

การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์
และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

นางสาวณัฐวิภา จงรัก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM LONGAN SEED BY ACTIVATION WITH
ZINC CHLORIDE AND POTASSIUM HYDROXIDE

Miss Nattavipa Chongrak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
โดย	นางสาวณัฐวิภา จงรัก
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ ไชษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุชาดา บุตรนาค)

ณัฐวิภา จงรัก : การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. (PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM LONGAN SEED BY ACTIVATION WITH ZINC CHLORIDE AND POTASSIUM HYDROXIDE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 131 หน้า.

เมล็ดลำไยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตลำไยอบแห้งในประเทศไทย ได้นำมาศึกษาเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดปัญหาในการกำจัดทิ้งด้วยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาวิธีการและภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น คือ ซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดลอง พบว่า ภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่เหมาะสม คือ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดลำไยต่อซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 1:2 และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที และที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดลำไยต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:3 และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เท่ากับ 826.95 และ 839.62 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด เท่ากับ 225.65 และ 243.37 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัส เท่ากับ 1032.75 และ 1098.62 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

สำหรับการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถกำจัดได้สูงสุด ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 7 ซึ่งมีค่า เท่ากับ 67.08 และ 67.85 ตามลำดับ และค่าคงที่ความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียม (K) ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.917 และ 3.144 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า $1/n$ เท่ากับ 0.45 และ 0.47 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

#5287158520 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : ACTIVATED CARBON / LONGAN SEED / POTASSIUM HYDROXIDE /
ZINC CHLORIDE

NATTAVIPA CHONGRAK : PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM
LONGAN SEED BY ACTIVATION WITH ZINC CHLORIDE AND POTASSIUM
HYDROXIDE. ADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.,
131 pp.

Longan Seed is the solid waste produced from a dried longan factory in Thailand. This work aim to convert this high carbon solid waste into the useful activated carbon adsorbent. The conditions for preparation of activated carbon from longan seed by a single-stage chemical activation method were studied.

The suitable activating condition were 1:2 ratio of longan seed : ZnCl_2 800 °C for 180 min and 1:3 ratio of longan seed : KOH 800 °C for 120 min. The highest iodine number adsorption of both activated carbon were 826.95 and 839.62 mg/g, the highest methylene blue adsorption were 225.65 and 243.37 mg/g and the BET surface area were 1032.75 and 1098.62 m^2/g respectively.

From adsorptive isotherm test, the results can be explained by Freundlich isotherm, the efficiency for chromium removal in synthetic wastewater by activated carbon from longan seed by activation with ZnCl_2 and KOH at pH 7 were 67.08 and 67.85 respectively. And the adsorptive capacity constants (K) of chromium were 2.917 and 3.144 mg/g and the value of $1/n$ were 0.45 and 0.47 of both activated carbons respectively, which has higher adsorption than commercial activated carbon.

Department : Environmental Science..... Student's Signature

Academic Year : 2011..... Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ชี้แนะ และตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ ดร.สุชาดา บุตรนาค ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ทั้งยังให้ข้อคิด ข้อเสนอแนะ รวมทั้งหลักการต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่เครื่องมืออุปกรณ์ และสารเคมีต่างๆ ในห้องปฏิบัติการตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และทุกๆ คน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยให้คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว น้องสาว และญาติพี่น้องทุกคน ที่ได้ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 วิธีดำเนินการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon).....	6
2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์.....	7
2.3 คุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	8
2.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	10
2.4.1 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	12
2.4.2 โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ของผิวถ่านกัมมันต์.....	13
2.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	15
2.5.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น.....	15
2.5.2 แบ่งตามรูพรุนบนผิวคาร์บอน.....	15
2.5.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์.....	16
2.5.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกลดซับ.....	16

2.5.5 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ.....	16
2.6 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	19
2.6.1 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation).....	19
2.6.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation).....	26
2.7 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	32
2.7.1 ปริมาณร้อยละของเถ้า (%Ash).....	32
2.7.2 ปริมาณความชื้น (Moisture).....	32
2.7.3 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density).....	32
2.7.4 ความแข็งแรงและความทนต่อการขัดถู (Hardness and Abrasion Number).....	32
2.7.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle Size Distribution).....	33
2.7.6 พื้นที่ผิว (Surface Area).....	33
2.7.7 การดูดซับไอโอดีน (Iodine Number).....	37
2.7.8 การดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue Number).....	38
2.7.9 โมลาสนัมเบอร์ (Molass Number).....	38
2.7.10 แทนนิน (Tannin).....	38
2.8 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	39
2.8.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับก๊าซหรือไอ.....	39
2.8.2 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ออกฤทธิ์ บริสุทธิ์).....	39
2.9 ลำไย.....	41
2.9.1 ประวัติลำไย.....	41
2.9.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	42
2.9.3 พันธุ์ลำไย.....	45
2.9.4 การขยายพันธุ์ลำไย.....	47
2.9.5 สรรพคุณและประโยชน์ของลำไย.....	48
2.10 ไครเมียม.....	49
2.10.1 ประวัติการค้นพบธาตุไครเมียม.....	49

2.10.2 ลักษณะและคุณสมบัติของโครเมียม.....	50
2.10.3 การนำไปใช้ประโยชน์.....	50
2.10.4 อันตรายของโครเมียม.....	52
2.10.5 การป้องกันและรักษา.....	53
2.10.6 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (Analytical Method).....	54
2.10.7 การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม.....	55
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	59
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	59
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	59
3.3 สารเคมีที่ใช้.....	60
3.4 วัตถุประสงค์.....	61
3.5 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุประสงค์.....	61
3.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	61
3.6.1 วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ (Proximate Analysis) ของเมล็ดลำไย...	61
3.6.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเมล็ด ลำไย.....	61
3.6.3 การกระตุ้น.....	62
3.7 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	65
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	67
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุประสงค์.....	67
4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	68
4.2.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย สารเคมี.....	68
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl ₂) ที่ภาวะต่างๆ.....	72
4.2.2.1 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย	

ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ.....	72
4.2.2.2 ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ.....	74
4.2.2.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ.....	76
4.2.2.4 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ.....	78
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ.....	80
4.2.3.1 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ.....	80
4.2.3.2 ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ.....	82
4.2.3.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ.....	84
4.2.3.4 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ.....	86
4.3 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์.....	88
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์.....	89
4.5 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	91
4.5.1 ผลของค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการดูดติดผิว.....	91
4.5.2 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์.....	94
4.5.2.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพหุนดลิจของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$).....	95
4.5.2.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพหุนดลิจของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH).....	96

4.5.2.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุณฑลิซของถ่านกัมมันต์ทาง การค้า.....	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	102
5.1.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH).....	102
5.1.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ผลิตได้ และถ่านกัมมันต์ ทางการค้า.....	103
5.1.2.1 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์แบบฟรุณฑลิซของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของเมล็ดลำไย.....	111
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์.....	114
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์.....	115
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	116
ภาคผนวก จ วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์.....	120
ภาคผนวก ฉ วิธีการหาไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุณฑลิซ.....	123
ภาคผนวก ช สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	126
ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย.....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	131

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	แสดงสถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2550 – 2554..... 2
ตารางที่ 2.1	วัตถุดิบต่างๆ ที่เคยนำมาศึกษาและใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์..... 9
ตารางที่ 2.2	สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมีสำหรับการเตรียมถ่าน กัมมันต์..... 26
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) ของ เมล็ดลำไย..... 67
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของ เมล็ดลำไย..... 67
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่าน กัมมันต์..... 88
ตารางที่ 4.4	การตกตะกอนของโครเมียมที่ค่า pH ต่างๆ..... 91
ตารางที่ 4.5	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ ค่า pH ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า..... 92
ตารางที่ 4.6	การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดย การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)..... 95
ตารางที่ 4.7	การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดย การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)..... 97
ตารางที่ 4.8	การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์ทางการค้า..... 98
ตารางที่ 4.9	แสดงค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ ทางการค้า จากสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช..... 100

ตารางที่ ง.1	น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน.....	119
ตารางที่ ฉ.1	การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์.....	124
ตารางที่ ฉ.2	การคำนวณการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์.....	125
ตารางที่ ช.1	ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (ZnCl ₂) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ.....	128
ตารางที่ ช.2	ค่าการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (ZnCl ₂) ที่ภาวะต่างๆ.....	129
ตารางที่ ช.3	ค่าการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ.....	130

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์.....	10
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	11
ภาพที่ 2.3 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์.....	14
ภาพที่ 2.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	18
ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ.....	23
ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน เมื่อใช้ซิงค์คลอไรด์เป็น ตัวกระตุ้น.....	27
ภาพที่ 2.7 ปฏิกริยาระหว่างเซลลูโลสกับกรดฟอสฟอริก.....	29
ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	31
ภาพที่ 2.9 ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับ.....	35
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู.....	38
ภาพที่ 2.11 ลำไย.....	41
ภาพที่ 2.12 ลักษณะช่อดอกลำไย.....	43
ภาพที่ 2.13 โครเมียม.....	49
ภาพที่ 3.1 เมล็ดลำไยที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	61
ภาพที่ 3.2 แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์.....	62
ภาพที่ 3.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย.....	64
ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียม.....	66
ภาพที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ภาวะ ต่างๆ.....	70
ภาพที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะ ต่างๆ.....	71
ภาพที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ภาวะต่างๆ.....	73
ภาพที่ 4.4 ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ภาวะ ต่างๆ.....	75

ภาพที่ 4.5	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ในแต่ละภาวะ	77
ภาพที่ 4.6	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ในแต่ละภาวะ.....	79
ภาพที่ 4.7	ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะต่างๆ.....	81
ภาพที่ 4.8	ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะต่างๆ.....	83
ภาพที่ 4.9	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ในแต่ละภาวะ.	85
ภาพที่ 4.10	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ในแต่ละภาวะ.....	87
ภาพที่ 4.11	ลักษณะสัณฐานวิทยาของเมล็ดลำไยก่อนกระตุ้นด้วยสารเคมีที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	89
ภาพที่ 4.12	ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า.....	90
ภาพที่ 4.13	ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า.....	90
ภาพที่ 4.14	ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	92
ภาพที่ 4.15	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$).	96
ภาพที่ 4.16	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH).....	97
ภาพที่ 4.17	ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อยู่มากมายที่พบว่ามีความเสี่ยงที่จะเกิดมลพิษที่ไม่ควรจะเป็นโรงงานผลิตผลไม้มือสองหรือโรงงานผลิตผลไม้มือหนึ่ง ซึ่งเมล็ดลำไยคือหนึ่งในวัสดุที่เหลือทิ้งจากโรงงานเหล่านี้ ดังนั้นเมล็ดลำไยที่เหลือทิ้งนี้สามารถถูกนำมาเป็นตัวช่วยในการแปรรูปของเหลือทิ้งซึ่งมีราคาถูกและสามารถทำให้เกิดมูลค่าที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณขยะและเพิ่มพูนรายได้ให้กับเกษตรกรและสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศอย่างมากมายมหาศาล (วารสารเกษตรกรรมธรรมชาติ, 2553) จากข้อมูลของปี 2553 ผลผลิตลำไยสดในประเทศไทยมีประมาณ 5 แสนตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2553) เมื่อคำนวณปริมาณเมล็ดลำไยโดยประมาณจากผลผลิตที่นำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปในโรงงานผลิตผลไม้มือสองในปี 2553 พบว่าจะได้น้ำหนักประมาณ 1 หมื่นตัน เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้งและเพื่อช่วยแก้ปัญหาการกำจัดของเหลือทิ้ง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเมล็ดลำไยมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการแปรรูปวัสดุที่มีราคาถูกให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่าและมีคุณค่าสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการแปรสภาพวัตถุดิบดังกล่าวนี้มาเป็นถ่านกัมมันต์จึงนับว่าเป็นประโยชน์แก่สังคมอย่างยิ่ง แล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ให้เป็นประโยชน์สูงสุดแก่ประเทศ จึงเป็นทางเลือกที่สามารถเป็นไปได้อีกทางหนึ่ง

นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ยังเป็นวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น พบว่ามีความเสี่ยงอยู่มากมายที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ รวมทั้งวัสดุชีวมวลที่เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมซึ่งได้มีการนำมาวิจัยแล้ว เช่น เปลือกถั่วอัลมอนต์ (A. Marcilla et. al., 2000) กะลาปาล์มน้ำมัน (Guo และ Lua, 2000) เปลือกถั่วลิสง (Juan และ Keqiang, 2010) เมล็ดองุ่น เมล็ดเชอร์รี่ (Lussier et. al., 1994) ชั่งข้าวโพด (Narges และ Jalal, 2009) แกลบ (Dimitrios et. al., 2008) และกะลาแมคคาเดเมีย (อติสรา นิติวัดนะ, 2553) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของถ่านกัมมันต์คือ มีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนมาก ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ในปริมาณมาก ถ่านกัมมันต์จึงถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายและหลากหลายในกระบวนการแยกสารประกอบและการทำให้สารบริสุทธิ์ จึงนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับสารทั้งที่เป็นของเหลวและก๊าซในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ฟอกสีและดูดกลิ่นในอุตสาหกรรมน้ำตาล การแยกสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอน การทำน้ำให้บริสุทธิ์ การกำจัดกลิ่น ใช้เป็นตัวกรองก๊าซพิษที่ออกมาจากการเผาไหม้ของยานยนต์ และใช้เป็นยาเพื่อดูดซับสารพิษที่เข้าสู่ร่างกาย เป็นต้น ด้วยคุณสมบัตินี้จึงนิยมนำไปใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์หรือโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท ทองแดง แคดเมียม และโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ เนื่องจากว่าโครเมียมที่พบในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปโครเมต (CrO_4^{2-}) และไดโครเมต (CrO_7^{2-}) ซึ่งสารประกอบโลหะโครเมียมที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ทำลายเซลล์ต่างๆ ของร่างกายสิ่งมีชีวิตได้ทุกทาง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำและก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพต่อประชาชนที่นำน้ำปนเปื้อนโลหะโครเมียมมาอุปโภคบริโภคด้วย (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2541) จากคุณสมบัติและประโยชน์การใช้งานที่หลากหลายของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้มีการใช้งานอย่างสม่ำเสมอทั้งภายในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศ ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงสถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2550-2554

ปี พ.ศ.	สถิติการนำเข้า		สถิติการส่งออก	
	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)
2550	4,435,887	223,121,035	9,309,014	263,440,875
2551	3,853,152	244,428,846	10,468,576	374,806,960
2552	4,354,095	297,116,845	7,023,716	354,461,372
2553	6,323,241	437,116,432	7,617,107	355,663,551
2554	6,715,511	447,045,292	9,097,413	475,561,511

ที่มา: กรมศุลกากร (www.customs.go.th ; คำค้น HS 38021000000)

จากข้อมูลทางสถิติการนำเข้าและการส่งออกของถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย พบว่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 - 2554 ประเทศไทยมีแนวโน้มในการนำเข้าถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยนั้นจะต้องมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น เพื่อทดแทนการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ และจากสถิติในการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 – 2554 พบว่า ปริมาณในการส่งออกถ่านกัมมันต์ในประเทศไทยโดยรวมนั้นมีอัตราที่ลดลง ดังนั้น ในการพัฒนาถ่านกัมมันต์ที่สามารถผลิตได้จากวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตร และจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อช่วยลดการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศและพัฒนาถ่านกัมมันต์ให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นเพื่อเพิ่มการส่งออกให้มากขึ้นจึงได้มีการ

ศึกษาวิจัยในการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อตอบสนองความต้องการในการนำไปใช้งาน และยังเป็นการพัฒนาวัตถุดิบที่มีอยู่ในประเทศให้เป็นประโยชน์เพิ่มมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
2. เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น
3. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

1.3 สมมติฐาน

การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงขึ้นและอยู่ในภาวะที่เหมาะสม และมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นการพัฒนาความรู้ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่เหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารเคมี อุณหภูมิ และเวลา
3. ศึกษาความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้
4. ศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

1.5 วิธีดำเนินการศึกษา

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมผลิตถ่านกัมมันต์
2. จัดเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
3. จัดเตรียมวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ คือ เมล็ดลำไย
4. วิเคราะห์องค์ประกอบของเมล็ดลำไย
5. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้
 - 5.1 อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารเคมีในการกระตุ้น (1:1 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก)
 - 5.2 อุณหภูมิในการกระตุ้น (500 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส)
 - 5.3 เวลาในการกระตุ้น (60 120 และ 180 นาที)
6. ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกัมมันต์
 - 6.1 วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเมล็ดลำไย
 - 6.2 วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนตามวิธี ASTM D 4607-86
 - 6.3 วิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูตามวิธี JIS 1470-1975
 - 6.4 วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวรูพรุน (BET surface area)
 - 6.5 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ (SEM)
7. ศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการศึกษางานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตลำไยอบแห้งได้
2. ทราบถึงภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
3. สามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากเมล็ดลำไยไปใช้ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้
4. สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

มีผู้ให้ความหมายของถ่านกัมมันต์หลากหลายด้วยกัน เช่น

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอน ซึ่งเป็นสารดูดซับชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผงหรือเม็ดก็ได้ มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวดูดซับสูง ทำให้มีสมบัติการดูดซับที่ดี ใช้ประโยชน์ในการกำจัดกลิ่น สี หรือ ก๊าซ (ปรัชญา แสงเงินอ่อน, 2548)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และมีความว่องไวในการดูดซับสูง (ปริญทร์ เต็มญารศิลป์, 2551)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านคาร์บอนที่มีลักษณะรูปร่างอสัณฐานชนิดหนึ่ง ซึ่งผลิตได้โดยการกระตุ้น ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีจำนวนรูพรุนเล็กๆ มากมายมหาศาล และมีพื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้นมากมายต่อหน่วยปริมาตร จึงเป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูงไม่ว่าจะเป็นก๊าซของเหลว หรือสารที่ถูกละลายบนพื้นผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ (Bansal et. al., 1988)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านที่อยู่ในรูปแบบไม่เป็นคาร์บอนแกรไฟต์ (Non-graphitic carbon) ซึ่งถูกพัฒนาให้มีพื้นที่ผิวภายในและรูพรุนสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารได้ทั้งที่เป็นก๊าซและของเหลว โดยถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้น (Jai Y.F., 1998)

