึงต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น ๆ ต่อไป

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำถ่านชาร์เผาที่อุณหภูมิ 400 – 600 °C มาทำการกระตุ้นโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 120 นาที ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ ดังตารางข้างล่าง เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการเข้าใจ

ตารางที่ 10 สัญลักษณ์ที่ใช้ของถ่านกัมมันต์ขานอ้อย

ถ่านกัมมันต์ขานอ้อย	สัญลักษณ์ที่ใช้
ถ่านชาร์คาร์บอนที่อุณหภูมิ 400 °C	AC 400
ถ่านชาร์คาร์บอนที่อุณหภูมิ 500 °C	AC 500
ถ่านชาร์คาร์บอนที่อุณหภูมิ 600 °C	AC 600

หลังจากได้ถ่านกัมมันต์ขานอ้อยแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและการดูดซับโลหะโครเมียม

4.9 ผลของการหาพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

เพื่อเป็นการวิเคราะห์สมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์หลังสภาวะกระตุ้น จึงได้ทำการทดลองโดยการนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 120 นาที ไปวิเคราะห์หาสมบัติความพรุนด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 °C โดยใช้เครื่อง Surface area analyzer (BET equation) สถานที่ที่ใช้ในการทดลอง คือ ศูนย์เครื่องมือของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผลจากการทำ BET ทำให้เราสามารถทราบขนาดของ pore และพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ขานอ้อยซึ่งผลต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงค่าขนาดของ pore และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ขานอ้อย

Activated Carbon	Average pore Diameter (nm)	BET surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)
AC 400	7.759	502.96	0.2045
AC 500	3.136	522.05	0.3149
AC 600	3.583	583.73	0.4126

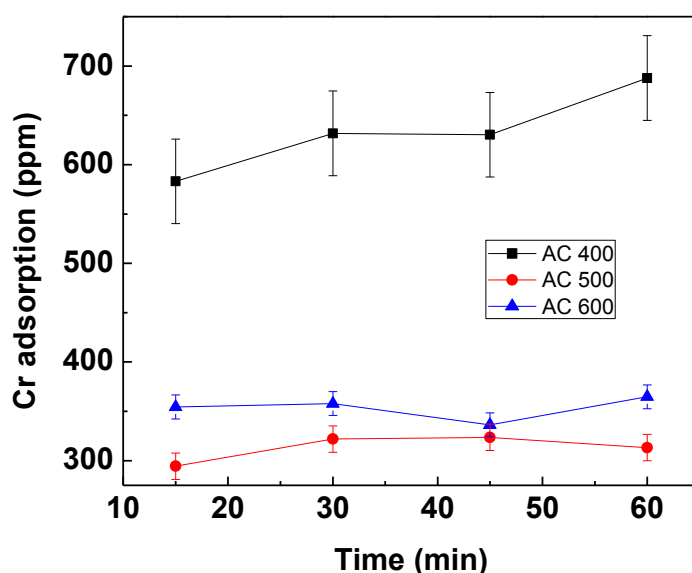
ผลจากตารางจะพบว่า AC 400 มีค่าเฉลี่ยของ pore มีค่าเท่ากับ 7.759 nm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า AC 500 และ AC 600 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่ำๆ รูพรุนของ micropore จะมีปริมาณน้อย รูพรุนส่วนใหญ่จะเป็น mesopores และ macropores จึงทำให้ได้ค่าของรูพรุนที่สูง เมื่อนำมากระตุ้นก็เกิดรูพรุนได้ไม่มาก เพราะรูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่อยู่แล้ว เมื่อเพิ่มการกระตุ้นเข้าไปจึงทำให้รูพรุนใหญ่ขึ้นกว่าเดิมด้วย

ส่วน AC 500 และ AC 600 ขนาดของรูพรุนค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะแต่เดิมถ่านชาร์มีรูพรุนขนาดเล็ก และเมื่อถูกกระตุ้นเข้าไปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปช่วยเพิ่มรูพรุนให้มากขึ้นแต่ขนาดยังเล็กอยู่ หรือก๊าซอาจจะไปเพิ่มรูพรุนที่มีอยู่แล้วให้ใหญ่ขึ้นกว่าเดิม แต่ก็ช่วยได้ไม่มาก ผลที่ได้ จึงพบว่า ขนาดของรูพรุนหลังการกระตุ้นใหญ่กว่าถ่านชาร์ไม่มาก ซึ่งมีค่า 3.136 nm สำหรับ AC 500 และ 3.583 nm สำหรับ AC 600

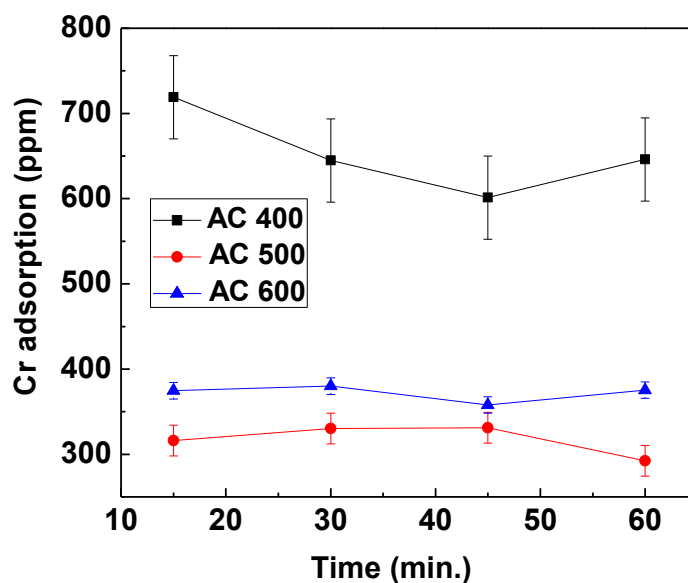
ในทางกลับกัน ในส่วนของพื้นที่ผิว จะเห็นว่า พื้นที่ผิวของ AC 600 จะมีค่าสูงที่สุดซึ่งเท่ากับ $583.73 \text{ m}^2/\text{g}$ และพื้นที่ผิวของ AC 400 มีค่าต่ำสุด คือ $502.96 \text{ m}^2/\text{g}$ ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่า ชานอ้อยได้ถูกนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงๆ สารระเหยต่างๆ เกิดการสลายตัวออกไปในปริมาณมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าทั้งเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเกิดการสลายตัวออกไปจนหมด ส่วนลิกนินอาจจะยังมีเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย ทำให้สมบัติความพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้ มีค่าแตกต่างกัน

