

การเตรียมและวัดสมบัติต้านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อย
โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

นางสาว ญัฐยา พูนสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2545
ISBN 974-533-246-1

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ACTIVATED
CARBON FROM LIGNITE COAL AND BAGASSE BY
CHEMICAL ACTIVATION METHOD**

Miss Natthaya Punsuwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2002

ISBN 974-533-246-1

การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อย

โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ACTIVATED CARBON
FROM LIGNITE COAL AND BAGASSE BY
CHEMICAL ACTIVATION METHOD**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนวรรณ เกียรติโกมล)

ประธานกรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสติติกุลชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาลี ตั้งสติติกุลชัย)

กรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....

(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร. วรพจน์ จำพิศ)

คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐยา พูนสุวรรณ : การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อย
โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Preparation and characterization of activated carbon from
lignite coal and bagasse by chemical activation method)

อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย,
113 หน้า ISBN 974-533-246-1

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการเตรียมและวัดสมบัติของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ และถ่านกัมมันต์
จากชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยให้ความร้อนในบรรยากาศการไหลของก๊าซไนโตรเจนใน
เตาเผาแบบท่อ สารกระตุ้นที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ และชานอ้อยได้แก่
ซิงค์คลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าสมบัติของถ่านกัมมันต์ได้แก่ ร้อย
ละผลผลิต องค์กรประกอบแบบประมาณ พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ขึ้นกับ
ชนิดของวัตถุดิบ และสภาวะการกระตุ้น เช่น อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ
อุณหภูมิ และเวลาของการกระตุ้น สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์สภาวะที่ให้พื้นที่
ที่ผิวจำเพาะสูงสุด $1550 \text{ m}^2/\text{g}$ ได้แก่ การใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.5 : 1.0
อุณหภูมิ 600°C และเวลา 60 นาที สำหรับถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด $1574 \text{ m}^2/\text{g}$
โดยการเตรียมที่สภาวะอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 400°C และ
เวลา 120 นาที

นอกจากนี้ยังศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) จากสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า
จากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมของถ่าน
กัมมันต์ทุกชนิดสูงมากในช่วงความเป็นกรดต่างของสารละลายต่ำกว่า 3.0 และดูดซับได้มากที่สุดที่
ความเป็นกรดต่าง 2.5 เนื่องจากโครเมียมอยู่ในรูป HCrO_4^- ซึ่งถูกดูดซับได้ดีบนถ่านกัมมันต์ การ
เพิ่มอุณหภูมิขณะดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์สูงขึ้น ซึ่งให้เห็นว่า
การดูดซับเป็นแบบดูดความร้อน สมการแลงเมียร์เป็นสมการที่สามารถนำมาใช้อธิบายไอโซเทอม
การดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์ได้ดี แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบการปกคลุมชั้นเดียว และจากผล
การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าการดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

NATTHAYA PUNSUWAN : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF
ACTIVATED CARBON FROM LIGNITE COAL AND BAGASSE BY CHEMICAL
ACTIVATION METHOD

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAIYOT TANGSATHITKULCHAI, Ph.D.

THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. MALEE TANGSATHITKULCHAI, Ph.D.

113 PP. ISBN 974-533-246-1

ACTIVATED CARBON/ ADSORPTION/CARBONIZATION/CHEMICAL ACTIVATION

The preparation and characterization of activated carbon from lignite coal and bagasse by chemical activation under nitrogen atmosphere in a tubular furnace were studied. The chemical agents used for activation were zinc chloride and phosphoric acid for lignite coal and bagasse, respectively. The results showed that properties of prepared activated carbon including percent yield, proximate analysis, specific surface area and pore volume depended on the type of precursors and activation conditions such as chemical ratio, temperature and time of activation. Activated carbon from lignite coal gave the highest surface area of 1550 m²/g when prepared using chemical ratio of 1.5 : 1.0, activation temperature of 600°C and activation time of 60 minutes. For activated carbon from bagasse, the best activation conditions that produced the highest surface area of 1575 m²/g were chemical ratio of 1.0 : 1.0 and activation temperature of 400°C for 120 minutes.

In addition, the adsorption of chromium (VI) from aqueous solution by commercial activated carbon and the prepared activated carbons were also studied. The adsorption was effective at pH of solution lower than 3.0, with maximum adsorption occurred around pH 2.5 for all types of activated carbon. At relatively low pH the HCrO₄⁻ form of chromium (VI) was a predominant species, which can be effectively adsorbed on the carbons. The adsorption capacity increased with increasing temperature, indicating that the adsorption of chromium (VI) on activated carbon was an endothermic process. Langmuir type of adsorption isotherm was found to fit the adsorption of chromium (VI) on activated carbon reasonably well. This suggests that the adsorption of chromium (VI) from solution was monolayer type of adsorption. The second-order rate model appeared to best describe the adsorption kinetics of chromium (VI) from the solution.

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ ตั้งสติย์กุลชัย ที่ได้มอบโอกาสในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท และเป็นผู้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาลี ตั้งสติย์กุลชัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนวรรณ เกียรติโกมล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการวิจัย

ขอบคุณน้อง เพื่อน และพี่ ระดับปริญญาโท-เอกทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษา มาโดยตลอด

ขอบคุณ กำลังใจจากเพื่อนที่แสนดี จูน (สุกัลกษณ์ ฉายสุริยพันธุ์)

ขอกราบขอบคุณ และขอบคุณ ผู้ที่มีส่วนร่วมทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี แต่มีได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณป้าเนื่องของหลานๆ และพี่ชายที่แสนดี ที่ส่งเสริมและสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา

ณัฐยา พูนสุวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ถ่านหิน.....	5
2.1.1 การจำแนกถ่านหิน.....	5
2.2 ชานอ้อย.....	9
2.2.1 เซลลูโลส.....	9
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส และเพนโตแซน.....	12
2.2.3 ลิกนิน.....	12
2.3 ถ่านกัมมันต์.....	14
2.3.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์.....	14
2.3.2 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์.....	15
2.3.3 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	23
2.3.5	การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์.....	25
2.4	การดูดซับ.....	25
2.4.1	การดูดซับทางกายภาพ.....	26
2.4.2	การดูดซับทางเคมี.....	26
2.4.3	ไอโซเทอมการดูดซับ.....	26
2.4.4	สมการไอโซเทอมการดูดซับ.....	29
2.5	โครเมียม.....	30
2.5.1	โครเมียม (VI).....	31
2.5.2	ความเป็นพิษของโครเมียม.....	32
2.5.3	การกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม.....	32
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1	การเตรียมถ่านกัมมันต์.....	37
3.2	การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	39
3.3	การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม.....	40
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล.....	43
4.1	สมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.....	43
4.1.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ.....	43
4.1.2	ร้อยละผลผลิต.....	45
4.1.3	ผลของสถานะกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว และลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	47
4.1.3	ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์.....	57
4.2	สมบัติถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก.....	60
4.2.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ.....	60
4.2.2	ร้อยละผลผลิต.....	62
4.2.3	ผลของสถานะกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว และลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4	ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	73
4.3	การทดสอบความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์	75
4.3.1	ระยะเวลาเข้าถึงสมดุล.....	75
4.3.2	ผลของความเป็นกรดต่างของสารละลาย	77
4.3.3	ไอโซเทอมการดูดซับ.....	79
4.3.4	จลนศาสตร์ของการดูดซับ	83
5	สรุปผลการวิจัย.....	86
5.1	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.....	86
5.2	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	87
5.3	การดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์.....	88
	เอกสารอ้างอิง.....	89
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	วิธีการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM	94
ภาคผนวก ข	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525) ออกตามความ ในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 เรื่อง หน้าที่ของผู้รับใบอนุญาต ประกอบกิจการโรงงาน	103
ภาคผนวก ค	โลหะหนักและโครเมียม	108
	ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณ และปริมาณซัลเฟอร์ของถ่านหินในประเทศไทย ..	8
2.2 ส่วนประกอบของชานอ้อย	10
2.3 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย.....	10
2.4 สัดส่วนของธาตุในชานอ้อย และค่าความร้อน.....	13
2.5 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์.....	21
4.1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านหินลิกไนต์และถ่านกัมมันต์ จากถ่านหินลิกไนต์	44
4.2 ร้อยละผลผลิต ค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จาก ถ่านหินลิกไนต์ เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์.....	46
4.3 ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากถ่านลิกไนต์	50
4.4 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบประมาณของชานอ้อยและถ่านกัมมันต์ จากชานอ้อย	61
4.5 ร้อยละผลผลิต ค่าการดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จาก ชานอ้อย	62
4.6 ร้อยละผลผลิต และค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย เตรียมด้วยอัตราส่วน 1.0:1.0 กระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 60 นาที แต่ใช้ระยะเวลาในการแช่กระตุ้น ต่างกัน	63
4.7 ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	68
4.8 สมบัติถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลาย	75
4.9 ผลการคำนวณค่าตัวแปรในสมการการดูดซับ Langmiur.....	82
4.10 ผลการคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาของการดูดซับโครเมียมในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์....	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างถ่านหินบิทูมินัส 6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เซลลูโลส (ข) เฮมิเซลลูโลส และ(ค) ลิกนิน 11
2.3	โครงสร้างแกรไฟต์ 16
2.4	โครงสร้างรูพรุนในถ่านกัมมันต์ 16
2.5	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์..... 17
2.6	ไอโซเทอมการดูดซับ 28
2.7	ตัวอย่างโมเลกุลหรือไอออนของโครเมียม (VI) ซึ่งโครงสร้างเป็นทรงสี่หน้า 31
2.8	การกระจายไอออนของไตรวาเลนซ์โครเมียม..... 33
2.9	การกระจายไอออนของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม 33
4.1	เส้น ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ขนาดอนุภาค 20x30 เมช (1) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/แม่เมาะ/400°C/60นาทีก (2) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/แม่เมาะ/500°C/60นาทีก (3) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/แม่เมาะ/500°C/60 นาทีก (4) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (5) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/บ้านปู/500°C/60นาทีก และ(6) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/แม่เมาะ/500°C/120 นาทีก 48
4.2	พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกันโดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตตูดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตตูดิบ 1.0 : 1.0 และใช้ เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ 49
4.3	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตตูดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตตูดิบ 1.0 : 1.0 และใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ 51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/60 นาที (ข) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/60 นาที (ค) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/60 นาที.....	52
4.5 เปรียบเทียบปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 ที่อุณหภูมิต่างกัน เมื่อ (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และ (ข) เวลาของการกระตุ้น 120 นาที	53
4.6 เปรียบเทียบ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ(ข) ค่าการดูดซับ ไอ โอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และบ้านปู ซึ่งเตรียมที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้อุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน	55
4.7 ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จาก (ก) ถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และ(ข) ถ่านหินลิกไนต์บ้านปู ซึ่งเตรียมที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้อุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน	56
4.8 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ (ก) ถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะอัตราส่วน 0.5 : 1.0/500°C/60 นาที (ค) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะอัตราส่วน 1.0 : 1.0/400°C/60 นาที และ (ง) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะอัตราส่วน 1.0 : 1.0/500 °C/60นาที.....	58
4.9 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ (ก) ถ่านหินลิกไนต์บ้านปูและ (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปู เตรียมที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 500°C และเวลา 60 นาที.....	59
4.10 ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับ โครงสร้างในชานอ้อย.....	61
4.11 เส้นไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยขนาด -100 เมช โดย (1) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/500°C/60 นาที (2) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/300°C/60 นาที (3) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (4) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/120 นาที (5) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/400°C/60 นาที (6) อัตราส่วน 1.0 :1.0/500°C/60 นาที และ (7) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/500°C/60 นาที	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ 66
4.13	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ 67
4.14	ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/60 นาที (ข) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/60 นาที และ (ค) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/60 นาที 69
4.15	ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างๆ กัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และ (ข) เวลาในการกระตุ้น 120 นาที..... 70
4.16	(ก) ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน และ (ข) ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยเตรียมที่สภาวะอัตราส่วน 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 500°C 60 นาที โดยใช้ระยะเวลาในการแช่สารกระตุ้น 1 และ 72 ชั่วโมง..... 72
4.17	ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ (ก) ชานอ้อย และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย เมื่อ (ข) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/500°C/60 นาที (ค) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/400°C/60 นาที (ง) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/60 นาที (จ) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/120 นาที และ (ฉ) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/500°C/60 นาที..... 74
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายโครเมียมกับเวลาในการสัมผัสของถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกัน เมื่อ (ก) ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ข) ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความเป็นกรดค้างของสารละลาย 2.5 อุณหภูมิขณะดูดซับ 30°C น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร) 76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	ผลของความเป็นกรดต่างของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับ โครเมียมของถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิขณะดูดซับ 30 °C น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร)..... 78
4.20	ไอโซเทอมการดูดซับ โครเมียมที่อุณหภูมิต่างกันของ (ก) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ และ (ค) ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (ความแตกต่างของสารละลาย 2.5 น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร)..... 80
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง C/q_c กับความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิต่างกันของ (ก) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ และ (ค) ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (ความแตกต่างของสารละลาย 2.5 น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร) 81
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\log (q_c - q)$ กับเวลาในการสัมผัส และ (ข) t/q กับเวลาในการสัมผัสระหว่างโครเมียมกับถ่านกัมมันต์ (ความแตกต่างของสารละลาย 2.5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิขณะดูดซับ 30°C น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร) 84

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_m	=	พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารดูดซับหนึ่งโมเลกุล
C	=	ค่าคงที่ไร้นิติยวที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ
C_e	=	ความเข้มข้นสารละลายที่สภาวะสมดุล
ΔH_A	=	ความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว
ΔH_L	=	ความร้อนของการควบแน่น
K	=	ค่าคงที่การดูดซับ Freundlich
k_1	=	ค่าคงที่การดูดซับเมื่อปฏิกิริยาการดูดซับเป็นอันดับหนึ่ง
k_2	=	ค่าคงที่การดูดซับเมื่อปฏิกิริยาการดูดซับเป็นอันดับสอง
L	=	ค่าคงที่อะโวกาโดร
m	=	ค่าคงที่ (Freundlich intensity parameter)
n	=	ปริมาณสารดูดซับที่ความดัน P
n_m	=	ปริมาณตัวดูดซับที่เรียงตัวแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ
P	=	ความดันของสารดูดซับ
P^0	=	ความดันไออิ่มตัวของสารดูดซับที่อุณหภูมิของการดูดซับ
P/P^0	=	ความดันสัมพัทธ์
q	=	ปริมาณการดูดซับที่เวลาต่างๆ ก่อนถึงสมดุล
q_m	=	ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล
r^2	=	สัมประสิทธิ์การถดถอย
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ
S	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ
t	=	เวลา
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านกรรมวิธีถ่านกัมมันต์จนได้ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับได้เป็นอย่างดี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, 2532) กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และวิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ตัวอย่างของวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ถ่านหิน ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง ชานอ้อย ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว เป็นต้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง จึงเหมาะที่จะนำไปดูดกลิ่น ดูดสี หรือใช้ในกระบวนการแยกสาร (Separation processes) ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำตาล การทำน้ำให้บริสุทธิ์ อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น

จากสถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยพบว่าในแต่ละปีมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในปริมาณสูง โดยในปี พ.ศ.2545 มีปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์ทั้งสิ้น 3,120 ตัน คิดเป็นมูลค่าสูงถึง 411,882,682 ล้านบาท (กรมศุลกากร, ออนไลน์, 2545) ทั้งนี้เนื่องจากการผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศไทยมีไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่หลากหลายโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งจะเป็นการใช้ประโยชน์ของวัตถุดิบให้คุ้มค่า และผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานในแต่ละประเภท ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ของประเทศไทย เนื่องจากถ่านหินลิกไนต์เป็นสินแร่ที่มีอยู่มากในประเทศไทย ในปีพ.ศ.2544 ประเทศไทยมีปริมาณสำรองรวมทั้งสิ้นประมาณ 1,332 ล้านตัน และมีปริมาณการใช้ถ่านหินทั้งสิ้น 24.5 ล้านตัน โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 80 ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า (กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, ออนไลน์, 2545) ดังนั้นถ่านหินลิกไนต์จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง และมีปริมาณสำรองในประเทศค่อนข้างมาก และจากการศึกษาโดยนักวิจัยหลายกลุ่มเช่น Teng and Yeh (1998) พบว่าถ่านหินสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ดี และเพื่อความเป็นไปได้ในการเลือกใช้วัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีความหลากหลาย เพื่อให้ได้

ถ่านกัมมันต์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในแต่ละประเภท งานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มการศึกษา การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลที่มีอยู่ เป็นจำนวนมากในประเทศไทย ซึ่งได้แก่ ชานอ้อย (Bagasse) จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2543 พบว่ามี ปริมาณชานอ้อยจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทั้งสิ้น 15,567,000 ตัน ซึ่งร้อยละ 80 ของชานอ้อย ถูกนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และชานอ้อยส่วนที่เหลือถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น ใช้ผลิตเชื้อกระดาษ ใช้ทำผลิตภัณฑ์เส้นใย เป็นต้น แต่จากการสำรวจยังพบว่ามีชานอ้อยที่ไม่ได้ถูก นำไปใช้ประโยชน์สูงถึง 3,222,000 ตัน (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, ออนไลน์, 2543) จึงมี ความเป็นไปได้ที่จะนำชานอ้อยมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ และจากผลการศึกษาเตรียม ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยด้วยวิธีการกระตุ้นต่างๆ โดยนักวิจัยหลายกลุ่มเช่น Castro, Bonelli, Cerella, and Cukierman (2000) พบว่าชานอ้อยเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ได้ดี ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการกระตุ้น ทางกายและกระตุ้นทางเคมี งานวิจัยนี้สนใจการใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีซึ่งสามารถเตรียมได้ดี อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

จากข้อมูลสถิติสิ่งแวดล้อมพบว่าปัจจุบันแหล่งน้ำสาขหลักหลายสายของประเทศไทยมีการ ปนเปื้อนของโลหะหนัก (สถานการณ์สิ่งแวดล้อมไทย 2540-41, 2542) ดังนั้นหากไม่มีการกำจัด และควบคุมอาจเกิดการสะสมของโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ตัวอย่างเช่นสารประกอบของโครเมียม (VI) ที่ละลายอยู่ในน้ำ โลหะโครเมียม พบมากในอุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรม การฟอกหนัง เป็นต้น ถ้าได้รับโครเมียมทางระบบหายใจติดต่อกันเป็นระยะเวลานานจะทำให้ผนังกัน จมูกทะเล ปอด ท้อง และระบบขับถ่ายถูกทำลาย ถ้าผิวหนังสัมผัสกับของเหลวหรือของแข็งที่มี โครเมียม (VI) จะทำให้ผิวหนังบวมแดงเป็นตุ่ม ถ้าร่างกายได้รับโครเมียมในปริมาณสูง ดับและไต จะถูกทำลาย ก่อให้เกิดมะเร็งปอดและถ้าได้รับโครเมียมในปริมาณสูงอาจทำให้เสียชีวิตได้ นอกจากนี้ โครเมียมจะมีความเป็นพิษสูงแล้ว ยังพบว่ามีความยุ่งยากในการกำจัดด้วยเนื่องจากโครเมียม (VI) ละลายน้ำได้ดีและสามารถถูกรีดิวซ์ให้เป็นโครเมียม (III) โดยสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำได้ง่าย จาก ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพิ่มเติมถึงการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปใช้ในการกำจัด โครเมียม (VI) เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีจากถ่านหินลิกไนต์ และชานอ้อย

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.2.3 ศึกษาสมบัติด้านการดูดซับโครเมียม (VI) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์จากแหล่งแม่เมาะ และแหล่งบ้านปูโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นสารกระตุ้น

1.3.2 เตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นสารกระตุ้น

1.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ สภาวะที่ดำเนินการศึกษาได้แก่

1.3.3.1 ปริมาณสารกระตุ้น

1.3.3.2 อุณหภูมิในการกระตุ้น

1.3.3.3 ระยะเวลาในการกระตุ้น

1.3.4 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ได้แก่

1.3.4.1 ร้อยละผลผลิต (%Yield)

1.3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่

ความชื้น (Moisture) เถ้า (Ash) สารระเหย (Volatile matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

1.3.4.3 ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Iodine number)

1.3.4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Specific surface area and pore volume)

1.3.4.5 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ

1.3.5 ศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยมีปัจจัยที่ศึกษา ดังนี้

1.3.5.1 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย

1.3.5.2 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

1.3.5.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย

1.3.5.4 อุณหภูมิการดูดซับ

1.3.5.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.4.2 ทราบสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.4.3 ทราบสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักโครเมียม (VI) หรือโลหะหนักอื่นๆ ที่เป็นเปื้อนในระดับอุตสาหกรรม

1.4.4 เป็นพื้นฐานในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใช้เองในประเทศ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหิน

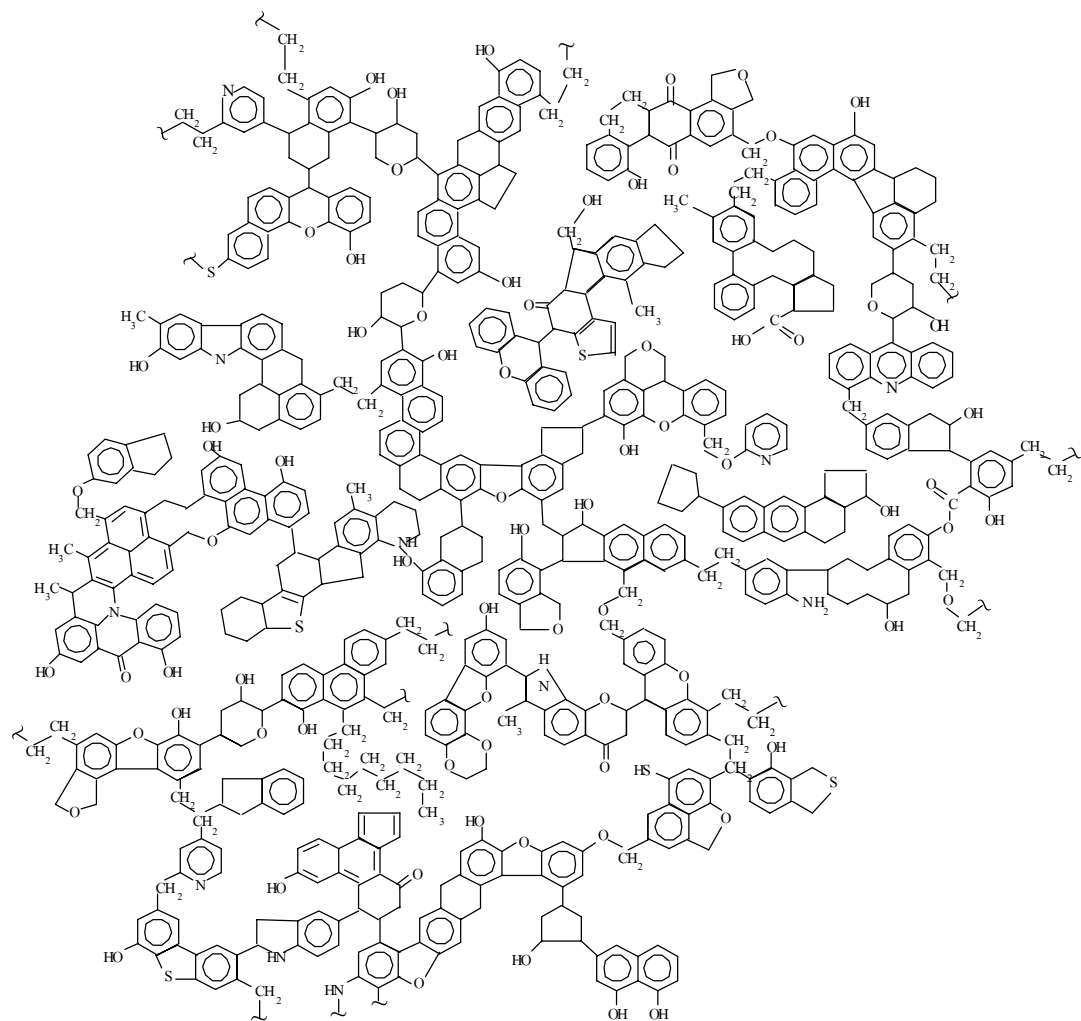
ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของแข็ง สันนิษฐานว่าเกิดจากซากพืชที่ขึ้นอยู่ตามที่สูง และ เช่น หนองบึง ครั้นเมื่อพืชเหล่านั้นตายลงก็จะทับถมกัน และเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการสลายตัวแบบไม่ใช้ออกซิเจนอย่างช้าๆ โดยแบคทีเรีย (Bacteria) ซึ่งจะเปลี่ยนสารเซลลูโลส (Cellulose) ไปเป็นลิกนิน (Lignin) ประกอบกับมีการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่เกิดจากการทับถมกันทำให้การสลายตัวหยุดลง จากการถูกทับถมกันเป็นเวลานานๆ ภายใต้ความดันสูงทำให้น้ำและสารระเหย (Volatiles) ถูกขจัดออกไป เมื่อถึงระยะนี้อะตอมไฮโดรเจนจะรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกแบบหนาแน่น (Condensed aromatics) กลายเป็นถ่านหิน ตัวอย่างโครงสร้างของถ่านหินบิทูมินัสแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ถ่านหินจากแหล่งแตกต่างกันจะมีสมบัติทางเคมี และทางกายภาพที่แตกต่างกันตามธรรมชาติของการเกิดอันได้แก่ พรรณพืชเริ่มต้น สภาพทางภูมิศาสตร์ และธรณีวิทยา ตลอดจนระยะเวลาที่ถูกทับถมซึ่งประการหลังมีบทบาทมากที่สุด ระยะเวลาที่ถูกทับถมหลังจากการตายของพืชจะมีผลต่อร้อยละของคาร์บอนในถ่านหินคือยิ่งถูกทับถมเป็นเวลานานๆ ร้อยละของคาร์บอนในถ่านหินก็ยิ่งมากซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพ และการให้พลังงานด้วย

2.1.1 การจำแนกถ่านหิน

แต่ละประเทศมีระบบการจำแนกถ่านหินแตกต่างกันไปตามจุดประสงค์ของการใช้งาน บางแห่งอาจใช้ชนิดของถ่านหิน (Type) เป็นเกณฑ์ ในขณะที่แห่งอื่นๆ ใช้คุณภาพของถ่านหิน (Grade) เป็นข้อมูลพื้นฐาน ตัวอย่างระบบการจำแนกถ่านหินที่ใช้กันอยู่ได้แก่ ระบบอังกฤษ (Great Britain) ระบบยุโรป (Europe International [ECE]) ระบบอเมริกาเหนือ (North America) และระบบออสเตรเลีย (Australia) เป็นต้น ซึ่งระบบต่างๆเหล่านี้มีข้อคล้ายคลึงกันคือใช้ค่าความร้อน (Calorific value) และผลวิเคราะห์ทางเคมีอื่นๆ เช่น คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ค่าความชื้น (Moisture content) และ ค่าสารระเหย (Volatile matter) เป็นเกณฑ์แบ่ง

อย่างไรก็ตามระบบที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันได้แก่การจำแนกถ่านหินตามลำดับศักดิ์ (Rank) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ในการเปลี่ยนสภาพจากซากพืชพันธุ์ไม้กลายเป็นถ่านหิน (Degree of coalification and metamorphism)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างถ่านหินปิทูมินัส

หมายเหตุ จาก Encyclopedia of Chemical Technology (437),

โดย Othmer, 1995, New York: John Wiley and Son.