แต่อย่างไรก็ดี สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่า ถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านที่มีคุณสมบัติดูดซับสี กลิ่น รส บางชนิดได้เป็นอย่างดี ถ่านชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ผลิตได้จากถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านกะลามะพร้าว หรือถ่านกระดูก ด้วยกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

ในคริสต์ศตวรรษที่ 15 ได้มีการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ โดยนำไม้มาเผาในที่อับอากาศ เพื่อนำมาใช้ในการดูดสีในของเหลว แต่ในการดูดก๊าซเพิ่งมีผู้บันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1785 แต่ก็ไม่มีผู้สนใจ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1811 มีนักวิทยาศาสตร์ท่านหนึ่งคิดค้นผลิตถ่านกัมมันต์จากกระดูก พบว่าสามารถดูดสีได้มากกว่าถ่านไม้ จึงนิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาวสะอาดบริสุทธิ์ จากนั้นได้มีการค้นคว้าและพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์มาเรื่อยๆ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1822 ได้มีผู้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากการเผาของผลสมระหว่างเลือดกับขี้เถ้า มีคุณสมบัติในการดูดสีมากกว่าถ่านกระดูกประมาณ 20-50 เท่า แต่มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากสามารถผลิตได้น้อย จากจุดนี้เองทำให้มีการพัฒนาและปรับปรุงความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ให้ดีขึ้น โดยผ่านกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิว ต่อมาประมาณ ค.ศ. 1900 มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Ostreyko ชาวโปแลนด์ ได้คิดค้นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่ โดยทำการเผาถ่านภายใต้บรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่ง คือ โดยการใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับเป็นผู้ริเริ่มให้เกิดอุตสาหกรรมผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อต่างๆ ขึ้น เช่น เอพอนิท (Eponit) ผลิตขึ้นในยุโรปในปี ค.ศ. 1909 นอริท (Norit) ผลิตในปี ค.ศ. 1911 และคาร์โบราฟฟิน (Carboraffin) ผลิตในปี ค.ศ. 1915 และในอเมริกาได้ผลิต ฟิลท์ชาร์ (Filtchar) ขึ้นในปี ค.ศ. 1913 ซึ่งได้มีการปรับปรุงและเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ๆ ไปเรื่อยๆ โดยถ่านที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ได้มีการศึกษาถึงการนำไปใช้ในการดูดสี ฟอกสี ในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้ได้ดีกว่าถ่านกระดูกมาก

คุณสมบัติในการดูดกลิ่นและก๊าซของถ่านกัมมันต์จึงเริ่มเป็นที่สนใจกันในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งมีการนำไปใช้ในการทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ จากจุดนี้จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจในคุณสมบัติการดูดกลิ่นและก๊าซของถ่านกัมมันต์ จึงได้มีการทดลองด้วยวิธีต่างๆ และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตใช้ในการฟอกสีน้ำตาลนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ เพราะมีลักษณะพองง่ายและมีน้ำหนักเบา และจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีการค้นคว้าวิจัยในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุดูดซับชนิดอื่นๆ และพยายามผลิตถ่านชนิดใหม่ให้มีความหนาแน่นมากขึ้น เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น เพื่อใช้เป็นไส้กรองในหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทำให้มีการพัฒนาถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุชนิดอื่นๆ เรื่อยมา จนถึงปัจจุบัน ต่อมา เมื่อสงครามสิ้นสุดลงการค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จ และมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การดูดไอของสารระเหย (solvent) ดูดไอเบนซิน (benzene) จากก๊าซอื่นๆ โดยถ่านที่ผลิตจากไม้ขี้เถ้า พืท ลิกไนท์ และกากที่เหลือจากการทำเยื่อกระดาษจากใยเซลลูโลส

จะได้ถ่านที่มีลักษณะพองและเบา เหมาะสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ฟอกของเหลว ส่วนกะลามะพร้าวจะได้ถ่านที่ใช้ในการดูดซับก๊าซได้ดี

2.3 คุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มักมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

- 1) เป็นวัสดุเหลือใช้หรือพวกของเหลือทิ้งที่มีราคาถูก
- 2) เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย
- 3) มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง
- 4) มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- 5) มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ เป็นต้น
- 6) สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติ และส่วนน้อยเป็นวัตถุดิบจากการสังเคราะห์ ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์สามารถจำแนกเป็นกลุ่มตามแหล่งกำเนิดได้ ดังต่อไปนี้

1) วัตถุดิบจากซากสิ่งมีชีวิตโบราณ เป็นวัตถุดิบที่เกิดจากการทับถมของซากพืชและซากสัตว์ต่างๆ ได้พื้นดินตั้งแต่ยุคดึกดำบรรพ์ วัตถุดิบเหล่านี้ประกอบด้วยถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหิน ถ่านโค้ก กากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งวัตถุดิบกลุ่มนี้มักจะมีลักษณะแข็ง

2) วัตถุดิบจากชีวมวล เป็นวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องกับเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมในยุคปัจจุบัน ประกอบด้วยวัสดุที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตพืชเศรษฐกิจ เช่น ฟางข้าว ลำต้นข้าวโพด และลำต้นมันสำปะหลัง เป็นต้น วัสดุเหลือจากการแปรรูปผลผลิตกิจกรรม เช่น ชังข้าวโพด กะละมะพร้าว กะลาปาล์ม เปลือกถั่วลิสง เมล็ดผลไม้ต่างๆ เป็นต้น วัสดุจากปศุสัตว์ เช่น กระดูก เป็นต้น หรืออาจเป็นวัสดุจากวัชพืช เช่น ผักตบชวา เป็นต้น

3) วัตถุดิบจากวัสดุอินทรีย์อุตสาหกรรม เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น พอลิเมอร์โมเลกุลสั้นชนิดต่างๆ และพอลิเมอร์ด้อยคุณภาพ ไม่ว่าจะเป็นพวกยางรถยนต์ หรือพลาสติกต่างๆ เป็นต้น

นอกจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว วัตถุดิบเหล่านี้ยังประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนและธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักร่วมกับธาตุคาร์บอน และวัตถุดิบเหล่านี้อาจมีธาตุชนิดอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน เป็นต้น ปนอยู่ด้วยกันในปริมาณเล็กน้อย (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552) ซึ่งวัตถุดิบต่างๆ ที่เคยนำมาศึกษาและใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์แล้ว แสดงดังตารางที่ 2.1 ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ ยังมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอีกด้วย นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมมาจากวัตถุดิบต่างชนิดกันจะมีการกระจายขนาดรูพรุนต่างกันด้วย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต หรือภาวะที่ใช้ เป็นต้น ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใดจะใช้ผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับงานแบบใด

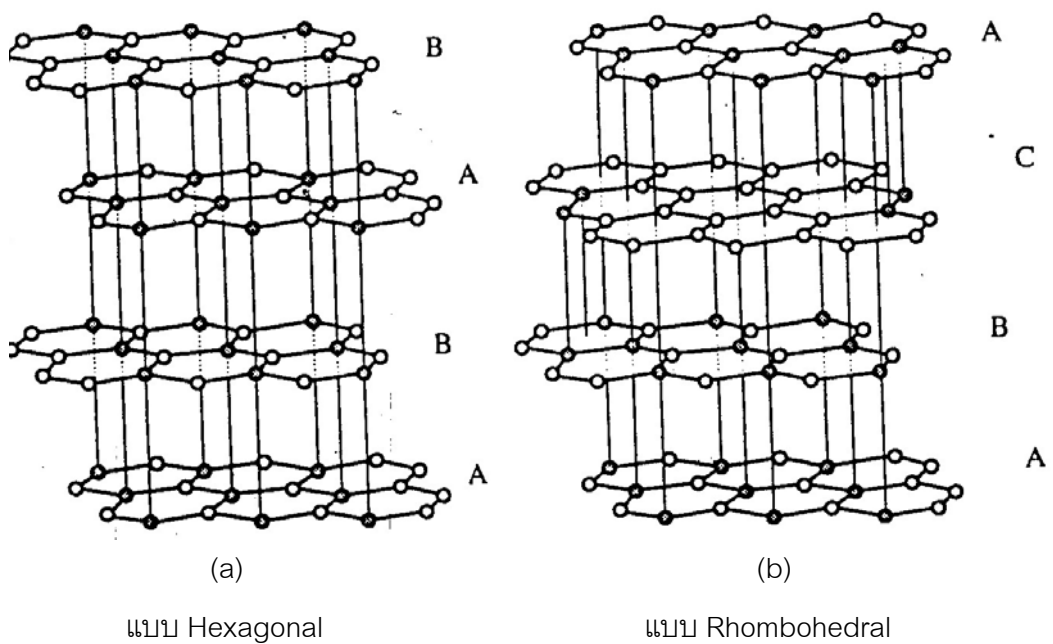
ตารางที่ 2.1 วัตถุดิบต่างๆ ที่เคยนำมาศึกษาและใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ชานอ้อย (Bagasses)	เปลือกเมล็ดฝ้าย (Cottonseed hull)
ถ่านหิน (Coal)	ของเสียจากโรงกลั่นสุรา (Distillery waste)
ไม้ (Wood)	ฝุ่นจากปล่องไฟ (Flue dust)
เปลือกลูกนัท (Nut shells)	ปลา (Fish)
กากน้ำตาล (Molasses)	เมล็ดผลไม้ (Fruit pits)
ถ่านลิกไนต์ (Lignite)	แกรไฟต์ (Graphite)
เปลือกกะลาปาล์มน้ำมัน (Palm-oil shell)	ขี้เลื่อย (Sawdust)
มันสำปะหลัง (Cassava)	วัชพืชทะเล (Kelp and seaweed)
กากน้ำตาลบีท (Beet-sugar sludges)	เขม่า (Lampblack)
เลือด (Blood)	กากหนัง (Leather waste)
กระดูก (Bones)	ลิกนิน (Lignin)
สารจำพวกแป้ง (Carbohydrates)	เปลือกถั่ว (Nut shell)
เมล็ดพืช (Cereals)	ถ่านหินน้ำมัน (Petroleum coke)
กะลามะพร้าว (Coconut shells)	ถ่านพีท (Peat)
กากกาแฟ (Coffee beans)	กากกรดปิโตรเลียม (Petroleum acid sludge)
ซังข้าวโพด (Corn cobs and corn stalks)	ของเสียจากเยื่อกระดาษ (Pulp-mill waste)
เศษยาง (Rubber waste)	แกลบ (Rice hull)

ที่มา: รติกร อิศระเสณีย์ (2539)

2.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซิน (Benzene Ring) แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.355 นาโนเมตร หรือกลุ่มของอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular hexagonal) อย่างต่อเนื่องกัน ดังภาพที่ 2.1

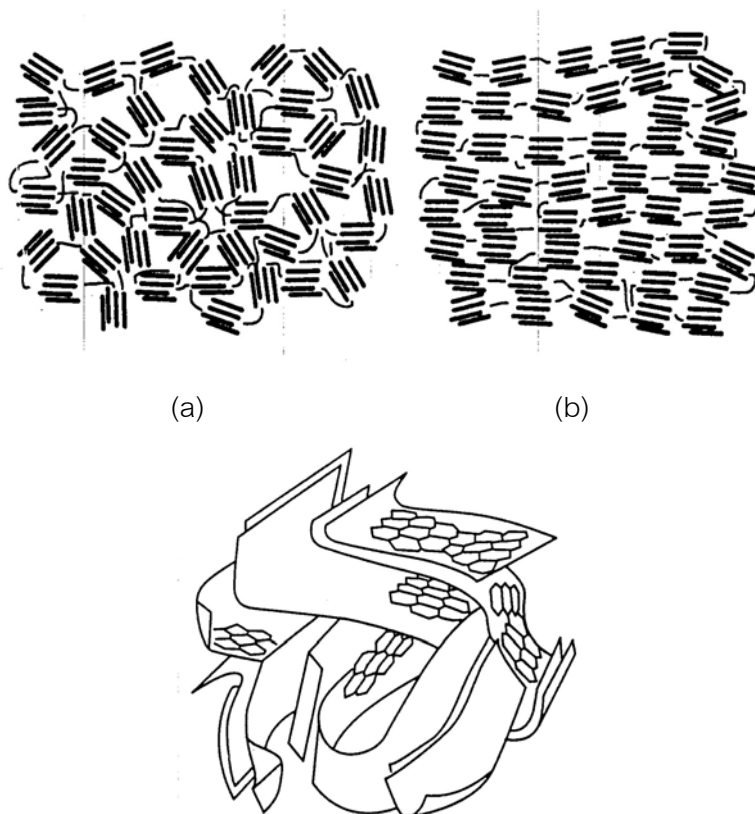


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์

ที่มา: จากหนังสือ Introduction to carbon technologies โดย Marsh, H., 1997, Spain : Secretariado.

นั่นคือ คาร์บอนอะตอมแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับคาร์บอนอีก 3 อะตอม ในระนาบเดียวกัน (Plane) และในลักษณะสมมาตรกัน ดังนั้น อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นแบบซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนของคาร์บอนอะตอมที่เหลืออีกหนึ่งอิเล็กตรอนซึ่งเป็นไพอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างของแกรไฟต์เกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Resonance) เพื่อทำให้โครงสร้างของชั้นคาร์บอนนั้นเสถียรยิ่งขึ้น ส่วนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก มีระยะห่างระหว่างชั้นห่างกัน 0.355 นาโนเมตร ดิสเพลสเมนต์ (Displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) ซึ่งจะเกิดง่ายเพราะแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลอ่อน เพราะฉะนั้นโครงสร้างของแกรไฟต์จะเกิดจุดบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้างที่จุดนี้ได้ง่าย

ส่วนโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะโครงสร้างแกรไฟต์ที่ไม่สมบูรณ์หรือไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) โดยเกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและชั้นอนเหลี่ยมในแนวระนาบที่มีทิศทางไม่แน่นอน เรียงตัวซ้อนกันประมาณ 3-30 ชั้น ซึ่งชั้นนี้จะเรียงตัวกันอย่างไม่สมบูรณ์และทำมุมไม่แน่นอน ช่องว่างระหว่างชั้นจึงมีมาก ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

(a) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์เล็กน้อย

(b) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์ง่าย

ที่มา: จากหนังสือ Introduction to carbon technologies โดย Marsh, H., 1997, Spain : Secretariado.

ซึ่งจะประกอบไปด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน ในแต่ละชั้นของอะตอมคาร์บอนยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ชนิดเอสพี 2 (sp² covalent bond) เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนอะตอมที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 15 นาโนเมตร และระยะห่างระหว่างผลึกเล็กๆ มีค่าระหว่าง 2-5 นาโนเมตร ซึ่งมากกว่าของแกรไฟต์ ดังนั้นช่องว่างนี้จึงทำให้เกิดโครงสร้างของรูพรุน

2.4.1 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างระหว่างผลึกของคาร์บอน โดยการเกิดรูพรุนจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสม คือ การทำให้มีความพรุนไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก โดยลักษณะรูพรุนนั้นมีลักษณะไม่แน่นอน เช่น เป็นแบบคล้ายหลอดแคปิลลารี (capillary pores) หรือแบบแผ่นขนาน (slit pore) บางรูพรุนมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งอาจมีรูปร่างรูพรุนเป็นรูปตัววี รูปคอกขวด ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะเกิดลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน โดยทั่วไปมักจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด ซึ่งขนาดของรูพรุนสามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

1) รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) รัศมีของรูพรุนขนาดเล็กมีค่าน้อยกว่า 2 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.6-0.8 นาโนเมตร ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15-0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะอย่างน้อยที่สุด 95 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมีมากกว่ารูพรุนในขนาดกลาง หรือพื้นที่ผิวที่ไม่มีรูพรุน ดังนั้น รูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญในการดูดซับ

2) รูพรุนขนาดกลาง (Transitional pores) ขนาดของรูพรุนขนาดกลางที่พบในถ่านกัมมันต์ซึ่งรัศมีของรูพรุนขนาดกลางมีค่าอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร มีปริมาตรความพรุนอยู่ระหว่าง 0.02-0.1 มิลลิลิตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด ตัวอย่างสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินาเจล (Alumina gel) และอะมิโนซิลิเกตคะตะลิสต์ (Amino silicate catalyst)

3) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ที่พบในถ่านกัมมันต์มีรัศมีมากกว่า 50 นาโนเมตร ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนขนาดใหญ่มีค่าน้อยกว่า 2 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนประเภทอื่นแล้ว รูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยมาก ดังนั้นรูพรุนประเภทนี้จึงไม่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูพรุนที่เล็กกว่า

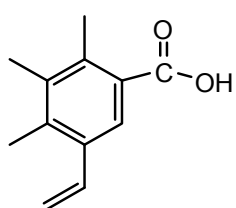
ดังนั้น วัสดุที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เปิดโดยตรงสู่ผิวภายนอกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ สำหรับวัสดุขนาดกลางจะแตกสาขาออกมาจากวัสดุขนาดใหญ่ สามารถดูดซับโมเลกุลของเหลวได้บ้าง และมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่มีความดันสัมพัทธ์สูงๆ และในรูปแบบเดียวกันวัสดุขนาดเล็กแตกสาขาออกมาจากวัสดุขนาดกลาง ซึ่งวัสดุขนาดเล็กมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และมีปริมาตรความพรุนสูง และพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ เพราะฉะนั้นวัสดุขนาดเล็กจึงมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวจำเพาะ จึงทำให้มีผลต่อความจุในการดูดซับ และเชื่อกันว่าปริมาณของวัสดุแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่าการกระจายขนาดของวัสดุ (pore size distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น (Bansal et. al., 1988)