4.10 ผลการวิเคราะห์การดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านกัมมันต์

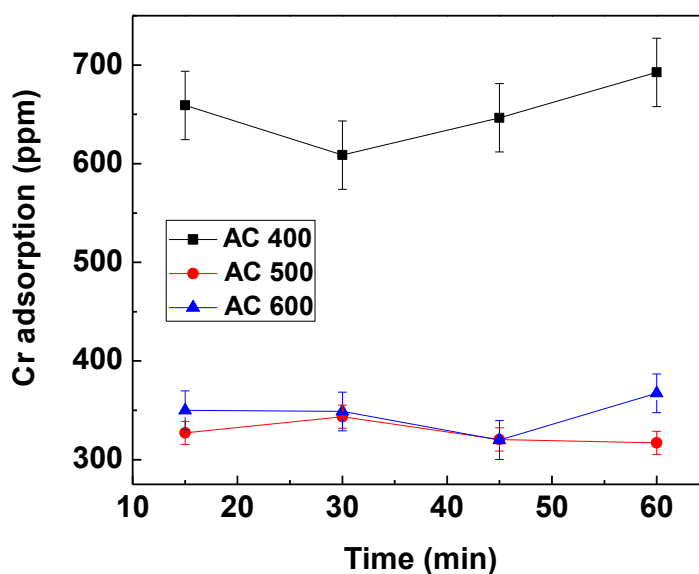
ในการหาปริมาณการดูดซับของโลหะโครเมียมของถ่านกัมมันต์ จะใช้เครื่อง Atomic Adsorption Spectroscopy (AAS) ในการวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับ ในส่วนของถ่านกัมมันต์ก็จะใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์ ซึ่งจะใช้ความเข้มข้นของโครเมียมเป็น 0.2, 0.6 และ 1.0 Molar ส่วนเวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะ คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 4.9 – 4.11



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.2 Molar ของถ่านกัมมันต์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที



ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.6 Molar ของถ่านกัมมันต์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที



ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่มีความเข้มข้น 1.0 Molar ของถ่านกัมมันต์ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากผลการทดลองจะพบว่า ถ่านกัมมันต์ AC 400 สามารถดูดซับโลหะโครเมียมได้ดีในทุกความเข้มข้นของโครเมียม (0.2, 0.6 และ 1.0) เช่นเดียวกับถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 400 °C แต่ในส่วน of ถ่านกัมมันต์ AC 400 จะเห็นว่า ค่าการดูดซับโลหะโครเมียมที่ 0.2 M มีแนวโน้มการดูดซับที่ดีกว่าความเข้มข้น 0.6 และ 1.0 M เนื่องจากกราฟมีค่าเพิ่มขึ้นตลอด นอกจากนี้ ค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ AC 400 สูงกว่าถ่านกัมมันต์

AC 500 และ AC 600 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.9 - 4.11 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ทั้งถ่านชาร์ ที่อุณหภูมิ 400 °C และถ่านกัมมันต์ AC 400 มีค่ารูพรุนสูง จึงดูดซับโลหะได้ดี อีกทั้งยังมีอะตอมของโครเมียม (62 pm) มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของถ่านจึงเป็นการง่ายที่ทั้งถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโลหะโครเมียมได้ดีซึ่งโครเมียมไอออนสามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนของถ่านและเมื่อมันเข้าไปในรูพรุนจนเต็มแล้ว มันยังสามารถเกาะอยู่ที่ผิวของถ่านได้อีกด้วย จึงทำให้ค่าปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมสูงกว่า ตัวอื่นๆ

ส่วนถ่านกัมมันต์ AC 500 และ AC 600 นั้น มีค่ารูพรุนต่ำกว่าโลหะโครเมียม อีกทั้งรูพรุนมีขนาดเล็กจึงทำให้โครเมียมไอออนไม่สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนได้ โครเมียมไอออนจึงเกาะอยู่ได้ที่ผิวถ่านเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ค่าปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมที่ได้ต่ำ ซึ่งค่าปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งสองตัวมีค่าประมาณ 300 – 380 ppm