ในการจำแนกถ่านหินตามลำดับชั้นนี้ถ้าเป็นถ่านหินประเภทถ่านหินชั้นสูง (High rank coal) จะถูกจัดตามร้อยละคาร์บอนคงตัว (Dry basis) แต่ถ้าเป็นถ่านหินประเภทถ่านหินชั้นต่ำ (Low rank coal) จะถูกจัดตามค่าความร้อน (Moist basis)

การจำแนกถ่านหินในระบบของ American Society for Testing and Material (ASTM) ซึ่งใช้ในทวีปอเมริกาเหนือ นั้น เป็นระบบการจำแนกถ่านหินตามลำดับชั้น ซึ่งมีความชัดเจน และง่ายแก่การใช้งาน จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในหลายประเทศ ระบบนี้ได้จำแนกถ่านหินเป็น 4 ลำดับชั้นคือแอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Subbituminous) และลิกไนต์ (Lignite) ซึ่งแต่ละลำดับถูกแบ่งย่อยลงไปอีกตามสมบัติทางเคมี และค่าความร้อนที่ต่างกันออกไป

2.1.1.1 แอนทราไซต์ เป็นวิวัฒนาการขั้นสูงสุดที่เปลี่ยนสภาพมาจากบิทูมินัสเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุดในลำดับชั้น มีน้ำหนักมาก มีความแข็งแรง มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละประมาณ 86 มีความชื้นต่ำ ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นเวลานาน เวลาเผาไหม้ให้เปลวไฟสีฟ้า ให้ความร้อนสูง มีควันน้อยมากหรือเกือบไม่มีเลย แต่ติดไฟยาก

2.1.1.2 บิทูมินัส เป็นถ่านหินเนื้อแน่น มีลักษณะแข็งมีปริมาณคาร์บอนร้อยละประมาณ 69-86 และมีความชื้นร้อยละประมาณ 1.5-7 เมื่อเผาไหม้ให้เปลวไฟสีเหลือง มีควันน้อย มีค่าต่ำ ให้ค่าความร้อนสูงกว่าถ่านลิกไนต์เนื้อถ่านมีสีน้ำตาลเข้ม ไม่มีร่องรอยของเนื้อไม้ปรากฏให้เห็น เหมาะสำหรับนำไปใช้ผลิตถ่านโค้ก และใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการถลุงโลหะได้

2.1.1.3 ซับบิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีลักษณะอยู่ระหว่างบิทูมินัส และลิกไนต์ โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละประมาณ 10 ถ่านหินประเภทนี้มีคุณค่ามากสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2.1.1.4 ลิกไนต์ เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำมีลักษณะอ่อนแต่ไม่พูน มีสีต่างๆ กัน ตั้งแต่สีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลแก่ มีซากพืชเหลืออยู่เล็กน้อยมีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง และมีปริมาณความชื้นสูงถึงร้อยละประมาณ 30-70 ให้ค่าความร้อนต่ำ ไม่สามารถขนส่งเป็นระยะทางไกลๆ หรือกองเก็บเป็นเวลานานได้ เพราะถ่านหินสามารถเกิดการติดไฟขึ้นมาเองได้ (Spontaneous combustion) ปัจจุบันใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ เมื่อนำลิกไนต์มาเผาเป็นเชื้อเพลิงแล้วจะก่อให้เกิดก๊าซหลายชนิดที่เป็นพิษ คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ฟูลิน และเถ้าเบา ไฮโดรคาร์บอน (ควันดำ) และคาร์บอนมอนอกไซด์

นอกเหนือจากถ่านหินใน 4 ลำดับชั้นดังกล่าวแล้ว นักวิชาการหลายกลุ่มยังได้จัดให้พีท (Peat) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์แรกในกระบวนการเกิดถ่านหิน ให้อยู่ในลำดับต่ำสุดของระบบการจำแนกด้วย พีทประกอบด้วยซากพืชซึ่งบางส่วนได้สลายตัวไปแล้วมีปริมาณออกซิเจน และ

ความชื้นสูงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เช่นกัน ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณ และปริมาณซัลเฟอร์ของถ่านหินในประเทศไทยได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบประมาณ และปริมาณซัลเฟอร์ของถ่านหินในประเทศไทย

เหมืองถ่านหิน และสถานที่ตั้ง	คุณภาพของถ่านหิน (ร้อยละ)				
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	ซัลเฟอร์
เหมืองแม่เมาะ (กฟผ.) อ.แม่เมาะ จ. ลำปาง	30.2	25.4	28.5	16.5	2.41
เหมืองกระบี่ (กฟผ.) อ. เมือง จ. กระบี่	14-42	6-45	4.7	41	2.22
สำนักงานพลังงานแห่งชาติ อ. ลี้ จ. ลำพูน	8.59	11	41.1	38.9	1.4
บริษัทแพร์ลิกไนต์ จำกัด อ.งาว จ.ลำปาง	19-21	7-11	27-31	38-41	1.5-2.7
บริษัทเหมืองบ้านปู้ จำกัด อ.ลี้ จ.ลำพูน	2-3	20	30	35-40	1.2-1.7
บริษัทไทยลิกไนต์ จำกัด อ.แม่ระมาด จ.ตาก	6-13	9-24	22-37	33-51	0.9-2.1
บริษัทสยามแกรไฟต์ (เลย) จำกัด อ.นาด้วง จ.เลย	2.31-4.23	17-35	2.78-7.71	55-73	0.52-1.07
บริษัทเอเชียลิกไนต์ จำกัด อ.หนองหญ้าปล้อง จ.เพชรบุรี	2-8	6-16	32.5	43-58	0.7-1.08

หมายเหตุ จาก ไอน้ำและพลังงานจากถ่านหิน. เกริกชัย สุภาจันท์ (2539). คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

2.2 ชานอ้อย

ชานอ้อยเป็นส่วนเส้นใยของลำต้นอ้อยหลังจากผ่านการบีบคั้นสกัดน้ำออกแล้ว ประกอบด้วย น้ำ เส้นใย และของแข็งที่ละลายได้จำนวนเล็กน้อย ปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ อ้อย อายุ วิธีการเก็บเกี่ยว และประสิทธิภาพของโรงงาน แต่โดยเฉลี่ยจากการสำรวจผลวิเคราะห์ของชานอ้อยที่ได้จากใน และต่างประเทศ ได้ค่าดังนี้ (วารสารน้ำตาล, 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 2.2 และ 2.3 แสดงส่วนประกอบของชานอ้อย และ ส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อยตามลำดับ

2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของ β -glucose ต่อกันด้วยพันธะ $\beta(1-4)$ ที่มีสูตรทั่วไปว่า $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืชโดยจะพบอยู่ร่วมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม (Gum) แทนนิน (Tannin) ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีโมเลกุลยาว และแข็ง การย่อยเซลลูโลสจะได้ Cellobiose และสุดท้ายจะได้กลูโคสโดยเอนไซม์ β -glucosidase จำนวนกลูโคสที่มาต่อกันหรือ Degree of Polymerization (DP) จะมีค่าแตกต่างกัน และสามารถมีค่า DP สูงถึง 10,000 หน่วย และอาจมีน้ำหนักโมเลกุล 1,620,000 สำหรับเซลลูโลสของชานอ้อยมีค่า DP เท่ากับ 2000–3000 หน่วย รูปที่ 2.2 ก แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ถ้าใช้สมบัติการละลายในโซดาไฟ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ของเซลลูโลส สามารถแบ่งประเภทเซลลูโลสได้ 3 ประเภท

α -cellulose: ไม่ละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5% ที่อุณหภูมิห้อง

β -cellulose: ละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5% และตกตะกอนได้ง่ายเมื่อทำให้สารละลายเป็นกรด

γ -cellulose: ละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5 % ไม่ตกตะกอนในกรดแต่ตกตะกอนได้โดยแอลกอฮอล์

เซลลูโลสมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.55 และมีเพียง α -cellulose เท่านั้นที่จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ ส่วนโฮโลเซลลูโลส (Holo-cellulose) จะเป็นคำที่ใช้เรียกคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดของพืชซึ่งได้ภายหลังจากแยกลิกนินแล้ว

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของชานอ้อย

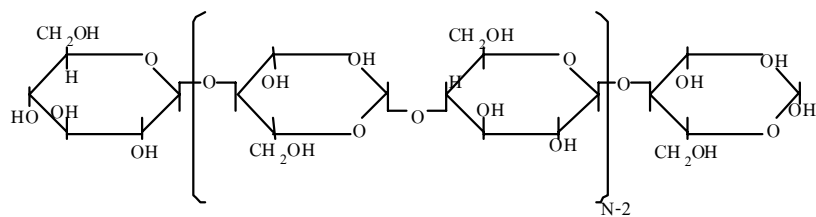
ส่วนประกอบของชานอ้อย	ร้อยละน้ำหนัก	ร้อยละการกระจายเซลล์
เส้นใยจริง	55	35
ท่อลำเลียง	20	17
เยื่อหุ้มท่อลำเลียง	20	35
ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย	5	13

หมายเหตุ จาก “การใช้ประโยชน์ของกากอ้อย,” โดย สำนักคณะกรรมการอ้อย และน้ำตาล สำนัก
งานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2541, วารสารน้ำตาล, 34, 6

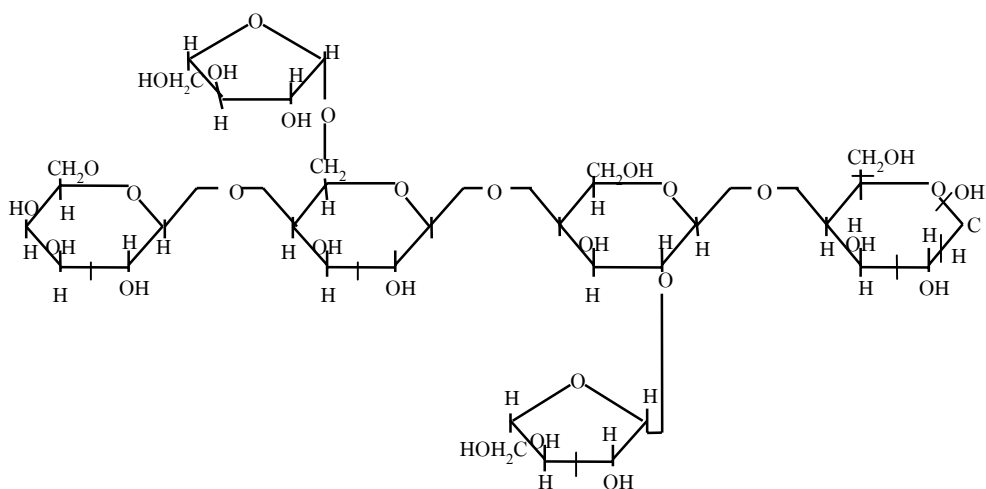
ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย

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

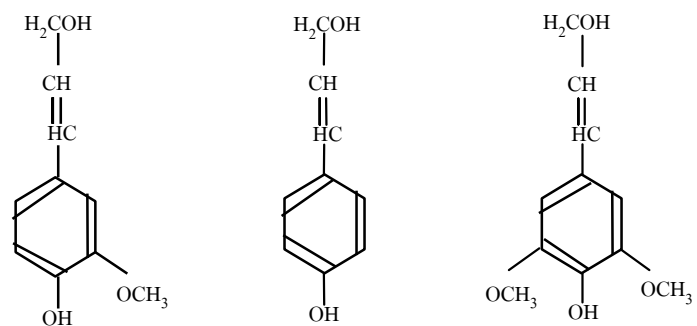
หมายเหตุ จาก Fernandez et al. (1995) อ้างถึงใน “การใช้ประโยชน์ของกากอ้อย,” โดยสำนักคณะกรรมการอ้อย และน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2541, วารสารน้ำตาล, 34, 7.



(ก) เซลลูโลส



(ข) เฮมิเซลลูโลส



(ค) ลิกนิน

รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เซลลูโลส (ข) เฮมิเซลลูโลส และ (ค) ลิกนิน

หมายเหตุ จาก Jagtoyen, M. and Derbyshire, F. (1998). Activated carbons from yellow poplar and white oak by H_3PO_4 activation. **Carbon**. 7-8. (30): 1090.

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเพนโตแซน (Pentosan)

เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่สามารถละลายในสารละลายโซดาไฟ 17.5% ที่อุณหภูมิต่ำได้ ซึ่งต่างจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยหน่วยน้ำตาลเพนโตสมากกว่า กลูโคส และมีค่า DP ต่ำกว่า (ประมาณ 40 หน่วย) ไม่ละลายน้ำ ส่วนเพนโตแซนเป็นรูปหนึ่งของ เฮมิเซลลูโลสและสามารถละลายน้ำได้ เฮมิเซลลูโลส และเพนโตแซนส่วนมากจะเป็น Heteropolysaccharides ซึ่งจะประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลที่แตกต่างกัน 2-4 ชนิด ส่วนมากจะเป็นน้ำตาลไซโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) และกรดยูโรนิก (Uronic acid) ถ้านำเพนโตแซนมาทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกเดือดจะได้เฟอร์ฟูรัล (Furfural) รูปที่ 2.2 ข แสดงโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส มีสูตรโมเลกุล $C_{49}H_{52}O_{14}$ โครงสร้างจะประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ฟีนอลที่มี และไม่มีการเติมหมู่เมทิล ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค

ลำต้นอ้อยประกอบด้วยเนื้อเยื่อเส้นใยหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุด 2 ชนิดที่พบในชานอ้อยได้แก่

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

เส้นใยจริง และเส้นหุ้มท่อลำเลียงมีองค์ประกอบทางเคมีเกือบเหมือนกัน แต่ด้านโครงสร้างแล้วแตกต่างกันมาก เส้นใยจริงมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงประมาณ 70 : 1 เส้นใยจริงในสภาพเปียกเมื่อนำมาทำให้แห้งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยืด และหดตัวจะมีค่าสูง เส้นใยแต่ละเส้นจะอยู่ใกล้กันมาก และจะเชื่อมติดกัน ทำให้มีความแข็งแรงยึดติดได้ดี สมบัตินี้จึงได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมกระดาษ ส่วนท่อลำเลียงเส้นใยจะมีขนาด และรูปร่างไม่แน่นอน มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่อเท่ากับ 5 : 1 แต่ละเซลล์จะไม่เชื่อมติดกันไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ แต่จะมีสมบัติในการดูดซึมที่ดี สามารถดูดซึมน้ำได้หลายเท่าของน้ำหนักของมัน แต่การใช้ประโยชน์ยังไม่แพร่หลาย ส่วนมากจะนำไปใช้เป็นตัวผสม (Carrier) กากน้ำตาลในอาหารสัตว์ ตารางที่ 2.4 แสดงสัดส่วนของธาตุในชานอ้อย และค่าความร้อนของชานอ้อย

ตารางที่ 2.4 สัดส่วนของธาตุในชานอ้อย และค่าความร้อน

โรงงาน	สถานที่	สัดส่วนของธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ค่าความร้อน (kJ / kg)
		C	H	O	N	S	สิ่งเจือปน	
ก	เขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ตอนบน)	43.1	6.4	49.2	0.17	0.03	1.1	19,241
ข	เขตภาคเหนือ (ตอนล่าง)	43.5	6.0	45.4	0.22	0.08	4.8	17,830
ค	เขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	43.8	5.9	47.9	0.13	0.09	2.2	19,256
ง	เขตภาคกลาง (ตะวันออกเฉียงเหนือ)	46	5.8	45.8	0.42	0.08	1.9	18,406
จ	เขตภาคกลาง (ตะวันออกเฉียงเหนือ)	37.3	7.1	51.6	0.20	0.06	3.7	19,482
ฉ	เขตภาคเหนือ (ตอนล่าง)	46.1	6.1	43.7	0.38	0.04	3.7	18,327

หมายเหตุ จาก กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม อ้างถึงใน “การใช้ประโยชน์ของกากอ้อย,” โดย สำนักคณะกรรมการอ้อย และน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2540, วารสารน้ำตาล, 33, 12.

2.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นมาโดยผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากเกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมากซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อน และเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึก (Crystallites) อยู่บ้าง โดยส่วนใหญ่จะรวมกันอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งต่างจากแกรไฟต์ จากสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่น

2.3.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

สมบัติในการดูดสีในของเหลวของถ่านเป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 15 แต่สมบัติในการดูดก๊าซเพิ่งจะมีผู้บันทึกไว้ในปี พ.ศ. 2328 แต่ก็ไม่มีผู้สนใจในสมบัติเหล่านั้น จนกระทั่งปี พ.ศ. 2354 พบว่าถ่านจากกระดูกสามารถดูดสีได้มากกว่าถ่านซึ่งได้จากไม้ จึงเป็นที่นิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกน้ำตาลทรายให้ขาวบริสุทธิ์กันมาก และได้มีการค้นคว้าพัฒนาต่อมาจนกระทั่งปี พ.ศ. 2365 มีผู้พบว่าถ่านที่ได้จากการเผาเลือดกับด่างจี้เถ้า (Potash) มีสมบัติในการดูดสีมากกว่าถ่านกระดูกถึง 20-50 เท่า แต่ไม่สามารถจะผลิตได้ปริมาณมากเพียงพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานได้ ต่อมาประมาณ พ.ศ. 2443 มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Ostreyko ชาวโปแลนด์ ค้นคิดวิธีผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่โดยเผาถ่านในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่งใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับเป็นผู้ริเริ่มให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อต่างๆ เช่น ชื่อ “เอพโพนิท (Epomit)” ผลิตขึ้นในยุโรปในปี พ.ศ. 2452 “นอร์ิท (Norit)” ผลิตในปี พ.ศ. 2454 และ “คาร์โบราฟฟิน (Carboraffin)” ผลิตในปี พ.ศ. 2458 และในอเมริกาได้ผลิต “ฟิลท์ชาร์ (Filtchar)” ขึ้นในปี พ.ศ. 2456 ได้มีการปรับปรุง และเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ๆ ไปเรื่อยๆ ถ่านที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ได้มีการศึกษาถึงการนำไปใช้ในการดูดสี ฟอกสี ในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้ได้ผลดีกว่าถ่านกระดูกมาก

สมบัติในการดูดกลิ่น และก๊าซของถ่านกัมมันต์ เริ่มเป็นที่สนใจกันในช่วง สงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งมีการนำไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ จากจุดนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจในสมบัติการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ของถ่าน ซึ่งจากการทดลองโดยวิธีต่างๆ ได้พบว่าถ่าน

กัมมันต์ที่ผลิตใช้ในการฟอกสีน้ำตาลนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำหน้าที่ปกป้องกันไอพิษ เพราะมีลักษณะของ เบบ และจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีผู้พยายามผลิตถ่านชนิดใหม่ให้มีความหนาแน่นมากขึ้นสำหรับใช้ในการดูดก๊าซโดยเฉพาะ ซึ่งต่อมาเมื่อสงครามสิ้นสุดลงการค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จ และมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การดูดไอของสารละลาย (Solvent) ดูดไอเบนซิน (Benzene) จากก๊าซอื่นๆ โดยทั่วไปถ่านที่ผลิตจากไม้จี้เลื้อย พีท ลิกไนต์ และถ่านที่เหลือจากการทำเยื่อกระดาษจากไฮเซลลูโลส จะได้ถ่านซึ่งมีลักษณะของ เบบ และเหมาะสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ฟอกของเหลว ส่วนกะลามะพร้าวจะได้ถ่านที่ใช้ในการดูดก๊าซได้ดี

2.3.2 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์

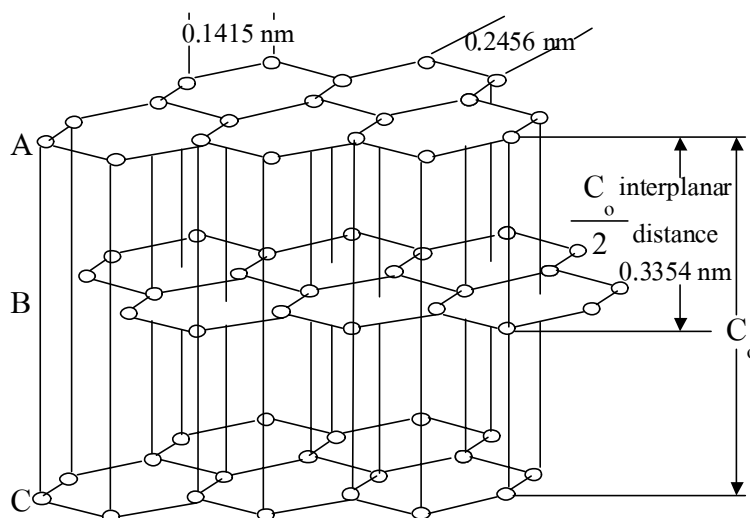
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ซึ่งในโครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้น (Layered structure) ส่วนถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์แต่มีความไม่เป็นระเบียบ (แสดงในรูปที่ 2.4) เรียงตัวซ้อนกันประมาณ 3-30 ชั้น ต่อความหนา 10-100 อังสตรอม ชั้นนี้จะเรียงตัวกันอย่างไม่สมบูรณ์ทำมุมไม่แน่นอน และแต่ละชั้นซ้อนกันอย่างไม่มีระเบียบระยะห่างแต่ละชั้นประมาณ 3.6 อังสตรอม ซึ่งมากกว่าของแกรไฟต์ ในแต่ละชั้นของคาร์บอนยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ชนิดเอสพี 2 (sp² covalent bond) ในรูปวงหกเหลี่ยมคล้ายกับวงหกเหลี่ยมของสารประกอบอะโรมาติก ระหว่างอะตอมคาร์บอนยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's forces)

2.3.3 การผลิตถ่านกัมมันต์

กรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะ และสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งแต่ละวิธีดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.3.2.1 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

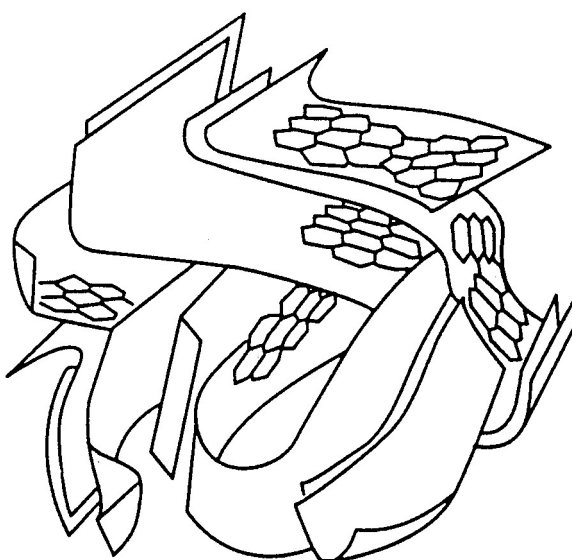
เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ฯลฯ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (Steam) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซออกซิเจน (O₂) และอากาศ (Air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ก๊าซพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ (Tar) ที่เหลืออยู่ และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) กับบางส่วนของเม็ดถ่าน ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆ กันคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็คตรอน



Hexagonal Structure of graphite

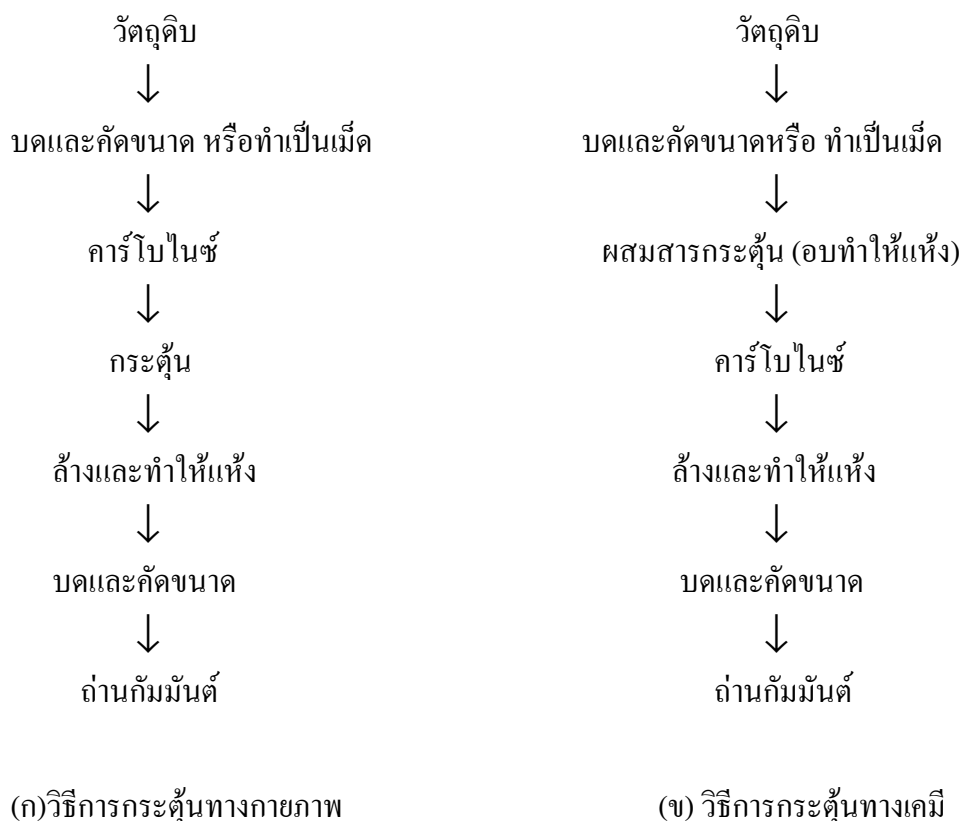
รูปที่ 2.3 โครงสร้างแกรไฟต์

หมายเหตุ จาก Encyclopedia of Chemical Technology (1099), โดย Othmer, 1995, New York: John Wiley and Son.



รูปที่ 2.4 โครงสร้างรูพรุนในถ่านกัมมันต์

หมายเหตุ จาก Active Carbon (120), โดย Bansal, Donnet and Stoeckli, 1988, New York: Marcel Dekker Inc.



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

อิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพโดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอนดังนี้

ก. การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ถ่านหิน และพีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์โบไนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์โบไนซ์ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์โบไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้ (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2536) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์โบไนซ์เช่นกัน มาผสมกับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง หรือฟุ้งกระจายได้ง่ายแล้วทำการอัดให้เป็นเม็ดก่อนที่จะนำไปคาร์โบไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป (Pendyal, Johns, Marshall and Rao, 1999)

ข. คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

คาร์บอนไนเซชัน หรือกระบวนการผลิตถ่าน (Char) เป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเกิดจากการเผาวัตถุอินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หลัก 3 ประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ และส่วนที่เป็นก๊าซ คาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัตถุอินทรีย์โดยใช้ความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของของเหลว และก๊าซมีผลให้ชาร์เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงเกินกว่าวัตถุอินทรีย์

กระบวนการคาร์บอนไนเซชันมีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการอ่อนตัว (Softening period) ควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้ก๊าซและทาร์ที่สลายตัวหลุดออกได้โดยไม่สลายตัวหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งอุดแน่นในรูพรุน และช่วงหลังการอ่อนตัว (After softening period) อัตราการให้ความร้อนปกติ เป็นช่วงที่คาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นระเบียบกว่าช่วงการอ่อนตัว ถ่านชาร์ที่ได้จะแข็ง และมีความหนาแน่นสูงขึ้น แต่ยังมีขีดความสามารถในการดูดซับต่ำเพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการการกระตุ้นต่อไป

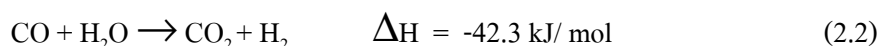
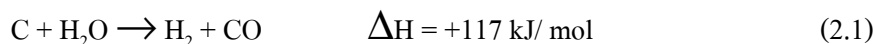
ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของถ่านชาร์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการเพิ่มความร้อน และธรรมชาติของวัตถุดิบ อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญเนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และก๊าซต่างๆหลุดออกไป ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวนอะโรมาติก ซึ่งคาร์บอนจะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นไปตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการเพิ่มความร้อนนั้นมีความสำคัญต่อปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการผลิตถ่าน ถ้าอัตราการเพิ่มความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับวัตถุอินทรีย์ที่มีอัตราการเพิ่มความร้อนต่ำ

ค. การกระตุ้น

การกระตุ้น คือการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก (Mukherjee, 1947)

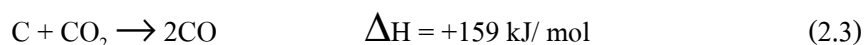
- การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- การเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- การกำจัดอินทรีย์วัตถุหรือ อนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active centers)

สำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2

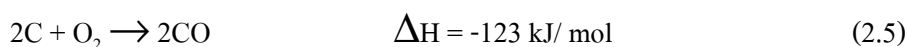
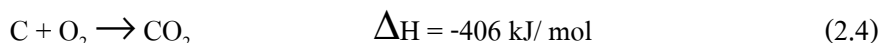


นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์บางส่วนที่เกิดขึ้นยังทำปฏิกิริยากับไอน้ำ (Water-gas formation reaction) เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ควบคู่ไปด้วย โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

สำหรับการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อนเช่นเดียวกันกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยาการกระตุ้นแสดงในสมการที่ 2.3



สมการที่ 2.4 และ 2.5 แสดงปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยอากาศ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จากปฏิกิริยาพบว่า การกระตุ้นโดยวิธีนี้ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นทางกายภาพนี้คือ (Hassier, 1976)

- ชนิด และปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- สมบัติทางเคมี และอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (700–1200°C) โดยกลไกของกระบวนการกระตุ้นนั้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนออกไซด์ แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดก๊าซซีพีเลชัน บางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์โบไนซ์ประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆ จำนวนมาก เกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะมีพาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนบรรจุอยู่

การกระตุ้นในหลายตัวอย่างของถ่านซาร์ พบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วแต่ไม่ควรเกิน 1000°C เนื่องจากทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) ส่งผลให้ความ

สามารถในการดูดซับลดลง การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อุณหภูมิประมาณ 800-900°C ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600°C เนื่องจากการกระตุ้นด้วยวิธีนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้การควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยาก นอกจากนี้ ออกซิเจนยังทำให้ผิวของถ่านไหม้เกิดการสูญเสียเนื้อถ่าน

2.3.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับเนื้อคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนของการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีแสดงในรูปที่ 2.5 ข. ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิต่ำ (400-600°C) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นแสดงในตารางที่ 2.5 สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (Dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น

ก. การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

ซิงค์คลอไรด์เป็นสารดูดน้ำ (Dehydration agent) ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ความหนาแน่น 2.91 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 136.28 มักอยู่ในรูปไฮเดรต ซิงค์คลอไรด์จะละลายได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น 0.5-1.0 นอร์มอล ถ้าเป็นสารละลายเข้มข้นจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน $[ZnCl_3]^-$ หรือ $[ZnCl_4]^{2-}$ สารละลายเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์จะมีความเป็นกรดสูงซึ่งสามารถละลายเบ็ง เซลลูโลส และสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ จากการศึกษาโดยนักวิจัยหลายกลุ่มเช่น Tsai, Chang, Lin, Chien, Sun and Hsieh (2001) พบว่าการนำชานอ้อยซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสมากมาเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีใช้ซิงค์คลอไรด์ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง

แม้ว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยายังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ก็ได้มีการนำซิงค์คลอไรด์มาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ พบว่าเคยมีการใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ เซลลูโลส หรือพีท โดยใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์เท่ากับ 1 : 6 เติมน้ำเท่าที่จำเป็นนำไปอบแห้ง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400-900°C ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง (Hassler, 1967 อ้างถึงใน บุญชัย ตระกูลมหชัย, 1994) นอกจากนี้ยังพบว่าซิงค์คลอไรด์สามารถละลายกำมะถันออกจากวัตถุดิบในรูป ZnS ด้วย (Caluria et.al, 1991 อ้างถึงใน บุญชัย ตระกูลมหชัย, 1994)

ตารางที่ 2.5 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดบอริก (H_3BO_3)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca[OH]_2$)	ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
กรดไนตริก (HNO_3)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	โพแทสเซียมซัลไฟต์ (K_2S)
กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)		โพแทสเซียมไซโอไซยานเนต (KSCN)
		แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3[PO_4]_2$)
		แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

Teng and Yeh (1998) ได้ทำการศึกษาเตรียมถ่านกัมมันต์จากหินบิทูมินัสโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้น พบว่าตัวแปรทั้งสามมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือการใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเท่ากับ 1 : 2 (ความเข้มข้นของสารกระตุ้นเท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้นเท่ากับ $500^{\circ}C$ และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1300 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.83 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมตามลำดับ

Khalili, Campbell, Sandi and Goals (2000) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนจากการผลิตเยื่อกระดาษ (Paper mill sludge) โดยการใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นพบว่าอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นมีอิทธิพลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ นอกจากการศึกษานักวิจัยดังกล่าวข้างต้นยังพบว่ามีนักวิจัยหลายกลุ่ม เช่น Gonzalez-Serrano, Cordero, Rodriguez-Marasol and Rodriguez (1997) และ Girgis, Yunis and Soliman (2000) ได้ศึกษาถึงการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชนิดอื่น โดยการใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าตัว

แปรที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ คือ ปริมาณซิงค์คลอไรด์ที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น

ข. การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียม ไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในวัตถุดิบ กลไกของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูงแสดงดังนี้



สมการที่ 2.6 และ 2.7 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านหินเกิดปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชัน จากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Otowa, Tanibata and Itoh, 1993)

ได้มีการศึกษาเตรียมถ่านกัมมันต์จากปิโตรเลียมโค้กโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นโดย Otowa et al., (1993) พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเท่ากับ 1 : 4 อุณหภูมิในการกระตุ้นเท่ากับ 800°C และใช้เวลา 100 นาที ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 3000 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งต่อมา Teng and Yeh (1999) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัสโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวสูงมากกว่า 3000 ตารางเมตรต่อกรัมเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเท่ากับ 1 : 4.25 อุณหภูมิในการกระตุ้น 800°C และใช้เวลาในการกระตุ้น 60 นาที

ค. การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

กรดฟอสฟอริกเป็นสารที่มีความสามารถในการทำละลายสูง ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบได้อย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่มพบว่า การใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลนั้นทำให้โครงสร้างของเซลล์โลสเกิดความเสถียร และองค์ประกอบของฟอสเฟตยังทำให้โครงสร้างของเซลล์โลสเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างหลังจากการให้ความร้อน

Girgis, Khalil and Tawfik (1994) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยใช้กรด 4 ชนิดได้แก่ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมีปริมาณรูพรุนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดตัวอื่นๆที่ใช้เป็นสารกระตุ้น กรดฟอสฟอริกที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกระตุ้นในการทำให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างถ่าน และช่วยสนับสนุนการเกิดเชื่อมโยง (Cross-link) ในโครงสร้างถ่าน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ (Jagtoyen and Derbyshire, 1998) จากนั้น Castro, Bonelli, Cerrella and Cukierman, (2000) ได้นำชานอ้อยมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงถึง 1100 ตารางเมตรต่อกรัม