2.4.2 โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ของถ่านกัมมันต์

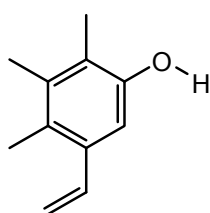
ถ่านกัมมันต์มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การคาร์บอนไนเซชัน ในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนเฮลิซิม (Aromatic Ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกพาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกพาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรงและสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทนความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่างๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะทางเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงแหวนเฮลิซิม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส และกลายเป็นออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนียและซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน

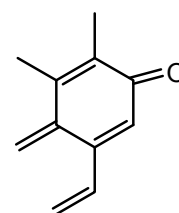
(Halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพก๊าซหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญ คือ ผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ กลุ่มของฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวของคาร์บอนประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactone, Fluorescein Type Lactone, Carboxylic Acid Anhydride และ Cyclic Peroxide ดังภาพที่ 2.3



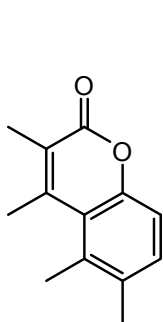
(a) Carboxylic Group



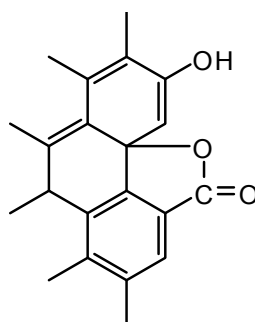
(b) Phenolic Hydroxyl Group



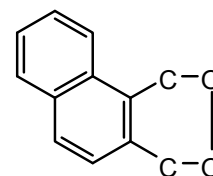
(c) Quinone Type Carbonyl Group



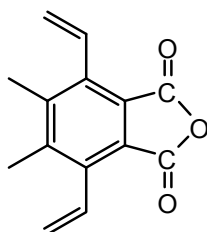
(d) Normal Lactone Group



(e) Fluorescein Type Lactone Group



(f) Cyclic Peroxide Group



(g) Carboxyl Acid Anhydride Group

ภาพที่ 2.3 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Cookson, 1978)

จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงถูกนำมาใช้ในการเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจนที่มีขั้ว (Polar) เหมาะสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขั้ว (Polar Organic) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีออกซิเจนพื้นผิวสามารถใช้ในการกำจัดโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันลดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีผลกระทบอย่างมากต่อความจุของการดูดซับ เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxylic group) ความจุการดูดซับผิวพื้นลดลง เป็นต้น (อิรัชย์ นพแก้ว, 2539)

2.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งโดยอาศัยหลักต่างๆ มากมาย ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งาน ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

2.5.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

1) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

2) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับก๊าซ และไอระเหย

2.5.2 แบ่งตามรูพรุนบนผิวคาร์บอน

(แบ่งตามเกณฑ์ของ International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)

1) ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับก๊าซ และไอระเหย

2) ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

3) ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านของอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็ก และมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

2.5.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- 1) ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ มักใช้เพื่อดูดซับในสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบให้เป็นสีขาวยบริสุทธิ์ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น
- 2) ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง มักใช้ดูดสารพิษ หรือไอระเหย

2.5.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- 1) สำหรับดูดซับก๊าซ (Gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผากระตุ้นถ่านสังเคราะห์ชนิดแข็ง (Hard artificial char) ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดในของผลไม้ หรือถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง เป็นต้น
- 2) สำหรับดูดซับสี (Colour adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผากระตุ้นถ่านสังเคราะห์ชนิดอ่อน (Soft artificial char) ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากถ่านหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล เป็นต้น
- 3) สำหรับดูดซับโลหะ (Metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลตทินัม และแร่

2.5.5 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมีและเภสัชกรรม ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมอาหาร น้ำตาล น้ำมันพืช น้ำอัดลม โมโนโซเดียมแอล-กลูตาเมต (Monosodium L-Glutamate) ใช้ดูดก๊าซในกั้นกรองนุหรี เครื่องทำอากาศให้บริสุทธิ์ในโรงงาน และใช้ในการกรองน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2547) คือ ชนิดผง ชนิดเกล็ด ชนิดเม็ด และชนิดแท่ง ซึ่งแต่ละชนิดจะมีขนาด คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไป ดังนี้

- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon) มีขนาดเล็กกว่า 0.18 มิลลิเมตร มีปริมาณที่ร่อนผ่านแวง 150 ไมโครเมตร หรือต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผงสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ มีค่าไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าความหนาแน่นปรากฏในช่วง 0.20-0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด ดังภาพที่ 2.4 (a)

โดยมีวิธีทดสอบ คือ นำตัวอย่างมาประมาณ 25 กรัม และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนได้มวลคงที่ และปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นให้รีบชั่งน้ำหนักเพื่อให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม (M_0) เทตัวอย่างลงไปในปีกเกอร์ เติมน้ำ 600-700 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วคนให้เข้ากัน โดยทำแรงให้เปียกก่อนแล้วเทตัวอย่างช้าๆ ผ่านแรง ในขณะที่เทให้คนตัวอย่างเป็นครั้งคราว จากนั้นล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในปีกเกอร์ออกให้หมด เมื่อเทตัวอย่างทั้งหมดลงบนแรง แล้วใช้น้ำล้างตัวอย่างอีกจนกระทั่งไม่มีตัวอย่างผ่านแรงอีก ถ่ายตัวอย่างที่ค้างบนแรง โดยใช้น้ำช่วยไล่ลงในปีกเกอร์ แล้วกรองผ่านกระดาษชิวชิวซึ่งทราบมวลแน่นอน แล้ว นำกระดาษชิวชิวไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนได้มวลคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์แล้วรีบชั่งน้ำหนักทันที (M_1)

วิธีคำนวณ

คำนวณหาปริมาณที่ผ่านแรง จากสูตร

$$\text{ปริมาณที่ผ่านแรง ร้อยละโดยน้ำหนัก} = [1 - (M_1/M_0)] \times 100$$

เมื่อ M_0 คือ มวลของตัวอย่างหลังจากอบแห้งครั้งแรก (กรัม)

M_1 คือ มวลของตัวอย่างหลังจากอบแห้งครั้งที่ 2 (กรัม)

2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon) มีขนาดอยู่ในช่วง 0.2-5.0 มิลลิเมตร มีค่าไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และมีความแข็งไม่น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ มักมีรูปร่างไม่แน่นอน ใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ ดังภาพที่ 2.4 (b)

3) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pelleted Activated Carbon) มีขนาดอยู่ในช่วง 0.8-5.0 มิลลิเมตร มีปริมาณที่ร่อนผ่านแรง 150 ไมโครเมตร หรือต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ มีค่าไอโอดีนในช่วง 600-1000 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และมีความแข็งไม่น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ มักมีรูปร่างขึ้นอยู่กับการอัดผ่านเครื่องอัด ใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ และใช้ทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ และไอระเหยต่างๆ ดังภาพที่ 2.4 (c)

โดยมีวิธีทดสอบ คือ ชั่งตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.1 กรัม ใส่ในแรงแล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่มีอัตราการเขย่า 285 รอบต่อนาที ± 5 รอบต่อนาที มีลักษณะการเขย่าเป็นแบบขึ้นลงและหมุนวนพร้อมกัน นาน 3 นาที ถ่ายส่วนที่ค้างบนแรงทั้งหมดลงในภาชนะที่ทราบมวลแน่นอนแล้ว ชั่งคำนวณส่วนที่ค้างบนแรงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

4) ถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง (Cloth and Fibres Activated carbon) ซึ่งจะมีขนาดตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย มีลักษณะเป็นแท่งสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ มีค่าไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 2.4 (d)



(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 2.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์

โดย (a) คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง, (b) คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด,
(c) คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด และ (d) คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง

ที่มา: <http://www.etc1992.co.th/index.php/journal/207-june2011/805-activated-carbon.html>

2.6 การผลิตถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการและการนำไปใช้งาน ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัย ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง แต่โดยทั่วไปวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Bansal et.al., 1988)

2.6.1 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ เป็นต้น ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้ก๊าซ ออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิมิตัวยิ่งยวด (Steam) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และอากาศ (Air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ซึ่งก๊าซพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ (Tar) ที่เหลืออยู่ และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) กับบางส่วนของเม็ดถ่าน ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆ กัน คือ เกิดการเปิดของรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนที่เล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น และโดยทั่วไป ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน หลังจากการเลือกชนิดของวัตถุดิบที่จะใช้ ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

1) การเตรียมวัตถุดิบ

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้นมักจะนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปทำการคาร์บอนไนซ์ แต่ถ้าวัตถุดิบที่นำมาใช้มีความแข็งและเหนียวมาก ทำให้การบดวัตถุดิบทำได้ยาก อาจนำวัตถุดิบนั้นไปทำการคาร์บอนไนซ์ก่อนแล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดต่อไป (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537) ถ้าวัตถุดิบมีลักษณะเป็นผง หรือฟุ้งกระจายได้ง่ายอาจนำมาอัดให้เป็นเม็ดก่อน โดยใช้ตัวประสานเป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ (tar) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการการคาร์บอนไนซ์ เมื่อทำเป็นเม็ดแล้วจึงนำไปทำการคาร์บอนไนซ์และทำการกระตุ้นในขั้นตอนต่อไป (Pendyal B. et.al., 1999)

2) การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)

การคาร์บอนไนซ์หรือกระบวนการผลิตถ่าน (Char) เป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเกิดจากการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศหรือในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำ เรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า ทาร์ (Tar) และส่วนที่เป็นก๊าซ การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในวัตถุดิบ โดยความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของของเหลว และก๊าซ โดยคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ควรมีลักษณะ ดังนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า (No ash)

ดังนั้น จึงมีผลทำให้ชาร์เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นกว่าวัตถุดิบ นอกจากนี้กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27-197 องศาเซลเซียส
- (2) การคาร์บอนไนซ์โดยเกิดก๊าซและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197-497 องศาเซลเซียส
- (3) ช่วงที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 497-847 องศาเซลเซียส

การคาร์บอนไนซ์มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการอ่อนตัว (Softening period) ควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้ก๊าซและทาร์ที่สลายตัวหลุดออกไปได้โดยไม่สลายตัวหรือมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งอุดแน่นในรูพรุน และช่วงหลังการอ่อนตัว (After softening period) คือ อัตราการให้ความร้อนแบบปกติ เป็นช่วงที่คาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นระเบียบกว่าช่วงการอ่อนตัว โดยถ่านชาร์ที่ได้จะแข็ง และมีความหนาแน่นสูง แต่ยังคงมีความสามารถในการ

ดูดซับต่ำ เพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในรูปพูนหรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการการกระตุ้นต่อไป เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

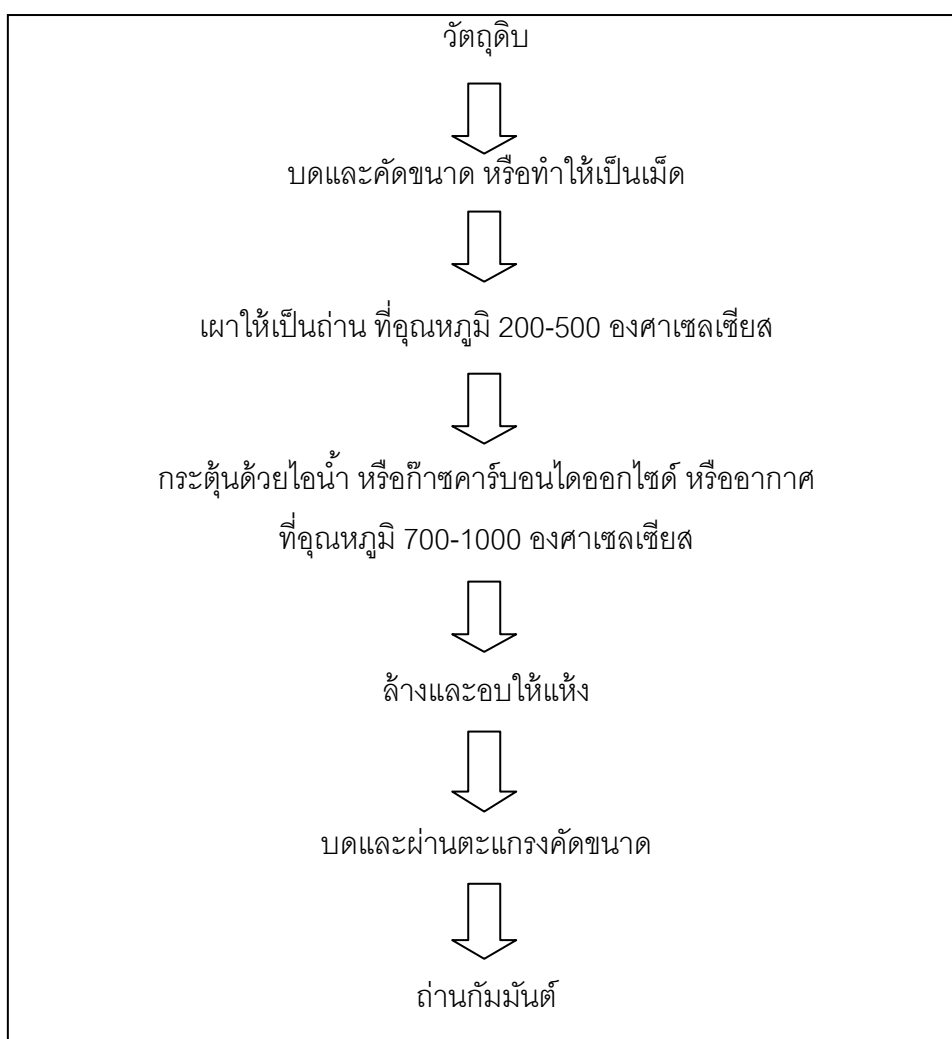
ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของถ่านชาร์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการเพิ่มความร้อน และธรรมชาติของวัตถุดิบ ซึ่งอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกหักตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้ได้สารระเหยเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กๆ เช่น น้ำ แอมโมเนีย ทาร์ และก๊าซต่างๆ หลุดออกไป ส่วนที่เหลืออยู่เป็นถ่านชาร์ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบวงแหวนอะโรมาติก ซึ่งคาร์บอนอะตอมมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เป็นผลทำให้ปริมาณของรูปพูนเล็กๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขั้นแรกของการคาร์บอนไนซ์ลดลง และเม็ดถ่านมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ส่วนอัตราการเพิ่มความร้อนนั้นมีความสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการทำคาร์บอนไนซ์ ถ้าอัตราการเพิ่มความร้อนสูงปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูปพูนขนาดใหญ่กว่า เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย เมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่มีอัตราการเพิ่มความร้อนที่ต่ำ และธรรมชาติของวัตถุดิบนั้น พบว่า วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งวัตถุดิบที่ต่างกันก็มักจะใช้วิธีการการกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพดีที่สุด และเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบที่เหมาะสมต่อไป

3) การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้นเป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีรูปพูนมากขึ้น และทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวนอกเหนือจากพลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่ายแล้ว ในปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นยังกำจัดการต่างๆ ที่ค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกคาร์บอนออกไปจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับอีกด้วย ส่วนการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน นอกจากนี้ยังช่วยกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ ดังนั้น ปฏิกิริยาเคมีในการกระตุ้นจึงช่วยให้คาร์บอนจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

วิธีกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ทำให้มีรูพรุนขนาดต่างๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และการจัดเรียงตัวโครงสร้างใหม่ของคาร์บอน ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) ต่างๆ ได้แก่ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไอเสียจากการเผา เป็นต้น โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อน ซึ่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นอาจเกิดความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ที่อุณหภูมิสูงมากถึง 800-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้น คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในการกระตุ้นก๊าซเหล่านี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่านเกิดการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) บางส่วนของเม็ดถ่านทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป และเกิดเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างด้วยกลไกที่ต่างกัน คือ การเปิดของรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนที่มีขนาดเล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ตัวทำปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้ามารอบผิวของอนุภาคและแพร่เข้าไปในรูพรุน ทำให้ถ่านมีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิก็นับปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์จะต่ำ ซึ่งเป็นผลทำให้ได้รูพรุนที่ต้องการช้า ส่วนที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าอัตราการแพร่ของตัวออกซิไดซ์เข้าไปในอนุภาค ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิวนอกของอนุภาคทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดรูพรุน

ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ หลังจากกระตุ้นจนได้ถ่านกัมมันต์แล้ว และยังสามารถนำไปใช้งานได้ทันที เพราะไม่มีปัญหาในเรื่องการล้างสารเคมีที่เหลือตกค้างที่อาจเป็นอันตราย แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นทางเคมี จึงทำให้เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน สำหรับขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

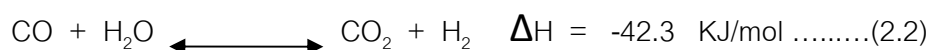
ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีในการกระตุ้นทางกายภาพ แสดงได้ดังต่อไปนี้

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นการแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์ โดยใช้ไอน้ำ ซึ่งการใช้ไอน้ำในที่นี้ หมายถึง การใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 2.1



นอกจากนี้ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์บางส่วนที่เกิดขึ้น ยังทำปฏิกิริยากับไอน้ำ (Exothermic water-gas formation reaction) เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบคู่ไปด้วย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 2.2