4.11 ไอโซเทิร์มของการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์

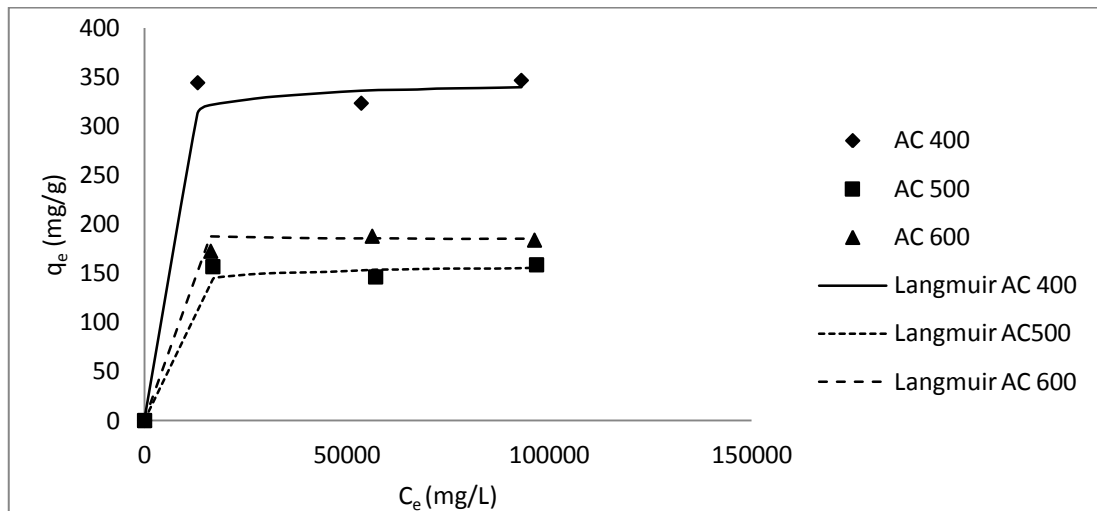
ไอโซเทิร์มของการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากขานอ้อย เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารโครเมียมที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ กับความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับและปริมาณการดูดซับสูงสุด จากภาพที่ 4.12 แสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับโครเมียมด้วย ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่ได้จากการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งลักษณะของไอโซเทิร์มที่ได้นี้ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ซึ่งรูปแบบของสมการเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$q_e = \frac{bq_m C_e}{1 + bC_e} \quad (10)$$

แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) สามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรงได้เป็น

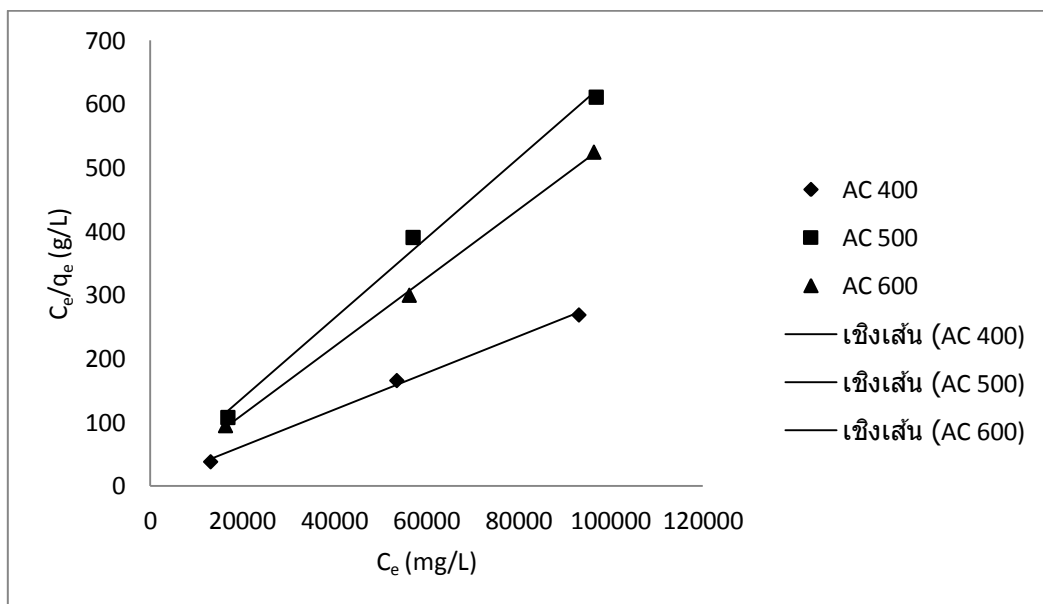
$$\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{1}{bq_m} \right) + \left(\frac{C_e}{q_m} \right) \quad (11)$$

เมื่อ	C_e	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q_e	=	ปริมาณดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน)
	q_m	=	ปริมาณการดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน)
	b	=	ค่าคงที่แลงเมียร์ของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ⁻¹



ภาพที่ 4.12 ไอโซเทิร์มการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่เตรียมจากถ่านชาร์เริ่มต้นต่างอุณหภูมิกัน ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม 0.2 - 1.0 Molar โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง AC 400, AC 500 และ AC 600 และสมการแลงเมียร์

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ที่ได้จากการทดลอง จะได้กราฟเป็นเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของไอโซเทิร์มตามสมการแลงเมียร์ของการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่เตรียมจากถ่านชาร์เริ่มต้นต่างอุณหภูมิกัน ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายโครเมียม 0.2 - 1.0 Molar

จากภาพที่ 4.13 แสดงว่าสมการแลงเมียร์ สามารถใช้อธิบายลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับโครเมียมได้ ซึ่งค่า q_m และ ค่า b ที่คำนวณได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน y ของกราฟ และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient, r^2) ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าคงที่ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ในการดูดซับโครเมียมของ ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่เตรียมจากถ่านชาร์เริ่มต้นต่างอุณหภูมิกัน

sample	q_m (mg/g)	b (mg/L) ⁻¹	r^2
AC 400	344.828	0.00074	0.997
AC 500	158.730	0.00055	0.995
AC 600	185.185	0.00140	0.999

จากตารางที่ 12 จะสามารถสรุปได้ว่า ความสามารถในการดูดซับโครเมียม (q_m) ของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่ผลิตได้นั้น มีค่าการดูดซับสูงสุดที่ตัวอย่าง AC 400 ซึ่งสามารถดูดซับโครเมียมได้ 344.828 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักถ่าน 1 กรัม และจะมีค่าการดูดซับโครเมียมลดลง เมื่อใช้ถ่านที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูงขึ้น (AC 500 และ AC 600) และจากการที่สมการแลงเมียร์อธิบายไอโซเทิร์มได้ดี ส่งผลให้สามารถอธิบายพฤติกรรมดูดซับได้เพิ่มเติมว่า การดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยนี้ เป็นการดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบชั้นเดียวและมีแนวโน้มที่จะเป็นการดูดซับทางเคมี