2.3.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งชนิดโดยใช้หลักการแบ่งหลายอย่าง ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ได้แก่

2.3.4.1 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง

ก. ประเภทเป็นผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร (μm) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด

ข. ประเภทเม็ด เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

- Pellet activated carbon มีรูปร่างขึ้นอยู่กับเครื่องอัด ใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของก๊าซ และใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซ และไอพิษต่างๆ

- Granular activated carbon มีรูปร่างไม่แน่นอนใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์

2.3.4.2 แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

ก. การกระตุ้นทางเคมี เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้น ถ่านพวกนี้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ก๊าซออกซิไดซ์เป็นสารกระตุ้น เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดก๊าซ และไอระเหย

2.3.4.3 แบ่งตามขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ก. Micropore เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 2 นาโนเมตร (nm) มักนำไปใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับก๊าซ และไอระเหย

ข. Mesopore หรือ Transitional pore เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. Macropore เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

2.3.4.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ก. ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น ใช้ฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

ข. ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

2.3.4.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. สำหรับดูดซับก๊าซ (Gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ กลิ่น และ ไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ และถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

ข. สำหรับดูดซับสี (Colour adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการเผาถ่านประเภท Soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากถ่านหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล

ค. สำหรับดูดซับโลหะ (Metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลทินัม และแร่

2.3.4.6 แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L Type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีคุณสมบัติเป็นกรด โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl)

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H Type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีคุณสมบัติเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวได้แก่ ควินิน (Quinine) ฟีนอล (Phenols) และคาร์บอกซิเลท (Carboxylates)

2.3.5 การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์

ถ่านกัมมันต์มีสมบัติในการฟอกสี และแต่งรสสารได้หลายชนิด มีอุตสาหกรรมหลายประเภทที่นิยมนำเอาถ่านกัมมันต์มาใช้ มีการประมาณกันว่ามีถึงร้อยละ 60 ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นได้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผง ซึ่งนำไปใช้กับสารที่เป็นของเหลว ส่วนที่เหลือจะเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้กับสารที่เป็นก๊าซ อุตสาหกรรมต่างๆที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.5.1 ประเภทใช้กับของเหลว

- ก. อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ฟอกสี และทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- ข. อุตสาหกรรมน้ำมัน และไขมันสำหรับบริโภค ใช้ฟอกสี ใช้แยกสบู่ และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมัน และไขมัน
- ค. อุตสาหกรรมอาหารใช้ดูดกลิ่น และฟอกสีผลิตภัณฑ์อาหาร
- ง. อุตสาหกรรมเครื่องคั้นแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ ใช้ดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการทำให้เครื่องคั้นรสชาติดีขึ้น
- จ. อุตสาหกรรมเคมี และยา เช่น Acetanilide Caffeine Glycerin และ Calcium Ferrocyanide

ในต่างประเทศมีการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์รักษาโรคโดยตรง เช่นรักษาอาการอักเสบจากการติดเชื้อ ขจัดสารพิษ ลดก๊าซในกระเพาะอาหาร ดูดเชื้อแบคทีเรีย ที่เป็นตัวผลิตก๊าซในลำไส้

2.3.5.2 ประเภทใช้ในการดูดก๊าซ และไอ

- ก. อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ และไอของสารอินทรีย์
- ข. อุตสาหกรรมการนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
- ค. อุตสาหกรรมปรับอากาศ ดูดมลทินในอากาศเช่นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน
- ง. อุตสาหกรรมทำบุหรี โดยใช้ทำเป็นกันกรอง

2.4 การดูดซับ

การดูดซับ เป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลว หรือก๊าซ โดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะ

โครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยกลไกการดูดซับมี 2 ประเภท

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับ (Adsorbent) กับสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์ จึงเป็นการยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรง และไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ ให้ความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่กรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนสูง อัตราการดูดซับจะช้าลงเพราะถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ภายในรูพรุน การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมดของตัวดูดซับทำให้ปริมาณการดูดซับสูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ การลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า Desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

2.4.2 การดูดซับทางเคมี

เกิดขึ้นได้คือที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวสารที่ถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง จะให้ความร้อนออกมาสูงมากเพราะการเกิดปฏิกิริยาเคมี ไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวนั้นเกิดได้บนพื้นที่ผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิด Desorption ได้เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นกับสารถูกดูดซับ และสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าสารบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

2.4.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (Isotherm)”

ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับก๊าซตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller (Rouquerol, Rouquerol and Sing, 1999) หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

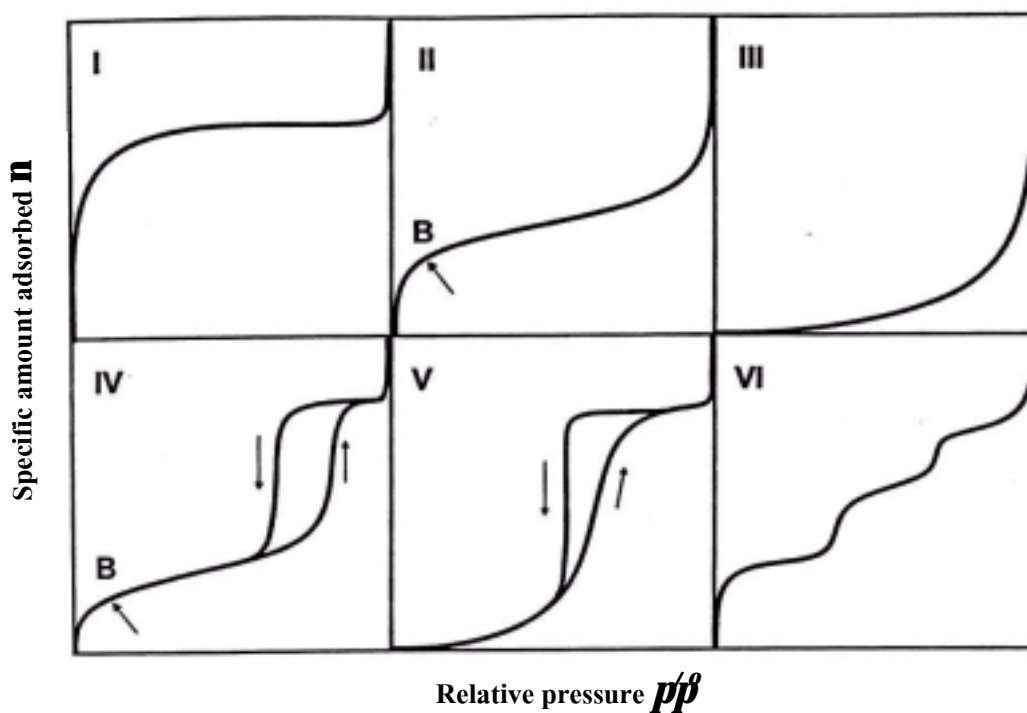
Type II ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or Knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจอกว่า ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยตัวเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ

หมายเหตุ จาก Adsorption by Powders and Porous Solids:

Principles, Methodology and Application (19), โดย
F., Rouquerol, J., Rouquerol, Sing, 1999, London:
Academic Press.

2.4.4 สมการไอโซเทอมการดูดซับ

สมการที่นิยามไอโซเทอมการดูดซับสำหรับระบบของแข็ง-ก๊าซได้แก่

2.4.4.1 สมการ Langmuir (F.Rouquerol, J.Rouquerol and Sing, 1999) ใช้สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ สมการ Langmuir แสดงดังนี้

$$\frac{P}{n} = \frac{b}{n_m} + \frac{P}{n_m} \quad (2.10)$$

เมื่อ P = ความดันของสารถูกดูดซับ
 n = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่สมดุลต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความดัน P (mol/g)
 n_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวนบนผิวของตัวดูดซับ (mol/g)
 b = สัมประสิทธิ์ของการดูดซับซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ และมีลักษณะเฉพาะสำหรับตัวดูดซับและ ตัวถูกดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P/n กับ P จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งสามารถหาค่า n_m ได้จากความชันของกราฟ และคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (S) ได้จากสมการ

$$S = n_m A_m L \quad (2.11)$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
 A_m = พื้นที่เฉลี่ยที่ถูกปกคลุมด้วยสารถูกดูดซับหนึ่งโมเลกุล (m^2)
 L = ค่าคงที่อะโวคาโดร (6.02×10^{23} โมเลกุลต่อโมล)

2.4.4.2 สมการ BET (Brunauer, Emmett, Teller) (F.Rouquerol, J.Rouquerol and Sing, 1999) เป็นการนำสมการ Langmuir มาประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้นในลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ

$$\frac{P}{n(P^0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \left(\frac{P}{P^0}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ P^0 = ความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ที่อุณหภูมิของการดูดซับ
 n = ปริมาณสารถูกดูดซับที่ความดัน P (mol/g)
 n_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียงแบบชั้นเดียวนบนผิวของตัวดูดซับ (mol/g)
 C = ค่าคงที่ไร้นิติยที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ โดยที่

$$C = e \times p \left[\frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT} \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ ΔH_A = ความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว

ΔH_L = ความร้อนของการควบแน่น

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

ดังนั้น $\Delta H_A - \Delta H_L$ = ความร้อนสุทธิของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{n(P^0 - P)}$ กับ $\frac{P}{P^0}$ จะได้กราฟเส้นตรง

และสามารถคำนวณหาค่า C และ n_m ได้จากความชัน และจุดตัดกราฟ จากนั้นคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้จากค่า n_m ตามสมการที่ 2.11

2.4.4.3 สมการ Freundlich (F.Rouquerol, J.Rouquerol and Sing, 1999) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้พลังงานของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้พลังงานการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของ สมการ Freundlich คือใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี รูปแบบสมการแสดงดังนี้

$$n = KP^{1/m} \quad (2.14)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่การดูดซับ Freundlich

m = ค่าคงที่ (Freundlich intensity parameter)

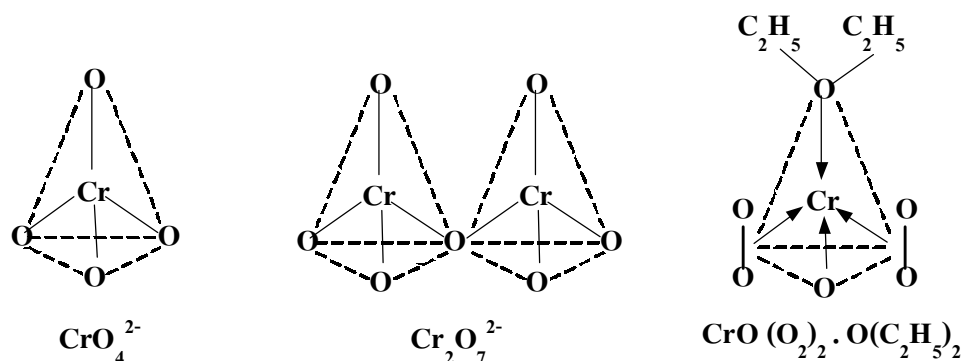
จัดรูปสมการ 2.14 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.15

$$\log n = \log K + (1/m) \log P \quad (2.15)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(n)$ กับ $\log(P)$ ได้กราฟเป็นเส้นตรง สามารถคำนวณหาค่า m และ K ได้จากความชัน และจุดตัดแกนในแนวตั้งของเส้นกราฟ

2.5 โครเมียม

โครเมียมเป็นธาตุในหมู่ VI B โครเมียมเป็นโลหะที่ทำให้บริสุทธิ์ยากถ้าไม่บริสุทธิ์จะเปราะประโยชน์สำคัญประการหนึ่งของโครเมียมก็คือใช้เคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการผุกร่อน และเพื่อความสวยงาม เนื่องจากผิวของสิ่งที่เคลือบแล้วจะเป็นมันวาว และค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยา ในธรรมชาติโครเมียมมักอยู่ในรูปของออกไซด์ผสม โครเมียมในสารประกอบมีเลขออกซิเดชันค่าต่างๆ

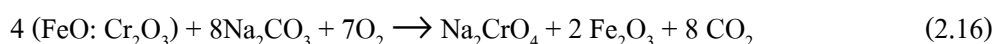


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโมเลกุลหรือไอออนของโครเมียม (VI) ซึ่งโครงสร้างเป็นทรงสี่หน้า
หมายเหตุ จาก เคมี 2 (170), ทบวงมหาวิทยาลัย, 2538, อักษรเจริญทัศน์: กรุงเทพมหานคร.

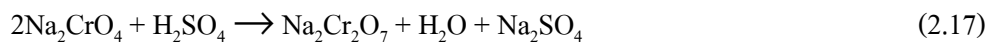
ตั้งแต่ +6 ถึง +2 แต่ที่สำคัญมี +6 +3 และ +2 โดยโครเมียม (VI) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากในสารละลายกรด ในรูปของไดโครเมตไอออน ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) โครเมียม (VI) มักรวมตัวกับธาตุที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง (O F Cl) ได้ เช่น CrO_3 , CrF_6 , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, CrO_4^{2-} เป็นต้น แต่จะไม่ให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลหรือไอออนมักเป็นทรงสี่หน้า ดังรูป 2.7

2.5.1 โครเมียม (VI)

โครเมียม (VI) เป็นโลหะหนักที่มีการนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับโลหะ การฟอกย้อม และการชุบโลหะ มากกว่าร้อยละ 63.8 ของอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะโครเมียมทั้งหมด การนำโครเมียมจากธรรมชาติมาใช้จะได้มาจากสายแร่ แล้วทำการสกัดให้อยู่ในรูปที่ใช้งานได้ง่าย



สารประกอบอื่นที่ไม่ต้องการจะถูกทำให้ตกตะกอน โดยการปรับค่าความเป็นกรดของสารละลาย ผลิตภัณฑ์โซเดียมโครเมตที่เกิดขึ้น จะทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก



โซเดียมไดโครเมตที่ได้ถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมมากมายเช่น การผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และการชุบโลหะ นอกจากนี้อุตสาหกรรมการผลิตสี นับเป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้สารประกอบโครเมียมมาก เนื่องจากโครเมียมมีสีตามชนิดของสารประกอบเช่น สีเขียวของโครมออกไซด์ (Cr_2O_3) สีเหลืองของสารประกอบตะกั่ว (PbCrO_4) และสีเหลืองของสารประกอบสังกะสี (ZnCrO_4) เป็นต้น เมื่อมีการใช้โครเมียมมากย่อมมีการปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.5.2 ความเป็นพิษของโครเมียม

โครเมียมที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติมีอยู่สองรูปคือ โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูงกว่าโครเมียม (III) ประมาณ 100 เท่า โครเมียม (VI) ยังก่อให้เกิดโรคร้ายแรงมากมายเช่น โรคมะเร็ง พบว่ามีคนงานจำนวนมากในโรงงานผลิตโครเมียม เป็นโรคมะเร็งปอด นอกจากนี้ยังพบว่าคนงานในโรงงานชุบโลหะเป็นโรคผิวหนังอักเสบ และมีการระคายเคือง เศษฝุ่น และควันที่เกิดจากการผลิตโครเมียมนั้นสามารถทำลายเนื้อเยื่อโพรงจมูกได้ ถ้าร่างกายได้รับโครเมียมในปริมาณสูงเป็นเวลานานตับไตจะถูกทำลายจนเป็นอันตรายต่อชีวิตได้จึงมีการกำหนดมาตรฐานน้ำเสียต้องมีโครเมียม (VI) ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์

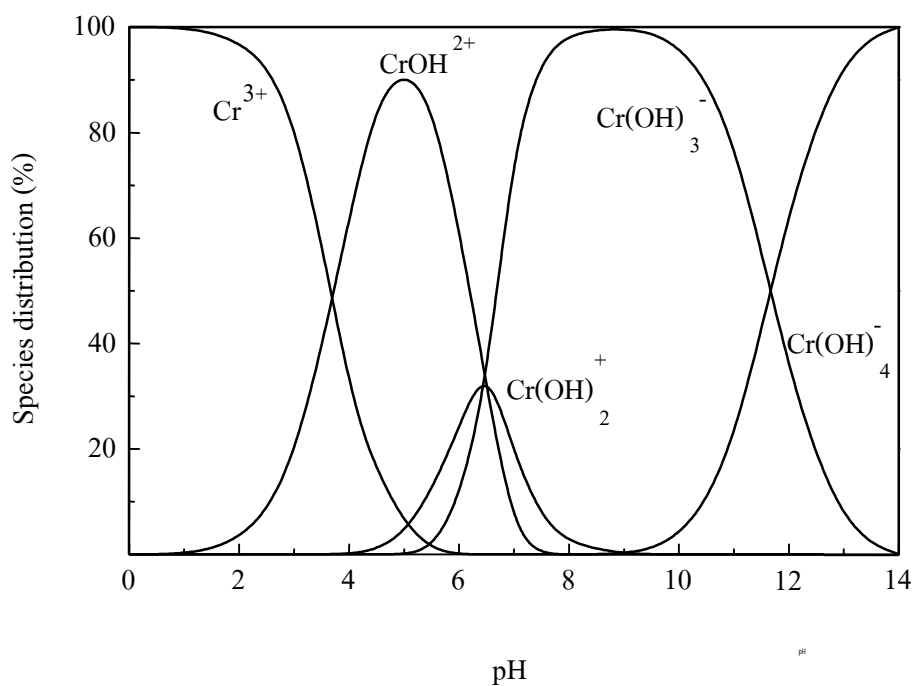
รูปที่ 2.8 และ 2.9 แสดงการกระจายไอออนของไตรวาเลนซ์โครเมียม และเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมที่ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายต่างๆ

2.5.3 การกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

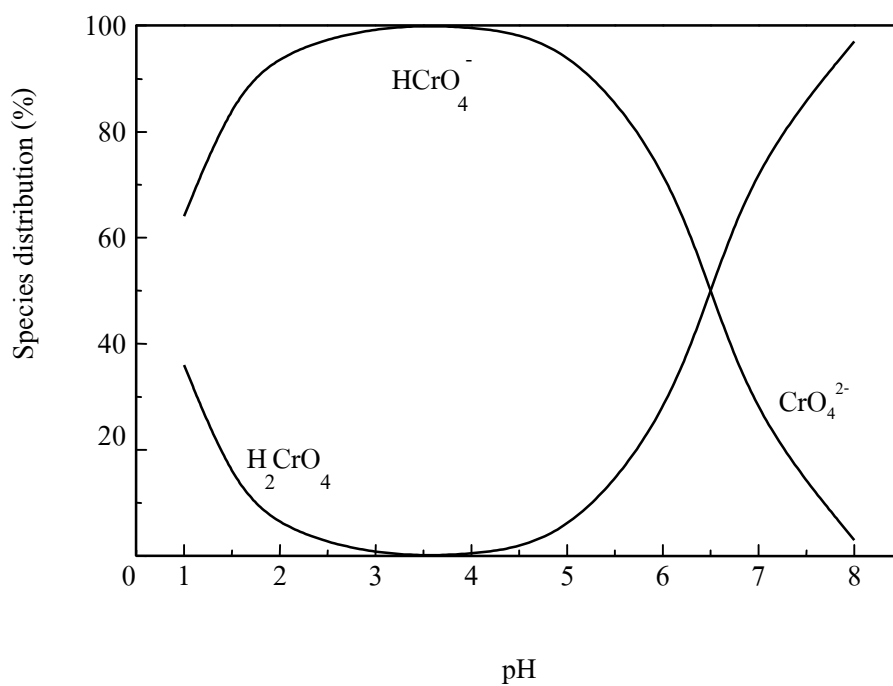
ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการกำจัดโครเมียม (VI) ออกจากน้ำทิ้งในแต่ละกระบวนการอาจประกอบด้วยวิธีการต่างกัน ได้แก่

2.5.3.1 การรีดักชันโครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) แล้วทำให้ตกตะกอนเป็นโครเมียมไฮดรอกไซด์

วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้มากในการกำจัดโครเมียม (VI) โดยเฉพาะโรงงานชุบโลหะส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 75) ใช้วิธีการนี้ โดยเติมสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ได้แก่ เพอร์ไรต์ไอออน (Fe^{3+}) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) โซเดียมไบซัลไฟด์ (Na_2S_2) เป็นต้น การตกตะกอนโครเมียมเกิดได้ดีเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 3 วิธีนี้ทำในระบบกะหรือระบบต่อเนื่อง สำหรับระบบกะเป็นระบบที่ง่าย และใช้ต้นทุนต่ำเหมาะสำหรับกรณีที่มีปริมาณน้ำไม่มากนัก (น้อยกว่า 50,000 แกลลอนต่อวัน) ระบบนี้ยังเหมาะกับน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสิ่งปนเปื้อนไม่แน่นอน ซึ่งจำเป็นต้องใช้วิธีการบำบัดที่แตกต่างกันออกไป ส่วนระบบต่อเนื่อง เหมาะกับปริมาณน้ำทิ้งมาก และมีองค์ประกอบของสิ่งปนเปื้อนในน้ำทิ้งค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตามวิธีการตกตะกอนนี้มีข้อเสียดังนี้ การตกตะกอนเกิดได้ไม่ดีหากค่าความเป็นกรดของน้ำทิ้งเปลี่ยนไป วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับน้ำทิ้งที่มีโลหะเจือปนอยู่หลายชนิด เพราะการตกตะกอนของโลหะแต่ละชนิดแตกต่างกันขึ้นกับค่าความเป็นกรดที่ต่างกัน ถ้ามีสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำทิ้งจะมีผลกระทบต่อกรกำจัดโครเมียม (VI) ใช้ต้นทุนในการดำเนินการค่อนข้างสูง ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโครเมียม (VI) เจือปนอยู่ หากนำไปถมที่หรือทำเป็นปุ๋ยอาจก่อให้เกิดปัญหาโลหะหนักตกค้าง



รูปที่ 2.8 การกระจายไอออนของไตรวาเลนซ์โครเมียม*



รูปที่ 2.9 การกระจายไอออนของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม*

* หมายถึง จาก *Encyclopedia of Analytical Science* (737-738),

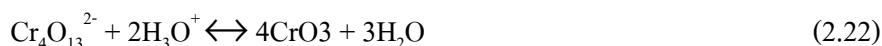
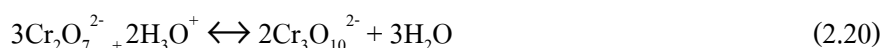
Townshend, 1995, London: Academic Press.

2.5.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

เป็นวิธีที่นิยมใช้รองลงมาจากวิธีการตกตะกอน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (VI) สูงมากกว่าร้อยละ 90 วิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนที่อยู่บนเรซินกับไอออนที่อยู่ในน้ำทิ้ง



ในน้ำที่เป็นกรด และมีความเข้มข้นสูงนอกจาก $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ จะจับกับเรซินแล้วยังมีส่วนทำปฏิกิริยากับ H_3O^+ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



เรซินที่ใช้จะเป็นเรซินชนิดไอออนบวกซึ่งเหมาะกับการกำจัดโครเมียม (VI) เมื่อเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจนอิ่มตัวแล้วจะทำการฟื้นฟูสภาพด้วยกรด เพื่อชะล้างเอาโลหะที่อยู่บนเรซินออก วิธีนี้มีข้อเสียคือ เรซินที่ใช้มีราคาสูง และการลงทุนค่อนข้างสูงมาก

2.5.3.3 การใช้สารช่วยในการตกตะกอน (Coagulation and Flocculation)

การเติมสารช่วยให้อนุภาคของโลหะหนักรวมตัวเป็นตะกอนนั้นเกิดจากประจุที่อยู่บนผิวของอนุภาค สารเคมีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous sulfate) หรืออะลูมิเนียม (Alum) ในการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม หากเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสูงกว่า 8 การกำจัดโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำ จากการศึกษาพบว่าถ้าใช้ทั้งเฟอร์รัสซัลเฟต และอะลูมิเนียมร่วมกัน สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำจากแม่น้ำที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6-10 ได้มากกว่าร้อยละ 97 นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำบ่อที่มีตะกั่วปนเปื้อนเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าถ้าใช้เฟอร์รัสซัลเฟตอย่างเดียวสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำบ่อได้มากกว่าร้อยละ 97 ส่วนถ้าใช้อะลูมิเนียมอย่างเดียวสามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับร้อยละ 80-90 และสามารถกำจัดโครเมียมภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้เท่ากับร้อยละ 89 เมื่อความเข้มข้นโครเมียมไม่สูงมาก

2.5.3.4 การใช้ฟองอากาศ (Flotation)

เป็นการกำจัดโลหะหนักที่มีความหนาแน่นต่ำออกจากน้ำทิ้ง โดยการปล่อยอากาศผ่านเข้าไป โลหะจะเกาะที่ผิวของฟองอากาศลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ จากนั้นสามารถกำจัดออกโดยการกวาดที่ผิวน้ำของน้ำทิ้ง ในกรณีที่โลหะหนักละลายในน้ำจะต้องเติมสารเคมีบางอย่างลงไปก่อน โดยอาจเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) เพื่อเปลี่ยน

โลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจึงกำจัดออกจากน้ำทิ้งด้วยวิธีการใช้ฟองอากาศ โดยวิธีการนี้เรียกว่า Ion flotation การใช้ฟองกำจัดโลหะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึงแม้ว่าในน้ำทิ้งจะมีโลหะหนักเจือปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย วิธีการนี้มีข้อดีได้แก่ เป็นวิธีที่ง่าย และสะดวก มีความคล่องตัว และมีประสิทธิภาพในการดำเนินการ ใช้พื้นที่น้อย สลัดจ์ (Sludge) ที่ได้มีความเข้มข้นของโลหะ และมีปริมาณน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการตกตะกอน และต้นทุนต่ำทั้งในแง่แรงงาน อุปกรณ์ และพลังงาน

2.5.3.5 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัดโลหะหนัก โดยให้น้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อนไหลสวนทางกับตัวทำละลาย เมื่อโลหะหนักละลายในตัวทำละลายแล้ว จึงทำการแยกโลหะหนักนั้นด้วยกรวดอีกครั้ง วิธีการนี้มีข้อดีได้แก่สามารถเลือก และแยกสารที่ต้องการจากน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนอยู่เพียงเล็กน้อยได้ ทำให้โลหะหนักที่ต้องการมีความเข้มข้นขึ้น เหมาะสำหรับระบบที่มีการควบคุมแบบอัตโนมัติ และมีประสิทธิภาพในการแยกสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะหลายชนิดได้ ส่วนใหญ่วิธีการนี้เหมาะกับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมผลิตทองแดง

2.5.3.6 การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) จากงานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่า กระบวนการนี้มีข้อจำกัดในการบำบัดไอออนของโลหะหนักของโครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำเพียงร้อยละ 5 เนื่องจากโลหะหนักมีความเป็นพิษต่อเชื้อที่ใช้

2.5.3.7 วิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical)

วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งจากโรงงาน นิยมใช้มากกับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ทำได้โดยการปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงลงในสารละลายระหว่างขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ทำให้โลหะหนักซึ่งมีไอออนบวกเกาะติดที่ขั้วแคโทด วิธีการนี้ใช้หลักการออกซิเดชัน-รีดักชัน

2.5.3.8 วิธีการกรองผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Membrane filtration)

วิธีนี้ใช้หลักการรีเวอร์ออสโมซิส (Reverse Osmosis) ในการกรองน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ผ่านเยื่อเลือกผ่านภายใต้ความดัน ทำให้น้ำซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กไหลผ่านไป ส่วนโลหะหนักซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านได้ วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงมาก ตัวอย่างเยื่อเลือกผ่านที่นิยมใช้ในการกรองโลหะหนักได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose Acetate) โพลีอะไมด์ (Polyamide) โพลีซัลโฟเนต (Polysulfonate) เป็นต้น วิธีนี้สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ การรีเวอร์ออสโมซิสที่ความดันสูง (High pressure reverse osmosis) ใช้ความดันตั้งแต่ 500-

1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การรีเวอร์ออสโมซิสที่ความดันต่ำ (Low pressure reverse osmosis) ใช้ความดันตั้งแต่ 200-500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และการกรองภายใต้ความดันต่ำ (Ultrafiltration) ใช้ความดันตั้งแต่ 20-100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นิยมใช้กับการแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 1000 กรัม ในกระบวนการรีเวอร์ออสโมซิสความดันที่ใช้ต้องมากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลายที่ต้องการขับออกไป

2.5.3.9 การดูดซับ (Adsorption)

วิธีนี้ส่วนใหญ่นิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ การดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์ต้องทำภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำ ปริมาณโลหะหนักในน้ำ และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ การดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์จะเป็นการบำบัดในขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่น้ำทิ้งผ่านการบำบัดโดยการตกตะกอนด้วยสารเคมีแล้ว จากการศึกษาโดยนักวิจัยหลายกลุ่ม เช่น Meeyoo, Kyaw and Amal (1995) พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ ขึ้นกับสภาวะของการดูดซับซึ่งได้แก่ ความเป็นกรดต่างของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ต่อมา Singh and Tiwari (1996) พบว่าอุณหภูมิในการดูดซับมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ และการศึกษาโดย Selomulya, Meeyoo and Amal (1999) ยังพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 70

นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังสามารถนำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักอื่นๆ ได้ เช่น ตะกั่ว สารหนู แคดเมียม นิเกิล เป็นต้น โดยความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการดูดซับ เช่น ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

3.1.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1.1 เครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.1.1.2 โถดูดความชื้น (Descicator)
- 3.1.1.3 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH meter)
- 3.1.1.4 ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert
- 3.1.1.5 เครื่องกวนด้วยแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 3.1.1.6 เครื่องบดแบบบอล (Ball Mill)
- 3.1.1.7 ตะแกรงแยกขนาด (Sieve)
- 3.1.1.8 ชุดกรองสุญญากาศ
- 3.1.1.9 เตาไฟฟ้า (Hot plate)
- 3.1.1.10 เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (Tube furnace)

3.1.2 สารเคมีและวัตถุดิบ

- 3.1.2.1 ถ่านหินลิกไนต์จากแหล่งแม่เมาะและแหล่งบ้านปู
- 3.1.2.2 ชานอ้อย
- 3.1.2.3 ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
- 3.1.2.4 กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- 3.1.2.5 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.1.3 วิธีการทดลอง

- 3.1.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ก. คัดขนาดถ่านหินให้ได้ขนาด 20 x 30 เมช (600x 850 μ m) นำไปอบที่อุณหภูมิ 110-120°C

ข. ผสมถ่านหินกับสารละลายซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยให้ได้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อซิงค์คลอไรด์เท่ากับ 1.0 : 1.0 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 วัน

ค. นำส่วนผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110-120°C จนน้ำหนักคงที่ (ระยะเวลาในการอบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นที่ใช้)

ง. นำส่วนผสมที่อบแห้งแล้วไปให้ความร้อนภายใต้สภาวะการไหลของก๊าซไนโตรเจน (อัตราการไหล 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที) ที่อุณหภูมิ 400°C ในเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อนาน 60 นาที แล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

จ. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ง) โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 500 และ 600°C ตามลำดับ

ฉ. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (จ) โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเป็น 0.5 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ

ช. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ง) โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 500 และ 600°C โดยเพิ่มเวลาเป็น 120 นาที

ซ. ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อน (ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร) ตามด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง (ล้างจนไม่พบตะกอนสีขาวขุ่นในน้ำที่ใช้ล้างเมื่อหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดลงไป) และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยน้ำที่ใช้ล้างควรเป็นน้ำที่ปราศจากไอออนหรือน้ำกลั่น

ฌ. อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ที่อุณหภูมิ 110-120°C จนน้ำหนักคงที่

ญ. คำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์} \times 100}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบ}} \quad (3.1)$$

3.1.3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

ก. ล้างทำความสะอาดขานอ้อยแล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110-120°C

ข. ผสมขานอ้อยกับสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยให้ได้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 ตั้งทิ้งไว้ 60 นาที

ค. ให้ความร้อนส่วนผสมที่ได้ภายใต้สภาวะการไหลของก๊าซไนโตรเจน (อัตราการไหล 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที) ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 60 นาที

ง. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ค) โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 400 500 และ 600°C ตามลำดับ

จ. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ง) โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเป็น 0.5 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ

ฉ. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ค) โดยเพิ่มระยะเวลาในการแช่ เป็น 6 12 24 และ 72 ชั่วโมงตามลำดับ

ข. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ค) โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 400 500 และ 600°C และเพิ่มเวลาเป็น 120 นาที

ช. ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งวัดค่าความเป็นกรดค้างของน้ำที่ใช้ล้างได้มากกว่า 6.5 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยน้ำที่ใช้ล้างควรเป็นน้ำที่ปราศจากไอออนหรือน้ำกลั่น

ฅ. อบถ่านกัมมันต์ที่ได้ที่อุณหภูมิ 110-120°C จนน้ำหนักคงที่

ฉ. คำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้จากสมการ 3.1

3.2 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์แบ่งเป็น

3.2.1 วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอไดน โดยทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94

3.2.2 วิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis) โดยวิเคราะห์

3.2.2.1 ปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D2867-95

3.2.2.2 ปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM D5832-95

3.2.2.3 ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D2866-95

3.2.2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (By difference)

3.2.3 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และการกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว Micromeritics ASAP 2010 ก่อนทำการวิเคราะห์ต้องไล่ก๊าซ (Degassing) ที่มีอยู่ในตัวอย่างโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300°C กระทั่งค่าความดันในหลอดตัวอย่างต่ำกว่า 50 ไมโครเมตรปรอท ข้อมูลที่ได้นำมาใช้คำนวณสมบัติต่างๆ ดังนี้

3.2.3.1 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยสมการ BET

3.2.3.2 ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดที่ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P°) เท่ากับ 0.98

3.2.3.3 ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กด้วยสมการ Dubinin-Radushkevich (DR)

3.2.3.4 ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางคำนวณด้วยสมการ BJH

3.2.3.5 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยคำนวณด้วยสมการ $4V/A$

เมื่อ V = ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (m^3/g)

A = เท่ากับพื้นที่ผิวจำเพาะ ($S_{\text{BET}}, \text{m}^2/\text{g}$)

3.2.1 ศึกษาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกนำไปเคลือบด้วยทอง

หมายเหตุ วิธีการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM แสดงในภาคผนวก ก.