ในช่วงการกระตุ้นต่ำ จะมีการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเท่านั้น และเมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้มีรูพรุนเพิ่มขึ้น และรูพรุนขนาดต่างๆ มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีการกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution) กว้าง และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume) สูงขึ้น โดยทั่วไปเมื่อร้อยละน้ำหนักที่หายไปทั้งหมด (% weight loss) มีค่าสูงกว่าร้อยละ 50 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะไม่เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้น การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแก๊สซิฟิเคชัน โดยส่วนใหญ่เป็นการทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเท่านั้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (Jai Y.F., 1998) ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (r) สามารถเขียนแบบ Langmuir-Hinshelwood ได้ดังสมการที่ 2.3

$$r = \frac{K_1 P_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + K_2 P_{\text{H}_2\text{O}} + K_3 P_{\text{H}_2}} \dots\dots\dots (2.3)$$

โดยที่ $P_{\text{H}_2\text{O}}$ คือ ความดันย่อยของไอน้ำ

P_{H_2} คือ ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน

K_1, K_2 และ K_3 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

- การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งใช้อุณหภูมิประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นเดียวกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ดังสมการที่ 2.4



การแก๊สซิฟิเคชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ ดังนั้น จึงต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และขนาดโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใหญ่กว่าน้ำ ทำให้อัตราการแก๊สซิฟิเคชัน (Rate of gasification) ช้ากว่า โดยส่วนใหญ่รูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เป็นรูปพุนขนาดเล็กตลอดช่วงร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้น ซึ่งมีประมาณร้อยละ 70 ของปริมาณรูปพุนทั้งหมด และมากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ทำให้มีการกระจายขนาดรูปพุนน้อย นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีปริมาณรูปพุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ แต่มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงได้ ดังสมการที่ 2.5

$$r = \frac{K_1 P_{CO_2}}{1 + K_2 P_{CO} + K_3 P_{CO_2}} \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

โดยที่ P_{CO_2} คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

P_{CO} คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

K_1, K_2 และ K_3 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

การผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าส่วนใหญ่ใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้น เนื่องจากไอน้ำสามารถแพร่เข้าไปในรูปพุนได้ดีทำให้อัตราการก๊าซซิฟิเคชันเร็ว อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นต่ำกว่าการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารกระตุ้น อีกทั้งต้นทุนในการใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นยังต่ำกว่า

- การกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศ

การกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ที่เกิดขึ้นง่ายและเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7



ปฏิกิริยาทั้ง 2 เป็นแบบคายความร้อน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นด้วยอากาศที่มีก๊าซออกซิเจนปนอยู่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้นที่ผิวของถ่านชาร์เป็นจำนวนมาก แต่ในการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศมีการเผาไหม้เกิดขึ้น จึงทำให้ควบคุมปฏิกิริยายาก เพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในเตาให้คงที่ได้ จึงไม่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้น ทั้งนี้เพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก

- การกระตุ้นด้วยก๊าซไอเสีย

การกระตุ้นด้วยก๊าซไอเสีย เนื่องจากก๊าซไอเสียมีก๊าซต่างๆ ปนอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะก๊าซที่มีคุณสมบัติในการกระตุ้นถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจนที่เหลืออยู่และไอน้ำ การกระตุ้นด้วยก๊าซไอเสียนี้เป็นการนำเอาก๊าซที่ทิ้งไปกลับนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ ทำให้ประหยัดในแง่เศรษฐศาสตร์

2.6.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

วิธีการกระตุ้นทางเคมี เป็นการคาร์บอนในวัสดุถุดิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น (Activation agent) โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 500-900 องศาเซลเซียส ขึ้นกับวัสดุถุดิบและสารเคมีที่ใช้ โดยปกติแล้ววิธีการกระตุ้นทางเคมีมักใช้กับวัสดุถุดิบที่เป็นไม้ สารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารกระตุ้นโดยทั่วไปเป็นสารประเภทอัลคาไลน์ โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอนเนต สารประเภทเบสและกรดบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอนเนต (K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ซึ่งสารเคมีที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมีสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นเบส	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดบอริก (H_3BO_3)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca[OH]_2$)	เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)
กรดไนตริก (HNO_3)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)
กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)		โพแทสเซียมไธโอไซยาเนต (KSCN)
		แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3[PO_4]_2$)
		แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

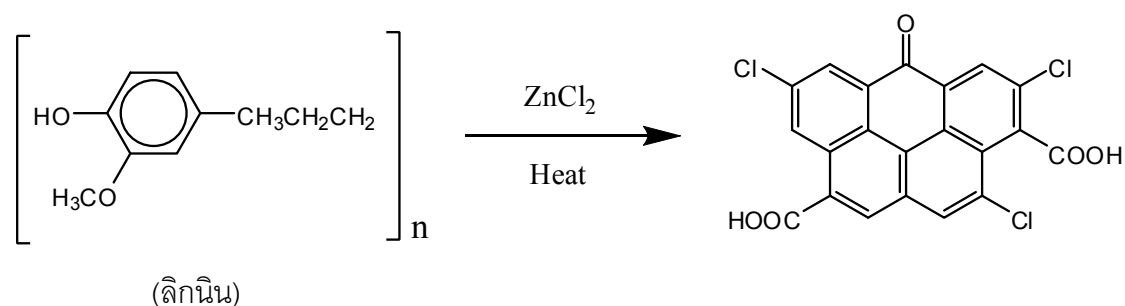
ที่มา: Yehaskel A. (1978)

ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยทั่วไปมักใช้สารเคมีดังต่อไปนี้

- การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

ในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสารเคมีประเภทสารดูดน้ำ (Dehydration agent) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ความหนาแน่น 2.91 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 136.28 มักอยู่ในรูปไฮเดรต โดยซิงค์คลอไรด์จะละลายได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น 0.5-1.0 นอร์มอล ถ้าเป็นสารละลายเข้มข้นจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน $[ZnCl_3]^-$ หรือ $[ZnCl_4]^{2-}$ สารละลายเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์จะมีความเป็นกรดสูง ซึ่งสามารถละลายแป้ง เซลลูโลส และสารอินทรีย์ต่างๆ ได้

ดังนั้น เมื่อนำวัตถุดิบที่เผาเป็นถ่านแล้วมาผสมกับสารละลายซิงค์คลอไรด์ โดยอัตราส่วนที่ใช้ คือ สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นประมาณ 0.5-4 ส่วน ต่อน้ำหนักของวัตถุดิบแห้ง 1 ส่วน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-900 องศาเซลเซียส สารละลายซิงค์คลอไรด์จะเป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ซึ่งแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน เมื่อใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น

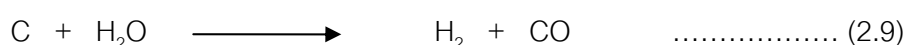
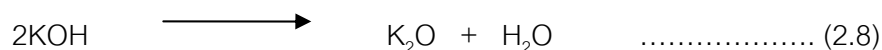
ที่มา: ปิยะพร บารมี (2542)

จากภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของลิกนินหลังจากกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จะมีหมู่ฟังก์ชันลันด์ที่เป็นกรด เช่น Cl และ COOH เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความว่องไวในการดูดซับมากยิ่งขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมักจะคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัด ประกอบกับปัญหาการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นในระยะหลังจึงลดลงบ้าง

- การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียม แล้วไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนเข้าไปโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในวัตถุดิบ กลไกของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูง ดังสมการ 2.8 และ 2.9



จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้คาร์บอนในถ่านเกิดปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชัน จากนั้น โพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจน หรือคาร์บอน กลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

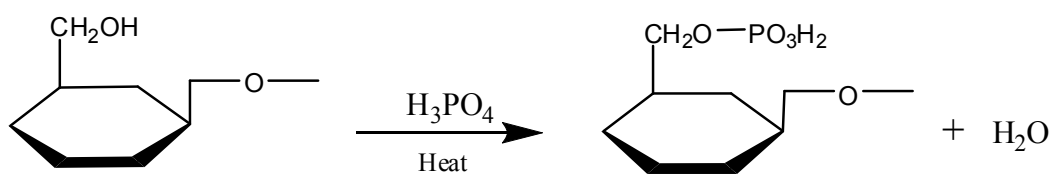


ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัว จึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ซึ่งทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Otowa T. et. al., 1993)

- การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

กรดฟอสฟอริก เป็นสารละลายกรดที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และเป็นสารที่มีความสามารถในการทำละลายสูง ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ค่อนข้างต่ำ คือ 400-500 องศาเซลเซียส โดยกรดที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ด้วยตัวเอง เกิดการกัดกร่อนขึ้น ทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น

จากการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่ม พบว่า การใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลนั้น ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดความเสถียร และองค์ประกอบของฟอสเฟตยังทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างหลังจากการให้ความร้อน แสดงปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.7



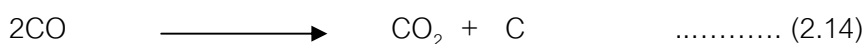
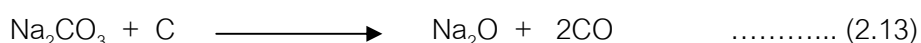
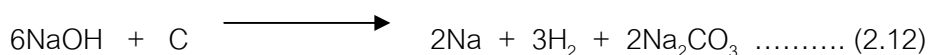
ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสกับกรดฟอสฟอริก

ที่มา: ณัฐยา พูนสุวรรณ (2545)

ข้อดีของการใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก คือ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นไม่สูงมากนัก และสามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยยังได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง

- การกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบสเข้มข้น เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำให้เป็นถ่านกัมมันต์มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ ก๊าซออกซิเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดในการกระตุ้นด้วยสารประกอบของโซเดียม แสดงในสมการที่ 2.12 - 2.14



สารเคมีแต่ละชนิดที่เติมลงไปจะช่วยกระตุ้นเพื่อทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบ และในขณะที่ทำการคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ และเกิดการเชื่อมไขว้กัน (Cross-link) ของโครงสร้างทำให้ถ่านเกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากติดการเชื่อมไขว้กันนี้ ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมไขว้กันประกอบด้วยสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกตัวอยู่ภายในทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก

วิธีการกระตุ้นทางเคมี สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

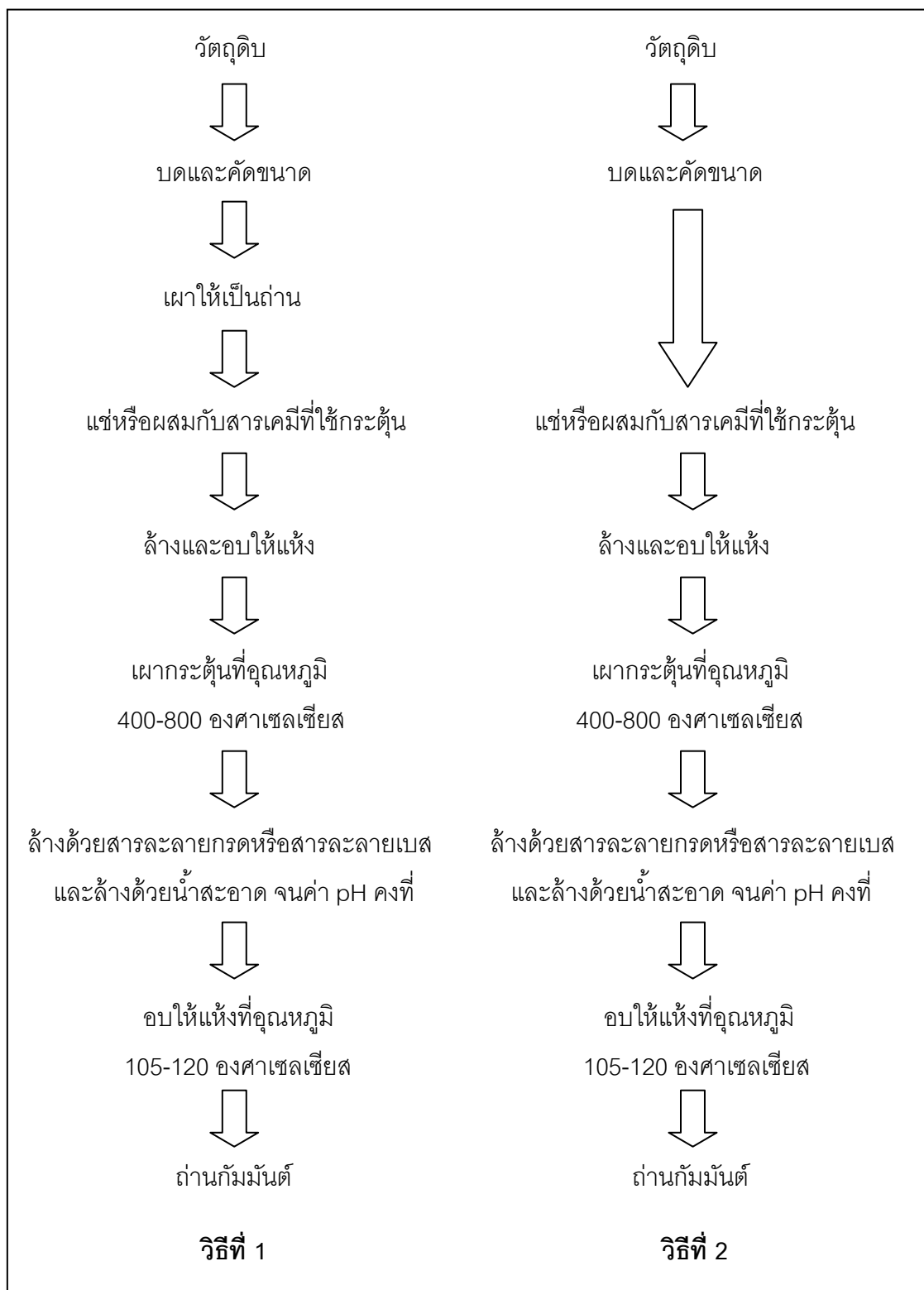
1) การนำวัตถุดิบมาทำการเผาในที่อับอากาศก่อนเพื่อให้วัตถุดิบเป็นถ่าน แล้วจึงนำไปแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น จากนั้นจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิสอีกครั้งหนึ่ง

2) เป็นการนำวัตถุดิบมาแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น แล้วจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิสควบคู่ไปกับการทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านในขั้นตอนเดียว

ซึ่งแสดงขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีได้ดังภาพที่ 2.8

การกระตุ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น และเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ชนิดของสารกระตุ้น รวมถึงวิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย

ข้อดีของวิธีนี้ คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก และผลผลิตที่ได้มากกว่าทางกายภาพ แต่มีข้อเสีย คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีก่อนที่จะนำไปใช้งาน รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน นอกจากนี้ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมก็ยังมีผลต่อการเลือกใช้ชนิดของกรดด้วยเช่นกัน โดยตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลา



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

2.7 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ในการวิเคราะห์สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์นั้นสามารถพิจารณาจากหลายสมบัติด้วยกันไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร และค่าพื้นที่ผิว เป็นต้น โดยในรายละเอียดการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์มีดังต่อไปนี้

2.7.1 ปริมาณร้อยละของเถ้า (%Ash)

ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์เป็นการหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนได้สูงและปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง และเวลาสูง ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการเกิดเถ้าทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากเถ้าจะอุดตันอยู่ในรูพรุน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีค่าเถ้าได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณเถ้าสูง วิธีการที่ใช้ในการกำจัดเถ้าออกจากถ่านกัมมันต์ คือ การนำไปล้างเอาเถ้าออกด้วยน้ำ หรือสารละลายกรด ซึ่งช่วยให้สามารถดูดซับสารได้ดีขึ้น

2.7.2 ปริมาณความชื้น (Moisture)

เป็นการหาปริมาณน้ำที่มีในถ่านกัมมันต์ โดยการอบให้แห้งในเตาอบ ทำการวิเคราะห์โดยบดถ่านกัมมันต์ชนิดผงปริมาณ 1-2 กรัม หรือชนิดเม็ด 5-10 กรัม แล้วนำไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) สามารถคำนวณปริมาณความชื้นได้จากน้ำหนักที่หายไป

2.7.3 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density)

เป็นการหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตร ปริมาตรในที่นี้เป็นปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาค คือ ช่องว่างระหว่างอนุภาค และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ค่านี้จึงขึ้นกับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีความหนาแน่นปรากฏ 0.3-0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นอยู่กับความชื้นของอนุภาคด้วย กล่าวคือ อนุภาคที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น และถ้าความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์สูง แสดงว่าเป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพดี

2.7.4 ความแข็งและความทนต่อการขัดถู (Hardness and Abrasion Number)

เป็นการบ่งบอกถึงความต้านทานการสึกกร่อน การทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง โดยค่านี้จะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งขึ้นอยู่กับการวัดคุณสมบัติและวิธีการกระตุ้น

2.7.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle Size Distribution)

จะพิจารณาที่ความละเอียดของผงถ่าน ยิ่งถ่านมีขนาดอนุภาคละเอียดมากก็จะยิ่งเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านมากขึ้น โดยจะมีผลให้โมเลกุลของก๊าซสามารถดูดซับเข้าไปในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ได้เร็วขึ้น และทำให้ความดันของก๊าซในระบบลดลงแต่ไม่มาก ดังนั้น ในอุตสาหกรรมจึงไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานมากมาย

2.7.6 พื้นที่ผิว (Surface Area)

การวัดพื้นที่ผิวจะใช้ไอโซเทอม (Isotherm) ของการดูดซับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และไอโซเทอมนี้จะมีรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับคงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับเพื่อสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งค่าจากไอโซเทอมของการดูดซับจะบอกถึง ค่าของพื้นที่ผิว ค่าของปริมาตรรูพรุน ทราบถึงลักษณะเคมีพื้นผิวของตัวดูดซับ ทราบข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ และทราบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์

ไอโซเทอมของการดูดซับสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด ตามระบบ IUPAC ซึ่งได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming and E. Teller (Rouquerol, Rouquerol และ Sing, 1999) หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT ดังภาพที่ 2.9

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่า แบบแลงเมียร์ (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 เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้

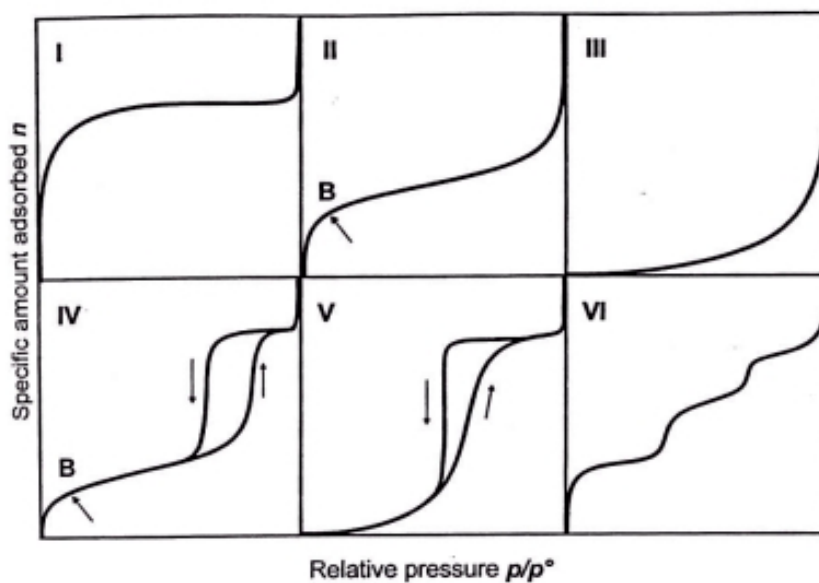
การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรงเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบบ่อยที่สุดในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรก ซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ เส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (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) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบบ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบบ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



ภาพที่ 2.9 ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับ

ที่มา: จาก Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Application (19), โดย F., Rouquerol, J., Rouquerol, Sing, 1999, London: Academic Press.