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกรรมวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการกระตุ้น ทั้งนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชัน ศึกษาปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ขานอ้อยที่ผลิตได้อีก รวมถึงศึกษาหาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของถ่านชาร์ การหาพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ขานอ้อยด้วย นอกจากนี้ได้ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำถ่านชาร์มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น เมื่อได้ถ่านกัมมันต์ แล้วนำมาศึกษาหาปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียม พื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ผลจากการทดลองพบว่า ขานอ้อยอัดแท่ง แล้วทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นถ่านชาร์ที่ให้ค่าคาร์บอนออกมาสูงที่สุด เท่ากับ 87.98% ส่วนที่ อุณหภูมิ 500 °C และ อุณหภูมิ 400 °C มีค่าคาร์บอนเท่ากับ 82.2% และ 79.27% ตามลำดับ ผลจากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่อง SEM พบว่า ถ่านชาร์เผาที่อุณหภูมิ 600 °C มีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับถ่านชาร์ขานอ้อยที่เผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า

ผลจากการหาพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยใช้เครื่อง Surface area analysis (BET analysis) พบว่า ถ่านชาร์ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีขนาดของรูพรุน มีค่าเท่ากับ 4.8854 nm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าถ่านชาร์ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 °C และ 600 °C ตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชันที่ต่ำ ส่งผลให้รูพรุนของ micropore จะมีปริมาณน้อย รูพรุนส่วนใหญ่จะเป็น mesopores และ macropores จึงทำให้ได้ค่าของรูพรุนที่สูง ส่วนที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันที่ 500°C และ 600°C ส่งผลให้ขนาดของรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่ารูพรุนที่ได้ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากว่ามีจำนวนรูพรุนของ micropore อยู่เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ขนาดของรูพรุนมีค่าน้อย อีกทั้งผลจากพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้น มาจากพื้นที่ของ micropore ดังนั้น จะเห็นว่า พื้นที่ผิวของถ่านชาร์ขานอ้อยที่อุณหภูมิ 600 °C จะมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 187.51 m²/g และพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ขานอ้อยเผาที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่า 130.92 m²/g ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด

ผลจากการหาปริมาณการดูดซับโลหะโครเมียม พบว่า ถ่านชาร์ขานอ้อยที่เผาแบบอับอากาศ หรือคาร์บอนไนเซชัน ที่อุณหภูมิ 400 °C นั้นมีการดูดซับโครเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งขัดแย้งกับผลการวัดค่าพื้นที่ผิวของการดูดซับที่ได้จากผลการทดลองอื่น ๆ จากข้อสันนิษฐานเบื้องต้น คาดว่า สาเหตุมาจากการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากผิวถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C นั้น มีสารชนิดอื่นที่ไม่ได้ถูกขจัดออก ในระหว่างกระบวนการเผาแบบอับอากาศหรือคาร์บอนไนเซชันติดอยู่ และทำให้เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันทางเคมีชนิดต่าง ๆ ซึ่งทำปฏิกิริยาจับกับสารโครเมียม ทำให้มีการดูดซับโลหะโครเมียมได้ดีกว่าถ่านที่ถูกเผาแบบอับอากาศที่

อุณหภูมิ 500 °C และ 600 °C ซึ่งเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ดังนั้น เพื่อยืนยันผลการทดลองจึงได้มีการทำการไทเทรตด้วยวิธีของโบห์ม และสามารถยืนยันข้อสันนิษฐานเบื้องต้นได้ว่า ถ่านที่ผ่านการเผาแบบอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C นั้น มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดอยู่จริง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันกรดที่พบคือ กรดฟีนอลิกและกรดแลคโตนิก แต่ไม่พบกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งกรดฟีนอลิกและกรดแลคโตนิกนี้จะทำปฏิกิริยาเคมีดูดซับกับสารโครเมียมทำให้ถ่านชาร์ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 °C มีการดูดซับโลหะโครเมียมเพิ่มขึ้นจากเดิมนอกจากการดูดซับผ่านพื้นผิวรูพรุน แต่เมื่อพิจารณาถ่านที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 °C แล้วพบว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันกรดทั้ง 3 ชนิดอยู่บนพื้นผิว แต่กลับมีการดูดซับโครเมียมที่ดีกว่าถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 600 °C ข้อสรุปที่เป็นไปได้ก็อย่างหนึ่งคือ อาจจะมีหมู่ฟังก์ชันกรดชนิดอื่นนอกจากหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด 3 ชนิดนี้อยู่บนผิวถ่านอีก เนื่องจากการไทเทรตด้วยวิธีของโบห์มนั้น สามารถทดสอบหาปริมาณของหมู่ฟังก์ชันของกรดได้เพียง 3 ชนิดเท่านั้น

ส่วนผลของการนำถ่านชาร์จากอ้อยมาทำการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้เป็นถ่านกัมมันต์ โดยการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมนั้น พบว่า ที่อุณหภูมิกระตุ้น 900 °C เป็นเวลา 120 นาที จะให้ผลการทดลองออกมาดีที่สุด ซึ่งดูได้จากค่า %yield