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

3.3.1.1 ตู้อบ

3.3.1.2 เครื่องชั่งแบบละเอียด

3.3.1.3 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ

3.3.1.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด่าง

3.3.1.5 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV-Visible Spectrophotometer)

3.3.1.6 Atomic absorption spectrophotometer, AAS

3.3.1.7 ชุดกรองสุญญากาศ

3.3.1.8 นาฬิกาจับเวลา

3.3.1.9 กระดาษกรองวัดแมนเบอร์ 42

3.3.2 สารเคมีและวัสดุ

3.3.2.1 ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าว โดยบริษัทซี-ใจแกนติก

3.3.2.2 ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเตรียม ในการทดลองเลือกใช้ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ด้วยอัตราส่วน 1.0 : 1.0 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C นาน 60 นาที และถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกด้วยอัตราส่วน 1.0 : 1.0 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C นาน 60 นาที

3.3.2.3 กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

3.3.2.4 กรดไนตริก (HNO_3)

3.3.2.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.3.2.6 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.3.2.7 สารประกอบไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (1,5-diphenylcarbohydrazide)

3.3.2.8 สารประกอบโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

3.3.2.9 สารประกอบไฮดรอกซีควิโนลีน (8-hydroxyquinoline)

3.3.3 วิธีการทดลอง

3.3.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

ก. บดถ่านกัมมันต์ตัวอย่างให้ได้ขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างในโถดูดความชื้น

ข. อบสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตที่ 110±5°C นาน 60 นาที เก็บในโถดูดความชื้น

ค. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.2828 กรัมต่อลิตร (ปริมาณโครเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ง. ปรับความเป็นกรดต่างของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตให้มีค่าเท่ากับ 2.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

จ. ชั่งถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดให้ได้น้ำหนัก 0.2000±0.0001 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ฉ. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในถ่านกัมมันต์

ช. นำส่วนผสมไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ซ. กรองแยกสารละลายออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 โดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ

ฌ. วิเคราะห์ปริมาณโครเมียมที่เหลือในสารละลายโดยวิธีการวิเคราะห์ ASTM D1687-92 โดยวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (VI) โดยใช้ไดฟีนิลคาร์บาไซด์เป็นตัวชี้บ่ง (Indicator) จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต

ฎ. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ฌ) โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเป็น 2 3 4 5 6 และ 7

ฏ. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (ฌ) โดยเปลี่ยนเวลาในการดูดซับเป็น 1 4 8 12 24 และ 48 ชั่วโมง

3.3.3.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ก. บดถ่านกัมมันต์ตัวอย่างให้ได้ขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเก็บตัวอย่างในโถดูดความชื้น

- ข. ออบสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตที่ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ นาน 60 นาทีเก็บในโถดูความชื้น
- ค. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 2.828 กรัมต่อลิตร (ปริมาณโครเมียม 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- ง. เจือจางสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตให้มีความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- จ. ปรับความเป็นกรดค้างของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตให้ได้ค่าเท่ากับ 2.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล
- ฉ. ชั่งถ่านกัมมันต์ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตรให้ได้น้ำหนัก 0.2000 ± 0.0001 กรัม
- ช. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไว้ข้างใน
- ซ. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30°C จนถึงสภาวะสมดุล
- ฅ. กรองแยกสารละลายออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ
- ฉ. วิเคราะห์ปริมาณโครเมียมที่เหลือในสารละลายโดยวิธีการวิเคราะห์ ASTM D1687-92
- ฐ. ทำซ้ำข้อ (ก) ถึง (จ) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายเป็น 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ
- ฎ. หาไอโซเทอมการดูดซับ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโครเมียมต่อกรัมถ่าน ที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล
- ฏ. ทำซ้ำทุกข้อข้างต้น โดยเปลี่ยนอุณหภูมิในการดูดซับเป็น 35 และ 40°C

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ในงานวิจัยนี้ใช้ถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และบ้านปู ขนาดอนุภาค 0.60-0.85 มิลลิเมตร (20x30 mesh) เป็นวัตถุดิบ โดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นสารกระตุ้น ศึกษาผลของตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 อุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วง $400^{\circ}C-600^{\circ}C$ และระยะเวลาของการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ภายใต้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เท่ากับ $100\text{ cm}^3/\text{min}$ และอัตราการให้ความร้อน $25^{\circ}C$ ต่อนาที ได้ผลการทดลองดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านหินลิกไนต์ และถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และถ่านหินลิกไนต์บ้านปู มีองค์ประกอบแบบประมาณ (ไม่รวมความชื้น) ได้แก่ ปริมาณเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวใกล้เคียงกัน เมื่อทำให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินทั้ง 2 แหล่งมีปริมาณเถ้า และสารระเหยลดลง โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างถ่านหินซึ่งหลุดออกไปในรูปของสารระเหย และอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโครงสร้างถ่านหิน ส่งผลให้สารระเหยหลุดออกจากโครงถ่านหินมากขึ้น ทำให้สารระเหยในถ่านกัมมันต์ลดลงแต่มีคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น เมื่อเทียบกับถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ กับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์บ้านปู ที่สภาวะการกระตุ้นเดียวกัน (สภาวะการกระตุ้นที่ 2 และ 5 ในตารางที่ 4.1) พบว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะมีปริมาณเถ้าน้อยกว่า และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากกว่า

ที่ทุกอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นทำให้ปริมาณสารระเหยในถ่านกัมมันต์ลดลง และปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างถ่านหินส่วนที่ไม่แข็งแรง ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนที่มีอะตอมของ ไฮโดรเจน และออกซิเจนหลุดออกไปในรูปของสารระเหย ทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น โดยการสลายตัวของโครงสร้างถ่านหินอาจเกิดขึ้นได้จากการแตกหักของพันธะในโครงสร้างของถ่านหินอันเนื่องมาจาก

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านหินลิกไนต์ และถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์

ชนิดถ่านหิน	สถานะการกระตุ้นที่	สถานะการกระตุ้น			ร้อยละความชื้น	องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		ZnCl ₂ : ถ่านหิน	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
แม่เมาะ	1	0.5	60	400	7	5	32	63
				500	7	7	22	71
				600	6	5	18	77
	2	1.0	60	400	6	5	30	65
				500	9	4	24	72
				600	5	5	14	81
	3	1.5	60	400	10	4	39	57
				500	8	4	21	75
				600	6	5	18	77
	4	1.0	120	400	10	4	31	65
				500	11	3	22	75
				600	6	4	24	72
บ้านปู	5	1.0	60	400	9	12	40	48
				500	4	9	28	63
				600	8	11	19	70
ถ่านหินแม่เมาะ					20	12	44	44
ถ่านหินบ้านปู					8	14	50	36
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจากกะลามะพร้าว					4	6	2	92

ความร้อน และอาจเกิดจากการที่ซิงค์คลอไรด์ทำปฏิกิริยาดึงน้ำออกจากถ่านหิน (Dehydration) กับอะตอมของไฮโดรเจน และออกซิเจน ในโครงสร้างของถ่านหินได้ดีขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นให้สูงขึ้น ส่งผลให้สารระเหยหลุดออกจากถ่านหินได้มากขึ้นตามอุณหภูมิทำให้ปริมาณสารระเหยที่อยู่ในถ่านกัมมันต์น้อยลง และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้นตามอุณหภูมิของการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้น

การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C มีอิทธิพลต่อสมบัติแบบประมาณของถ่านกัมมันต์เพียงเล็กน้อย (สภาวะการกระตุ้นที่ 2 และ 4 ในตารางที่ 4.1) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 600°C และใช้เวลานานทำให้ร้อยละคาร์บอนคงตัวลดลง เนื่องจากอาจเกิดการสูญเสียซิงค์คลอไรด์ (จุดหลอมเหลว 283°C และจุดเดือด 732°C) ไปบ้างบางส่วน (Teng and Yeh, 1998) ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโครงสร้างของถ่านหินเกิดได้ลดลง

การเพิ่มอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ (ที่อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้นเดียวกัน) พบว่าไม่มีผลทำให้องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์เปลี่ยนแปลงไป อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณสารกระตุ้นที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์มีปริมาณมากเกินไปแล้วต่อการทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของถ่านหิน

4.1.2 ร้อยละผลผลิต

ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่สภาวะการเตรียมอื่นคงที่ ทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ลดต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างถ่านหินหลุดออกไปได้มากขึ้น เนื่องจากการแตกหักของพันธะในโครงสร้างของถ่านหินโดยความร้อน และจากการเกิดปฏิกิริยาของซิงค์คลอไรด์กับโครงสร้างถ่านหิน ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตลดลงตามอุณหภูมิของการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้น

การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์ลดลง (สภาวะการกระตุ้นที่ 2 และ 4 ในตารางที่ 4.2) เนื่องจากซิงค์คลอไรด์ทำปฏิกิริยากับโครงสร้างถ่านหินได้มากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงถึง 600°C การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นทำให้เกิดการสูญเสียซิงค์คลอไรด์ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

นอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการกระตุ้นสูงถึง 600°C ชนิดของถ่านหินลิกไนต์ และการเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อาจเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิ 600°C เป็นอุณหภูมิที่ทำให้สารระเหยที่มีอยู่ในโครงสร้างของถ่านหินลิกไนต์หลุดออกไปได้เกือบทั้งหมด และยังทำให้ซิงค์คลอไรด์ระเหยออกไป ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินลิกไนต์กับซิงค์คลอไรด์เกิดได้ลดลง ร้อยละผลผลิตจึงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

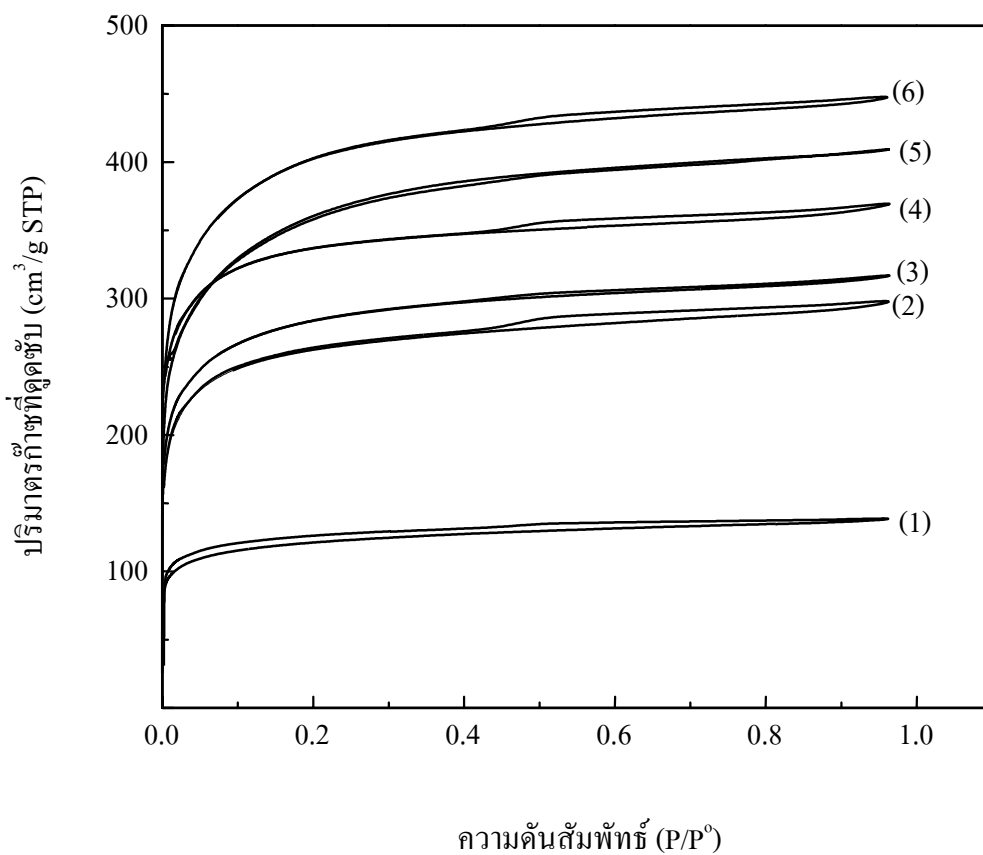
ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลผลิต ค่าการดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน
ลิกไนต์ เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

ชนิด ถ่านหิน	สถานะ การ กระตุ้นที่	สถานะการกระตุ้น			ร้อยละ ผลผลิต	ค่าการดูด ซับไอโอดีน (mg/g)	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m ² /g)
		ZnCl ₂ : ถ่านหิน	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
แม่เมาะ	1	0.5	60	400	69.88	547	507
				500	62.72	787	905
				600	58.67	801	905
	2	1.0	60	400	87.33	578	432
				500	76.85	896	936
				600	60.35	1069	1332
	3	1.5	60	400	68.43	1060	1078
				500	62.39	1091	1176
				600	57.63	1100	1550
	4	1.0	120	400	71.27	736	938
				500	64.01	1002	1427
				600	61.4	959	1301
บ้านปู	5	1.0	60	400	72.08	496	678
				500	62.70	921	1277
				600	60.04	854	1124

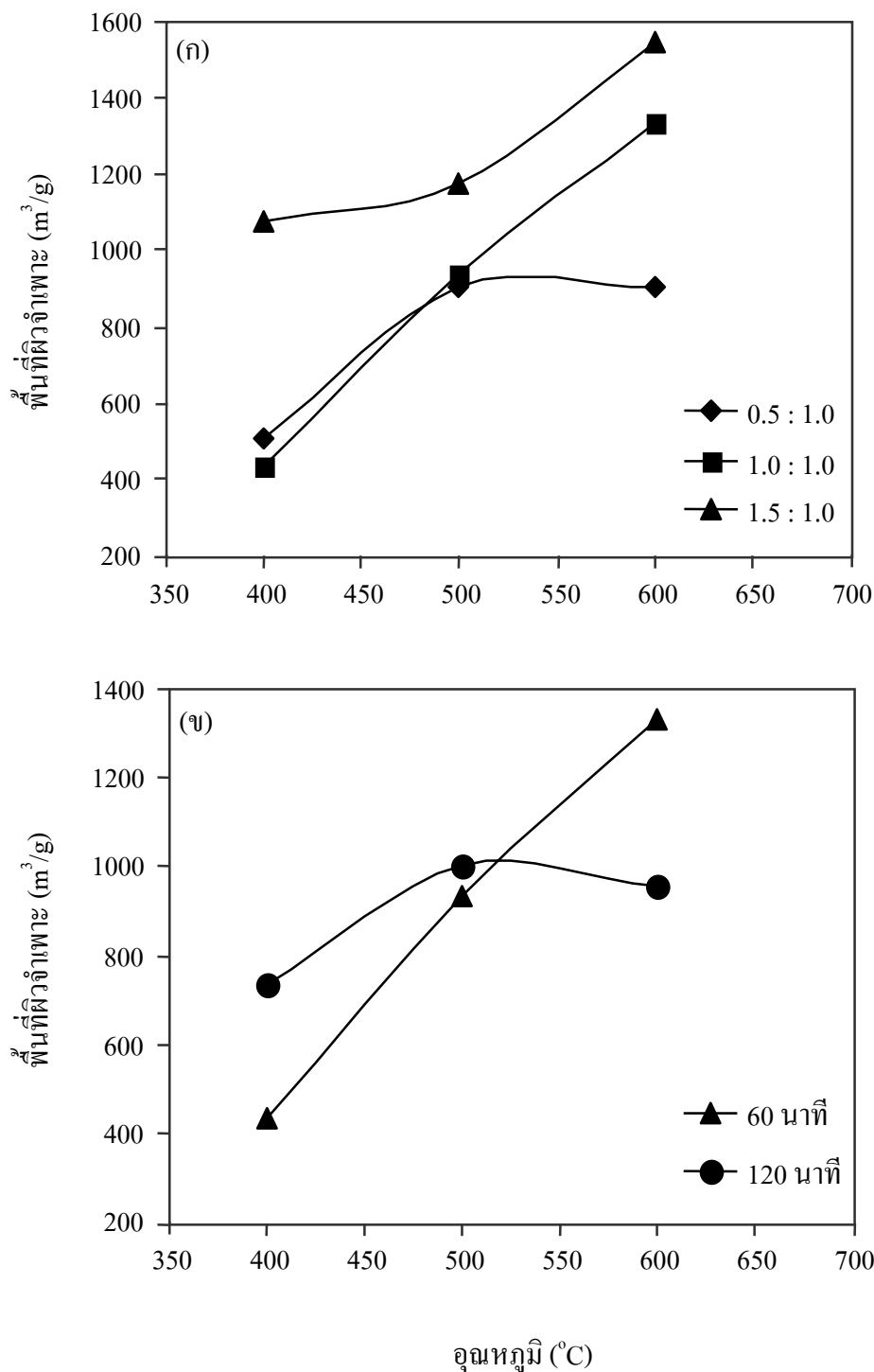
4.1.3 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว และลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างเส้นกราฟไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากกราฟพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำการศึกษามีลักษณะของเส้นกราฟไอโซเทอมเป็นชนิด Type I โดยจำแนกตามระบบ IUPAC และพบว่ามี Hysteresis loop บนเส้นกราฟไอโซเทอม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนภายในส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็กและมีรูพรุนขนาดกลางในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ด้วย การเพิ่มอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ (เส้นกราฟที่ 2 และ 3) การเพิ่มอุณหภูมิ (เส้นกราฟที่ 1 และ 3) และการเพิ่มระยะเวลา (เส้นกราฟที่ 3 และ 6) ของการกระตุ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ และการเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นยังทำให้ Hysteresis loop บนเส้นกราฟไอโซเทอมกว้างขึ้นด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เกาะกับถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปู (เส้นกราฟที่ 3 และ 5) พบว่าที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิของการกระตุ้น 500°C และเวลา 60 นาที ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปูสามารถดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้มากกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปูมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เกาะที่สภาวะการกระตุ้นนี้

ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิสำหรับการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ที่อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.2 ก) ค่าการดูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.3 ก) และปริมาตรรูพรุน (รูปที่ 4.4 ก และ ข) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.5 : 1.0 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.2 ก) ค่าไอโอดีน (รูปที่ 4.3 ก) และปริมาตรรูพรุน (รูปที่ 4.4 ค) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่า 500°C พบว่า ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มคงที่ เมื่ออัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.5 : 1.0 พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งจากผลการศึกษาในช่วงต้นกล่าวได้ว่าผลของอุณหภูมิต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่ใช้



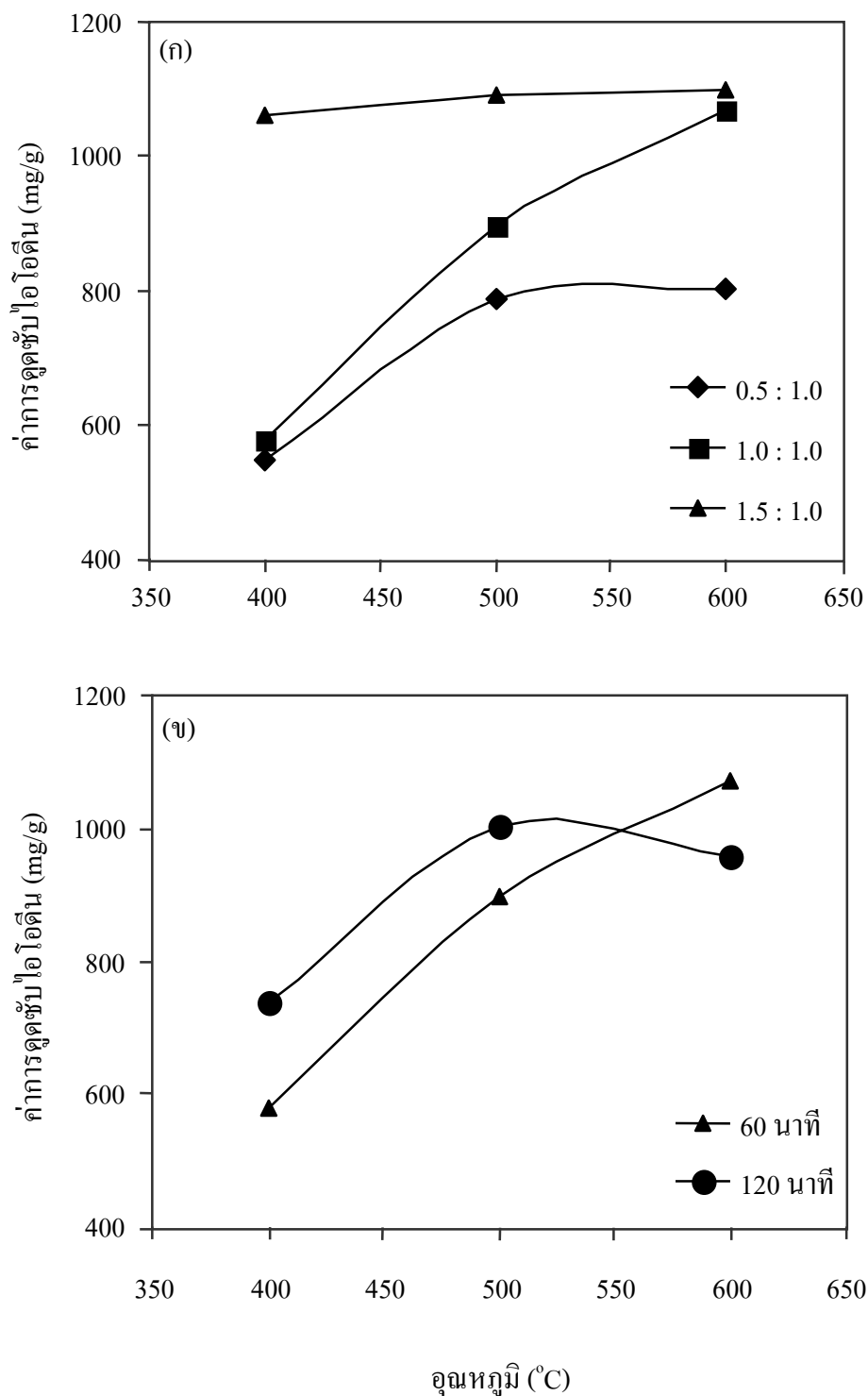
รูปที่ 4.1 เส้นไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ขนาดอนุภาค 20x30 เมช (1) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/แม่เมาะ/400°C/60นาทึ่ (2) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/แม่เมาะ/500°C/60นาทึ่ (3) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/แม่เมาะ/500°C/60 นาทึ่ (4) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (5) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/บ้านปู/500°C/60นาทึ่ และ(6) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/แม่เมาะ/500°C/120 นาทึ่



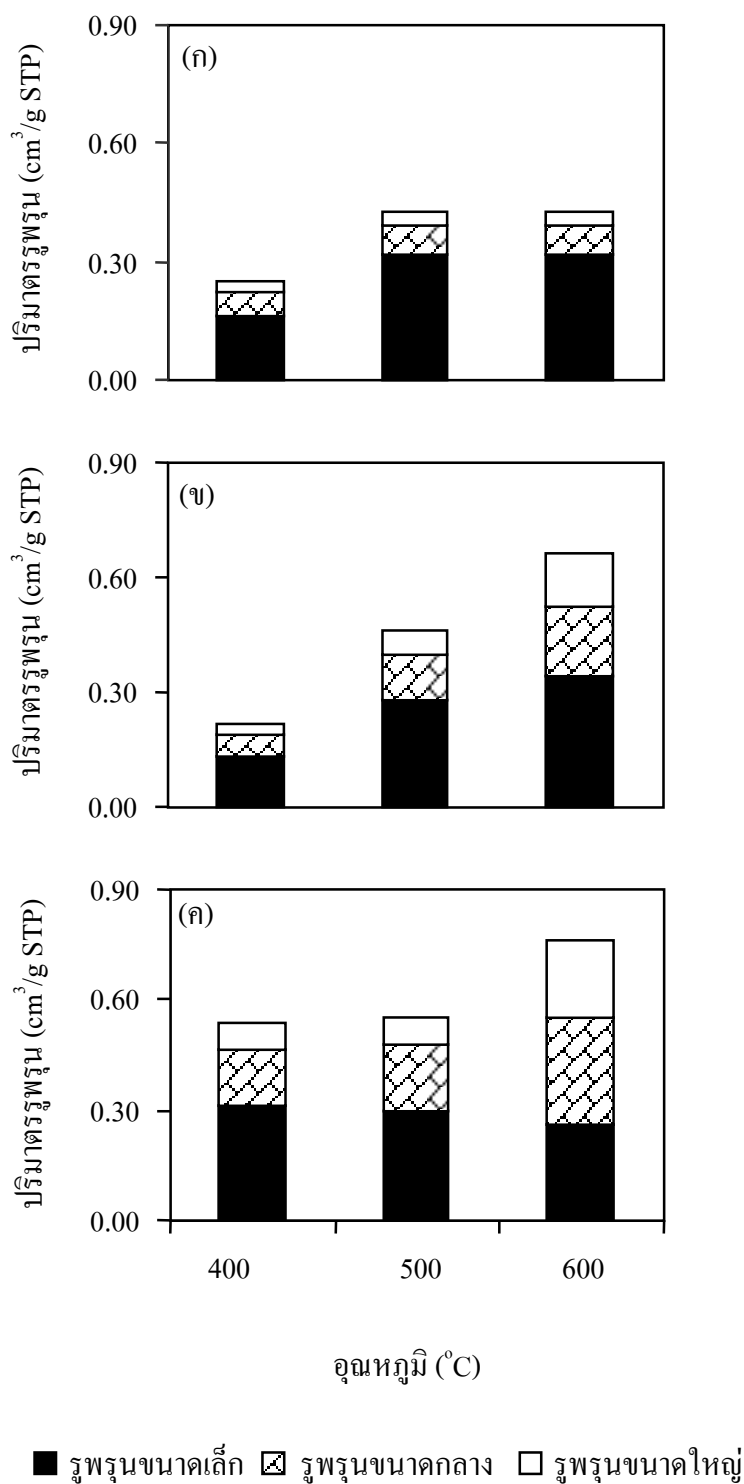
รูปที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมะที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์