สมการไอโซเทอมการดูดซับ

สมการที่นิยมใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับสำหรับระบบของแข็ง-ก๊าซ ได้แก่

1) สมการ Langmuir ใช้สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ และแต่ละตำแหน่งของผิวการดูดซับมีลักษณะเหมือนกันหมด สมการ Langmuir แสดงดังสมการ 2.15

$$X = (X_m b C) / (1 + b C) \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

เมื่อ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว (mg/g หรือ mol/g)

X_m = ขีดจำกัดของการดูดติดผิว (mg/g หรือ mol/g)

C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลาย (mg/L หรือ mol/L)

b = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

เมื่อ X เข้าสู่อันันต์ และ C เข้าใกล้ค่าอนันต์ (infinity, ∞) จะเขียนสมการได้เป็น

$$C/X = (1/X_m) + (C/X_m) \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C/X กับ C จะได้กราฟเส้นตรง มีความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C)(1/bX_m) \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C$ จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน เท่ากับ $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$

2) สมการ BET (Brunauer Emmett Teller) เป็นการนำสมการ Langmuir มาประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้นในลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับ

$$X = (X_m b C) / (C_s - C)(1 + (b - 1)C/C_s) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

เมื่อ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (mg/g หรือ mol/g)

X_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ ที่ภาวะสมดุล (mg/g หรือ mol/g)

C = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (mg/L หรือ mol/L)

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับ ณ ทุกๆ ชั้น (mg/L หรือ mol/L)

B = ค่าคงที่ของการดูดซับ

จากสมการ 2.18 สามารถเขียนได้เป็น

$$C/X (C_s - C) = (1/X_m b) + ((b - 1) / X_m b)(C/C_s) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C/X (C_s - C)$ กับ (C/C_s) จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชัน เท่ากับ $(b - 1)/X_m b$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m b$

3) สมการ Freundlich ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้พลังงานของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้พลังงานการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของ สมการ Freundlich คือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีความดันสูงๆ ได้ไม่ดี รูปแบบสมการแสดงได้ดังนี้

$$X/m = KC^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

เมื่อ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิว (mg หรือ mol)

m = น้ำหนักของสารดูดติดผิว (g)

C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่ภาวะสมดุล (mg/L หรือ mol/L)

$K, 1/n$ = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.20 สามารถเขียนสมการในรูป Logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\text{Log}(X/m) = \text{log} K + 1/n \text{ log} C \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{log}(X/m)$ กับ $\text{log} C$ ได้กราฟเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน เท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\text{log} K$ ของ $\text{log}(X/m)$ ที่ $\text{log} C = 0$ ($C = 1$)

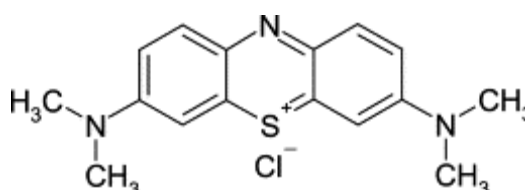
โดยสมการการดูดติดผิวแบบฟรอนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดติดผิว ถ้าค่า $1/n < 1$ แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี แต่ถ้าค่า $1/n > 1$ แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี และถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมมีความชันมาก แสดงว่าการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ และเกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงเมื่อนำไปใช้ในระบบสัมผัส (พระราชกร ใจประดับเพชร, 2549)

2.7.7 การดูดซับไอโอดีน (Iodine Number)

เป็นค่าที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการดูดซับไอโอดีนเป็นวิธีที่ง่ายในการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และถ่านสามารถดูดซับสารละลายไอโอดีนได้ดี โดยวัดน้ำหนักของไอโอดีนเป็นมิลลิกรัมต่อน้ำหนักถ่าน 1 กรัม ซึ่งตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Material (ASTM) ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุล เท่ากับ 0.02 นอร์มัล ซึ่งอาจมีค่าแตกต่างจาก 0.02 นอร์มัล โดยให้อยู่ในช่วง 0.007-0.03 นอร์มัล โดยสามารถควบคุมได้จากน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีควรใช้น้ำหนักในการวิเคราะห์ต่ำ ซึ่งในทางปฏิบัติต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนัก 3 ค่า เพื่อให้มีความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุลมากกว่า ไกล่เคียง และน้อยกว่า 0.02 นอร์มัล แล้วใช้วิธีเฉลี่ยแบบลอกาทิทึม ทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งในบางครั้งถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็กสูงค่าการดูดซับไอโอดีนอาจมีค่าต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของไอโอดีนไม่สามารถเข้าไปสู่อรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรได้

2.7.8 การดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue Number)

การดูดซับเมทิลีนบลูเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกับขนาดรูพรุนของโมเลกุลเมทิลีนบลู ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดกลาง คือ จะมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร โดยเป็นค่าที่สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด และโครงสร้างของโมเลกุลเมทิลีนบลูแสดงได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู

ที่มา: Juan และ Keqiang (2010)

2.7.9 โมลาสนัมเบอร์ (Molass Number)

เป็นค่าที่บอกปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ คือ รูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 2 นาโนเมตร โดยถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก ค่าการดูดซับโมลาสนัมเบอร์จะสูง ซึ่งสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โมเลกุลของสีได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งมีค่าการดูดซับโมลาสนัมเบอร์ที่ต่ำ

2.7.10 แทนนิน (Tannin)

เป็นสารผสมที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดใหญ่ และสารโมเลกุลขนาดกลาง คล้ายกับผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีทั้งรูพรุนขนาดใหญ่ และรูพรุนขนาดกลาง ดังนั้น ค่าแทนนินจึงเป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่ และขนาดกลางของถ่าน ซึ่งมีหน่วยเป็นพีพีเอ็ม (ppm : part per million คือ ส่วนในล้าน)

2.8 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีสมบัติในการดูดซับได้ดี และแต่งรสสารได้หลายชนิด จึงมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.8.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับก๊าซหรือไอ

- 1) ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหาร และที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- 2) ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
- 3) ใช้แยกเบนซีน (Benzene) ออกจากก๊าซอุตสาหกรรม
- 4) ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้ว เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และคายออกที่ความดันของไอต่ำๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
- 5) กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
- 6) กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ (Organic sulfur) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสิ่งเจือปนอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม
- 7) กำจัดกลิ่นในอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง
- 8) ใช้ดูดกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกรณ์นิวเคลียร์

2.8.2 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ขุ่นของเหลวบริสุทธิ์)

ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

- 1) ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อใช้ในการฟอกสี และทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- 2) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไขมันและน้ำมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร็อกไซด์ออกจากร้ำมันและไขมันด้วย
- 3) ใช้แยกสิ่งเจือปนจากอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจลาติน น้ำส้ม น้ำผลไม้ เพคติน ซ็อคโกแลต เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- 4) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ เป็นต้น ซึ่งมักจะใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัด รส และกลิ่นที่ไม่ต้องการออกจากวิสกี้ ใช้ถ่านกัมมันต์ทำให้ไวน์มีเกรดดี

ขึ้น ใช้ถ่านกัมมันต์เติมลงในเบียร์ เพื่อกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการแช่เย็น โดยถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ดูดซับตะกอนโปรตีนที่เอนไซม์ย่อยไม่ได้และยังใช้ถ่านกัมมันต์ในการเตรียมน้ำสะอาดเพื่อนำไปต้มเบียร์อีกด้วย

5) ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยาและเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สเตربتโตมัซซิน (Streptomycin) คาเฟอีน (Caffeine) โซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate) รวมทั้งกรดต่างๆ

6) ใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับคลอรีนและสารที่เป็นพิษอื่นๆ ที่ติดมากับน้ำประปาหรือน้ำบาดาล ซึ่งเป็นการกำจัดสี รส และกลิ่น

7) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือพาสารเร่งปฏิกิริยา เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst support) ใช้เป็นตัวพวยเมอร์คิวริกคลอไรด์ในอุตสาหกรรมผลิตไวนิลคลอไรด์จากอะเซทิลีนและกรดไฮโดรคลอริก ใช้เป็นตัวพวยทองคำขาว ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเจน ใช้เป็นตัวแยกสาร โดยการบรรจุถ่านกัมมันต์ลงในคอลัมน์ของเครื่องโครมาโตกราฟีแก๊ส ใช้ผสมในสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ใช้เป็นตัวกรองให้หน้ากากกันแก๊สพิษและไอพิษต่างๆ ใช้ในก้นกรองของบู่หรือบางชนิด ใช้ดูดควันหรือกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ตามห้องปรับอากาศ ตู้เย็น ตู้เสื้อผ้า

8) ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮโดรซิลอะมิโนฟีนิลาโซนิค แอซิด (Hydroxyl aminophenylarsonic acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบา และพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่กินยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีก๊าซมากในกระเพาะอาหารอีกด้วย

2.9 ลำไย



ภาพที่ 2.11 ลำไย

ชื่อเรียกพื้นบ้าน: บาลำไย

ชื่อสามัญ: Longan

ชื่อทางวิทยาศาสตร์: *Dimocarpus longan* Lour.

ชื่อทางพฤกษศาสตร์: *Nephelium*, Canb. หรือ
Euphorialongana, Lamk.

ชื่อวงศ์: Sapindaceae (Native)

ลำไยจัดเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย และเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจอันดับหนึ่งของภาคเหนือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน นอกจากนี้ก็ยังมี ลำปาง น่าน แพร่ เชียงราย และแม่ฮ่องสอน ซึ่งผลผลิตของลำไยสามารถส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศซึ่งประเทศที่มีการส่งออก ได้แก่ ฮองกง อินโดนีเซีย จีน สิงคโปร์ เกาหลีใต้ ไต้หวัน มาเลเซีย สหรัฐอเมริกา และฝรั่งเศส เป็นต้น โดยจะส่งออกไปจำหน่ายทั้งในรูปแบบของผลไม้สด ลำไยแช่แข็ง ลำไยอบแห้ง และในรูปแบบลำไยกระป๋อง ซึ่งทำรายได้ปีละหลายพันล้านบาท และมีแนวโน้มว่าจะมีการส่งออกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งลำไยอบแห้ง จนกระทั่งกระทรวงเกษตรและสหกรณ์และกระทรวงพาณิชย์ได้จัดให้ลำไยเป็นไม้ผลลดหย่อนภาษี จึงทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกและการผลิตอย่างต่อเนื่อง

2.9.1 ประวัติลำไย

ลำไยเป็นผลไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนของเอเชีย ซึ่งอาจมีถิ่นกำเนิดในประเทศศรีลังกา อินเดีย พม่า หรือจีน แต่ที่พบหลักฐานที่ปรากฏในวรรณคดีของจีนในสมัยพระเจ้าเซ็งแทงของจีน เมื่อ 1,766 ปีก่อนคริสตกาล และจากหนังสือ RuYa ของจีน เมื่อ 110 ปีก่อนคริสตกาล ได้มีการกล่าวถึงลำไยไว้แล้ว และต่อมาชาวยุโรปได้เดินทางไปยังประเทศจีน เมื่อปี พ.ศ. 1514 ก็ได้เขียนเรื่องราวเกี่ยวกับลำไยไว้ในปี พ.ศ. 1585 แสดงว่าลำไยมีการปลูกในประเทศจีนที่มณฑลกวางตุ้ง กวางสี เสฉวน ไต้หวัน และมีศูนย์กลางอยู่ที่มณฑลฟูเจี้ยน

ลำไยจากประเทศจีนนี้ได้มีการแพร่หลายเข้าไปสู่ในประเทศอินเดีย ศรีลังกา พม่า ฟิลิปปินส์ ยุโรป สหรัฐอเมริกา (มลรัฐฮาวายและฟลอริดา) คิวบา หมู่เกาะอินเดียตะวันตก และ

เกาะมาดากัสกา ในปลายพุทธศตวรรษที่ 25 ส่วนในประเทศไทยนั้นลำไยเริ่มแพร่หลายเข้ามาในประเทศไทยพร้อมๆ กับประเทศในเขตนี้นี้แต่ไม่ปรากฏหลักฐานที่แน่ชัด แต่หลักฐานที่พบเป็นต้นลำไยในสวนเก่าแก่ของ ร.อ.หลวงราญอริพล (เหรียญสรรพเสน) ที่ปลูกในตรอกจันทน์ถนนสาธุประดิษฐ์ใกล้วัดปวิาศในสมัยรัชกาลที่ 5 ซึ่งเป็นลำไยที่ขยายพันธุ์มาจากการเพาะเมล็ด แสดงว่าลำไยได้มีในประเทศไทยมาก่อนแล้ว นอกจากนี้ก็มีการพบลำไยตามป่าในจังหวัดเชียงใหม่ และที่จังหวัดเชียงราย มีลำไยพื้นเมืองซึ่งมีผลเล็กขึ้นอยู่ดาดำดิน และเรียกกันว่าลำไยธรรมชาติ ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาพันธุ์เมล็ดลำไยตามสภาพของภูมิภาค จนกระทั่ง พ.ศ. 2439 มีชาวจีนผู้หนึ่งนำกิ่งตอนลำไย 5 กิ่ง จากประเทศจีนมาถวายพระราชชายาเจ้าดารารัศมี พระชายาของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 5 พระราชชายาเจ้าดารารัศมีได้แบ่งลำไยเอาไว้ปลูกที่กรุงเทพฯ 2 กิ่ง ส่วนอีก 3 กิ่ง ได้มอบให้เจ้าน้อยต้น ณ เชียงใหม่ ผู้เป็นน้องชายนำไปปลูกที่เชียงใหม่ ณ บ้านน้ำทิ้ง ตำบลสบแม่ข่า อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ ต่อมาได้แพร่กระจายพันธุ์ไปยังจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดที่ใกล้เคียง จากนั้นก็ขยายพันธุ์สู่ภูมิภาคต่างๆ ในล้านนา ซึ่งในอดีตการขยายพันธุ์ลำไยทำโดยการเพาะเมล็ดจนเกิดการแปรพันธุ์ (Mutation) จึงทำให้มีการกลายพันธุ์เกิดขึ้น และเกิดพันธุ์ใหม่ตามสภาพคุณลักษณะที่ดีของภูมิภาคที่เหมาะสม และเกื้อกูลต่อการเจริญเติบโตของลำไย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจังหวัดลำพูนมีสภาพภูมิประเทศที่ดีในลุ่มแม่น้ำใหญ่หลายสาย จนเกิดลำไยต้นหมื่นที่บ้านหนองข้างคีน อำเภอเมืองลำพูน ซึ่งเก็บผลขายต้นเดียวได้ราคาเป็นหมื่น เมื่อปี พ.ศ. 1511 ผลิตผลต่อต้นได้ 40-50 เหว่ง การพัฒนาการของลำไยในภูมิภาคนี้โดยเฉพาะที่จังหวัดลำพูน ถ้านับจากการเสด็จกลับที่ล้านนาครั้งแรกของพระราชชายาเจ้าดารารัศมีเมื่อปี พ.ศ. 2457 จนถึงลำไยต้นหมื่นที่หนองข้างคีน เมื่อปี พ.ศ. 2511 ก็พัฒนามาร่วม 60 ปี และถ้านับมาถึงปัจจุบันก็มีการพัฒนาพันธุ์ร่วม 90 ปีแล้ว ซึ่งในขณะนี้มีลำไยมากมายหลายพันธุ์และมีการปลูกมากถึง 157,220 ไร่

2.9.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลำไยเป็นไม้ผลยืนต้นขนาดกลาง ทรงพุ่ม กว้างประมาณ 10 เมตรขึ้นไป และมีความสูงประมาณ 12-15 เมตร ลำไยเป็นไม้ผลที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในระดับอุณหภูมิ 10 ถึง 25 องศาเซลเซียส และมีปริมาณน้ำฝนปานกลาง คือ 1,000 ถึง 1,200 มิลลิเมตรต่อปี โดยลำไยเป็นไม้ผลที่ติดผลสลับปี (Alternate Bearing)