จากนั้น นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาทดสอบหาพื้นที่ผิวและรูพรุน ซึ่งผลการทดลองที่ได้ พบว่า ถ่านกัมมันต์ AC 600 ให้ค่าพื้นที่ผิวออกมาสูงสุด เท่ากับ 583.73 m²/g ส่วนถ่านกัมมันต์ AC 400 ให้ค่าพื้นที่ผิวออกมาเท่ากับ 508.96 m²/g ในส่วนของขนาดของรูพรุนนั้นกลับพบว่า ถ่านกัมมันต์ AC 400 ให้ค่าขนาดของ รูพรุนสูงถึง 7.759 nm แต่ถ่านกัมมันต์ AC 500 และ ถ่านกัมมันต์ AC 600 ให้ค่าขนาดของรูพรุนใกล้เคียงกันคือ 3.136 และ 3.583 nm ตามลำดับ

ผลของการดูดซับโลหะโครเมียมนั้นมีค่าคล้ายๆ กับถ่านชาร์ คือ ถ่านกัมมันต์ AC 400 แสดงค่าปริมาณการดูดซับได้ดีกว่า ถ่านกัมมันต์ AC 500 และ ถ่านกัมมันต์ AC 600 และเมื่อนำค่าการดูดซับโครเมียมที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม ที่พิจารณาไอโซเทอมตามแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) พบว่า ถ่านกัมมันต์ AC 400 สามารถดูดซับโครเมียมได้สูงสุดที่ 344.828 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักถ่าน 1 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สูงที่สุดอีกด้วย และรองลงมาคือ AC 600 และ AC 500 ให้ค่าการดูดซับโครเมียมอยู่ที่ 185.185 และ 155.703 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักถ่าน 1 กรัม ตามลำดับ ดังตารางต่อไปนี้

ตัวอย่าง	Average pore diameter (nm)	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (m ² /g)	ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับโครเมียม (mg/g)
AC 400	7.759	502.96	344.828
AC 500	3.136	522.05	158.730
AC 600	3.583	583.73	185.185

ดังนั้นในงานวิจัยในครั้งนี้ สภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย คือ คาร์บอนใน เซชันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจน 1000 มิลลิลิตรต่อนาที แล้ว กระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหลที่ 70 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การเปรียบเทียบความสามารถเชิงคุณภาพกับถ่านกัมมันต์ในตลาด

1. ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ของบริษัท ไฟโตเทคโนโลยี แอนด์ อะโกรเคมีคอล จ.เชียงใหม่ เหมาะ สำหรับการดูดซับกลิ่น ดูดซับสี และดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิว 1000 m²/g ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่ผลิตได้ แต่ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยก็เหมาะสำหรับการนำไป ดูดซับโลหะหนัก ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดีกว่า ถึงแม้จะให้ค่าพื้นที่ผิวที่ต่ำกว่า เพราะมีขนาดของรูพรุนที่ ใหญ่กว่า สามารถดูดซับโมเลกุลของโลหะหนักในน้ำเสียได้


ไฟโตเทคโนโลยี แอนด์ อะโกรเคมีคอล
 เลขที่ 200/99 หมู่ 5 ต.ฟ้าฮ่าม อ.เมืองเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50000
 หมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร: 053-853139, มือถือ: 086-6586628
 E-mail: plantbiomedia@gmail.com, Website: www.plantmediashop.com

TECHNICAL SPECIFICATION	
Product : Powdered Activated Coconut Shell Based Carbon Grade : HRO M325-90 Test Method : ASTM , Unless otherwise stated Application : DEODORIZATION ,DECOLOURIZATION DECHLORINATION AND REMOVAL OF ORGANIC COMPOUND IN WATER	
PHYSICAL PROPERTIES	SPECIFICATION
Particle Size Distribution : Under 325 mesh (.045 mm) (ASTM MESH/MM.)	MIN. 90 %
Apparent Density (g / cc)	MIN. 0.50
Moisture (% w/w) (As Packed)	MAX. 10
Ash (% w/w) (As Packed)	MAX. 8
pH	9 – 11
Surface Area (m ² / g) (Calculated)	MIN. 1000
Iodine Number (mg / g) (AWWA B 600-96)	MIN. 950
Packing : 25 kgs. / bag (packed in polypropylene with polythene inner) : 500 kgs. / bag	
“ Quality Guaranteed ”	

2. ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน ของ The Carbon Company เป็นถ่านกัมมันต์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่ง กระตุ้นทางกายภาพ ด้วยไอน้ำยิ่งยวด มีพื้นที่ผิวอยู่ที่ 900 m²/g เหมาะสำหรับกรองน้ำ ดูดซับสีและ กลิ่นในน้ำ เพราะถ่านกัมมันต์นี้มีขนาดของรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่เหมาะกับการดูดซับโลหะหนัก เมื่อ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ได้จากขาน้อย



AquaSorb® 1000

granular coal based
activated carbon

Features and Benefits

- Medium activity
- Proven drinking water adsorbent
- High density
- High wettability
- High hardness and abrasion resistance
- Proven superior for multiple reactivations
- Excellent adsorption capacity
- Both adsorption and transport pores

Typical Applications

- Treatment of municipal drinking water
- Production of soft drinks and beer
- Dechlorination of process water
- Purification of MEA/DEA

Available Particle Sizes

- 20x50 mesh [0.30 - 0.85 mm]
- 12x40 mesh [0.425 - 1.70 mm]
- 8x30 mesh [0.60 - 2.36 mm]
- 8x20 mesh [0.85 - 2.36 mm]
- 8x16 mesh [1.18 - 2.36 mm]

Certifications and Approvals

- ANSI / NSF standard 61
- AWWA B604-96
- EN12915

Standard Packaging

- 25 kg bag [55 lb]
- 500 kg bulk bag [1100 lb]



The polyethylene valve bag from Jacobi sets the standard in the industry for clean, durable and safe handling.