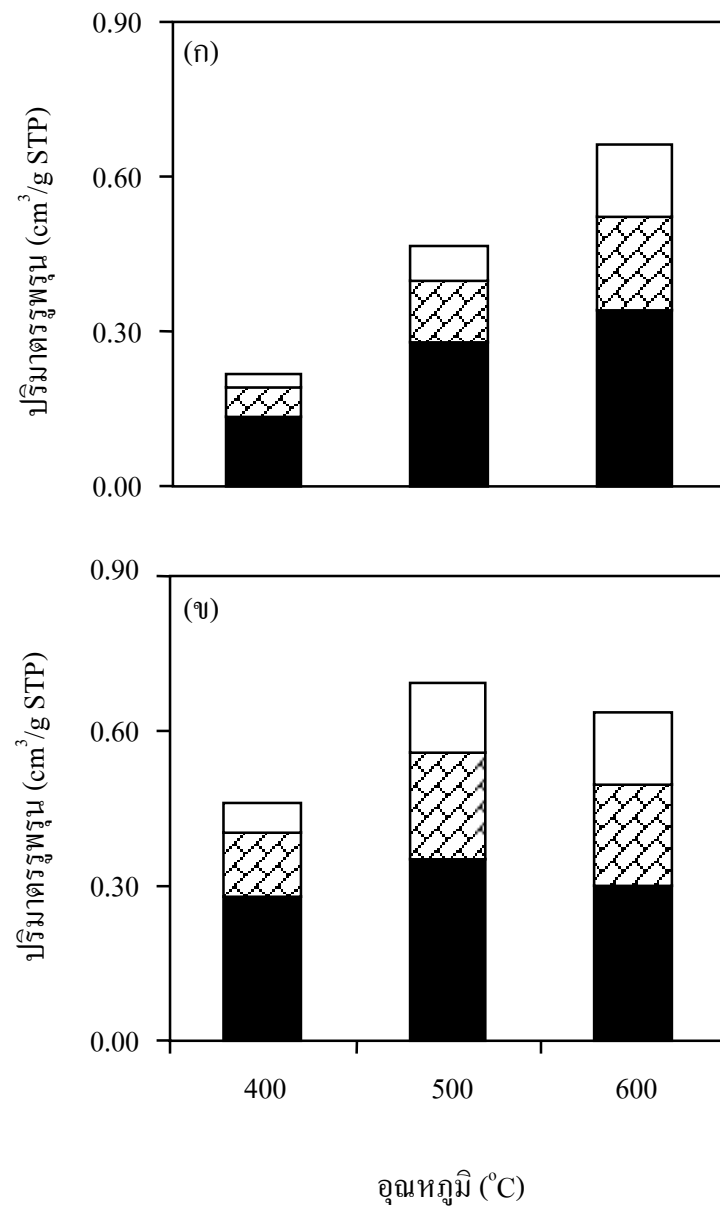
ชนิดถ่านหิน	สถานะการกระตุ้น			ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)				ขนาดรูพรุน (nm)
	ZnCl ₂ : ถ่านหิน	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่	ทั้งหมด	
แม่เมาะ	0.5	60	400	0.17	0.06	0.02	0.25	1.97
			500	0.32	0.08	0.03	0.43	1.90
			600	0.32	0.08	0.03	0.43	1.89
	1.0	60	400	0.13	0.06	0.03	0.22	2.00
			500	0.28	0.12	0.06	0.46	1.98
			600	0.41	0.16	0.13	0.70	1.92
	1.5	60	400	0.31	0.15	0.07	0.53	1.98
			500	0.33	0.17	0.07	0.57	1.94
			600	0.26	0.29	0.20	0.77	1.98
	1.0	120	400	0.28	0.12	0.06	0.46	1.97
			500	0.35	0.20	0.14	0.69	1.95
			600	0.29	0.20	0.14	0.63	1.95
บ้านปู	1.0	60	400	0.20	0.08	0.05	0.33	1.93
			500	0.27	0.23	0.14	0.64	1.99
			600	0.24	0.21	0.12	0.57	2.03



รูปที่ 4.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เกาะที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ปริมาตรรุกรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เกาะที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย(ก) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/60 นาที (ข) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/60 นาที และ(ค) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/60 นาที



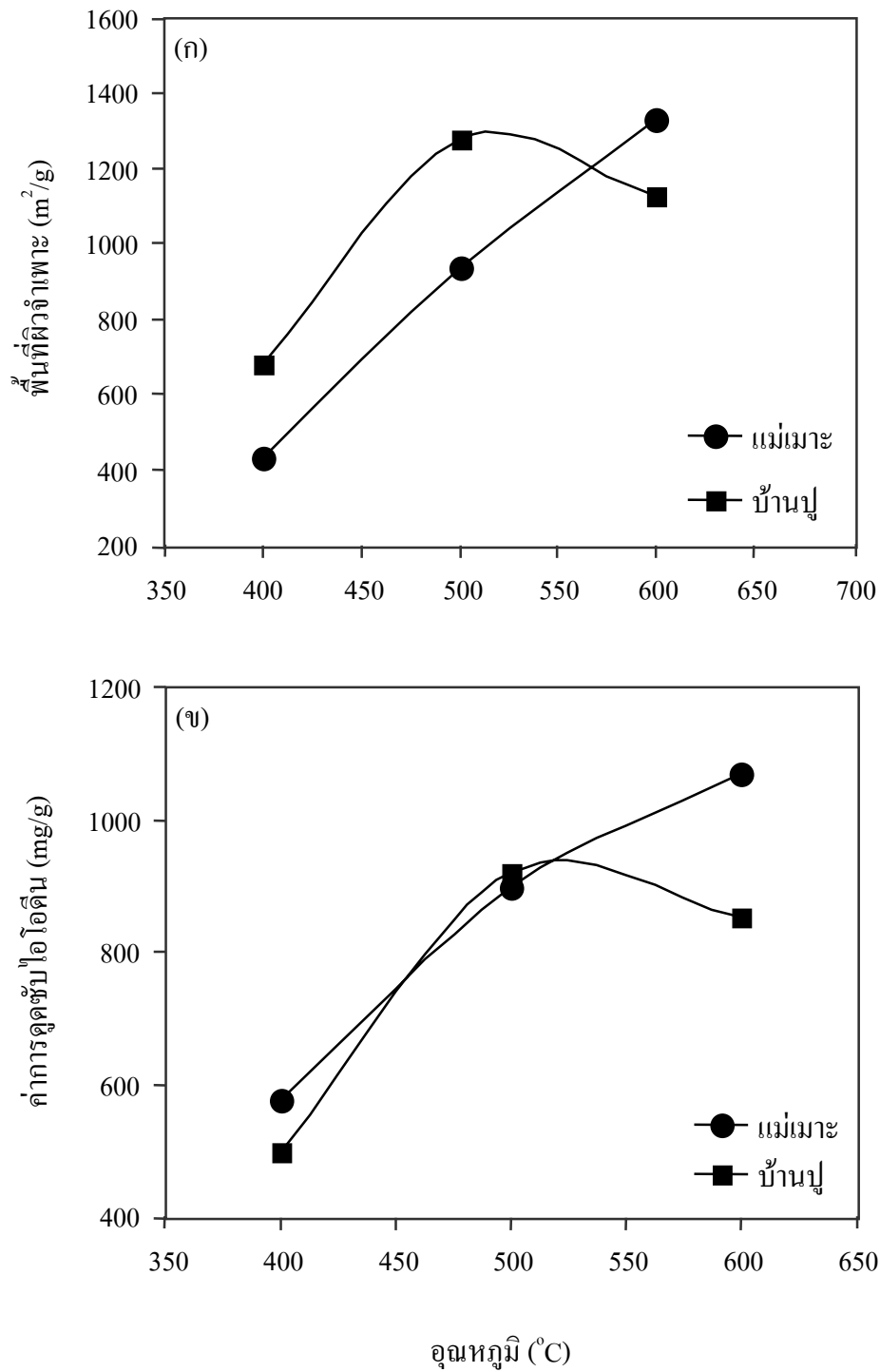
■ รุกรุนขนาดเล็ก ▨ รุกรุนขนาดกลาง □ รุกรุนขนาดใหญ่

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณรุกรุนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 ที่อุณหภูมิต่างกัน เมื่อ (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และ (ข) เวลาในการกระตุ้น 120 นาที

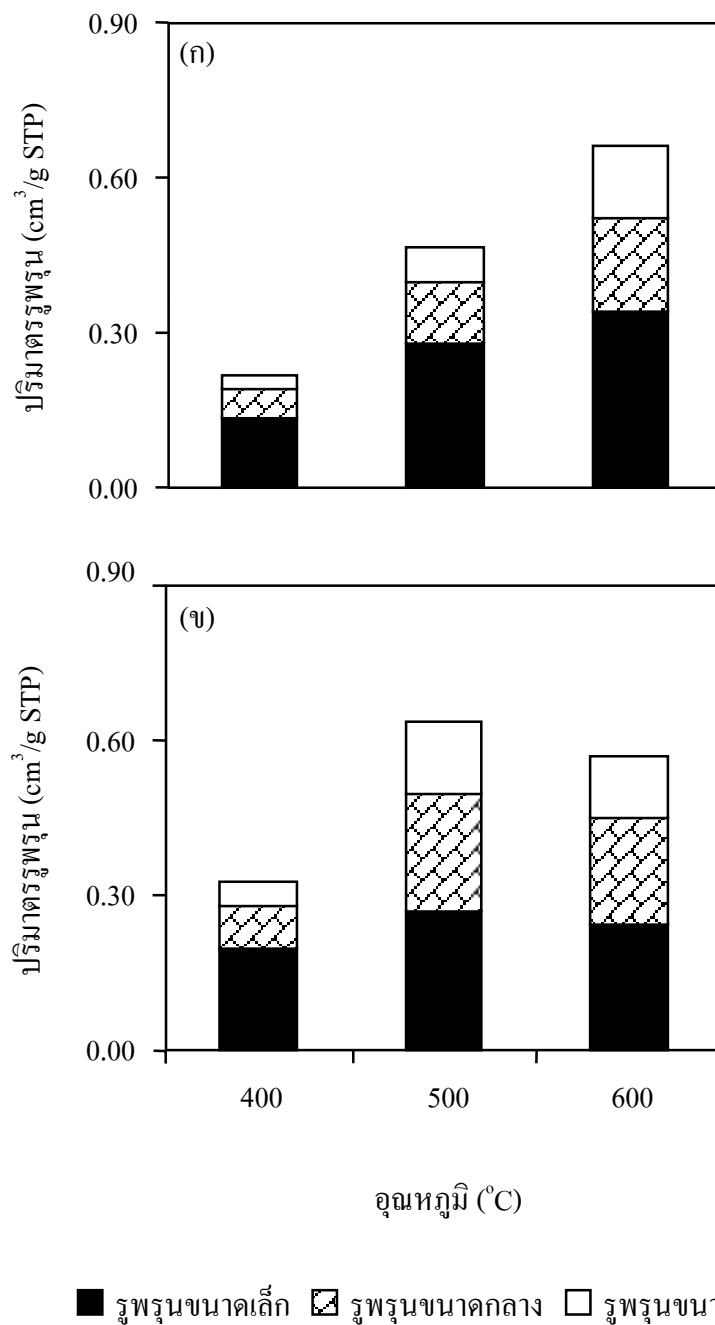
ในส่วนของระยะเวลาในการกระตุ้น พบว่าที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 และอุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่า 500°C การเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้น ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.2 ข) ค่าการดูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.3 ข) และปริมาตรรูพรุน (รูปที่ 4.5 ข) ของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่า 500°C การเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้น ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง

จากผลการวิเคราะห์ในข้างต้นอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิของการกระตุ้นสูง และใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นนาน อาจเกิดการสูญเสียซิงค์คลอไรด์ (จุดหลอมเหลว 283°C และจุดเดือด 732°C) ไปบ้างบางส่วน (Teng and Yeh, 1998) ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโครงสร้างถ่านหินลิกไนต์ลดลง ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ การดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 0.5 : 1.0 เมื่ออุณหภูมิของการกระตุ้นสูงกว่า 500°C จึงมีค่าไม่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการกระตุ้น แต่ที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 และที่ 1.5 : 1.0 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ การดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์สูงขึ้นตามอุณหภูมิของการกระตุ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบสูงๆ แม้จะมีการสูญเสียซิงค์คลอไรด์ไปบ้างเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ยังคงมีซิงค์คลอไรด์เหลือพอที่จะทำปฏิกิริยากับถ่านหินลิกไนต์ได้ ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติดังกล่าวสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 การกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง (600°C) แต่ใช้เวลานานขึ้น (120 นาที) ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ การดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนไม่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการสูญเสียซิงค์คลอไรด์ไปบางส่วนเช่นเดียวกัน

จากการศึกษาเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปู ที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 ระยะเวลาในการกระตุ้น 60 นาที พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.6 ก) ค่าการดูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.6 ข) และปริมาตรรูพรุน (รูปที่ 4.7 ข) ของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทั้งสามกับถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะพบว่ามีค่าสูงกว่า แต่เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่า 500°C พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์กลับลดลง และมีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านหินลิกไนต์บ้านปูมีรูพรุนภายในส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (รูปที่ 4.7 ข) ซึ่งแตกต่างจากถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะซึ่งมีรูพรุนภายในส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก (รูปที่ 4.7 ก) ผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้นเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ที่มาจากแหล่งต่างกัน ส่งผลให้สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แตกต่างกันด้วย



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบ (ก) พื้นที่ผิวจำเพาะ และ(ข) ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และบ้านปู ซึ่งเตรียมที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้อุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน

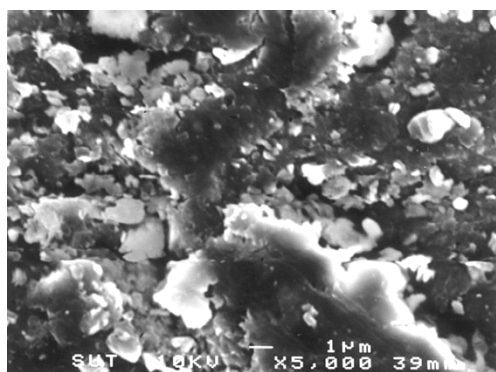


รูปที่ 4.7 ปริมาตรรุกรุนของถ่านกัมมันต์จาก (ก) ถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และ (ข) ถ่านหินลิกไนต์บ้านปู ซึ่งเตรียมที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้อุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน

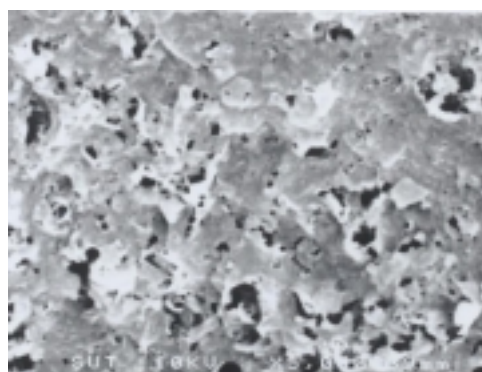
ดังนั้นจากผลการศึกษารูปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ โดยพิจารณาเฉพาะค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ได้แก่สภาวะที่อัตราส่วนสารกระตุ้นเท่ากับ 1.5 : 1.0 โดยการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600°C และใช้ระยะเวลา 60 นาที ซึ่งทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1550 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจากกะลามะพร้าวที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 1180 ตารางเมตรต่อกรัม

4.1.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

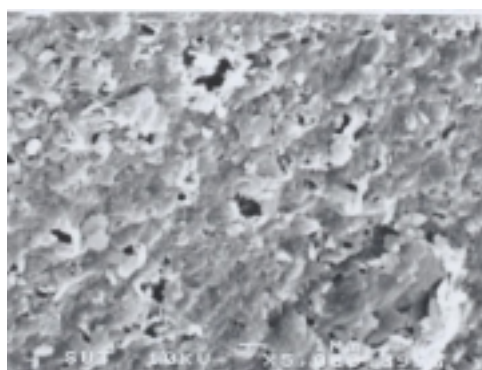
รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และรูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านหินลิกไนต์บ้านปู และถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปู ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, [SEM]) จากผลการวิเคราะห์พบว่าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และบ้านปู ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้น ไม่มีรูพรุนที่ผิวด้านนอก แต่เมื่อนำมาเตรียมให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่สภาวะการกระตุ้นต่างๆ พบว่ามีรูพรุนกระจายที่ผิวด้านนอกของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้น



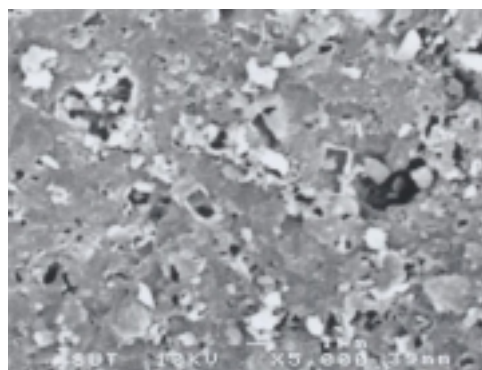
(ก) ขยาย 5000 เท่า



(ข) ขยาย 5000 เท่า

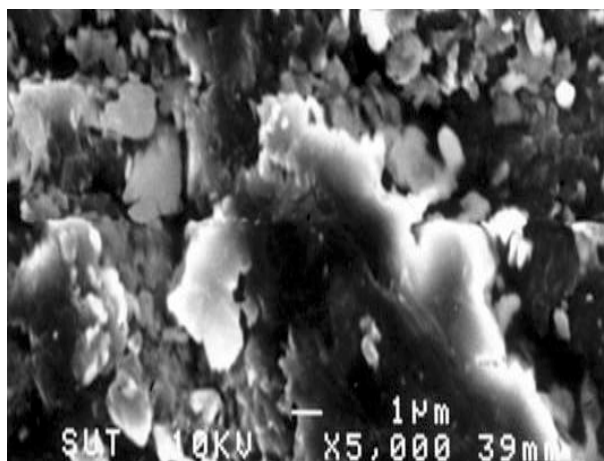


(ค) ขยาย 5000 เท่า

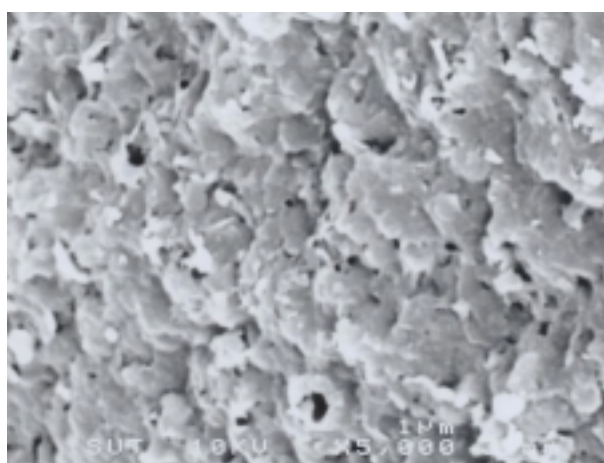


(ง) ขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ (ก) ถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะอัตราส่วน 0.5 : 1.0/500°C/60 นาที (ค) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะอัตราส่วน 1.0 : 1.0/400°C/60 นาที และ (ง) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะอัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/60 นาที



(ก) ขยาย 5000 เท่า



(ข) ขยาย 5000 เท่า

รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ (ก) ถ่านหินลิกไนต์บ้านปู และ (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปูเตรียมที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตตูลิบ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 500°C และ เวลา 60 นาที

4.2 สมบัติถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเลือกใช้วัสดุคิบที่มีความหลากหลายในการนำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นสารกระตุ้นโดยศึกษาผลของตัวแปร อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 อุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วง $300^\circ C - 600^\circ C$ และระยะเวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ภายใต้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ และอัตราการให้ความร้อน $25^\circ C$ ต่อนาที ได้ผลการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

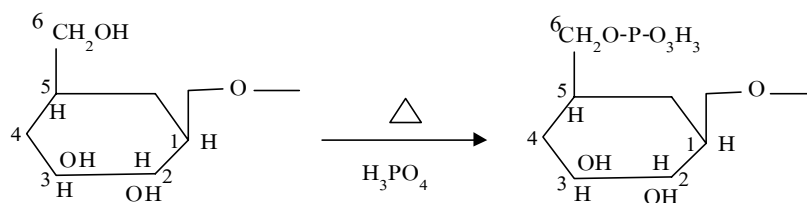
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่าขานอ้อยมีองค์ประกอบที่เป็นสารระเหยในปริมาณสูงถึงร้อยละ 88 และมีคาร์บอนคงตัวเพียงร้อยละ 11 ดังนั้นการใช้ขานอ้อยเป็นวัสดุคิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์จึงให้ผลผลิตค่อนข้างต่ำกว่าถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากขานอ้อยมีองค์ประกอบของสารระเหยลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคิบ

ผลการศึกษาที่ทุกสภาวะของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น ปริมาณสารระเหยในถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นให้สูงขึ้น ทำให้เกิดการสลายพันธะในโครงสร้างของขานอ้อยในส่วนที่เป็นอะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจนมากขึ้น ขณะเดียวกันปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริก กับโครงสร้างของขานอ้อยก็เกิดได้มากขึ้น (Jagtoyen and Derbyshire, 1998) ทำให้อินทรีย์วัตถุที่อยู่ในขานอ้อยหลุดออกไปในรูปของก๊าซได้มากขึ้น ส่งผลให้สารระเหยในถ่านกัมมันต์ลดลง แต่ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ในส่วนของปริมาณสารกระตุ้นและเวลาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุคิบ และการเพิ่มเวลาของการกระตุ้นให้นานขึ้น ทำให้สารระเหยและคาร์บอนคงตัวแตกต่างกันไม่มากนัก

นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าที่ทุกสภาวะของการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์มีปริมาณเถ้าสูงกว่าขานอ้อยที่ใช้เป็นวัสดุคิบ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเถ้าโดยน้ำหนักอาจมีค่าคงที่แต่เมื่อคิดเป็นร้อยละทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารระเหยลดลง นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริก กับขานอ้อย ดังตัวอย่างของการเกิดปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 4.10 (Jagtoyen and Derbyshire, 1998 quoted Barker and Hendrix, 1997 and Lyons, 1970) ส่งผลให้โมเลกุลของธาตุฟอสฟอรัสแทรกอยู่ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ อาจทำให้เถ้าในถ่านกัมมันต์สูงกว่าในขานอ้อยที่ใช้เป็นวัสดุคิบ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของชานอ้อย และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

สภาวะการกระตุ้น			ร้อยละ ความชื้น	องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
H ₃ PO ₄ : ชานอ้อย	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		เถ้า	สารระเหย	คาร์บอน คงตัว
0.5	60	300	12	6	37	57
		400	12	5	21	74
		500	11	5	19	76
		600	21	10	15	75
1.0	60	300	12	6	37	57
		400	12	5	25	70
		500	21	9	19	72
		600	11	8	19	73
1.5	60	300	12	5	33	62
		400	8	6	18	76
		500	12	7	16	77
		600	15	7	16	77
1.0	120	400	24	6	25	69
		500	28	5	20	75
		600	24	11	21	68
ชานอ้อย			9	2	88	10



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับโครงสร้างในชานอ้อย

4.2.2 ร้อยละผลผลิต

ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้น ที่ทุกอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ ทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของโครงสร้างชานอ้อยบางส่วนหลุดออกไปเป็นสารระเหยมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อาจเป็นไปได้ว่าอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการกระตุ้นเป็นปริมาณที่มากเกินไปแล้ว

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลผลิต ค่าการดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

สภาวะการกระตุ้น			ร้อยละผลผลิต	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
H ₃ PO ₄ : ชานอ้อย	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
0.5	60	300	50.18	530	855
		400	41.76	716	1279
		500	41.46	783	1008
		600	39.24	776	901
1.0	60	300	48.23	663	1024
		400	44.35	902	1394
		500	42.71	927	1500
		600	41.54	931	1294
1.5	60	300	53.87	642	1002
		400	42.04	893	1527
		500	41.07	886	1467
		600	39.75	1043	1474
1.0	120	400	35.31	781	1574
		500	32.29	892	1434
		600	31.00	792	1294

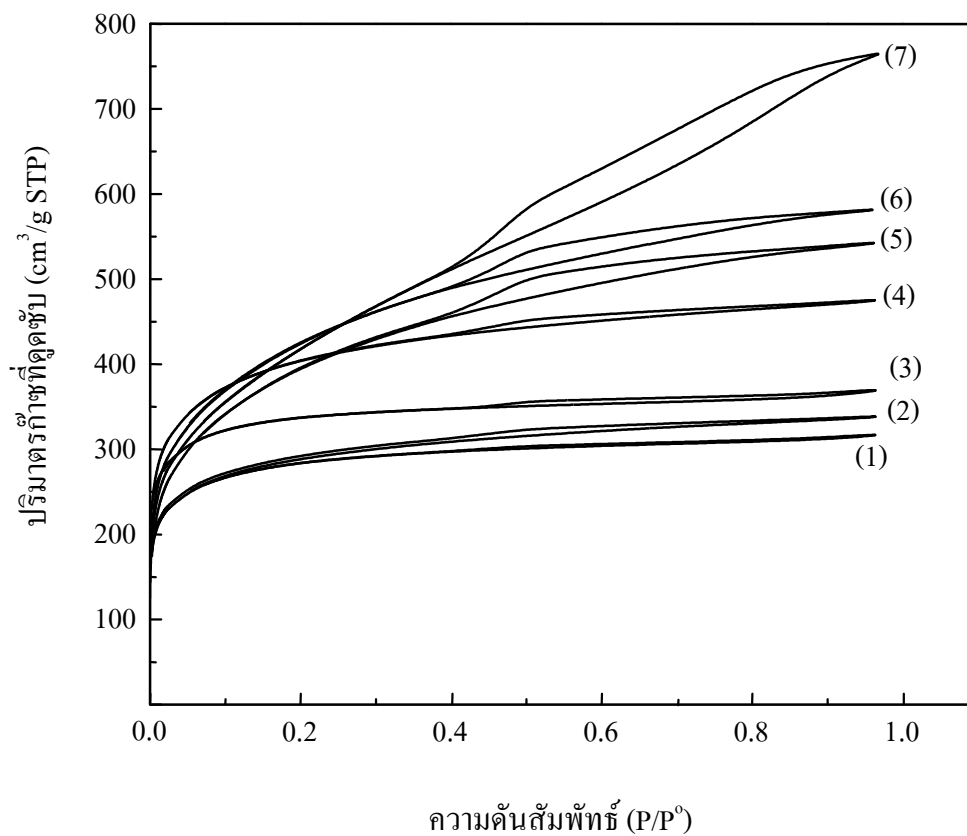
ตารางที่ 4.6 แสดงผลของระยะเวลาในการแช่วัตถุดิบในสารกระตุ้นต่อสมบัติของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการแช่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ และค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่เตรียมได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นการ ทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะต่างๆ จึงใช้เวลาในการแช่เพียง 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลผลิต และค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จาก ชานอ้อยเตรียมด้วยอัตราส่วน 1.0 : 1.0 กระตุ้นที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที แต่ใช้ระยะเวลาในการแช่กระตุ้นต่างกัน

เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	ร้อยละผลผลิต	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
1	42.71	927
6	40.48	939
12	39.55	927
24	41.52	893
72	39.00	949

4.2.3 ผลของสภาวะกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว และลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่างเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกแสดงในรูปที่ 4.11 การใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 กระตุ้นที่อุณหภูมิค่า 300°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน เป็นชนิด Type I (เส้นกราฟที่ 2) และเกือบไม่มี Hysteresis loop ซึ่งให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้เป็น ชนิดที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นให้สูงขึ้นเส้นกราฟไอโซ เทอมมีแนวโน้มที่เปลี่ยนจาก Type I เป็นแบบ Type II (เส้นกราฟที่ 2 5 และ 6) โดยมี Hyteresis loop ที่ค่อนข้างกว้างขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีรู พรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น ส่วนสภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 ที่อุณหภูมิของการกระตุ้นเท่ากับ 500°C และใช้ระยะเวลาในการกระตุ้น 60 นาที พบว่าเส้นไอโซ เทอมการดูดซับเป็นชนิด Type I และเกือบไม่มี Hysteresis loop เมื่ออัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ เท่ากับ 0.5 : 1.0 (เส้นกราฟที่ 1) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเป็น 1.0 : 1.0 (เส้นกราฟ ที่ 6) พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนจาก Type I เป็นคล้าย Type II และมี Hyteresis loop ที่กว้างขึ้น ซึ่งให้ เห็นว่าเมื่อมีปริมาณสารกระตุ้นมากขึ้นทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น



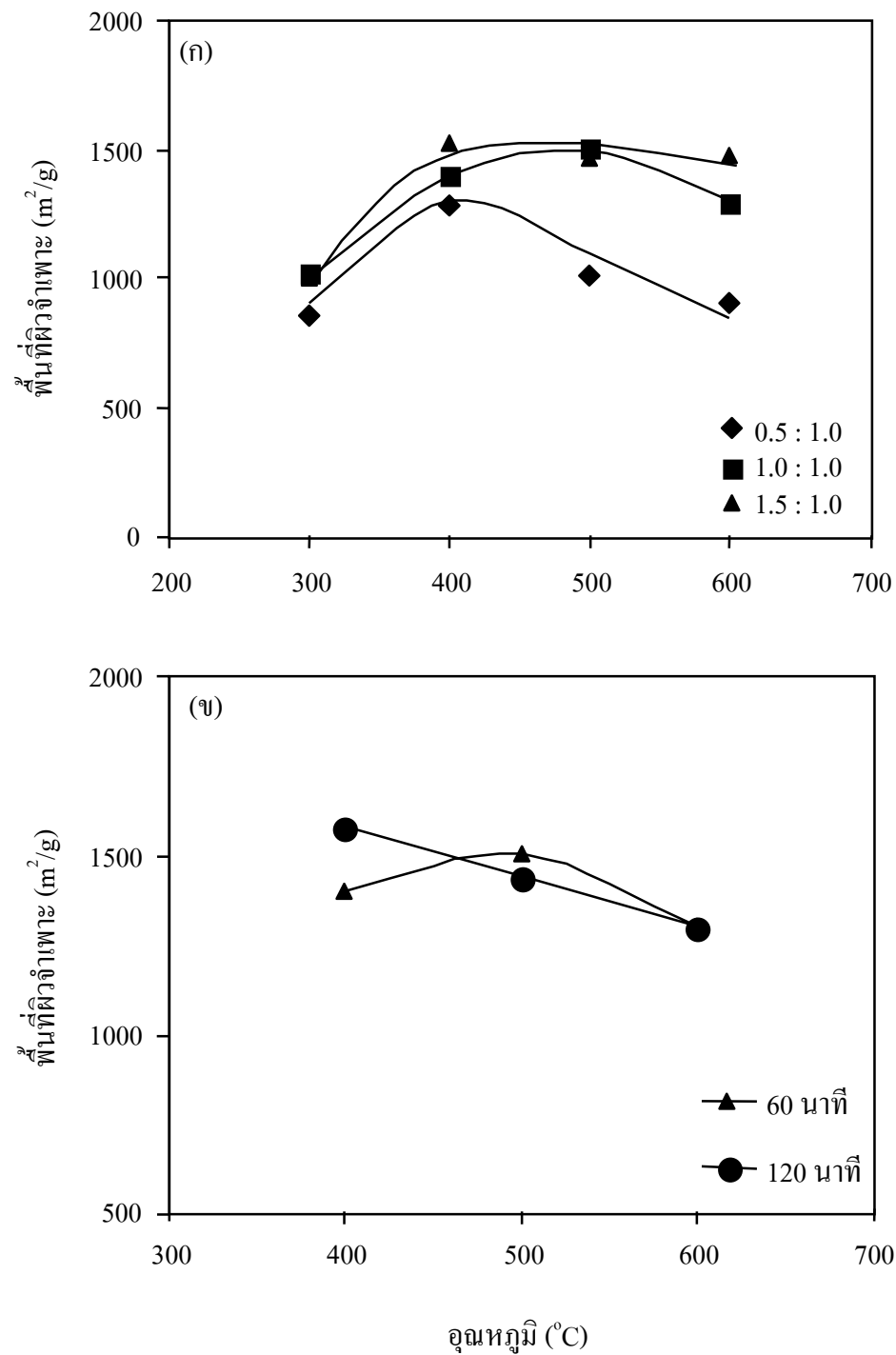
รูปที่ 4.11 เส้นไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยขนาด -100 เมชโดย (1) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/500°C /60 นาที (2) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/300°C /60 นาที (3) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (4) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/120 นาที (5) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/400°C/60 นาที (6) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/60 นาที และ (7) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/500°C/60 นาที

และที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.5 : 1.0 ไอโซเทอมการคูดซับเป็นชนิด Type IV (เส้นกราฟที่ 7) ซึ่งให้เห็นว่ารูปนโดยส่วนใหญ่เป็นรูปนขนาดกลาง ในส่วนของการเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นให้นานขึ้น พบว่าค่าการคูดซับก๊าซไนโตรเจนลดลง แต่ยังเป็นชนิด Type I (เส้นกราฟที่ 4 เทียบกับเส้นกราฟที่ 6)