ลำต้น ลำไยเป็นพืชที่มีลำต้นสูงปานกลางจนถึงขนาดใหญ่ ต้นที่ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ดจะมีลำต้นตรง เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะมีความสูงประมาณ 10-15 เมตร และถ้าหากเป็นต้นที่ขยายพันธุ์ด้วยการตอนกิ่งจะแตกกิ่งก้านสาขาใกล้ๆ กับพื้น ทรงพุ่มต้นสวยงาม มีการแตก

กิ่งก้านสาขาดี แต่ถ้าได้รับการตัดแต่งกิ่งในขณะที่ยังเล็กมักแตกลำต้นเทียมหลายต้น ลำต้นที่เกิดขึ้นไม่ค่อยเหยียดตรงมักเอนหรือโค้งงอ และเนื้อไม้จะเปราะทำให้กิ่งหักง่ายกว่าต้นลินจี่ เปลือกของลำต้นขรุขระ มีสีเทาหรือสีเทาปนน้ำตาลแดงเป็นสะเก็ด

ใบ ใบลำไยเป็นใบรวมที่ประกอบด้วยใบย่อยอยู่บนก้านใบร่วมกัน (pinnately compound leaves) มีปลายใบเป็นคู่ มีใบย่อย 3-5 คู่ ความยาวใบ 20-30 เซนติเมตร ใบย่อยเรียงตัวสลับหรือเกือบตรงข้าม ความกว้างของใบย่อย 3-6 เซนติเมตร ยาว 7-15 เซนติเมตร รูปร่างใบเป็นรูปรีหรือรูปหอก ส่วนปลายใบและฐานใบค่อนข้างป้าน ใบด้านบนมีสีเขียวเข้มกว่าด้านล่าง ผิวด้านบนเรียบส่วนผิวด้านล่างสากเล็กน้อย ขอบใบเรียบไม่มีหยัก ใบเป็นคลื่นเล็กน้อยและเห็นใบเส้นแขนง (vein) แตกออกจากเส้นกลางใบชัดเจนและมีจำนวนมาก

ช่อดอก เกิดเป็นช่อ ส่วนมากเกิดจากตาที่ปลายยอด (terminal bud) บางครั้งอาจเกิดจากตาข้างของกิ่ง ความยาวของช่อดอกประมาณ 15-60 เซนติเมตร ช่อดอกขนาดกลางจะมีดอกย่อยประมาณ 3,000 ดอก



ภาพที่ 2.12 ลักษณะช่อดอกลำไย

ดอก ดอกลำไยมีสีขาวหรือสีขาวอมเหลืองมีขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6-8 มิลลิเมตร มีกลิ่นหอม ช่อดอกหนึ่งๆ อาจมี 3 ชนิด (polygamo-monoecious) คือ ดอกตัวผู้ (staminate flower) ดอกตัวเมีย (pistillate flower) และดอกสมบูรณ์เพศ (perfect flower) ลักษณะที่คล้ายคลึงกันของดอกทั้ง 3 ชนิด คือ มีกลีบเลี้ยงสีเขียวปนน้ำตาลหนาแข็ง 5 กลีบ และมีกลีบดอกบางสีขาว 5 กลีบ

- **ดอกตัวผู้ (staminate flower)** มีเกสรตัวผู้ 6-8 อัน เรียงเป็นชั้นเดียวอยู่บนจานรองดอก (disc) ซึ่งมีสีน้ำตาลอ่อนและมีลักษณะอู่ม้วน ก้านชูเกสรตัวผู้มีขน เกสรตัวผู้มีความ

ยาวสม่ำเสมอ คือ ยาวประมาณ 3-5 มิลลิเมตร อับเรณูมี 2 หยัก และเมื่อแตกจะแตกตามยาว (longitudinal dehiscence)

- **ดอกตัวเมีย (pistillate flower)** ประกอบด้วยรังไข่ที่มี 2 พู (bicarpellate) ตั้งอยู่บนจานรองดอกเป็นแบบรังไข่อยู่เหนือส่วนต่างๆ ของดอก (superior ovary) ด้านนอกของรังไข่มีขนปกคลุมอยู่ แต่ละพูจะมีเพียง 1 ช่อง (locule) เท่านั้นที่จะเจริญเติบโตและพัฒนาจนเป็นผล ส่วนอีกพูหนึ่งจะค่อยๆ ฝ่อไป ในบางกรณีอาจพบไขในพูทั้งสองเจริญเติบโตเป็นผลได้ เกสรตัวเมียอยู่ตรงกลางระหว่างพู ก้านชูเกสรตัวเมีย (style) ยาวประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ตรงปลายยอดเกสร (stigma) แยกออกเป็น 2 แฉก เห็นได้ชัดเมื่อดอกบานเต็มที่ เกสรตัวผู้มีประมาณ 8 อัน ก้านเกสรตัวผู้ (semi-sesile filament) มีความยาว 1 มิลลิเมตร อับเรณูของเกสรตัวผู้จะไม่แตกและไม่มีการงอก แต่จะค่อยๆ แห้งตายไปหลังดอกบาน

- **ดอกสมบูรณ์เพศ (perfect flower)** มีทั้งเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ในดอกเดียวกัน รังไข่ของเป็นกระเปาะค่อนข้างกลม ขนาดเล็กกว่ารังไข่ของดอกตัวเมีย ยอดเกสรตัวเมียจะสั้นกว่าและตรงปลายจะแยกออกเพียงเล็กน้อยเมื่อดอกบาน ก้านชูอับละอองเกสรของดอกสมบูรณ์เพศจะมีความยาวไม่สม่ำเสมอ มีความยาวอยู่ระหว่าง 1.5-3.0 มิลลิเมตร ดอกสมบูรณ์เพศสามารถติดผลได้เช่นเดียวกับดอกตัวเมีย โดยปกติแล้วจะพบดอกสมบูรณ์เพศน้อยอาจพบเพียง 1-2 ดอกต่อช่อ

ผล มีผลทรงกลมเบี้ยว มีเปลือกสีน้ำตาลปนเหลืองปนเขียว ผลสุกมีเปลือกสีเหลืองหรือสีน้ำตาลอมแดง ผิวเปลือกเรียบหรือเกือบเรียบ มีตุ่มแบนๆ ปกคลุมที่ผิวเปลือกด้านนอก เนื้อลำไยเป็นเนื้อเยื่อพาเรนไคมาที่เจริญล้อมรอบเมล็ด (outer integument) และอยู่ระหว่างเปลือกกับเมล็ด ซึ่งมีสีขาวคล้ายวุ้น มีสีขาวขุ่น ใส หรือสีชมพูเรื่อๆ มีกลิ่นหอม รสหวาน แตกต่างกันไปตามพันธุ์

เมล็ด มีลักษณะกลมจนถึงแบน เมื่อยังไม่แก่มีสีขาวแล้วค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีดำมัน ส่วนของเมล็ดที่ติดกับขั้วผล มีลักษณะเป็นวงกลมสีขาวอยู่บนเมล็ด (placenta) คล้ายตามังกร (dragon's eye) วงสีขาวจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ต่างกันไปตามพันธุ์ เมื่อผลแก่จัดแต่ถ้ายังไม่เก็บเกี่ยว placenta จะใหญ่ขึ้น เนื่องจากดูดอาหารขึ้นไปเลี้ยงเมล็ด ทำให้เนื้อเยื่อมีรสชาติจืดลง

2.9.3 พันธุ์ลำไย

ลำไยปลูกในหลายประเทศที่สำคัญ คือ ประเทศจีน มีการปลูกลำไยถึง 26 พันธุ์ คือ พันธุ์ที่ปลูกในมณฑลกวางตุ้ง 12 สายพันธุ์ ปลูกในประเทศไต้หวันอีก 15 สายพันธุ์ ปลูกในสหรัฐอเมริกา 1 สายพันธุ์ คือ พันธุ์โคฮาลา ส่วนพันธุ์ลำไยในประเทศไทย จำแนกออกตามลักษณะ ผล เนื้อ เมล็ด และรสชาติ แบ่งได้ดังนี้

1) พันธุ์ดอหรืออีดอ เป็นลำไยพันธุ์เบา คือ ออกดอกและเก็บผลก่อนพันธุ์อื่น โดยส่วนใหญ่ชาวสวนนิยมปลูกมากที่สุดเพราะเก็บเกี่ยวได้ก่อน และเป็นพันธุ์ที่เจริญเติบโตดี โดยเฉพาะในดินอุดมสมบูรณ์ และมีน้ำพอเพียง ทนแล้งและทนน้ำได้ดีปานกลาง พันธุ์ดอแบ่งตามสีของยอดอ่อนได้เป็น 2 ชนิด คือ

- อีดอยอดแดง เจริญเติบโตเร็วมาก ลำต้นแข็งแรง ไม่ฉีกหักได้ง่าย เปลือกลำต้นมีสีน้ำตาลปนแดง ใบอ่อนมีสีแดง แต่ปัจจุบันอีดอยอดแดงไม่ค่อยนิยมปลูก เนื่องจากออกดอกติดผลไม่ดี และเมื่อผลเริ่มสุกถ้าเก็บไม่ทันผลจะร่วงเสียหายมาก

- อีดอยอดเขียว มีลักษณะต้นคล้ายอีดอยอดแดงแต่ใบอ่อนเป็นสีเขียว ออกดอกติดผลง่ายแต่อาจไม่สม่ำเสมอ

นอกจากนี้ลำไยพันธุ์อีดอยังแบ่งตามลักษณะของก้านช่อผลได้เป็น 2 ชนิด คือ

- อีดอก้านอ่อน มีก้านช่อผลอ่อน เปลือกของผลจะบาง

- อีดอก้านแข็ง ก้านช่อผลจะแข็ง เปลือกผลจะหนา ขนาดผลค่อนข้างใหญ่

2) พันธุ์ชมพู เป็นลำไยพันธุ์กลาง เป็นพันธุ์ที่มีรสชาติดีมากที่สุด นิยมรับประทานในประเทศ พุ่มต้นสูงโปร่ง กิ่งเปราะหักง่าย การเจริญเติบโตดี ไม่ทนแล้ง เกิดดอกติดผลง่ายปานกลาง การติดผลไม่สม่ำเสมอ มีเปลือกหนา แข็งและเปราะ ช่อผลยาว ผลมีขนาดใหญ่ เนื้อหนา นุ่มและกรอบ เนื้อมีสีชมพูเรื่อๆ ยิ่งผลแก่จัดสีของเนื้อยิ่งเข้ม เมล็ดค่อนข้างเล็ก

3) พันธุ์ตลับนาค ผลมีขนาดใหญ่ค่อนข้างกลม ผิวเปลือกเรียบ มีเปลือกบาง มีเนื้อหนาสีขาวใส เมล็ดเล็ก รสไม่ค่อยหวานจัด

4) พันธุ์เปี้ยวเขียว เป็นลำไยพันธุ์หนักที่เก็บผลผลิตได้ช้ากว่าพันธุ์อื่นๆ เจริญเติบโตได้ดี ทนแล้งได้ดี แต่มักอ่อนแอต่อโรคพุ่มไม้กว่าด มักออกดอกเว้นปี ช่อผลหลวม ผลขนาดเล็กจะมีสีเขียว เปลือกหนาและเหนียว เนื้อหนาแห้งกรอบ สีขาว มีรสหวาน กลิ่นหอม เมล็ดค่อนข้างเล็ก ลำไยพันธุ์เปี้ยวเขียวแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- เบี้ยวเขียวก้านแข็งหรือเบี้ยวเขียวปาเส้า ให้ผลไม่ตก แต่ขนาดผลใหญ่มาก ติดผลน้อย อ่อนแอต่อโรคพุ่มไม้กวาด ไม่ค่อยนิยมปลูก

- เบี้ยวเขียวก้านอ่อนหรือเบี้ยวเขียวเซียงใหม่ ให้ผลตกเป็นพวงใหญ่

5) พันธุ์แดงหรืออีแดงกลม เป็นลำไยพันธุ์กลาง ลักษณะเฉพาะของพันธุ์นี้ คือ ผลกลม เนื้อมีกลิ่นคาวคล้ายกำมะถัน ทำให้คุณภาพของผลไม่ค่อยดี การเจริญเติบโตปานกลาง ไม่ทนแล้งและไม่ทนน้ำขังจึงล้มง่าย มักยืนต้นตายเมื่อเกิดสภาพน้ำขัง ในระยะออกดอก ใบที่อยู่บริเวณใกล้กับช่อดอกมักจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ผลมีขนาดใหญ่ปานกลาง ขนาดผลค่อนข้างสม่ำเสมอ มีผิวสีน้ำตาลอมแดง ผิวเรียบ เปลือกบาง เนื้อหนาปานกลาง เมล็ดรูปทรงป้อม วงขาวบนเมล็ด (placenta) มีขนาดใหญ่มาก

6) พันธุ์ใบดำหรืออีดำหรือกะโหลกใบดำ เป็นลำไยพันธุ์กลาง ลักษณะเด่นของลำไยพันธุ์นี้คือ ออกดอกติดผลสม่ำเสมอ เจริญเติบโตได้ดีมาก ทนแล้งและน้ำได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ผลมีขนาดเล็กกว่าพันธุ์อื่นๆ ทั้งนี้เพราะติดผลดกมาก และเมื่อผลแก่จัดมักมีเชื้อราเจริญปกคลุมผิวเปลือกทำให้ผลมีสีคล้ำไม่น่าดู ปัจจุบันความนิยมพันธุ์นี้ลดลงอาจเนื่องมาจากคุณภาพไม่ค่อยดี จึงจำหน่ายได้ในราคาต่ำ แต่พันธุ์นี้ยังเป็นพันธุ์ที่น่าสนใจสำหรับปรับปรุงพันธุ์ เนื่องจากออกดอกติดผลดี ผลมีขนาดใหญ่ปานกลาง ค่อนข้างกลมแบนและเบี้ยวเล็กน้อย มีผิวสีน้ำตาลคล้ำ ขรุขระเปลือกหนาและเหนียว เนื้อหนาปานกลาง มีรสหวาน เมล็ดมีขนาดเล็กรูปร่างค่อนข้างยาว

7) พันธุ์แห้วหรืออีแห้ว เป็นลำไยพันธุ์หนัก ลำต้นไม่ค่อยแข็งแรง กิ่งเปราะหักง่าย เปลือกลำต้นมีสีน้ำตาลปนแดงเขียว เป็นพันธุ์ที่เจริญเติบโตได้ดีมาก ทนแล้งได้ดี พันธุ์แห้วแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- แห้วยอดแดง มีใบอ่อนและยอดเป็นสีแดง ออกดอกง่าย มีเนื้อสีค่อนข้างชุนน้อยกว่าแห้วยอดเขียว นิยมปลูกกันมากกว่าแห้วยอดเขียว

- แห้วยอดเขียว มีใบอ่อนและยอดเป็นสีเขียว เกิดดอกและติดผลค่อนข้างยาก ซึ่งอาจให้ผลเว้นปี ช่อดอกจะสั้น ขนาดผลในช่อมักไม่สม่ำเสมอ ผลมีขนาดใหญ่ถึงปานกลาง ฐานผลป้อม มีผิวสีน้ำตาล มีกระสีคล้ำตลอดผล เมื่อจับจะรู้สึกสากมือ มีเปลือกหนามาก จะมีเนื้อหนาแน่น แห้งและกรอบ สีขาวชุน มีรสหวาน กลิ่นหอม และเมล็ดมีขนาดค่อนข้างเล็ก

8) พันธุ์อีเหลืองหรือเหลือง มีทรงพุ่มค่อนข้างกลม ออกผลดก กิ่งเปราะหักง่าย เมื่อมีผลดกมากๆ ผลค่อนข้างกลม มีเนื้อสีขาวนวล ผลทรงค่อนข้างกลมและเบี้ยวเล็กน้อย ผิวสีน้ำตาลมีกระสีน้ำตาล มีเนื้อหนา สีขาวครีม รสหวาน เมล็ดมีขนาดปานกลาง รูปทรงกลมแบน

9) พันธุ์เพชรสาครกจัดว่าเป็นลำไยพันธุ์ทะวาย คือ สามารถออกดอกและให้ผลผลิตปีละ 2 รุ่น คือ รุ่นแรกออกดอกราวเดือนธันวาคมถึงมกราคม และเก็บผลได้ประมาณเดือน พฤษภาคมถึงมิถุนายน รุ่นที่สองออกดอกราวเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม เก็บเกี่ยวผลได้ในเดือน ธันวาคมถึงมกราคม ลักษณะของลำไยพันธุ์นี้มีใบขนาดเล็ก ผลกลม เปลือกบาง เนื้อมีสีขาวฉ่ำน้ำ มีกลิ่นคาว

10) พันธุ์ปุม่าตีนโค้ง มีผลสวยงาม มีขนาดใหญ่มีสีเขียวให้ผลดก แต่คุณภาพและรสชาติไม่ค่อยดี มีกลิ่นคาว นอกจากนี้ยังเป็นพันธุ์ที่อ่อนแอต่อโรคพุ่มไม้กวาด ปัจจุบันจำนวนต้นของพันธุ์นี้ลดลงเป็นอย่างมาก คงมีแต่ในสวนเก่าๆ ซึ่งมีเหลือเพียงไม่กี่ต้นเท่านั้น