AquaSorb® 1000 is a highly economical, medium activity granular activated carbon manufactured by steam activation from select grades of bituminous coal. The perfect balance between adsorption and transport pores provides optimum performance in a wide range of water treatment applications. The product is a high density adsorbent and provides maximum volume activity. The high hardness and mechanical strength ensures negligible losses during backwashing, air scouring and multiple reactivations.



Soft drink manufacturers and breweries rely upon AquaSorb® activated carbon for dechlorination and dissolved organic removal.

Specification

Iodine number	min. 850 mg/g
Moisture content	max. 5%
Total ash content	max. 15%
Wettability	min. 95%
Hardness	min. 95%

Typical Properties

Surface area	900 m ² /g
Methylene blue number	200 mg/g
Total pore volume	0.88 cm ³ /g
Water soluble ash	0.2%
Apparent density	510 kg/m ³
pH	8-11

Jacobi Carbons reserves the right to modify specifications without prior notice. To obtain a full sales specification with test methods, please contact your nearest Jacobi Carbons office.

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 °C แล้วทำการกระตุ้นทางกายภาพ ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 584 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเหมาะแก่การนำไปกรองสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย เพราะในน้ำเสียมีองค์ประกอบที่มีลักษณะของแข็งขนาดเล็กปนอยู่ ส่วนถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเผา ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C แล้วทำการกระตุ้นทางกายภาพ ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงนั้น ให้ค่าขนาดของรูพรุนออกมาสูงที่สุดที่ 7.759 nm และผลการดูดซับโลหะดีที่สุดในน้ำเสีย จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย เช่น โครเมียม สังกะสี แคดเมียม เป็นต้น

ในส่วนของการพัฒนาคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยในครั้งนี้ ควรมีการพัฒนาในด้านการผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีลักษณะเป็นเม็ดที่มีความแข็งและมีขนาดเม็ดเท่าๆ กัน เพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งานของภาคอุตสาหกรรมที่จะนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน และเพื่อสามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว นำกลับมาคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ได้ง่ายกว่า ส่วนในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ควรพัฒนาในส่วนของแก๊สที่ใช้ในการกระตุ้น อาจจะใช้ไอน้ำยิ่งยวดเป็นตัวกระตุ้นถ่านกัมมันต์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต แต่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในส่วนของพื้นที่ผิวภายในที่ลดลงของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

นอกจากนี้ เราได้คำนวณหาต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งแสดงข้อมูลได้ ดังนี้

การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

การวิเคราะห์ต้นทุนคิดจากแรงงาน 1 คน และผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยได้ 50 กิโลกรัมต่อวัน	
1 วัน ใช้ถ่านขานอ้อย 50 กิโลกรัม	เป็นเงิน 200 บาท
(คิดถ่านขานอ้อยกิโลกรัมละ 4 บาท) 1 วัน	
ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตถ่านกัมมันต์ 1 ถัง เท่ากับ 10 ลิตร	เป็นเงิน 1,400 บาท
(คิดค่าลิตรละ 140 บาท) 1 วัน	
ค่าไฟฟ้าในการอบถ่านกัมมันต์จากเตาอบ	เป็นเงิน 10.50 บาท
(คิดจากเตาอบขนาด 3,000 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) 1 วัน	
ผลิตถ่านกัมมันต์ได้ 15 กิโลกรัม) 1 วัน ค่าแรง 1 คน	เป็นเงิน 300 บาท
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	เป็นเงิน 1,910 บาท

ดังนั้น ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยต่อกิโลกรัมเท่ากับ 38.21 บาท

ราคาถ่านกัมมันต์ในตลาด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นถ่านกะลามะพร้าวคุณภาพระดับการค้าอยู่ที่กิโลกรัมละ 180-200 บาท ดังนั้นการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยจึงมีศักยภาพเพียงพอในเชิงพาณิชย์

แต่ถ้าหากกระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์ จากกระบวนการทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำยิ่งยวด จะมีต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ต่ำกว่าการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเหมาะสำหรับภาคอุตสาหกรรม ในที่นี้สามารถเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตได้ ดังนี้

การใช้ไอน้ำ (O₂)

การวิเคราะห์ต้นทุนคิดจากแรงงาน 1 คน และผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยได้ 50 กิโลกรัมต่อวัน

1 วัน ใช้ถ่านขานอ้อย 50 กิโลกรัม เป็นเงิน 200 บาท

(คิดถ่านขานอ้อยกิโลกรัมละ 4 บาท) 1 วัน

ใช้ไอน้ำในการผลิตถ่านกัมมันต์ 20 ลิตร เป็นเงิน 240 บาท

(คิดค่าลิตรละ 12 บาท) 1 วัน

ค่าไฟฟ้าในการอบถ่านกัมมันต์จากเตาอบ เป็นเงิน 10.50 บาท

(คิดจากเตาอบขนาด 3,000 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) 1 วัน

ผลิตถ่านกัมมันต์ได้ 15 กิโลกรัม) 1 วัน ค่าแรง 1 คน เป็นเงิน 300 บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด เป็นเงิน **750.50** บาท

ดังนั้นต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยต่อกิโลกรัมเท่ากับ 15 บาท

ราคากถ่านกัมมันต์ในตลาดเป็นถ่านคุณภาพระดับการค้าอยู่ที่ กิโลกรัมละ 180 -200 ดังนั้นการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยจึงมีศักยภาพเพียงพอในเชิงพาณิชย์