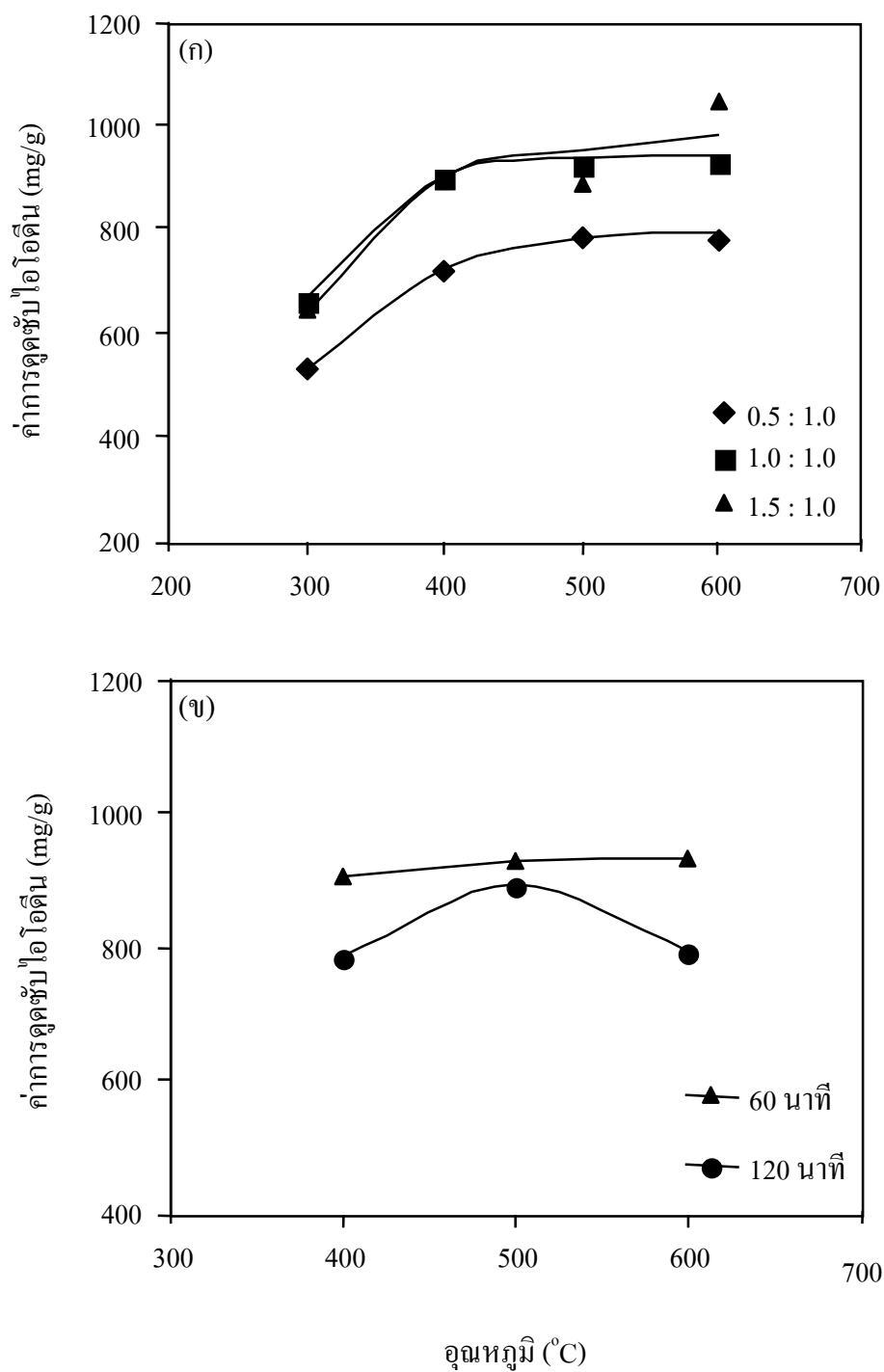
ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.12 ค่าการคูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 และปริมาตรรูปนของถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.14 พบว่าที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 400°C ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.12 ก) ค่าการคูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.13 ก) และปริมาตรรูปนรวม (รูปที่ 4.14 ก และ ค) ของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของการกระตุ้นสูงกว่า 400°C ที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 ค่าการคูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มคงที่ แต่ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูปนของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง (รูปที่ 4.12 ก และ 4.14 ก) และที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.5 : 1.0 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.12 ก) ค่าการคูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.13 ก) และปริมาตรรูปนของถ่านกัมมันต์ (รูปที่ 4.14 ค) มีแนวโน้มคงที่ สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.12 ก) ค่าการคูดซับไอโอดีน (รูปที่ 4.13 ก) และปริมาตรรูปน (รูปที่ 4.14 ข) ของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของการกระตุ้นสูงกว่า 500°C ค่าการคูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มคงที่เช่นเดียวกันกับที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 แต่ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูปนของถ่านกัมมันต์ลดลง

พิจารณาในส่วนของระยะเวลาในการกระตุ้น พบว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400°C และใช้เวลาในการกระตุ้นนาน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (รูปที่ 4.12 ข) และปริมาตรรูปน (รูปที่ 4.15 ข) ของถ่านกัมมันต์สูงขึ้น แต่การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C และใช้เวลาในการกระตุ้นนาน ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ปริมาตรรูปนของถ่านกัมมันต์ลดลง

จากผลการศึกษาโดย Jagtoyen and Derbyshire (1998) ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาของการกระตุ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับชานอ้อยเกิดได้มากขึ้น โดยการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 450°C ปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับชานอ้อยที่เกิดขึ้น ทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในโครงสร้างของชานอ้อยหลุดออกมาในรูปของก๊าซ ส่งผลให้ความรูปนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการกระตุ้น แต่เมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 450°C และใช้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบต่ำกว่า 1.5 : 1.0 ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เกิดมีการหดตัวของโครง



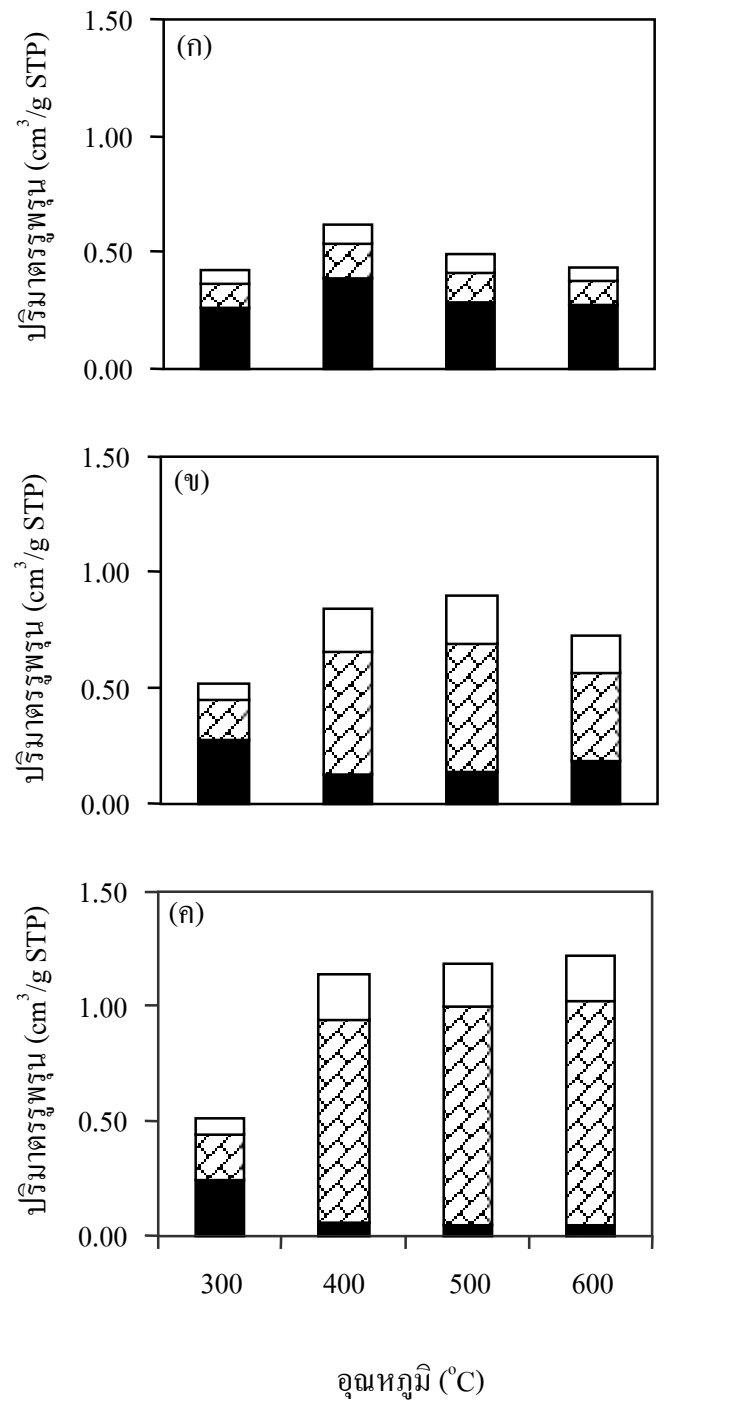
รูปที่ 4.12 พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ



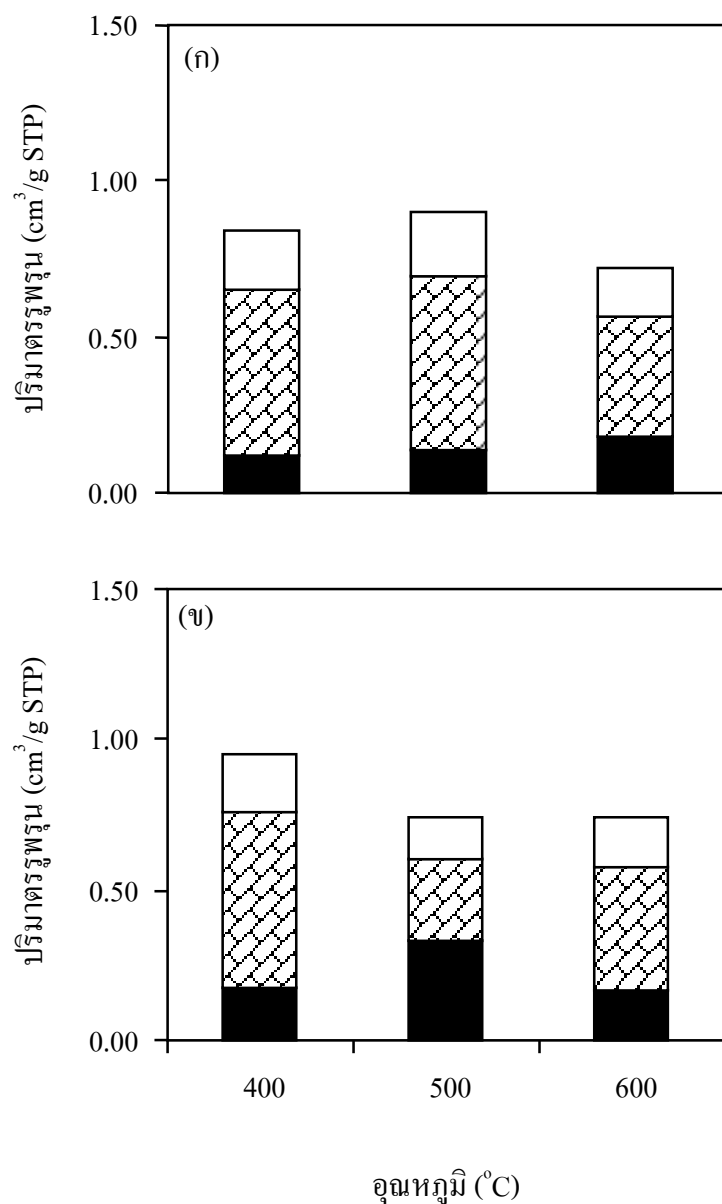
รูปที่ 4.13 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และใช้ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 0.5 : 1.0 1.0 : 1.0 และ 1.5 : 1.0 ตามลำดับ และ (ข) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และ ใช้เวลาในการกระตุ้น 60 และ 120 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

สถานะการกระตุ้น			ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)				ขนาดรูพรุน (nm)
H ₃ PO ₄ : ชานอ้อย	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่	ทั้งหมด	
0.5	60	300	0.26	0.11	0.05	0.42	1.97
		400	0.39	0.15	0.08	0.62	1.92
		500	0.28	0.13	0.08	0.49	1.95
		600	0.28	0.10	0.05	0.43	1.91
1.0	60	300	0.27	0.18	0.07	0.52	2.05
		400	0.12	0.53	0.19	0.84	2.42
		500	0.13	0.56	0.21	0.90	2.40
		600	0.18	0.38	0.16	0.72	2.23
1.5	60	300	0.25	0.19	0.07	0.51	2.05
		400	0.06	0.87	0.20	1.13	2.98
		500	0.05	0.96	0.18	1.19	3.24
		600	0.04	0.97	0.21	1.22	3.30
1.0	120	400	0.18	0.58	0.19	0.95	2.42
		500	0.33	0.27	0.13	0.73	2.06
		600	0.17	0.40	0.17	0.74	2.30



รูปที่ 4.14 ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างกัน โดย (ก) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/60 นาที (ข) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/60 นาที และ (ค) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/60 นาที



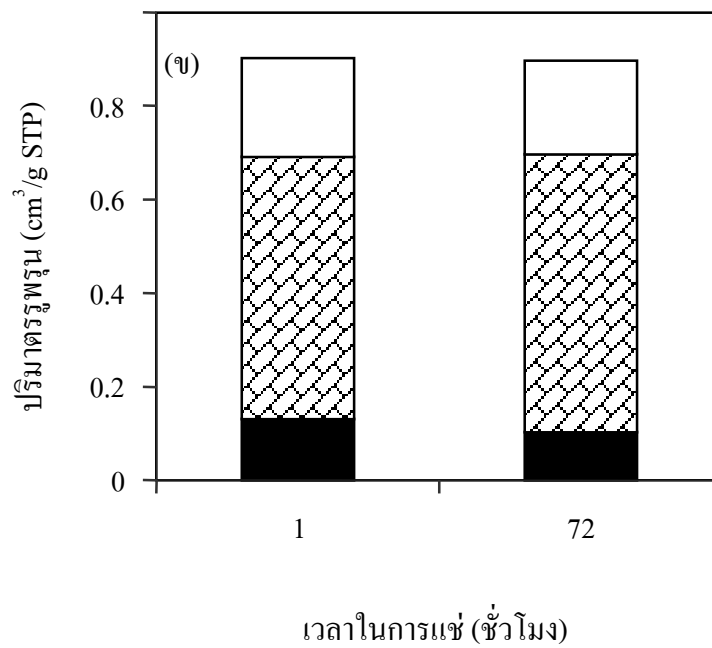
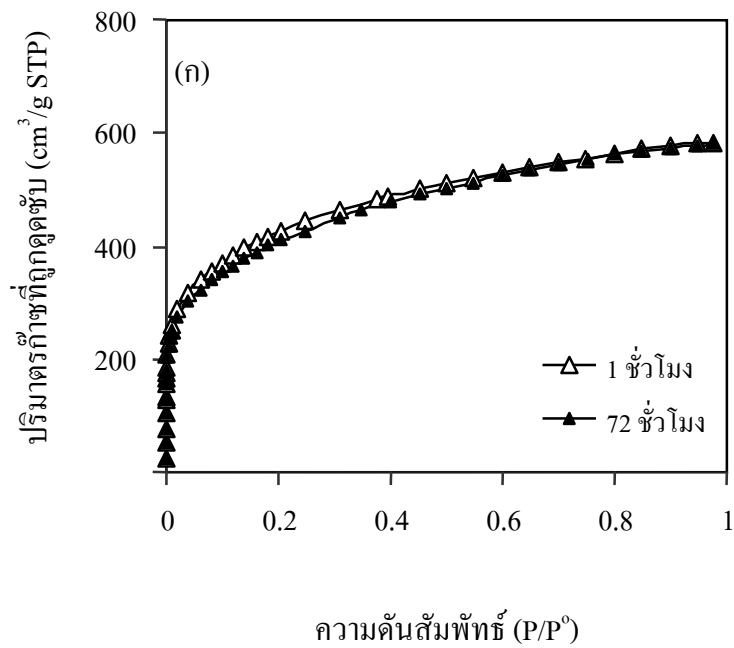
■ รุกรุนขนาดเล็ก □ รุกรุนขนาดกลาง □ รุกรุนขนาดใหญ่

รูปที่ 4.15 ปริมาตรรุกรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 และอุณหภูมิของการกระตุ้นต่างๆ โดย (ก) เวลาในการกระตุ้น 60 นาที และ (ข) เวลาในการกระตุ้น 120 นาที

สร้างรูปพรุน ส่งผลให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง แต่ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบสูงกว่า 1.5 : 1.0 การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นนอกจากจะทำให้เกิดการสูญเสียอินทรีย์วัตถุอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับซานอ้อยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังพบว่ากรดฟอสฟอริกที่มีปริมาณมากทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) ได้มากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างเป็นแบบบริจิดเมทริกซ์ (Rigid matrix) ซึ่งโครงสร้างนี้ช่วยลดการหดตัวของโครงสร้างรูปพรุน และยังทำให้โครงสร้างรูปพรุนถ่างออก ซึ่งฟอสเฟตเอสเทอร์สามารถกำจัดออกได้โดยการล้าง ทำให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น และรูปพรุนภายในถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะเป็นรูปพรุนขนาดกลาง นอกจากนี้ Castro, Bonelli, Cerrella and Cukierman (2000) พบว่าการเตรียมโดยการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงและใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นนาน ทำให้เกิดการหดตัวของโครงสร้างรูปพรุน ทำให้ความพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลงเช่นเดียวกัน

จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าช่วง 400-500°C สมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูปพรุนเพิ่มขึ้นไปตามอุณหภูมิของการกระตุ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของการกระตุ้นสูงกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ที่ทุกสภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มที่จะคงที่ แต่พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูปพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบน้อยกว่า 1.5 : 1.0 แต่เมื่ออัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.5 : 1.0 พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูปพรุนของถ่านกัมมันต์ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C และใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นนาน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูปพรุนของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Jagtoyen and Derbyshire (1998) และ Castro et al, (2000) และสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

นอกจากผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น และระยะเวลาในการกระตุ้น งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของระยะเวลาในการแช่ต่อสมบัติทางด้านพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากซานอ้อยด้วย พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการแช่จาก 1 ชั่วโมง เป็น 72 ชั่วโมง เมื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 กระตุ้นที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนมีลักษณะคล้ายกัน และความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนต่างกันเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4.16 ก) เมื่อพิจารณาปริมาตรรูปพรุน (รูปที่ 4.16 ข) พบว่าปริมาตรรูปพรุนของรูปพรุนทุกขนาดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าระยะเวลาในการแช่ไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์

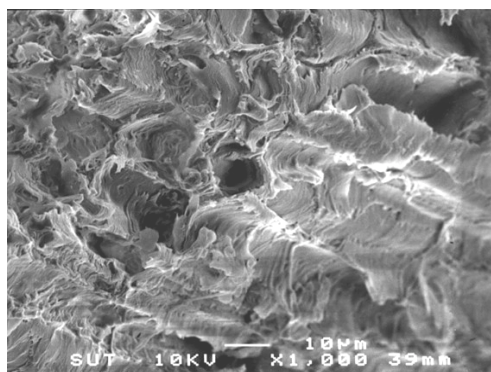


รูปที่ 4.16 (ก)ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน และ (ข) ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยเตรียมที่สภาวะอัตราส่วน 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 500°C 60 นาที โดยใช้ระยะเวลาในการแช่สารกระตุ้น 1 และ 72 ชั่วโมง

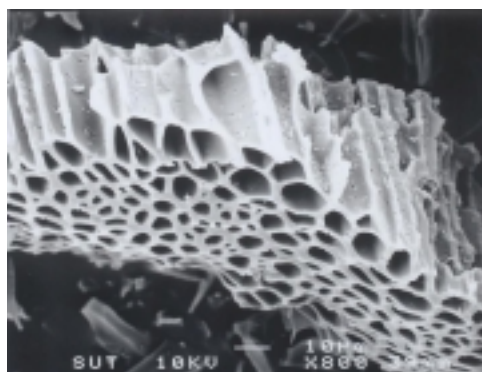
จากผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียง หรือมากกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้าที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1180 ตารางเมตรต่อกรัม โดยสถานะที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ คือสถานะที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิของการกระตุ้น 400°C และใช้เวลาในการกระตุ้น 120 นาที ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1574 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด

4.2.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

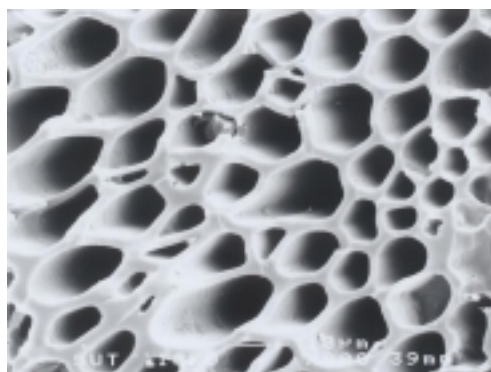
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะพื้นผิวของชานอ้อย และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยมีรูพรุนเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน และมีลักษณะเป็นท่อ



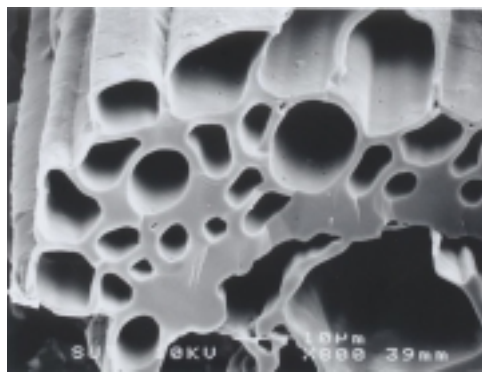
(ก) ขยาย 1000 เท่า



(ข) ขยาย 800 เท่า



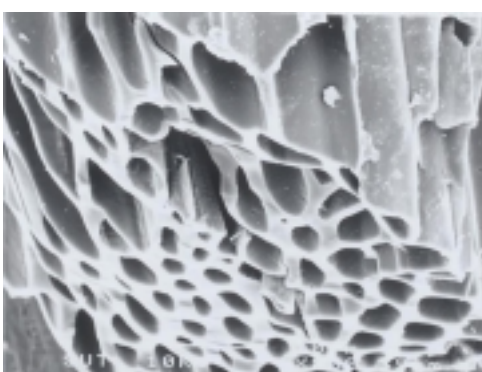
(ค) ขยาย 800 เท่า



(ง) ขยาย 800 เท่า



(จ) ขยาย 400 เท่า



(ฉ) ขยาย 800 เท่า

รูปที่ 4.17 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ (ก) ชานอ้อย และด้านกัมมันต์จากชานอ้อย เมื่อ (ข) อัตราส่วน 0.5 : 1.0/500°C/60 นาที (ค) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/400°C/60 นาที (ง) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/60 นาที (จ) อัตราส่วน 1.0 : 1.0/500°C/120 นาที และ (ฉ) อัตราส่วน 1.5 : 1.0/500°C/60 นาที

4.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์

หัวข้อนี้เป็นการรายงานผลการศึกษาศึกษาการดูดซับโครเมียม (IV) จากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่ทำการศึกษาได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย เวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิของการดูดซับ ทำการศึกษาโดยใช้ถ่านกัมมันต์สามชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแม่เมาะเตรียมโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และที่สภาวะอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 ที่อุณหภูมิ 500°C และเวลา 60 นาที ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยซึ่งเตรียมโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่สภาวะเดียวกันกับถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมจากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ และเปรียบเทียบผลกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าว สารละลายเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยโครเมียม (VI) เท่านั้น สมบัติถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดที่ใช้ทดสอบความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) แสดงในตารางที่ 4.8

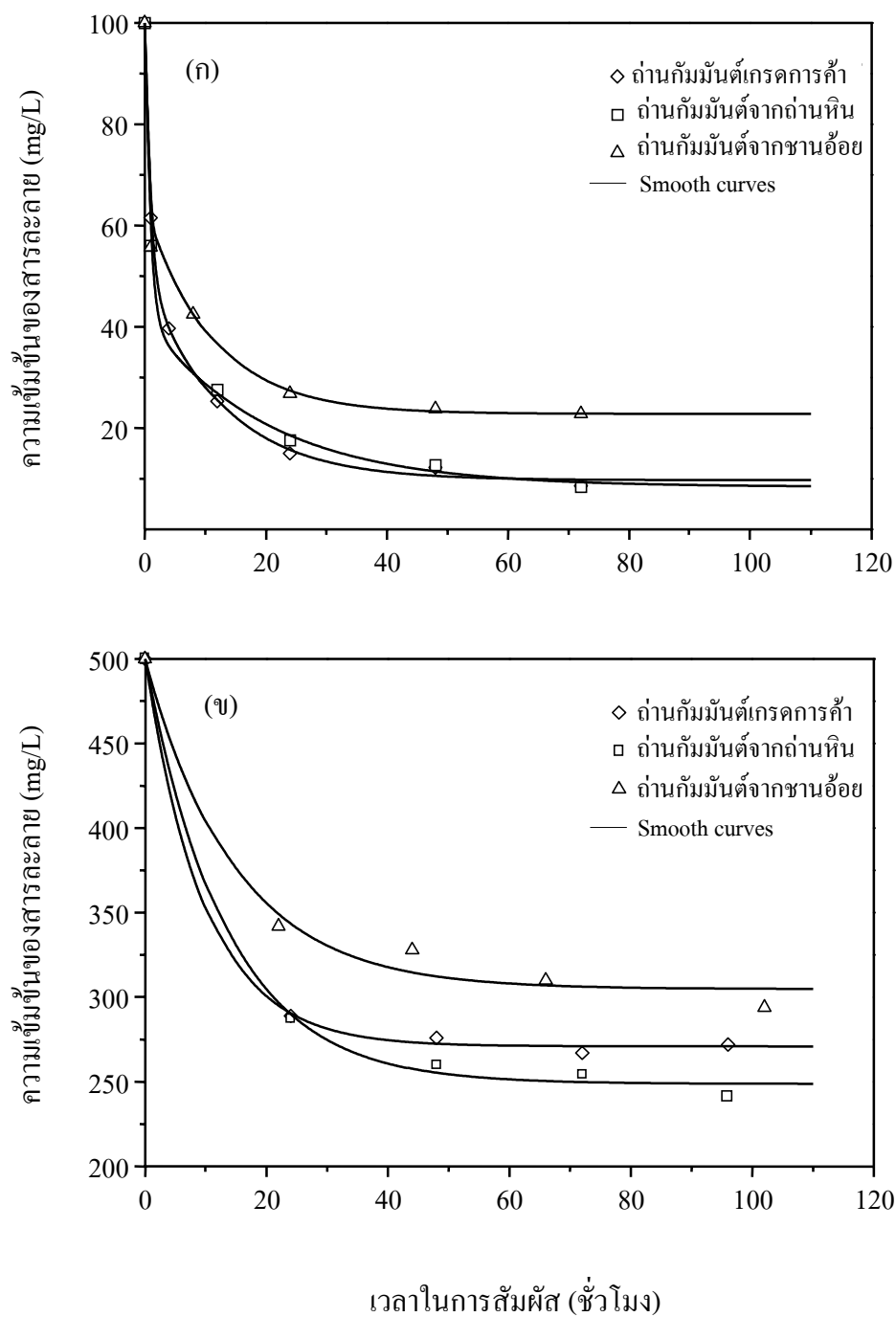
ตารางที่ 4.8 สมบัติถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลาย

ถ่านกัมมันต์	สมบัติถ่านกัมมันต์		
	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน	936	1.98	896
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า	1180	1.91	970
ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	1500	2.40	927

การศึกษาระยะเวลาเข้าถึงสมดุลของการดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์ และค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์ เพื่อจุดประสงค์ในการนำระยะเวลาเข้าถึงสมดุลไปใช้ศึกษาผลของตัวแปรอื่นต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์ต่อไป ผลการศึกษาแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.1 และ 4.3.2

4.3.1 ระยะเวลาเข้าถึงสมดุล

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือในสารละลายกับระยะเวลาในการสัมผัส พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรกของการดูดซับ การดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดเข้าสู่สมดุลที่เวลาในการดูดซับประมาณ 50 ชั่วโมง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างของสารละลาย 2.5 และอุณหภูมิของการดูดซับ 30°C แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น



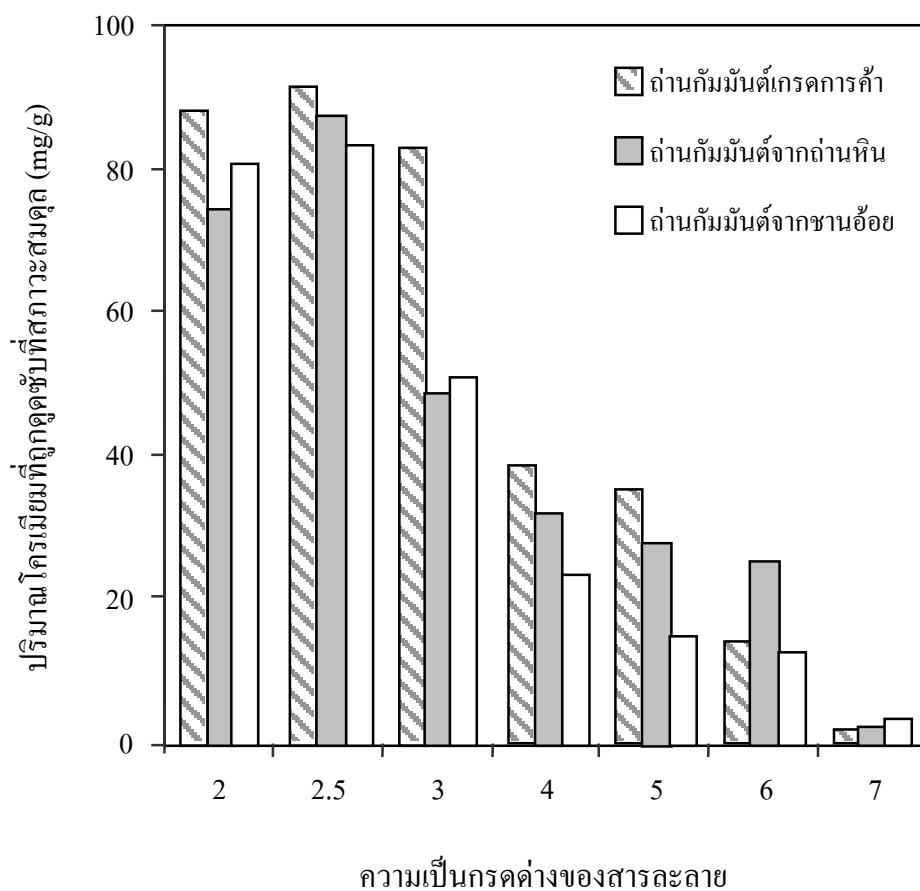
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายโคโรเมียกับเวลาในการสัมผัส ของถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกัน เมื่อ (ก) ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ข) ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย 2.5 อุณหภูมิขณะดูดซับ 30°C น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ของสารละลาย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ทั้งสามเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 70 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการเข้าสู่สมดุลของระบบขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เวลาที่ 72 ชั่วโมงเป็นเวลาเข้าถึงสมดุล