2.9.4 การขยายพันธุ์ลำไย

วิธีการขยายพันธุ์ลำไยที่นิยมมากที่สุดในประเทศไทย คือ การตอนกิ่ง เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและได้ตรงตามพันธุ์ แต่มีข้อเสียคือ ต้นไม่มีรากแก้วจึงมักโค่นล้มเมื่อมีลมพายุ สำหรับการขยายพันธุ์ลำไยในต่างประเทศ เช่น สาธารณรัฐประชาชนจีน และเวียดนาม นิยมขยายพันธุ์ลำไยโดยวิธีการต่อกิ่ง การขยายพันธุ์ลำไยนอกเหนือจากการตอนและต่อกิ่งแล้ว ลำไยยังสามารถขยายพันธุ์โดยวิธีอื่น เช่น การตัดชำ และการทาบกิ่ง

1) การขยายพันธุ์โดยการตัดชำ การตัดชำลำไยเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว และขยายพันธุ์ได้ในปริมาณที่มาก การเลือกกิ่งตัดชำ ควรเลือกกิ่งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5-1.0 เซนติเมตร ความยาวประมาณ 25 เซนติเมตร และมีใบติดประมาณ 2-3 ใบ รวมนำกิ่งดังกล่าวมาปักชำในกระบะหรือถุงพลาสติกที่บรรจุขี้เถ้าแกลบ รดน้ำให้ชื้น จากนั้นนำกิ่งที่ชำเสร็จไปใส่ในถุงพลาสติกใสขนาดใหญ่แล้วเก็บไว้ในร่มให้มีแสงแดดผ่านได้ประมาณ 25% ทิ้งไว้ประมาณ 2 เดือน กิ่งตัดชำจะเริ่มออกราก เมื่อรากเดินเต็มถุงจะสังเกตจากรากที่โผล่ออกจากข้างถุงจึงค่อยย้ายลงชำในถุงอีกครั้งหนึ่ง

2) การขยายพันธุ์โดยการตอนกิ่ง เป็นวิธีขยายพันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากการตอนกิ่งเป็นวิธีที่ง่าย ต้นที่ได้ไม่กลายพันธุ์ เทคนิคและขั้นตอนในการปฏิบัติมีดังนี้

- เลือกต้นพันธุ์ที่ออกดอกติดผลดี ปราศจากโรค โดยเฉพาะโรคพุ่มไม้กวาด

- เลือกกิ่งที่ตั้งตรง แต่ถ้าเป็นกิ่งนอนก็ใช้ได้ แต่การเกิดรากจะเกิดเฉพาะ

ด้านล่าง ขนาดความยาวของกิ่งประมาณ 75-100 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของกิ่ง 1.5-2.0 เซนติเมตร

- ใช้มีดควั่นกิ่ง 2 รอย ห่างกันประมาณ 1 นิ้ว หรืออาจควั่นรอยเดียวจากนั้นใช้คีมปากจิ้งจกคีบแล้วบิดรอยที่ควั่น โดยไม่จำเป็นต้องใช้มีดกรีดลอกเปลือกออก ส่วนของเนื้อเยื่อเจริญจะถูกขจัดสูญหายไปด้วย

- หุ้มรอยควั่นที่ลอกเปลือกแล้วด้วยดินเหนียวและกาบมะพร้าว หลังจากนั้นจึงหุ้มด้วยผ้าพลาสติก มัดกระเปาะหุ้มท้ายด้วยเชือกฟางหรือตอกหรือหุ้มด้วยขุยมะพร้าวชั้นที่อัดในถุงขนาด 4x6 นิ้ว จากนั้นใช้มีดผ่ากลางถุง และหุ้มรอยควั่นประมาณ 30 วัน รากจะเริ่มงอกเมื่อเห็นรากมีสีขาวและมีปริมาณมากจึงค่อยตัดมาชำ

3) การขยายพันธุ์โดยการต่อกิ่ง ปัจจุบันชาวสวนปลูกลำไยด้วยกิ่งตอน จึงทำให้เกิดปัญหาในการโค่นล้ม เนื่องจากลมพายุ ทั้งนี้เนื่องจากระบบรากของลำไยที่ได้จากการตอนกิ่งเป็นระบบรากพิเศษ เจริญแผ่กว้างไปในแนวนอน และจากการสังเกตรากของลำไยจะมีน้อยประกอบกับลำไยมีทรงพุ่มทึบและกว้างในปีที่ลำไยติดผลมากๆ การปลูกลำไยด้วยกิ่งพันธุ์ที่ขยายพันธุ์โดยการต่อกิ่ง จึงใช้ต้นตอที่มีระบบรากแก้วสามารถหยั่งลึกลงไปดิน นอกจากนี้ การต่อกิ่งยังมีประโยชน์ในด้านการศึกษาถึงอิทธิพลของต้นตอที่มีต่อกิ่งพันธุ์ดี เช่น อาจมีผลต่อขนาดของทรงพุ่ม และคุณภาพของผลลำไย การขยายพันธุ์โดยวิธีการต่อกิ่งจึงจะต้องมีการเตรียมต้นตอและวิธีการขยายพันธุ์ที่ดี

2.9.5 สรรพคุณและประโยชน์ของลำไย

ลำไยเป็นผลไม้ที่ให้พลังงานแก่ผู้บริโภคสูง เนื่องจากมีน้ำตาลอยู่มาก นอกจากนี้เนื้อของลำไยยังมีน้ำตาลอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ กลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส และมีกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดกลูโคนิก กรดมาลิก กรดซิตริก ฯลฯ รวมทั้งมีกรดอะมิโนอีก 9 ชนิด ส่วนเนื้อลำไยแห้งยังประกอบด้วยเกลือแร่ที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส เป็นต้น และเนื้อผลลำไยสด 100 กรัม จะให้คุณค่าทางอาหารต่างๆ รวมทั้งแร่ธาตุที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ซึ่งในทางการแพทย์แผนโบราณจีนจะใช้ลำไยแห้งเป็นยา ซึ่งมีคุณสมบัติบำรุงหัวใจ บำรุงเลือด บำรุงประสาท ช่วยย่อยและเป็นอาหารบำรุงกำลัง จึงเหมาะสำหรับผู้ที่ร่างกายอ่อนแอ นอกจากนี้ส่วนอื่นๆ ของลำไยก็สามารถนำมาเป็นประโยชน์ได้ เช่น

เปลือก เปลือกของต้นลำไยมีสีน้ำตาลอ่อนหรือเทา และมีรสฝาด ซึ่งจะใช้ต้มเป็นยาหม้อแก้ท้องร่วง

ลำต้น ลำต้นจะมีขนาดใหญ่ สูงประมาณ 30-40 ฟุต เนื้อไม้มีสีแดงและแข็งสามารถนำไปใช้ทำเครื่องใช้ในการประดับหรือตกแต่งบ้านได้

ผล ผลลำไยมีเปลือกสีน้ำตาลอมเขียว ภายในมีเนื้อขาวอมชมพู ขาวอมเหลือง ซึ่งแล้วแต่สายพันธุ์ของเนื้อลำไย เพราะฉะนั้นจึงสามารถนำมาบริโภคสด บรรจุกระป๋อง หรือตากแห้ง และยังสามารถทำเป็นชาชงใช้ดื่มเป็นยาบำรุงกำลัง จะช่วยให้หลับสบายและเจริญอาหาร นอกจากนี้ยังเป็นยาบำรุงในคนที่เป็โรคประสาทอ่อนๆ นอนไม่หลับ ถ้ารับประทานขนาด 10-15 กรัม จะช่วยบำรุงม้าม และบำรุงหัวใจ

ใบ ใบของลำไยจะใช้ต้มน้ำกินแก้โรคมาลาเรีย โรคริดสีดวงทวาร และใช้หัดได้

ดอก มักจะนำดอกมาใช้แก้รักษาโรคหนองต่างๆ

เมล็ด เมล็ดตากแห้ง นำมาบดเป็นผงจะใช้ทาภายนอก แก้กลากเกลื้อน แผลฝีหนอง คนจีนจะนิยมนำมาใช้สระผมเนื่องจากมีสารซาโนนิน และยังใช้ห้ามเลือดเนื่องจากมีรสฝาด

รากสด นำรากสดมาต้มน้ำตาลกรวด แล้วดื่มแต่น้ำ จะช่วยรักษาแก้ไข้ใน

รากแห้ง นำรากแห้งมาต้มน้ำ จะช่วยรักษาแก้อาการวิงเวียนศีรษะ อ่อนเพลีย แก้อาการตกขาว และยังช่วยขับพยาธิเส้นด้าย

2.10 โครเมียม (Chromium)

2.10.1 ประวัติการค้นพบธาตุโครเมียม

ธาตุโครเมียมถูกค้นพบโดย Vauquelin ในปี ค.ศ. 1797 ในแร่ crocoite (PbCrO_4) ซึ่งพบจากไซปรีเรีย มีลักษณะเป็นแร่ตะกั่วมีสีแดง ในปีต่อมา Vauquelin สามารถสกัดโครเมียมจาก Cr_2O_3 โดยวิธีดิวซ์ Cr_2O_3 ด้วยผงถ่าน ต่อมาในปี ค.ศ. 1893 Moissan สกัด Cr ได้เช่นกัน โดยวิธีดิวซ์ Cr_2O_3 ด้วยถ่านหินในเตาไฟฟ้า และในปี ค.ศ. 1898 Goldschmidt สกัด Cr อีกรูปจากคาร์บอนเจือปน โดยนำ Cr_2O_3 มารีดิวซ์ด้วย Al และเริ่มมีการใช้แร่ของโครเมียมในอุตสาหกรรมประมาณปี ค.ศ. 1800 โดยนำมาผลิตเคมีภัณฑ์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมหนังสัตว์และสี



ภาพที่ 2.13 โครเมียม (Chromium)

2.10.2 ลักษณะและคุณสมบัติของโครเมียม

โครเมียมมีสัญลักษณ์ธาตุ คือ Cr เป็นธาตุทรานซิชันในหมู่ VIB ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม เท่ากับ 24 น้ำหนักอะตอม เท่ากับ 51.996 มีความหนาแน่น เท่ากับ 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,890 องศาเซลเซียส

โครเมียมเป็นโลหะสีขาวเงิน มีลักษณะเป็นมันวาว มีความแข็งแรง คงความเป็นมันเงาได้นานในอากาศ มีความฝืดต่ำ และทนต่อการผุกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิม สามารถทำปฏิกิริยากับธาตุต่างๆ ได้จำนวนมาก เช่น C, N₂, H₂, S, I₂, F₂ เป็นต้น และโครเมียมในสารประกอบมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +6 จึงมักนำมาผสมหรือชุบโลหะอื่นๆ และยังเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี โดยปกติโครเมียมจะไม่พบอยู่ในรูปของโลหะอิสระตามธรรมชาติ

2.10.3 การนำไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากโครเมียมมีคุณสมบัติเด่น คือ มีจุดหลอมเหลวสูง และทนต่อความร้อนได้ดี จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยโลหะโครเมียมบริสุทธิ์จะนิยมนำไปใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ส่วนสารประกอบของโครเมียมจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมฟอกหนัง การย้อมสีขนสัตว์ ผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าประโยชน์ของโครเมียมและสารประกอบของโครเมียมมีประโยชน์มากมาย เช่น

- 1) ใช้เคลือบผิวโลหะ พลาสติกต่างๆ เช่น เหล็กและเหล็กกล้า เพื่อป้องกันการผุกร่อนของโลหะเหล่านั้น โดยกระบวนการเคลือบหรือชุบด้วยไฟฟ้า เรียกว่า electroplating ซึ่งเป็นการทำให้ได้ผิวโลหะที่เป็นมันวาว และไม่ผุกร่อน
- 2) ใช้เป็นส่วนประกอบของเหล็กกล้าสำหรับทำตู้নিরภัย เครื่องยนต์กลไก เกวาระกันกระสุน เครื่องบินไอพ่นและจรวด เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน และเหนียว ถ้ามีโครเมียม 10% ใน Fe จะได้เหล็กปลอดสนิม ซึ่งจะมีสมบัติทนต่อสารเคมีชนิดต่างๆ ได้เป็นอย่างดี
- 3) เป็นโลหะเจือโคบอลต์กับโครเมียมใช้ทำกระดุกเทียม เนื่องจากมีความแข็งแรงมากและมีปฏิกิริยาต่อร่างกายน้อย
- 4) สารประกอบหลายชนิดของโครเมียมใช้ทำรงควัตถุ
- 5) ใช้ในงานวิจัยทางนิวเคลียร์และปฏิกิริยาที่เกิด ณ อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้โครเมียมและสารประกอบโครเมียมจะมีหลายกลุ่ม โดยแบ่งตามเลขออกซิเดชัน ได้แก่ เลขออกซิเดชัน 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ซึ่งกลุ่มเลขออกซิเดชัน 3 (trivalent chromium : Cr III) และกลุ่มเลขออกซิเดชัน 6 (hexavalent chromium : Cr IV) จะเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญ ทั้งในด้านการนำไปใช้ประโยชน์และผลกระทบต่อสุขภาพของคน ซึ่งโครเมียมสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามคุณสมบัติทางเคมีได้เป็น

1) Chromium metal และ Alloy กลุ่มนี้จะรวมไปถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และ Chromium containing-alloy ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

2) Divalent Chromium Compound (Cr^{2+}) หรือ Chromous Compounds ได้แก่ Chromous Chloride (CrCl_2) และ Chromous Sulfate (CrSO_4) กลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษน้อย

3) Trivalent Chromium Compound (Cr^{3+}) หรือ Chromic Compound เป็นที่ทราบกันว่า Trivalent Chromium เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในขบวนการ glucose metabolism ส่วนสารประกอบอื่นๆ ที่พบในกลุ่มนี้ ได้แก่ Chromic Oxide (Cr_2O_3), Chromic Sulfate ($\text{Cr}_2[\text{SO}_4]_3$), Chromic Chloride (CrCl_3), Chromic Potassium Sulfate ($\text{KCr}[\text{SO}_4]_2$) และ Chromite Ore (FeOCr_2O_3)

4) Hexavalent Chromium Compound (Cr^{6+}) เป็นสารที่เป็นพิษและก่อมะเร็งซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

4.1) กลุ่มที่ละลายน้ำได้ (Water-soluble Hexavalent Compounds) ได้แก่ Chromic acid, Anhydride of Chromic acid, Monochromate, Dichromate of Sodium, Potassium, Ammonium, Cesium, Rubidium และ Lithium เป็นต้น

4.2) กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (Water-insoluble Hexavalent Compounds) ได้แก่ Zinc Chromate, Calcium Chromate, Lead Chromate, Barium Chromate, Strontium Chromate และ Sintered Chromium Trioxide เป็นต้น

มีรายงานการศึกษาว่าในคนทั่วไปจะได้รับโครเมียมในรูปแบบ trivalent จากอาหารที่บริโภคเป็นประจำวันละ 50-200 ไมโครกรัม และ 3-5% ของอาหารที่บริโภค โดยจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ส่วน hexavalent chromium จะถูกดูดซึมจากระบบทางเดินอาหารได้ดีกว่า trivalent ถึง 3-5 เท่า (Ramathibodi Poison Center, 2001)

2.10.4 อันตรายของโครเมียม

โครเมียมและสารประกอบโครเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจและการซึมผ่านทางผิวหนัง ในกรณีที่ร่างกายได้รับโครเมียมในปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ร่างกายจะรับได้ จะส่งผลทำให้เกิดภาวะพิษโครเมียม ทั้งในลักษณะการเกิดพิษแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง

1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute Toxicity) มักพบในกรณีที่ได้รับการกิน Hexavalent Chromium เช่น Chromic acid จะทำให้เกิดกระเพาะและลำไส้อักเสบแบบเฉียบพลันร่วมกับมีอาการอาเจียนออกมาเป็นเลือด ทำให้เกิดมะเร็งที่ตับ มะเร็งในระบบทางเดินอาหาร และภาวะไตวายได้ นอกจากนี้ในรายที่กิน Hexavalent Chromium ในปริมาณมากๆ จะทำให้มีอาการวิงเวียน ปวดท้อง และถ่ายเป็นเลือด ในรายที่รุนแรงอาจพบความผิดปกติเหล่านี้ร่วมด้วย เช่น hepatorenal syndrome, severe coagulopathy และ intravascular hemolysis และอาจเสียชีวิตได้ ซึ่งปริมาณที่ทำให้เสียชีวิตได้ในผู้ใหญ่ คือ 1-3 กรัม

2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic Toxicity) มักพบในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมเป็นเวลานานๆ ได้แก่

- ความเป็นพิษต่อผิวหนังและเยื่อเมือก มักมีสาเหตุจากการสัมผัส Hexavalent Chromium เป็นระยะเวลานานๆ จะเกิดแผลบริเวณผิวหนังที่ต้องสัมผัสโครเมียมเป็นประจำที่เรียกว่า Chrome hole หรือ Chrome Sore พบมากในคนงานที่ใช้ Chromic acid, Ammonium dicromate, Potassium chromate และ Sodium dichromate ถ้าแผลไม่ลึกมาก เมื่อรักษาด้วยยาประมาณ 3 อาทิตย์แผลจะหาย ในรายที่รุนแรงจะทำให้เกิดโรคผิวหนังอักเสบ ซึ่งเป็นอาการผิดปกติที่เกิดขึ้นร่วมกับระบบภูมิคุ้มกัน โดยจะพบในอาการที่รุนแรงหรือเป็นกลากเรื้อรัง และจัดเป็น Chromium Sensitivity ชนิด delayed-type (class IV) hypersensitivity reaction ถ้ามีผิวหนังอักเสบบริเวณมือ แขน ใบหน้า และหน้าอก ผิวหนังบริเวณนี้จะเกิดอาการอักเสบขึ้นหลังจากคนงานทำงานมาแล้วประมาณ 6 เดือน ในรายที่เป็นมากจะมีสีแดงเข้มและบวม ในบริเวณที่อักเสบจะคันมาก และมีอาการเจ็บแสบด้วย