จากผลการคำนวณ จะพบว่า ทางโรงงานอ้อยและน้ำตาลสามารถนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงาน เช่น ขานอ้อยหรือเถ้าดำขานอ้อยมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับโรงงาน อีกทั้งยังสามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากขานอ้อยหรือเถ้าดำขานอ้อยมาใช้ในกระบวนการดูดซับสีในน้ำตาล ซึ่งเป็นการลดการใช้เรซินในกระบวนการดูดซับสีในน้ำตาล อีกทั้งยังช่วยในการลดภาวะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการล้างทำความสะอาดเรซินด้วย นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ที่ได้ยังสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย หลังจากใช้บำบัดน้ำเสียแล้วยังสามารถนำมาทำเป็นปุ๋ยชีวภาพได้อีก ซึ่งได้ประโยชน์ในหลายด้าน

จากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยประสงค์ที่จะต่อยอดการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยหรือเถ้าดำขานอ้อยโดยใช้กระบวนการทางกายภาพคือใช้ไอน้ำ เพื่อคำนึงถึงต้นทุนในการผลิต และจะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาใช้ในการบวนการดูดซับสีของการผลิตน้ำตาลทราย เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับภาคอุตสาหกรรม

จากข้อมูลดังกล่าวทั้งเรื่องการเปรียบเทียบความสามารถเชิงคุณภาพกับถ่านกัมมันต์ในตลาดและต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยจะพบว่า ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวหรือถ่านกัมมันต์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดซึ่งเป็นข้อดีในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเพื่อใช้งานในทางด้านการดูดซับต่างๆ แต่ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยยังมีพื้นที่ผิวภายในที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยที่ผลิตได้นี้ อาจเหมาะสมกับลักษณะของการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ดูดซับกลิ่น ดูดซับสี ในกระบวนการผลิตน้ำตาล หรือดูดซับโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่าโครเมียม เพื่อให้ได้ปริมาณการดูดซับที่สูงสุด

บรรณานุกรม

1. กรมศุลกากร. 2545. สถิติการนำเข้าส่งออก [ออนไลน์]. จาก http://www.oie.go.th/industrystatus_th.asp
2. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2543). การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุชีวมวล[ออนไลน์]. จาก http://www.dedp.go.th/renew/bio_p.htm
3. Castro, J., Bonelli, R., Cerrella, G. and Cukierman, L. 2000, "Phosphoric acid activation of agricultural residues and bagasse from sugar cane: Influence of the experimental conditions on adsorption characteristics of activated carbons" Ind. Eng. Chem. Res. 39.4166-4172.
4. วัชร ชาทกิตติวงศ์. 2542. การควบคุมมลพิษในสิ่งแวดล้อม Environment Pollution Control (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง
5. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. 2541. การใช้ประโยชน์ของกากอ้อย. วารสารน้ำตาล. 34. 5.
6. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. 2541. วารสารน้ำตาล. 34. 6.
7. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. 2541. วารสารน้ำตาล. 34.7.
8. Jagtoyen, M. and Derbyshire, F. 1998, Activated carbons from yellows poplar and white oak by H_3PO_4 activation. **Carbon**. 36. 1085 -1097.
9. Othmer, 1995, Encyclopedia of Chemical Technology, New York, John Wiley and Son, p.1099.
10. Bansal, Donnet and Stoeckli, 1998, Active Carbon, New York, Marcel Dekker Inc, p. 120.
11. Hassler, J.W. (1974). Purification with activated carbon: Industrial, Commercial and Environmental. Chemical Publishing Co. Inc., New York.
12. Leon y Leon, C.A., and Radovic, L.R. 1994, Interfacial chemistry and electrochemistry Of carbon surfaces. In: Thrower, P. A., editor. Chemistry and Physics of Carbon. Marcel Dekker, Inc., New York.
13. คณิต กฤษณังกูร และ จงจิตร หิรัญลาภ, 2527, "การทำ Activated Carbon จากแกลบ", วารสารวิทยาศาสตร์, ปีที่ 38, ฉบับที่ 5 – 6, หน้า 276 – 284.

14. Ruiz, M. and Rolz, C., 1971, "Activated Carbons from Sugar Cane kasse," Industrial and Engineering Chemistry Production Research and Development, 10 (4). 429 - 432.
15. Bhattacharya, S.C. and Shrestha, R-M., 1990, "Biocoal: Technology and Economics, Asian Institute of Technology", page 495.
16. อุไรวรรณ ธรรมรัตน์คุณ, 2523, การทำถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ กรมวิทยาศาสตร์บริการ, หน้า 11- 12.
17. วาทีน ชูติปาโร, สมชัย อนันต์โสภณกุล และ ศักดิ์ชัย เหล่าวัฒนวงศ์, 2526, Activated Carbon from Coconut shell, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1 – 70.
18. กมล ตรีวิบูลย์ และสมพจน์ เตชะมีนา, 2528, การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านกะลามะพร้าว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1 – 108.
19. Singh, J. and Raman SK, 1976, "Utilization of Undersized Particles of Coconut Shell for Production of Activated Carbons," Indian Journal of Technology, 14. 145-149.
20. Kato, T., 1965, Method of Preparing Activated Charcoals, Patent specification 1001161, 2-5.
21. Hashimoto, K, Miura, K., Yoshikawa, F. and Imai, I., 1979, "Change in Pore Structure of Carbonaceous Materials during Activation and Adsorption Performance of Activated Carbon," Industrial and Engineering Chemistry Process of Desorption Development, 18(1). 72 - 80.
22. Dutta, S., Wen, C.Y. and Belt, R.J., 1977, "Reactivity of Coal and Char. 1. In Carbon Dioxide Atmosphere," Industrial and Engineering Chemical Product Design and Development, 16(2) 20-30.
23. Blackwood, J.D. and Mac Taggart. F.K, 1959, "The Oxidation of Carbon with Carbon Dioxide". Australian Journal Chemistry. 12(2). 114 - 121.
24. ดำรง ชุมมงคล และ อภิสิทธิ์ เจริญกุล, 2533, "การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น", วิศวกรรมสาร, เล่ม 6, หน้า 96 – 99.
25. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2523, "การศึกษาเรื่องการทำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ" รายงานกิจกรรมวิทยาศาสตร์บริการ, ฉบับที่ 38, หน้า 65 – 73.