4.3.2 ผลของความเป็นกรดต่างของสารละลาย

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าความเป็นกรดต่างของสารละลายมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดสามารถดูดซับโครเมียมได้ดีเมื่อสารละลายมีความเป็นกรด (ช่วงความเป็นกรดต่าง 2-2.5) เนื่องจากโครเมียมจะอยู่ในรูปของไอออน HCrO_4^- เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นไอออนที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ (Selomulya et al., 1999) แต่เมื่อความเป็นกรดต่างของสารละลายสูงกว่า 2.5 สารละลายมี OH^- มาก และ OH^- สามารถเกาะติดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ดี ทำให้พื้นผิวถ่านกัมมันต์แสดงความเป็นประจุลบ ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับไอออนของ HCrO_4^- ได้น้อยลง ความสามารถในการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์จึงลดลง นอกจากนี้ที่ความเป็นกรดต่างของสารละลายสูง ไอออนของโครเมตบางส่วนจะอยู่ในรูป CrO_4^{2-} ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้น้อยมาก หรือไม่สามารดูดซับได้เลย (Selomulya et al., 1999) เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์เกรดการค้า พบว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความสามารถในการกำจัดโครเมียมสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยสามารถดูดซับโครเมียมไว้ได้ 91.3 87.3 และ 83.2 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านตามลำดับ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายที่ 2.5 ในการศึกษาต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด (ตารางที่ 4.8) พบว่าถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า และถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน แต่กลับมีความสามารถในการกำจัดโครเมียมต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางเคมีที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีความสำคัญต่อความสามารถในการกำจัดโครเมียมในสารละลาย



รูปที่ 4.19 ผลของความแตกต่างของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมของ ถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิขณะดูดซับ 30°C น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

4.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์แสดงในรูปที่ 4.20 ความสามารถในการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นความสามารถในการดูดซับโครเมียมมีแนวโน้มที่คงที่ ซึ่งข้อมูลการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ที่สถานะสมดุลถูกนำมาทดสอบตามความสัมพันธ์ของสมการ Langmuir ซึ่งเป็นสมการที่นิยมนำมาใช้อธิบายการดูดซับ

เมื่อนำข้อมูลการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ที่สถานะสมดุลมาทดสอบตามความสัมพันธ์ของสมการ Langmuir ดังสมการ

$$\frac{q_e}{q_m} = \frac{b C_e}{1 + b C_e} \quad (4.1)$$

หรือจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 4.2

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4.2)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

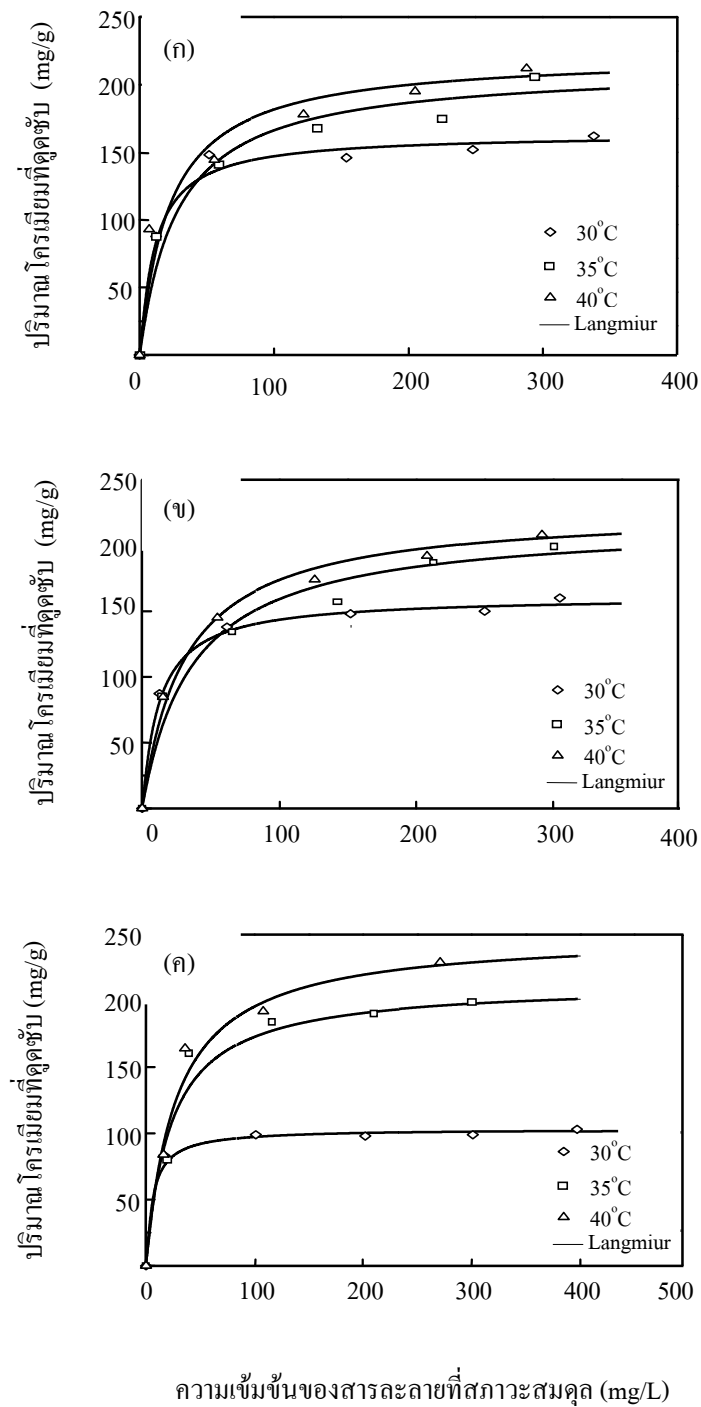
q_e = ปริมาณดูดซับที่สถานะสมดุล (mg/g carbon)

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า q_e ที่เวลาของการดูดซับเท่ากับ 72 ชั่วโมง เนื่องจากการเพิ่มเวลาของการดูดซับให้สูงกว่านี้ ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 5

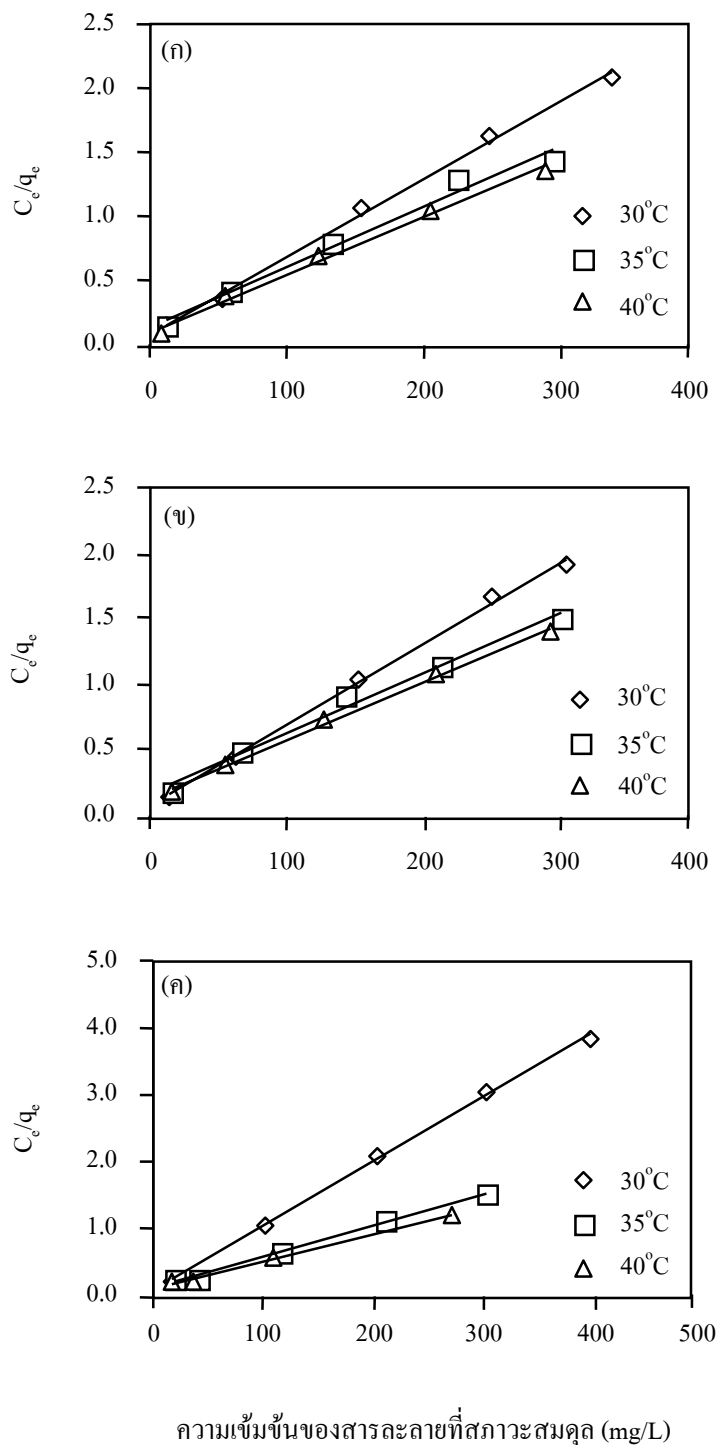
q_m = ปริมาณของตัวถูกดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับชั้นเดียว (mg/g carbon)

b = ค่าคงที่การดูดซับ (affinity coefficient)

เมื่อเขียนเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ ความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุล (C_e) ได้กราฟเส้นตรง แสดงในรูปที่ 4.21 ทำให้สามารถคำนวณค่า q_m ได้จากความชันของกราฟ และค่า b จากจุดตัดแกนในแนวตั้งของกราฟผลการคำนวณค่า q_m และค่าของ b ในสมการ Langmuir แสดงในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมที่อุณหภูมิต่างกันของ (ก) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ และ (ค) ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (ความเป็นกรดต่างของสารละลาย 2.5 น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร)



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างกันของ (ก) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (ข) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ และ (ค) ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (ความเป็นกรดต่างของสารละลาย 2.5 น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่าตัวแปรในสมการการดูดซับ Langmuir⁽¹⁾

อุณหภูมิ (°C)	ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า			ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน			ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย		
	q_m	b	r^2	q_m	b	r^2	q_m	b	r^2
30	163.93	0.0873	0.9971	161.29	0.0804	0.9977	103.09	0.0115	0.9968
35	212.77	0.0358	0.9831	217.39	0.0273	0.9881	212.77	0.0434	0.9958
40	222.22	0.0448	0.9925	227.27	0.0323	0.9972	250.00	0.0362	0.9969

หมายเหตุ⁽¹⁾ หมายถึง ความเป็นกรดต่างของสารละลาย 2.5 น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และ

ปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร

r^2 หมายถึง ค่า สัมประสิทธิ์การถดถอย (coefficient of regression)

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.9 พบว่าการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ทั้งสามสามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการ Langmuir ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q กับ C_e เส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยพบว่ามีค่ามากกว่า 0.98 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียม (VI) บนผิวของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดเป็นการปกคลุมของตัวถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์แบบชั้นเดียว เมื่อพิจารณาค่า q_m พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโครเมียมได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขณะดูดซับ จึงอาจเป็นไปได้ว่าการดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับทางเคมีมากกว่าจะเป็นการดูดซับแบบกายภาพ

4.3.4 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetics of adsorption)

การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของการดูดซับจะทดสอบแบบจำลอง ในรูปแบบของปฏิกิริยาการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) และปฏิกิริยาการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) ในรูปแบบของ Ho และ McKey, 1998 (Hamadi, Chen, Farid and Lu, 2001) โดยการดูดซับจะต้องเป็นการดูดซับทางเคมี และการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเป็นขั้นที่ช้าที่สุดที่เป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate-limiting step)

เมื่อพิจารณาให้ปฏิกิริยาของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของปฏิกิริยาการดูดซับแสดงในสมการที่ 4.3

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad (4.3)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 4.3 จาก $t=0$ ถึง $t>0$ และ $q=0$ ถึง $q>0$ และจัดรูปสมการใหม่ทำให้ได้สมการที่ 4.4

$$\log(q_e - q) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4.4)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g carbon)

q = ปริมาณการดูดซับที่เวลาต่างๆ ก่อนถึงสมดุล (mg/g carbon)

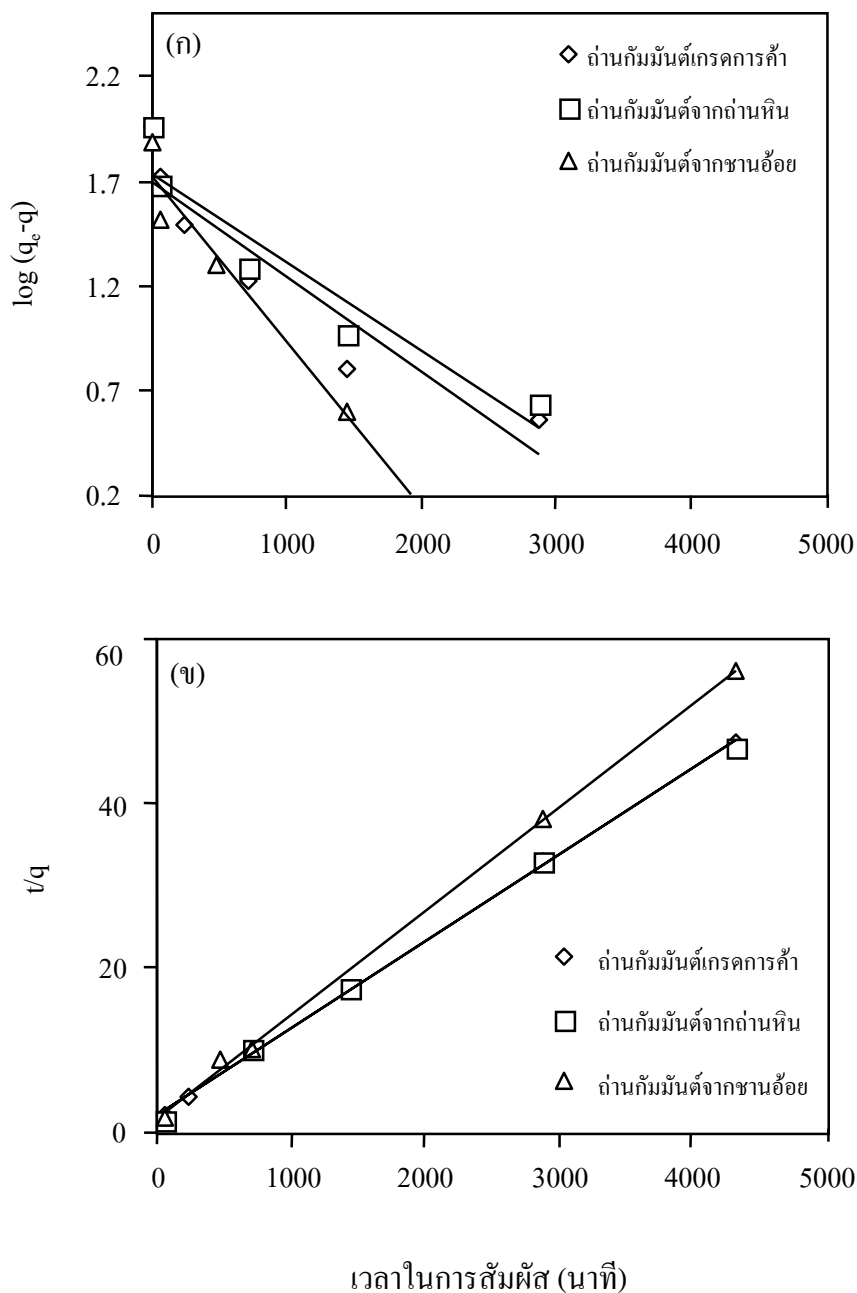
k_1 = ค่าคงที่การดูดซับ (1/นาทีก)

จากสมการ 4.4 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q)$ กับเวลา เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง (รูปที่ 4.22 ก) ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับได้จากความชันของกราฟ ตัวอย่างผลการคำนวณค่าคงที่การดูดซับโครเมียมโดยถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดดังแสดงในตารางที่ 4.10

เมื่อพิจารณาให้ปฏิกิริยาของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง สมการอนุพันธ์อันดับสองของปฏิกิริยาการดูดซับแสดงในสมการที่ 4.5

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (4.5)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 4.5 จาก $t=0$ ถึง $t>0$ และ $q=0$ ถึง $q>0$ และจัดรูปสมการใหม่ทำให้ได้สมการที่ 4.6



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\log(q_c - q)$ กับเวลาในการสัมผัส และ (ข) t/q กับเวลาในการสัมผัสระหว่างโครเมียมกับถ่านกัมมันต์ (ความเป็นกรดต่างของสารละลาย 2.5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ ขณะดูดซับ 30°C น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e} \quad (4.6)$$

จากสมการ 4.6 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q กับเวลาเส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง (รูปที่ 4.22 ข) ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับได้จากความชันของกราฟ ซึ่งจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ได้ค่าคงที่การดูดซับของการดูดซับโครเมียมในสารละลายโดยถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาของการดูดซับโครเมียมในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์⁽¹⁾

ถ่านกัมมันต์	k_1 (min^{-1})	r^2	k_2 (g/mg min)	r^2
ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน	0.9×10^{-3}	0.8998	6.8×10^{-5}	0.9984
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า	1.2×10^{-3}	0.8713	7.8×10^{-5}	0.9994
ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย	1.8×10^{-3}	0.9376	11×10^{-5}	0.9993

หมายเหตุ ⁽¹⁾ หมายถึง ความเป็นกรดต่างของสารละลาย 2.5 อุณหภูมิ 30°C ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 0.2000 กรัม และปริมาตรสารละลาย 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากผลการคำนวณค่าคงที่การดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์พบว่าจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง แสดงว่าอัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) โครเมียมบนถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านกัมมันต์และปริมาณโครเมียมในสารละลาย โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากชานอ้อยมีอัตราการดูดซับ เร็วกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้าและถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิด พบว่าถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากมีอัตราการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้าและถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

5.1.1 ถ่านหินลิกไนต์สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มีค่าสูงสุด $1550 \text{ m}^2/\text{g}$ ได้แก่ สภาวะอัตราส่วนโดยน้ำหนักสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1.5 : 1.0 อุณหภูมิ 600°C และเวลา 60 นาที

5.1.2 การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้นทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ลดลง เมื่ออุณหภูมิของการกระตุ้นสูงถึง 600°C การเพิ่มเวลาของการกระตุ้นไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิตที่ได้

5.1.3 การเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาของการกระตุ้นทำให้ร้อยละสารระเหยของถ่านกัมมันต์ลดลง ทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ในส่วนของการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ พบว่าไม่มีผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์

5.1.4 การเพิ่มปริมาณสารกระตุ้น ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาณธาตุพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น

5.1.5 การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 500°C ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาณธาตุพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500°C การเพิ่มอุณหภูมิทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาณธาตุพรุนมีแนวโน้มคงที่เมื่ออัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบน้อยกว่า 1.0 : 1.0 แต่เมื่ออัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ หรือสูงกว่า 1.0 : 1.0 การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า 500°C ทำให้สมบัติทั้งสามดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.1.6 การเพิ่มเวลาของการกระตุ้นทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาณธาตุพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น เมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิของการกระตุ้นต่ำกว่า 500°C จากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นทำให้ พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาณธาตุพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง

5.1.7 ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านหินลิกไนต์โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เป็นถ่าน

กัมมันต์ที่มีรูพรุนภายในส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก การเพิ่มอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลาของการกระตุ้นทำให้ปริมาณรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น

5.1.8 ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ต่างแหล่งกันมีสมบัติต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์บ้านปุมีปริมาณรูพรุนขนาดกลางในโครงสร้างสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ

5.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

5.2.1 ขานอ้อยสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกได้ โดยสภาพที่เหมาะสมที่ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มีค่าสูงสุด $1574 \text{ m}^2/\text{g}$ ได้แก่ สภาพอัตราส่วนโดยน้ำหนักสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 อุณหภูมิ 400°C และเวลา 120 นาที

5.2.2 การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้นทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยลดลง สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ พบว่าไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลผลิต

5.2.3 การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้นทำให้ร้อยละสารระเหยของถ่านกัมมันต์ลดลง แต่ร้อยละคาร์บอนคงตัวและเถ้าเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบพบว่ามีผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์

5.2.4 ที่สภาพอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบต่ำกว่า 1.5 : 1.0 การเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น และมีมากที่สุดที่ช่วงอุณหภูมิ $400\text{-}500^\circ\text{C}$ จากนั้นสมบัติดังกล่าวมีค่าลดลง เนื่องจากการกระตุ้นที่สภาพอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบต่ำๆ โดยใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานทำให้โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์หดตัว ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบสูง

5.2.5 ที่สภาพอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ 1.0 : 1.0 การกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400°C และใช้นาน ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400°C การเพิ่มเวลาของการกระตุ้นทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการดูดซับไอโอดีน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง

5.2.6 ที่สภาพอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบต่ำ ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ และที่สภาพอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบสูง ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยมีรูพรุนภายในส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง

5.2.7 ระยะเวลาในการแช่วัตถุดิบในสารละลายของตัวกระตุ้น ไม่มีผลต่อสมบัติทางพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

5.2.8 ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์

5.3 การดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์

5.3.1 ถ่านกัมมันต์ทั้งสามชนิดดูดซับ โครเมียม ได้ดีที่สุดในค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย เท่ากับ 2.5

5.3.2 ระยะเวลาเข้าถึงสมดุลของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย

5.3.3 การเพิ่มอุณหภูมิขณะดูดซับทำให้ความสามารถในการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับโครเมียมเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

5.3.4 การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทำให้ปริมาณการดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์สูงขึ้น

5.3.5 สมการ Langmuir เป็นสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยถ่านกัมมันต์ได้ดี ซึ่งให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียมบนถ่านกัมมันต์เป็นแบบดูดซับชั้นเดียว

5.3.6 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าจลนศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งให้เห็นว่า อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวดูดซับและประมาณโครเมียมในสารละลาย ค่าคงที่อัตราการดูดซับโครเมียม (VI) บนถ่านกัมมันต์ของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (กะลามะพร้าว) ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยเท่ากับ 7.8×10^{-5} 6.8×10^{-5} และ 11×10^{-5} g/mg min ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2543). การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุชีวมวล [ออนไลน์].
ได้จาก: http://www.dedp.go.th/renew/bio_p.htm
- กรมศุลกากร. (2545). สถิติการนำเข้าส่งออก [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.oie.go.th/industrystatus_th.asp
- กองเชื้อเพลิงพลังงานธรรมชาติ กระทรวงพลังงาน. (2545). ข้อมูลพลังงาน [ออนไลน์]. ได้จาก :
<http://www.dmf.go.th/resources/coal/from.asp>
- เกริกชัย สุกาญจน์จที. (2539). ไอ้ น้ำ และพลังงานจากถ่านหิน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. (2537). การควบคุมดูแลและบำบัดน้ำเสีย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สารกัมมันต์ [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.sc.chula.ac.th/ASCON2002>
- บุญชัย ตระกูลมหัย. (2537). การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเสริฐ ชูมนุม และคณะ. เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน. บริษัทแคนดิดมีเดีย จำกัด.
- วัชรวิ ชาติกิตติวงศ์. (2542). การควบคุมมลพิษในสิ่งแวดล้อม **Environmental Pollution Control** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- พิมล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. (2539). เคมีสถานะสิ่งแวดล้อม **Environmental Chemistry** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: โอ. เอส. พรินติ้ง เฮ้าส์.
- พิมพิมล สิงขรวงศ์. (2537). การผลิตถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทวิวงศ์ ศรีบุรี. (2541). **Environmental Impact Assessment EIA** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: มายด์ พับลิชชิ่ง.
- สุกรานต์ โรจน์ไพรวงศ์. (2542). **สถานการณ์สิ่งแวดล้อมไทย 2540-41** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: มายด์ พับลิชชิ่ง.

- สุธีลา ตูลยะเสถียร โกศล วงศ์สุวรรณค์ และสถิต วงศ์สุวรรณค์. (2544). **มลพิษสิ่งแวดล้อม (ปัญหาสังคมไทย)** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: รวมสาส์น (1977).
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. (2540). **วารสารน้ำตาล**. 33. 12.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. (2541). การใช้ประโยชน์ของกากอ้อย. **วารสารน้ำตาล**. 34. 5.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. (2541). **วารสารน้ำตาล**. 34. 6.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. (2541). **วารสารน้ำตาล**. 34. 7.
- สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม โรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. **ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยขบวนการทางเคมี** [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.thaienvironment.net>
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2532). **ถ่านกัมมันต์**. อัสวิทย์ ปัทมะเวณ. (2539). **ตามรอยน้ำตาล**. กรุงเทพมหานคร. ที. พี. ปริ้นท์.
- Ahmadpour, A., King, A. and Do, D. (1998). Comparison of Equilibria and Kinetics of High Surface Area Activated Carbon Produced from Different Precursors and by Different Chemical Treatments. **Ind. Eng. Chem. Res.** 37. 1329-1334.
- Ahmadpour, A. and Do, D. (1997). The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical activation. **Carbon**. 35. 1723-1732.
- Annual Book of ASTM Standards. (1998). **Standard Test Methods for Chromium in Water D1687-92**. 11. 01. United State of America.
- Annual Book of ASTM Standards. (1998). **Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon D2866-94**. 15. 01. 707-708. United State of America.
- Annual Book of ASTM Standards. (1998). **Standard Test Method for Moisture in Activated Carbon D2867-95**. 15. 01. 709-711. United State of America.
- Annual Book of ASTM Standards. (1998). **Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon D4607-94**. 15. 01. 755-759. United State of America.
- Annual Book of ASTM Standards. (1998). **Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples D5832-95**. 15. 01. 782. United State of America.
- Bansal, Donnet and Stoecki. (1988). **Active Carbon**. New York: Marcel Dekker Inc.
- 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.

- Chemvironcarbon. **Activated carbon** [Online]. Available: http://www.chemvironcarbon.com/carbon_definition/whatis.htm
- Cimino, G., Passerini, A. and Toscano, G. (2000). Removal of toxic cations and Cr (VI) from aqueous solution by hazelnut shell. **Water Res.** 34. 2955-2962.
- Duong, D.Do. (1998). **Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics**. London: Imperial College Press.
- Girgis, S. and El-Hendawy, A. (2002). Porosity development in activated carbons obtained from date pits under chemical activation with phosphoric acid. **Microporous and Mesoporous Materials.** 52. 105-117.
- Girgis, S., Khalil, B. and Tawfik, A.M. (1994). Activated carbon from sugar cane bagasse by carbonization in the presence of inorganic acid. **J. Chem.Tech. Biotechnol.** 61. 87-92.
- Girgis, S., Yunis, S. and Soliman, M. (2002). Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation. **Materials Letters.** 57. 164-172.
- Gonzalez-Serrano, E., Cordero, T., Rodriguez-Mirasol, J. and Rodriguez, J.J. (1997). Development of Porosity upon Chemical Activation of Kraft Lignin with ZnCl₂. **Ind. Eng.Chem. Res.** 36. 4832-4838.
- Hamadi, K., Chen, X.D., Farid, M. and Lu, G.Q. (2000). Adsorption kinetics for the removal of chromium (VI) from aqueous solution by adsorbents derived from used tyres and sawdust. **Chemical Engineering Journal.** 84. 95-105.
- Hsieh and Teng. (2000). Influence of mesopore volume and adsorbate size on adsorption capacities of activated carbons in aqueous solutions. **Carbon.** 38. 863-869.
- Jagtoven, M. and Derbyshire, F. (1998). Activated carbons from yellows poplar and white oak by H₃PO₄ activation. **Carbon.** 36. 1085-1097.
- Johns, M., Marshall, E. and Toles, A. (1998). Agricultural By-Products as Granular Activated Carbons for Adsorbing Dissolved Metals and Organics. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** 71. 131-140.
- Khalili, R., Campbell, M., Sandi, G. and Golas', J. (2000). Production of micro-and mesoporous activated carbon from paper mill sludge I. Effect of zinc chloride activation. **Carbon.** 38. 1905-1915.

- Mozammel, M., Masahiro, O. and Bhattacharya, SC. (2002). Activated charcoal from coconut shell using $ZnCl_2$ activation. **Biomass and Bioenergy**. 22. 397-400.
- Mtsglobal. **Forms of Carbon** [On-line]. Available: <http://www.mtsglobal.com/Carbon/carbonforms.htm>
- Othmer, K. (1995). **Encyclopedia of Chemical Technology**. Vol. 6. 437. John Willey and Sons.
- Othmer, K. (1995). **Encyclopedia of Chemical Technology**. Vol. 6. 1099. John Willey and Son.
- Otawa, T., Tanibata, R. and Itoh, M. (1993). Production and adsorption characteristics of MAXSORB: high-surface area active carbon. **Gas Separation & Purification**. 7. 241-245.
- Park and Jang. (2002). Pore structure and surface properties of chemically modified activated carbons for adsorption mechanism and rate of Cr (VI). **Journal of Colloid and Interface Science**. 249. 458-463.
- Patrick. (1995). **Porosity in Carbons: Characterization and Applications**. London: Edward Arnold.
- Pendyal, B., Johns, M.M., Marshall, W.E., Ahmedna, M. and Rao, R.M. (1999). The effect of binder and agricultural by-products on physical and chemical properties of granular activated carbon. **Bioresource Technology**. 68. 247-254.
- Noyes, R. (1991). **Handbook of Pollution Process**. United States of America: Noyes Publications. 287.
- Quantachrome. **Physisorption** [On-line]. Available: <http://www.quantachrome.com/physisorption.htm>
- Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K. (1999). **Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications**. LONDON: Academic Press.
- Selomulya, C., Meeyoo, V. and Amal, R. (1999). Mechanisms of Cr (VI) removal from water by various types of activated carbons. **J. Chem.Tech. Biotechnol.** 74. 111-122.
- Selvi, K., Pattabhi, S. and Kadirvelu, K. (2001). Removal of Cr (VI) from aqueous solution by adsorption onto activated carbon. **Bioresource Technology**. 80. 87-89.
- Singh, K. and Tiwari, N. (1997). Removal and Recovery of Chromium (VI) from Industrial Waste Water. **J. Chem. Tech. Biotechnol.** 69. 376-382.
- Teng and Yeh. (1998). Preparation of activated carbons from bituminous coals with zinc chloride activation. **Ind. Eng. Chem. Res.** 37. 58-65.
- Toles, A., Marshall, E. and Johns, M. (1998). Phosphoric Acid Activation of Nutshells for Metals and Organic Remediation: Process Optimization. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** 72. 255-263.

- Townshend. (1995). **Encyclopedia of Analytical Science**. Vol. 2. LONDON: Academic Press.
- Tsai, W.T., Chang, C.Y., Lin, M.C., Chien, S.F., Sun, H.F. and Hsieh, M.F. (2001). Adsorption of acid dye onto activated carbons prepared from agricultural waste bagasse by $ZnCl_2$ activation. **Chemosphere**. 45. 51-58.
- Unnithan, R. and Anirudhan, T.S. (2001) The kinetics and thermodynamic of sorption of chromium (IV) onto the Iron (III) complex of a carboxylated polyacrylamide-grafted sawdusts. **Ind. Eng. Chem. Res.** 40. 2698-2701.

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ด้วยมาตรฐานการวิเคราะห์ ASTM

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture)

วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นในสารตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3173 มีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

- 1.1.1 อุ่นเตาเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 150°C
- 1.1.2 อบด้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปลดยthingไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 1.1.3 ชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัมใส่ในถ้วยกระเบื้อง
- 1.1.4 อบสารตัวอย่างจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณความชื้นในสารตัวอย่างโดย

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad (\text{ก-1})$$

1.2 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash)

วิเคราะห์หาปริมาณเถ้าในสารตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 มีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

- 1.2.1 เผาด้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงปลดยthingไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 1.2.2 ชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัมใส่ในถ้วยกระเบื้องหรือใช้สารตัวอย่างที่ผ่านการหาความชื้นแล้ว
- 1.2.3 เผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 650°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (เปิดฝาด้วยกระเบื้องขณะเผา) คำนวณปริมาณเถ้าในสารตัวอย่างโดย

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักสารตัวอย่างหลังเผา} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad (\text{ก-2})$$

1.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)

วิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยในสารตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3175 มีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

- 1.3.1 เผาด้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงปลดยthingไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 1.3.2 ชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัมใส่ในถ้วยกระเบื้องหรือใช้สารตัวอย่าง

ที่ผ่านการหาปริมาณความชื้นแล้ว

1.3.3 เผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 7 นาที (ขณะเผาให้ปิดฝาถ้วย กระเบื้อง) แล้วนำออกจากเตาเผาทันที ตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาทีแล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

1.3.4 บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ทำซ้ำกระทั่งสารตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่

1.3.5 คำนวณปริมาณสารระเหยในตัวอย่าง

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \quad (\text{ก-3})$$

1.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ปริมาณคาร์บอนคงตัวในสารตัวอย่างคำนวณจาก

ปริมาณคาร์บอนคงตัว = 100 - ร้อยละความชื้น - ร้อยละเถ้า - ร้อยละสารระเหย

2. วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ตามวิธี ASTM D 4607-86 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังนี้

2.1 สารเคมีที่ใช้ และวิธีการเตรียม

2.1.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร

เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนักปริมาตร 70 ลูกบาศก์เซนติเมตรในน้ำกลั่นปริมาตร 550 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2.1.2 สารละลายไอโอดีน (I₂) เข้มข้น 0.1000 นอร์มอล

ชั่งไอโอดีน 12.7000 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 19.1000 กรัม ผสมให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง เติมน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อยแล้วกวนให้เข้ากันจากนั้นค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไปกวนตลอดเวลาจนได้ปริมาตร 75±25 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลายหมด แล้วนำไปเจือจางให้มีปริมาตร 1 ลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา

2.1.3 สารละลายโซเดียมไรโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃·5H₂O) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล

ชั่งโซเดียมไรโอซัลเฟต 24.8200 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่เดือดใหม่ ๆ ปริมาตร 75±25 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้ละลาย แล้วเติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.12 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัว

ของโซเดียมโซโครัลเฟต เนื่องจากแบคทีเรีย แล้วเจือจางให้มีปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เก็บไว้ในขวดสีชาเป็นเวลาอย่างน้อย 4 วันก่อนนำมาใช้

2.1.4 สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล

อบแห้งโพแทสเซียมไอโอเดตให้ได้น้ำหนัก 3.5667 กรัม ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นก่อนนำไปละลายในน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดที่มีฝาปิดมิดชิด

2.1.5 สารละลายน้ำแป้ง

ชั่งแป้งหนัก 0.1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต้มจนได้สารละลายใสและกวนตลอดเวลา (น้ำแป้งควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำาทดลอง)

2.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

2.2.1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโซโครัลเฟต

เปิดสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาตร 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0000 ± 0.0001 กรัม ลงไปเขย่าให้ละลาย เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต

$$N_1 = (P_1 \times R)/S \quad (\text{ก-4})$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโซโครัลเฟต
 P_1 = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต
 R = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต
 S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมโซโครัลเฟต

2.2.2 ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

เปิดสารละลายไอโอดีนปริมาตร 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมโซโครัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจนได้สารละลายที่มีสีเหลืองอ่อน หยดสารละลายน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนโดย

$$N_2 = (S \times N_1)/I \quad (\text{ก-5})$$

เมื่อ N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน
 S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมโซโครัลเฟต
 N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโซโครัลเฟต

I = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน

2.3 วิธีวิเคราะห์

- 2.3.1 บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 325 เมช
- 2.3.2 อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 2.3.3 ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีฝาปิด (ชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง 3 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นของไอโอดีนหลังการดูดซับน้อยกว่า เท่ากับ หรือมากกว่า 0.02 นอร์มอล)
- 2.3.4 เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร แก้วขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟตออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 2.3.5 เติมสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.1000 ± 0.001 นอร์มอล 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปิดฝาเขย่าแรงๆ 30 วินาที
- 2.3.6 กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรองวัดต์แมน(Whatman) เบอร์ 42
- 2.3.7 บีบอัดสารละลาย 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2.3.8 ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 นอร์มอลจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน หยคน้ำแข็ง 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ ไทเทรตต่อกระทั่งสารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ (S)

- 2.3.9 คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ (C) โดย

$$C = N_1 / (50 \times S) \quad (\text{ก-6})$$

- 2.3.10 คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่าน (X/M) จาก

$$X/M \text{ (mg/g)} = (A - [DF \times B \times S]) / M \quad (\text{ก-7})$$

เมื่อ $A = 12693N_2$

$$B = 126.93N_1$$

$$DF = 2.2$$

2.3.11 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่านกับ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับจะได้กราฟเป็นเส้นตรง

2.3.12 คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ตรงตำแหน่งที่ค่า ความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนที่เหลือเท่ากับ 0.02 นอร์มอล

3. การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมในสารละลาย

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับโครเมียม ตามวิธี ASTM D1687-92 มีรายละเอียดของ การวิเคราะห์ดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ และวิธีการเตรียม

3.1.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution) ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 0.2828 กรัมด้วยน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น (ควรรอบโพแทสเซียมไดโครเมตที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง)

3.1.2 สารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์อินดิเคเตอร์ (Diphenylcarbazide indicator solution)

ละลาย 1,5-ไดฟีนิลคาร์โบไฮไดรไซด์ (1,5-Diphenylcarbohydrazide) ด้วยอะซิโตน 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ควรเก็บสารละลายในขวดสีชาที่มีฝาปิดที่อุณหภูมิ 4°C สารละลายที่เตรียม ได้จะหมดอายุใน 7 วัน และควรเตรียมสารละลายใหม่เมื่อสารละลายเปลี่ยนสี

3.1.3 สารละลาย 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-Hydroxyquinoline solution) ละลาย 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน 50 กรัม ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 37 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ความร้อนตลอดเวลากระทั่ง 8-ไฮดรอกซีควิโนลีนละลายหมด ถ่ายสารละลาย ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.1.4 สารละลายกรดฟอสฟอริก (1+1) เจือจางกรดฟอสฟอริกความถ่วงจำเพาะ 1.69 ปริมาตร 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ ได้ปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตรด้วยน้ำกลั่น

3.1.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 40 มิลลิกรัมด้วยน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจาก นั้นเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร

3.1.6 สารละลายกรดไนตริก (1+499) เจือจางกรดไนตริกความถ่วงจำเพาะ 1.42 ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรในน้ำกลั่น 499 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.7 สารละลายกรดฟอสฟอริก (1+19)

เจือจางกรดฟอสฟอริกความถ่วงจำเพาะ 1.69 ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรในน้ำกลั่น 19 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.8 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความถ่วงจำเพาะ 1.19)

3.2 วิธีวิเคราะห์

3.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมด

วิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมดในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer ใช้ความยาวคลื่น 357.9 นาโนเมตร โดยใช้ก๊าซอะเซทิลีนเป็นเชื้อเพลิงและใช้อากาศเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidant)

3.2.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เจือจางสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 100 มิลลิกรัมต่อลิตรให้มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 5 ความเข้มข้นด้วยสารละลายกรดไนตริก (1+499) โดยต้องเติมสารละลาย 8-ไฮดรอกซีควิโนลีนจำนวน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจำนวน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร (สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำกรวิเคราะห์)

3.2.1.2 การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

ก. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรในสารละลายตัวอย่าง 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่บรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ข. ต้มสารละลายตัวอย่างข้างต้นด้วยไฟอ่อนๆ กระทั่งสารละลายตัวอย่างมีปริมาตรระหว่าง 15 ถึง 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร (โดยขณะทำการต้มต้องแน่ใจว่าสารละลายตัวอย่างไม่เดือด) ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ค. กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองวัตต์แมนเบอร์ 42

ง. ปรับปริมาตรสารละลายตัวอย่างเป็น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยกรดไนตริก (1+499)

จ. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรใส่ลงในหลอดทดลองจากนั้นเติมสารละลาย 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน จำนวน 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

3.2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (VI)

3.2.2.1 การเตรียมเส้นกราฟมาตรฐาน

ก. เตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยการเจือจางสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจำนวน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

ข. เตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยเจือจางสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ได้ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ค. ปิเปตสารละลายมาตรฐานข้างต้นจำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำตามข้อ 3.2.1.3 ข. ถึง ง.

ง. วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรเขียนเส้นกราฟมาตรฐาน โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกับความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.2.2 การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

ก. กรองสารละลายตัวอย่างด้วยเยื่อผ่านขนาด 0.45 ไมโครเมตร ปรับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายให้ได้ค่าระหว่าง 8 ถึง 8.5

ข. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือใช้สารละลายเพียงเล็กน้อยแล้วปรับปริมาตรเป็น 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรด้วยน้ำกลั่น (ควรวัดค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายถ้ามีค่าต่ำกว่า 8 ถึง 8.5 ควรปรับให้ได้ค่าดังกล่าว)

ค. เติมสารละลายไดฟิโนลคาร์บาไฮดริลอินดิเคเตอร์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร แก้ว เพื่อให้สารผสมกันดี

ง. เติมสารละลายกรดฟอสฟอริก (1+1) จำนวน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร แก้วให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 15 นาทีเพื่อให้เกิดสีสมบูรณ์ แต่ไม่ควรเกิน 30 นาทีหลังจากเติมไดฟิโนลคาร์บาไฮดริลอินดิเคเตอร์

จ. วัดค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร

ฉ. คำนวณปริมาณโครเมียม (VI) ในสารละลายตัวอย่างโดยใช้เส้นกราฟมาตรฐาน

ช. คำนวณปริมาณเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดย

$$\text{Cr}^{+6} \text{ (mg/L)} = (W_s - W_p) \times 50/S \quad (\text{ก-8})$$

เมื่อ

W_s = ความเข้มข้นของโครเมียมที่พบในตัวอย่าง (mg/L)

W_b = ความเข้มข้นของโครเมียมที่พบแบลนด์ (mg/L)

S = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (mL)

ภาคผนวก ข

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525) ออกตามความ

ในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512

เรื่อง หน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512

เรื่อง หน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 39 (6) แห่งพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม ออกประกาศกำหนดหลักเกณฑ์และวิธีการที่ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานทุกประเภทหรือชนิดที่มีหน้าที่กระทำการเกี่ยวกับการระบายน้ำทิ้งดังต่อไปนี้

ให้ยกเลิกความในข้อ 22 แห่งประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2513) ลงวันที่ 24 กรกฎาคม 2513 และให้ใช้ความต่อไปนี้แทน

ข้อ 22 ห้ามมิให้ระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน เว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง แต่ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution) โดยให้น้ำทิ้งมีลักษณะดังต่อไปนี้

- (1) ค่าของความเป็นกรดด่าง (pH value) ระหว่าง 5 ถึง 9
- (2) ค่าของเปอร์มันганต (Permanganate value) ไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (3) สารที่ละลายได้ (Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

3.1 สารที่ละลายได้ (Dissolved Solids) ต้องไม่มากกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ภูมิประเทศหรือลักษณะการระบายตามพนักงานเจ้าหน้าที่เห็นสมควร แต่ต้องไม่มากกว่า 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 น้ำทิ้งซึ่งจะระบายออกจากโรงงานสู่แหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่าสารที่ละลายได้ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าสารละลายได้ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือทะเลได้ไม่เกิน 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร

- (4) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (HS) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (5) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (6) โลหะหนักมีค่าดังนี้

- 6.1 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.2 โครเมียม (Chromium) ไม่มากกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.3 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.4 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.5 ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

- 6.6 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.7 แบเรียม (Barium) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.8 เซเลเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.9 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.10 นิกเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 6.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (7) น้ำมันทาร์ (Tar) ไม่มีเลย
- (8) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้น โรงงานกลั่นน้ำมัน และ โรงงานประกอบกิจการผสมน้ำมันหล่อลื่น จาระบี ตามประเภทหรือชนิดโรงงานลำดับ 49 50 (4) แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2512) ให้มีน้ำมันไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (9) ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (10) ฟีนอลและหรือครีโซลส์ (Phenol & Cresols) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (11) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกรัม
- (12) ยาฆ่าแมลง (Insecticide) สารกัมมันตรังสีไม่มีเลย
- (13) ถ้าอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำทิ้งกับน้ำในลำน้ำสาธารณะอยู่ระหว่าง 1 ต่อ 8 ถึง 1 ต่อ 150 สารที่ลอยเจือปนอยู่ต้องไม่มากกว่า 30 ส่วนใน 1,000,000 ส่วน ถ้าอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำทิ้งกับน้ำในลำน้ำสาธารณะอยู่ระหว่าง 1 ต่อ 151 ถึง 1 ต่อ 300 สารที่ลอยเจือปนอยู่ต้องไม่มากกว่า 60 ส่วนใน 1,000,000 ส่วน ถ้าอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำทิ้งกับน้ำในลำน้ำสาธารณะอยู่ระหว่าง 1 ต่อ 301 ถึง 1 ต่อ 500 สารที่ลอยเจือปนอยู่ต้องไม่มากกว่า 150 ส่วนใน 1,000,000 ส่วน
- (14) ค่าของ บีโอดี (BOD) (5 วันที่อุณหภูมิ 20°C) ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ อาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ภูมิประเทศ หรือลักษณะการระบายตามที่พนักงานเจ้าหน้าที่เห็นสมควร แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร (บีโอดี หรือ BOD ย่อมาจาก Biochemical Oxygen Demand) ยกเว้นเฉพาะโรงงานประเภทหรือชนิดดังต่อไปนี้
- 14.1 โรงงานประกอบกิจการทำอาหารจากสัตว์น้ำ และบรรจุในภาชนะที่ผนึกและอากาศเข้าไม่ได้ ตามประเภทหรือชนิดโรงงานลำดับที่ 7 (1) แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2512) ต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2526 เป็นต้นไป ต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 14.2 โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ตามประเภทหรือชนิดโรงงานลำดับที่ 9 (3) แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2512) ซึ่งมีกรรมวิธีผลิตดังนี้
- 14.2.1 เหยียงแยกแป้งแล้วทำให้แห้งด้วยลมร้อน ต้องมีค่า บีโอดีไม่มากกว่า 100

มิลลิกรัมต่อลิตร และนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2526 เป็นต้นไปต้องมีค่า บีโอดี ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ได้ แล้วแต่ภูมิประเทศหรือลักษณะการระบาย ตามที่พนักงานเจ้าหน้าที่เห็นสมควร แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

14.2.2 แยกแป้งด้วยการตกตะกอนแล้วทำให้แห้งบนพื้นอังไฟต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2526 เป็นต้นไป ต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

14.2.3 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับทำผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งเป็นเส้นหรือขึ้นตามประเภทหรือชนิดโรงงาน ลำดับที่ 10 (3) แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2512) ชนิดทำก๋วยเตี๋ยว ขนมหิน และเส้นหมี่ที่ใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบไม่เกิน 500 กิโลกรัมต่อวัน ต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2526 เป็นต้นไปต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

14.2.4 โรงงานหมัก ฟอก หนังสัตว์ ตามประเภทหรือชนิดโรงงาน ลำดับที่ 29 แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2512) ที่ใช้หนังสัตว์สดเป็นวัตถุดิบต้องมีค่า บีโอดี ไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2526 เป็นต้นไป ต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

14.2.5 โรงงานผลิตเชื้อกระดาษจากไม้ ฐานอ้อย หญ้า เศษผ้า ฯลฯ ตามประเภทหรือชนิดโรงงาน ลำดับที่ 38 (1) แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2512) ต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

14.2.6 โรงงานห้องเย็น ตามประเภทหรือชนิดโรงงาน ลำดับที่ 92 แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2512) ชนิดที่มีการแกะล้างแช่แข็งสัตว์น้ำ ต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2526 เป็นต้นไปต้องมีค่า บีโอดี (BOD) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

คุณภาพน้ำที่รวมกันตามหลักเกณฑ์ที่สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกำหนดด้วยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ และให้ใช้มาตรฐานคุณภาพน้ำที่ตามเกณฑ์ที่คำนวณได้

ข้อ 12 การตรวจสอบมาตรฐานคุณภาพน้ำที่ตามเกณฑ์ที่คำนวณได้ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน ว่าด้วยการกำหนดวิธีการตรวจคุณภาพน้ำที่จากอาคาร

จึงประกาศให้ทราบกันทั่วไป

ประกาศ ณ วันที่ 2 พฤษภาคม 2537

เสถียร วงศ์วิเชียร

อธิบดีกรมเจ้าท่า

ภาคผนวก ค

โต๊ะหน้า และโครเมียม

โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึงธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 23-92 และอยู่ในคาบตั้งแต่ 4-7 ในตารางธาตุ (Periodic Table) และปรากฏมีค่าความถ่วงจำเพาะที่มากกว่าตั้งแต่ 5 ปึขึ้นไป ในสภาพปกติโลหะหนักมักจะเป็นผลึกบริสุทธิ์ แสดงความเป็นพิษออกมาเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าโลหะหนักหรือสารประกอบบางตัว ปรากฏอยู่ในรูปของความดันไอสูงนั้นจะเป็นอันตรายค่อนข้างมากต่อมนุษย์ เช่น เมธอล ปรอท สำหรับโลหะหนักนั้น มีอยู่ด้วยกันทั้งสิ้น 68 ธาตุ ตัวอย่างเช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม สังกะสี ทองแดง นิกเกิล โครเมียม เหล็ก แมงกานีส โคบอล ฯลฯ ชนิดของโลหะหนักที่มีบทบาทต่อการเกิดมลภาวะในสิ่งแวดล้อมมากที่สุดมีอยู่ด้วยกัน 3 ธาตุ คือ ปรอท ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งถ้าพบมากเกินไปจนขีดจำกัดแล้ว ย่อมจะทำให้เกิดพิษภัยขึ้นมาต่อร่างกายได้ โดยเฉพาะสารปรอทนั้น ถ้ามีการสะสมเป็นจำนวนมากแล้ว จะก่อให้เกิดโรคร้ายประเภทหนึ่งที่เรียกว่า มินามาตะ (ประสบการณ์ของการเกิดโรคดังกล่าวเคยพบกับคนในประเทศญี่ปุ่นมาก่อน)

ส่วนลักษณะของการเป็นพิษนั้น สารโลหะหนักมักสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร และในขบวนการทางชีวภาพ เมื่อมนุษย์บริโภคเข้าไปโดยตรง ได้สัมผัสหรือจากผลโดยทางอ้อมเช่น บริโภคพืชผักผลไม้และเนื้อสัตว์ ก็อาจทำให้เกิดอันตรายอย่างร้ายแรงได้ แต่อย่างไรก็ตามในระบบของห่วงโซ่อาหารนั้น พิษของโลหะหนักมักสะสมเพิ่มมากขึ้นตลอดระยะเวลา กล่าวคือจากแหล่งน้ำที่มีโลหะหนักปะปนอยู่แล้ว อาจเคลื่อนย้ายต่อเข้าสู่พื้นดิน พืช สัตว์ และมนุษย์ที่บริโภคในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งก็จะได้รับเพิ่มมากขึ้นกว่าในตัวพืชหรือสัตว์ ทั้งนี้มาจากสาเหตุเพราะเป็นการสะสมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างต่อเนื่องเป็นสำคัญ

ในสภาพธรรมชาติ สารโลหะหนักมักปะปนอยู่เสมอภายในน้ำ เพราะเกิดขึ้นมาจากการสลายตัวของหินและแร่ ซึ่งมีโลหะหนักเหล่านี้ปรากฏอยู่เป็นองค์ประกอบร่วมด้วย แต่ส่วนใหญ่อาจเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก โดยไม่มีอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ สัตว์ แต่ถ้าเมื่อใดปรากฏการรบกวนจากอิทธิพลของมนุษย์ ก็อาจทำให้สารโลหะหนักกลับสะสมเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นได้ในช่วงระยะเวลาที่รวดเร็ว นอกจากนี้เป็นที่น่าวิตกในสภาพปัจจุบันที่ว่า พบปริมาณของสารโลหะหนักสะสมอยู่ในระดับที่สูงมากกว่า 5.0 ppb ในแม่น้ำเจ้าพระยา ทำจีน แม่กลอง และปราณบุรี ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วในสถานที่ห่างไกลจากเขตชุมชน จะมีปริมาณที่น้อยกว่า 0.5 ppb อนึ่งปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในตะกอนนั้น จะมีค่ามากกว่าที่พบในน้ำเสมอ เพราะอนุภาคตะกอนส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบ ส่วนโลหะหนักจะมีค่ามากกว่าที่พบในน้ำเสมอ เพราะอนุภาคตะกอนส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบ ส่วนโลหะหนักจะมีประจุเป็นบวก เพราะฉะนั้นจึงมีความสามารถในการเข้าไปถูกแทนที่และเกาะยึดตัวไว้ได้เป็นอย่างดีบนผิวหน้าของตะกอน

โครเมียม (Cr)

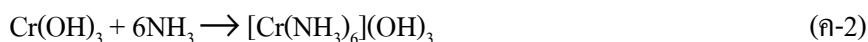
โครเมียมเป็นโลหะซึ่งมีผลึกสีขาวและเนื้อไม่อ่อนนั้ก โลหะนี้ละลายในกรด HCl จะให้ไฮโครเจนออกมา และถ้าไม่ให้ออกอากาศจะได้สีฟ้าของโครมัสคลอไรด์ CrCl_2 แต่ถ้าออกอากาศจะได้โครมิกคลอไรด์ CrCl_3 โลหะโครเมียมทำปฏิกิริยากับซัลฟูริกเจือจางได้เช่นเดียวกัน คือถ้าไม่ถูกกับอากาศจะได้โครมัสซัลเฟต CrSO_4 และถ้าถูกกับอากาศจะได้โครมิกซัลเฟต $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ โลหะนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับ กรดซัลฟูริกเข้มข้น กรดไนตริกเจือจาง หรือ กรดไนตริกเข้มข้น จะทำให้โลหะแพชซีฟ (Passive)

ออกไซด์ปรกติของโครเมียมจะเป็น Cr_2O_3 มีสีเขียว เกือบโครมิกต่างๆ ถือว่าได้มาจากออกไซด์นี้ ส่วนเกลือโครมัสซึ่งถือได้ว่าได้จาก CrO นั้นถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศให้เป็นเกลือโครมิกได้ง่าย เกือบโครมัสพบน้อยมากในการทำคุณภาพวิเคราะห์ จึงไม่กล่าวถึงในที่นี้ โครเมียมไตรออกไซด์ CrO_3 เป็นแอซิดิกออกไซด์ซึ่งเป็นผลึกสีแดงและเป็นสาเหตุให้มีสีในสารพวกโครเมต เช่น K_2CrO_4 (หรือ $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{CrO}_3$) และไดโครเมต เช่น $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (หรือ $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{CrO}_3$)

ปฏิกิริยาของโครมิกไอออน (Cr^{3+})

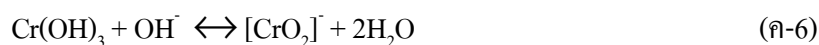
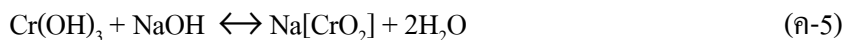
ใช้สารละลายโครมิกคลอไรด์ $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือใช้โครมอลัม $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ (เกลือโครมิกอาจมีสีเขียวหรือสีเขียวหรือสีม่วงในสารละลาย)

1. สารละลายแอมโมเนีย: ได้ตะกอนลักษณะคล้ายวุ้น มีสีเขียวอมเทาหรือฟ้าอมเทาของโครมิกไฮดรอกไซด์ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ตะกอนนี้ละลายได้เล็กน้อยในรีเอเจนต์ที่เย็นและมากพอ ได้สารละลายสีม่วงหรือชมพูของคอมเพล็กซ์โครมแอมมิน (Complex chromeammines) ถ้าต้มสารละลายให้เดือดจะได้ตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ การที่จะให้โครเมียมตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์อย่างสมบูรณ์จะต้องต้มสารละลายให้เดือด และไม่เติม NH_3 ให้มากเกินไป

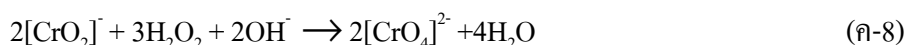
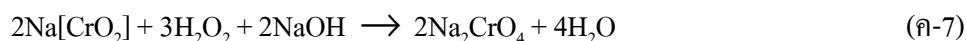


ถ้าในสารละลายมีไอออนต่อไปนี้เป็น: แอซีเตต ทาร์เตรตและซิเตรตอยู่ด้วย จะป้องกันการตกตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์: ได้ตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ซึ่งละลายได้อย่างรวดเร็วในกรดต่างๆ และในรีเอเจนต์ที่เย็นและมากเกินพอ จะได้สารละลายสีเขียวของโซเดียมโครไมต์ $\text{Na}[\text{CrO}_2]$ สารละลายสีเขียวนี้นำไปต้มให้เดือดจะแยกสลายตัว ได้ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ กลับตกตะกอนออกมาอีกครั้งเป็นปริมาณเกือบทั้งหมดของโครเมียมที่มีอยู่



ถ้าเติม H_2O_2 ลงในสารละลายของโซเดียมโครไมต์นี้จะได้สารละลายสีเหลืองของโซเดียมโครเมต ตรวจสอบโดยใช้ปฏิกิริยาของ “กรดเพอร์โครมิก” (Perchromic acid)



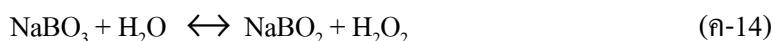
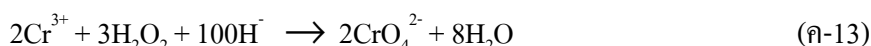
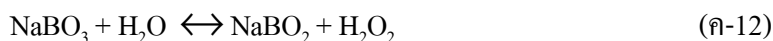
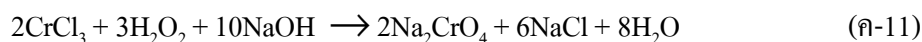
3. สารละลายแอมโมเนียมซัลไฟด์หรือสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต: ได้ตะกอนโครมิกไฮดรอกไซด์ ซึ่งแยกสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำ

4. สารละลายโซเดียมแอสซิเตรต: ไม่เกิดตะกอนแม้ว่าจะต้มสารละลายจนเดือด (ถ้ามีเกลือของเหล็กและ/หรือของอะลูมิเนียมปนอยู่มากพอควร เมื่อต้มให้เดือดบางส่วนของอะลูมิเนียมเหล็ก และโครเมียมจะตกตะกอนออกมาเป็นเบสิกแอสซิเตรต)

5. สารละลายโซเดียมฟอสเฟต: ได้ตะกอนสีเขียวของโครเมียมฟอสเฟต (CrPO_4) ซึ่งละลายในกรดแร่ แต่ไม่ละลายในกรดแอสซิดิกเจือจางเย็น



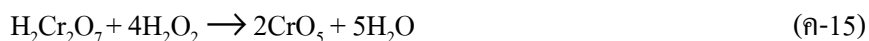
6. การทดสอบโดยการทำออกซิเดชันให้เป็นโครเมต: เมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปลงในสารละลายของเกลือโครมิก แล้วเติม H_2O_2 6% 2-3 cm^3 นำสารละลายผสมไปต้มให้เดือดเป็นเวลา 2-3 นาที จะได้สารละลายสีเหลืองของโครเมต การทำออกซิเดชันอีกวิธีหนึ่งอาจทำได้โดยการเติมโซเดียมเพอร์โบเรต $\text{NaBO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นของแข็งจำนวนเล็กน้อย แล้วนำไปต้มให้เดือดเป็นเวลา 2-3 นาที



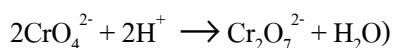
การทดสอบโครเมตทำได้ดังนี้

6.1 เติมเอมิลแอลกอฮอล์ 2-3 cm^3 แล้วทำให้เป็นกรดด้วย H_2SO_4 เจือจาง เติม H_2O_2 ลงไปเล็กน้อย แล้วเขย่า จะได้สีน้ำเงินในชั้นของเอมิลแอลกอฮอล์ และเนื่องจากโครมิกเพอร์

ออกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่เสถียรสีน้ำเงินจึงหายไปอย่างรวดเร็ว โครมิกเพอร์ออกไซด์ที่ได้จากการทดสอบด้วย H_2O_2 นี้ มักเรียกกันจนติดว่า “กรดเพอร์โครมิก” (Perchromic acid)



(อนุมูลโครเมต $[\text{CrO}_4]^{2-}$ นี้เมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกรด จะกลายเป็นอนุมูลไดโครเมต $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{2-}$)



6.2 ทำสารละลายให้เป็นกรดด้วยกรดแอซิดิก แล้วเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ และสารละลายโซเดียมแอซิเตต ได้ตะกอนสีเหลืองของแบเรียมโครเมต (BaCrO_4)

การทดสอบแห้ง

1. โดยวิธีเป่าผ่าน สารประกอบโครเมียมทุกชนิดเมื่อนำมาผสมกับโซเดียมคาร์บอเนตแล้วเผาบนทั้งถ่าน จะได้โครเมียมเซสควิออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีสีเขียวและไม่หลอมเหลว
2. โบแรกซ์บีด จะได้บีดที่มีสีเขียวทั้งในเปลวออกซิไดซ์ซิงและเปลวรีดิวซิง แต่วิธีนี้ไม่ใช่การแสดงลักษณะพิเศษ
3. โดยการหลอมเหลวกับโซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมไนเตรตบนหั่วลวดแพลทินัม จะได้สารสีเหลืองของแอลคาไลโครเมต



ประวัติผู้เขียน

นางสาวณัฐยา พูนสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2521 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2539 ขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาตรีได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี และนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีของน้ำตาลทรายดิบ ภายหลังสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา 2543