26. Khummongkol, D., Charoenkool, A. and Pongkum, N., 1992, "Experimental Optimization of Activated Carbon Synthesis by Simplex Search Method," *Applied Energy*, 41. 243 - 249.
27. สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, เลอสรวง เมทสุด, จงกลณี เลหาวิจิตร, ประจง โภคสวัสดิ์ และ รุ่งวิภา โชต รุ่งเรือง 2523, "การทำ Activated Carbon จากกะลามะพร้าว [ภาค 2]". วารสารเคมีวิศวกรรม เทคโนโลยีทางอาหารและเชื้อเพลิง, ปีที่2, ฉบับที่ 1, หน้า 67 - 72.
28. กองการวิจัยกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2527, "ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)". ข่าวกรม วิทยาศาสตร์บริการ, ฉบับที่ 107, หน้า 12 -13.
29. นราพร หาญจนวนวงศ์, สุนทรี ต้นสุวรรณ และ สงวนเกียรติ ล้วนรัตนกร, 2529, "การทำถ่านกัมมันต์ จากซังข้าวโพด", วารสารคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์, ปีที่ 5, ฉบับที่ 3, หน้า 291 - 303.
30. Valix, M., Siliezar, J. and Zhang, K. 1999, "The influence of the properties of activated bagacillo on Cr (VI) adsorption" *Dev. Chem. Eng. Mineral Process.*, 7(5/6) 537-549.
31. Castro, J., Bonelli, R., Cerrella, G. and Cukierman, L. 2000, "Phosphoric acid activation of agricultural residues and bagasse from sugar cane: Influence of the experiment conditions on adsorption characteristics to activated carbons". *Ind. Eng. Chem. Res.* 39(4). 166 - 172.
32. Selvi, K., Pattabhi, S. and Kadirvelu, K. 2001 "Removal by a adsorption onto activated carbon". *Bioresource Technology*, 80. 87 - 89.
33. Girgis, S., Yunis, S. and Soliman, M. 2002 "Characteristics of activated carbon from peanut bulls in relation to conditions of preparation". *Materials Letters*, 57. 164 - 172.
34. Kobya, M. 2004 "Adsorption, kinetics an equilibrium studies of Cr (VI) by hazelnut shell activated carbon". *Absorption Science & Technology*, 22(1). 51- 64.
35. Gupta, V.K., & Ali, I. (2000). "Utilisation of bagasse fly ash (a sugar industry waste) for the removal of copper and zinc from wastewater". *Separation and Purification Technology*, 18(2). 131-140.
36. Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Chandra, S., &Agarwal, S. 2002 "Removal of lindane and malathion from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste". *Water Research*, 36(10). 2483-2490.

37. Roa, M., Parwate, A.V., & Bhole, A.G. 2003 "Removal of Cr^{6+} and Ni^{2+} from aqueous solution using bagasse and fly ash". Waste Management, 22(7): 821-830.
38. Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Sharma, M., & Saini, V. K. 2002. "Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste". Water Research, 37(16). 4038 - 4044.
39. Gupta, V. K., & Ali, I. 2004 "Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste". Journal of Colloid and Interface Science, 271(2). 321 - 328.
40. Ouki, S.K. and Neufeld, R.D. 1997 "Use activated carbon for the recovery of chromium from industrial wastewater". J. Chem. Tech. Biotechnol. 70. 3 – 8.
41. Selomulya, C., Meeyoo, V. and Amal, R. 1999 "Mechanisms of Cr (VI) removal from water by various types of activated carbon". J. Chem. Tech. Biotechnol. 74. 111 – 122.
42. Harry M. 2000. Activated carbon compendium. 1st edition. Elsevier Science, Amsterdam, New York.
43. Henning, K.D., and Schäfer, S. 2007. Impregnated activated carbon for environmental protection. Wigan, Lancashire: CPL Carbon Link. Available from: <http://www.activatedcarbon.com/enviro.html>. Accessed date: June 25, 2007.
44. Kenneth, E.N., Gounaris, V., and Hou, W.S. 1992. Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control. Lewis publishers, Inc., Chelsea, Michigan.
45. กรมควบคุมมลพิษ 2547. ฐานความรู้การกำจัดกลิ่น - การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษร่วมกับสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แหล่งข้อมูล: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm
46. Kalderis D., Bethanis .S, Panagiota P., Diamadopoulos E. 2008. Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-stage chemical activation method at low retention times, Bioresource Technology 99, 6809-6816.
47. Purnomo C.W., Salim ., Hinode H. 2011. Preparation and characterization of activated carbon from bagasse fly ash, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 91, 257-262.
48. Olivier, J.P. 1995. Modeling physical adsorption on porous and nonporous solids using density functional theory. Journal of Porous Materials, 2(1), 9-17.

49. Mor, S. Ravindra, K. and Bishnoi, N.R. 2007. Adsorption of chromium from aqueous solution by activated alumina and activated charcoal, *Bioresour. Technol.*, 98.
50. Samanta, B.J.K. and Kundu, A.K. 2000. Removal of Cr(VI) from aqueous solution by using low cost adsorbent, *Indian J. Environ. Prot.* 20, 754–760.
51. Sing K. (2001), The use of nitrogen adsorption for the characterization of porous materials, *Colloids Surf. A* 187–188 (2001), 3–9.