นอกจากนี้ในรายคนงานที่ต้องสัมผัสกับฝุ่นละอองของโครเมียมเป็นเวลานานๆ มักจะพบโรคตาแดง การระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ โรคจมูกอักเสบ และที่พบบ่อย คือ การเป็นแผลหรือเยื่อโพรงจมูกถูกเจาะทะลุ เมื่อสูดหายใจเอาควันของ Chromic acid หรือฝุ่นของโครเมียมเป็นประจำ ซึ่งอาการที่เกิดขึ้น คือ ลิ้นและฟันจะเปลี่ยนเป็นสีออกเหลืองๆ ถ้าเป็นมากจะทำให้ผิวหนังกั้นในจมูกถูกทำลายจนเป็นรูทะลุ ซึ่งการทะลุของแผ่นกั้นจมูกนี้จะไม่รู้สึกเจ็บปวดแต่อย่างใด แต่จะรู้ตัวเมื่อมีเสียงอู้อี้หรือดั่งจุมกแบนลงแล้วเท่านั้น โดยส่วนใหญ่มักจะเริ่มที่รอยถลอกของผิวหนัง พบมากที่สุดที่โคนเล็บมือ ตามข้อนิ้วมือหรือหลังเท้า จะมีลักษณะเป็นแผลวงกลม ขอบค่อนข้างบาง บุ่มลึกลงไปมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร หรือเล็กกว่า มองดูคล้ายถูกตะปูเจาะ แม้ว่าแผลนั้นจะไม่เจ็บปวดแต่จะมีอาการคันมากในเวลากลางคืน และแผลก็จะเกิดการติดเชื้อมากขึ้นทำให้ลุกลามไปถึงข้อต่อใกล้เคียงอาจต้องตัดนิ้วทิ้ง ฝุ่นของเกลือโครเมียมหรือควันของ Chromic acid อาจตกลงบนหนังตาหรือที่ปลายจมูก ซึ่งทำให้เกิดแผลขึ้น

- การเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (Carcinogenicity) โดย The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ US Toxicology Program จัด Hexavalent Chromium เป็น Human Carcinogen ด้วยความสามารถในการละลายน้ำที่ดีของสารประกอบโครเมียม เช่น Strontium และ Zinc Chromates จึงพบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดมะเร็งปอด ซึ่งพบค่อนข้างมากกว่ามะเร็งชนิดอื่น มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดมะเร็งปอดในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับ Hexavalent Chromium เป็นเวลามากกว่า 30 ปีขึ้นไป จะมีความเสี่ยงสูงกว่าคนงานที่มีอายุงานน้อยกว่า เพราะจะเกิดกับคนที่สูดหายใจเอาโครเมียมเข้าไปทุกวันติดต่อกันเป็นเวลานานๆ ซึ่งเป็นอันตรายแก่ชีวิตเพราะไม่มียารักษาให้หายได้

2.10.5 การป้องกันและการรักษา

1) การป้องกัน

ในกลุ่มคนงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครเมียมโดยเฉพาะ มีวิธีการป้องกันซึ่งสามารถทำได้ ดังนี้

- โดยการใส่หน้ากากป้องกันการหายใจเอาโครเมียมเข้าไป
- การใส่ถุงมือในขณะปฏิบัติงาน เพื่อป้องกันการถูกสัมผัสโดยตรงของโครเมียม
- การล้างมือและการทำความสะอาดร่างกายหลังการทำงานทุกครั้ง

นอกจากนี้ จะต้องมีการเฝ้าระวังการเกิดพิษของโครเมียม โดยการไปพบแพทย์เพื่อตรวจเช็คสุขภาพร่างกายและตรวจหาระดับของโครเมียม ซึ่งควรตรวจเป็นประจำ

2) การรักษาแบบประคับประคอง

หลังจากที่มีการตรวจวินิจฉัยแล้วว่าเป็นพิษจากโครเมียมชนิดใด ในการรักษาสิ่งที่สำคัญที่สุด คือ ควรมุ่งเน้นป้องกันภาวะแทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้น ได้แก่ ภาวะไตวาย การเกิดอาการช็อค และความผิดปกติของ cardiovascular เป็นต้น

3) การรักษาที่จำเพาะ

สำหรับภาวะพิษของโครเมียมจะไม่มียาแก้พิษที่เฉพาะเจาะจงในการรักษาจึงเป็นแบบการรักษาไปตามอาการของผู้ป่วย โดยปัจจุบันมีการรายงานการศึกษาว่าการให้วิตามินซีในปริมาณสูงๆ หลังจากเกิดภาวะพิษของโครเมียมทันที ซึ่งจะช่วยลดความรุนแรงจากภาวะเป็นพิษของโครเมียมได้

2.10.6 การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (Analytical Method)

1) การวิเคราะห์ Hexavalent Chromium ซึ่งสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม คือ การปนเปื้อนของโครเมียมในตัวอย่างเลือดและปัสสาวะ รวมถึงการเลือกใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ เนื่องจากปริมาณโครเมียมที่ทำการตรวจวิเคราะห์จะมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นอุปกรณ์ทั้งหมดในการเก็บตัวอย่างและในการวิเคราะห์จะต้องผ่านการแช่ด้วยกรดไนตริก 20% อย่างน้อย 1 วัน แล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำสะอาด (Millipore water) อีก 2-3 ครั้งก่อนนำมาใช้ ตลอดจนสารเคมีที่ใช้จะต้องเป็น Analytical Grade ด้วย ส่วนเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry และต้องมีการใช้ร่วมกับ Background Correction Method เพื่อให้ผลการตรวจวิเคราะห์มีความถูกต้องและแม่นยำ

2) การวิเคราะห์ระดับโครเมียมในเลือด ระดับ Plasma Chromium จะบ่งบอกถึงการได้รับโครเมียมทั้ง Trivalent Chromium และ Hexavalent Chromium ในระยะเวลาไม่นาน ส่วน Intracellular Chromium จะบ่งบอกถึงขนาดของ Hexavalent Chromium เนื่องจากเฉพาะ Hexavalent Chromium เท่านั้นที่สามารถผ่านเข้าไปในเซลล์เม็ดเลือดแดงได้ ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญในการพิจารณาว่าต้องการที่จะตรวจสอบสารประกอบโครเมียมชนิดใด นอกจากนี้ระดับโครเมียมในเซลล์เม็ดเลือดแดงจะมีระดับสูงอยู่ประมาณ 30 วันหรือมากกว่า ขณะที่ระดับ Plasma Chromium จะกลับสู่ระดับปกติภายในเวลา 10 วัน ซึ่งค่าปกติของโครเมียมในเลือดสำหรับคนทั่วไป (serum หรือ plasma) เท่ากับ 0.5 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วนระดับใน whole blood หรือเซลล์เม็ดเลือดแดงของคนงานที่ต้องสัมผัสกับสารประกอบโครเมียม ยังไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานที่แน่ชัด (Ramathibodi Poison Center, 2001)

3) การวิเคราะห์ระดับโครเมียมในปัสสาวะ ระดับโครเมียมในปัสสาวะจะบ่งบอกถึงการดูดซับของโครเมียมในระยะเวลา 1-2 วัน โดยทั่วไปการตรวจวัดในปัสสาวะไม่สามารถแยก ระหว่าง Trivalent Chromium กับ Hexavalent Chromium ซึ่งค่าปกติของโครเมียมในปัสสาวะ สำหรับคนทั่วไป ไม่ควรเกิน 5 ไมโครกรัม/กรัมของครีเอตินิน ส่วนในคนงานค่าที่ยอมรับให้มีได้ คือ ไม่เกิน 30 ไมโครกรัม/กรัมของครีเอตินิน (Ramathibodi Poison Center, 2001)

2.10.7 การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

โครเมียมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง การปนเปื้อนของโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อมนั้นส่วนใหญ่เกิดจากการทิ้งของเสียอันตรายหรือน้ำเสียที่มีโครเมียมปะปน อยู่ลงสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งทางอากาศ ทางน้ำ และทางดิน อากาศที่ปนเปื้อนโครเมียมจะตกลงสู่ดิน หรือน้ำ โดยในดินนั้นสามารถพบโครเมียมได้ในรูปของ Trivalent Chromium และ Hexavalent Chromium ซึ่ง Hexavalent Chromium ไม่ตกตะกอนหรือเข้าร่วมตัวกับพันธะของดิน ดังนั้น จึงซึม ผ่านจากดินไหลลงสู่น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินได้ ส่วน Trivalent Chromium ที่เหลืออยู่ในดินจะ สามารถออกซิไดซ์ (Oxidized) อย่างช้าๆ กลายเป็น Hexavalent Chromium

การปนเปื้อนของโครเมียมสามารถอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน อากาศ และน้ำ โดยในดินปกติโครเมียมมีค่าอยู่ระหว่าง 10-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบกำเนิด ของดินด้วย เช่น ในดินอัลตราเมฟิก (Ultramafic) หรือดินเซอเพนทิน (Serpentine) สามารถมีโครเมียมได้ถึง 125 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (Adriano, 1986) ในน้ำจืดโดยปกติมีค่าของโครเมียม อยู่ระหว่าง 0.1-117 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนในน้ำทะเลมีค่าระหว่าง 0.2-50 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับโครเมียมในบรรยากาศมีความแตกต่างกันมากในอากาศ ความเข้มข้นพื้นฐานของโครเมียม อยู่ระหว่าง $5 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-3}$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจากการเก็บตัวอย่างอากาศใน เมืองซึ่งเป็นพื้นที่ควบคุมของประเทศแอนตาร์กติกา และกรีนแลนด์ พบโครเมียมในอากาศถึง 0.015-0.030 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Nriagu, 1988) นอกจากนี้ Hexavalent Chromium เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เนื่องด้วยมีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox potential) ที่สูงถึง 1.33-1.38 อิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ Hexavalent Chromium เกิดความเป็นพิษสูง และรวดเร็ว

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิราพร เงินแจ่ม และบุริมภัทร ปกรณ์ศิริ (2549) ศึกษาวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงจากเปลือกเมล็ดทานตะวันด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้กรดฟอสฟอริกและซิงค์คลอไรด์ เผากระตุ้นภายใต้ก๊าซไนโตรเจน และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารฟีนอล ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วน 1:2 เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง (SH72) มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสุดคือ 1,274.86 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 1:3 เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง (SH52) มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงสุดคือ 1,096.75 ตารางเมตรต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารฟีนอล พบว่า สภาวะที่ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เวลาสัมผัส 120 นาที pH เท่ากับ 4 ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า FLUKA#05120 SH72 และ SW52 เท่ากับ 99.89%, 99.41% และ 99.05% ตามลำดับ จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีราคาต่ำกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า คือ ถ่านกัมมันต์ชนิด SH72 และ SW52 มีค่าใช้จ่ายในการผลิตเท่ากับ 2,650 และ 2,320 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้า FLUKA#05120 มีราคา 3,700 บาทต่อกิโลกรัม โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงใกล้เคียงกัน

สุพรรณิ จันทรภิรมณ์ (2550) เม็ดลำไยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลไม้กระป๋องในประเทศไทยได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อเพิ่มมูลค่าและลดปัญหาในการกำจัดทิ้งด้วยการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก สมบัติพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ถูกวิเคราะห์โดยวิธีดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ -196 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสภาวะการเตรียมที่มีต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ ขอบเขตของสภาวะในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ กระตุ้นอยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส และเวลาการกระตุ้นที่ใช้ ได้แก่ 30, 60, 120 และ 180 นาที ส่วนการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกนั้นได้ศึกษาเฉพาะผลของอุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง 400-900 องศาเซลเซียส พบว่าในการกระตุ้นทางกายภาพ ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาการกระตุ้นทำให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นเพิ่มขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 14-90 เปอร์เซ็นต์ และมีผลโดยตรงต่อสมบัติความพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยพบว่าเมื่อค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยได้พื้นที่ผิวมากที่สุดเท่ากับ 1,278 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.81 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

แต่ที่ร้อยละน้ำหนักที่หายไปสูงขึ้นกว่านี้สมบัติเหล่านี้มีค่าลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความพรุนกับร้อยละน้ำหนักที่หายไปนี้สามารถประมาณค่าได้ด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับสาม สำหรับการกระตุ้นทางเคมีนั้นพบว่าในช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มจาก 400-700 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าลดลง และกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากสภาวะการเตรียมทางเคมีในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 651-946 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.33-0.49 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

G.G. Stavropoulos (2005) ได้ศึกษาเม็ดมะกอกซึ่งเป็นกากของเสียที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยสารกระตุ้น KOH งานวิจัยนี้ศึกษาผลที่เกิดขึ้นของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดรูพรุนของการเตรียมถ่าน ผลิตภัณฑ์เป็นลักษณะการดูดซับ N_2 ที่ 77 K โดยใช้วิธี BET α_s และ Dubinin-Radushkevich ในขณะที่กำลังดูดซับจากของเหลวที่แสดงโดยไอโซเทอมของการดูดซับเมทิลีนบลูจากสารละลาย ซึ่งถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะกอกซึ่งเป็นกากของเสียเทียบได้เท่ากับเกรดของถ่านกัมมันต์ทางการค้า แสดงให้เห็นว่ามีพื้นที่ผิวมากขึ้นและมีลักษณะเป็นถ่านกัมมันต์ชั้นสูง รูพรุนของคาร์บอนที่ได้จะมีลักษณะเป็น micropores ที่เป็นขั้นตอนแรกของการกระตุ้น และมีลักษณะเป็น micropores และ mesopores ที่ขั้นตอนสุดท้าย พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนพบว่าเพิ่มมากขึ้นกับระดับของการเผาไหม้ คือ เวลา และ อุณหภูมิ ในการกระตุ้น ความสามารถในการกำจัดเมทิลีนบลูจะปรากฏใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทางการค้า และปริมาณของสารกระตุ้นในระดับที่สูง

Walid K. Lafi (2000) งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกโอ๊กและเม็ดมะกอก วัตถุประสงค์ที่ใช้จะมีต้นทุนต่ำและเป็นสาเหตุของปัญหามลพิษทางขยะในประเทศจอร์แดน โดยใช้กระบวนการทางเคมีในการผลิตถ่านกัมมันต์ ผลที่ได้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากลูกโอ๊กเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดมะกอกจะได้เป็นอันดับสอง จัดเป็นถ่านกัมมันต์ประเภทธุรกิจซึ่งมีการตอบรับล่าสุดเกี่ยวกับการดูดซับ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ 800 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการฟื้นฟู คือ 800 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน

Suat Ucar (2009) ในการศึกษาครั้งนี้ เมล็ดทับทิมเป็นผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ซึ่งนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมถ่านโดยการกระตุ้นทางเคมีกับ $ZnCl_2$ ตัวแปรที่มีอิทธิพลในกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ และอัตราการทำให้มีขึ้นบนพื้นผิวเนื้อสัมผัสและคุณสมบัติพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ได้ศึกษา เมื่อใช้อัตราส่วนที่ทำให้มีขึ้น 2.0 อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ คือ 600 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวเฉพาะคาร์บอนผลัฟท์ที่ได้สูงถึง $978.8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ผลสรุปที่ได้พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ อัตราการทำให้มีขึ้นของพื้นที่

ผิวต่ำที่สุด และอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์มีค่าสูงถึง $709.4 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ และ $0.329 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ ตามลำดับ สารกระตุ้นจะมีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการทำให้มีขึ้นของพื้นที่ผิว และอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จะมีอิทธิพลเป็นลำดับต่อมา

Tan et. al., (2007) ศึกษาสภาวะการผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกมะพร้าวด้วยการกระตุ้นของ KOH โดยใช้เทคนิค RSM เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิการกระตุ้น เวลาการกระตุ้นและอัตราส่วนขี้เถ้าต่อสารเคมีที่มีผลต่อการตอบสนองค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู และร้อยละผลได้ แบบจำลองที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์การแปรปรวนเพื่อหาอิทธิพลของตัวแปรต่อค่าการตอบสนอง โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของลิกไนต์ต่อ KOH คือ 1:3.9 อุณหภูมิการกระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส และเวลาการกระตุ้น 1 ชั่วโมง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed) เพื่อนำมาศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ และสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด Retsch GMBH wesa-Germany รุ่น 5657 HAAN
2. เครื่องชั่งแบบละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo
3. เครื่องคัดขนาด Endecott SHAKER รุ่น EF.1-1M411
4. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 2.00 - 4.75 มิลลิเมตร
5. โถดูดความชื้น (Desicator)
6. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
7. ครุชีเบล ความจุ 20 มิลลิลิตร พร้อมฝา
8. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
9. นาฬิกาจับเวลา
10. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
11. เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C862
12. เครื่องเขย่าแนวราบ ยี่ห้อ GFL รุ่น 3016
13. เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (Tube furnace) ชนิด 21100
14. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
15. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
16. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer) รุ่น Model UVA 150318
Type Helios Alpha, Thermo, England.
17. เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน LECO รุ่น CHN2000

18. เครื่องวัดพื้นที่ผิวของ Micromeritics รุ่น Flow SorbII 2300
19. ชุดกระตุ้มแบบเบดนิ่ง เป็นลักษณะเตาให้ความร้อนแบบรีทอร์ต (retort) แนวตั้ง (vertical) สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ตรงส่วนกลางจะเป็น ส่วนของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อใส่ตัวอย่าง เป็นท่อทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 เมตร ยาว 0.50 เมตร
20. Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-6400

3.3 สารเคมีที่ใช้

1. ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ยี่ห้อ R.O.C. Made in Taiwan
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ยี่ห้อ LOBAL Chemie Assay 85% min
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ยี่ห้อ QReC Assay 37%
4. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) ยี่ห้อ Ajax Finechem Assay 99.5-101.0%
5. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ยี่ห้อ MERCK, F.R. Germany
6. โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ยี่ห้อ Ajax Finechem Assay 99.0-101.0%
7. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ยี่ห้อ Ajax Finechem Assay 99.0-101.0%
8. โบแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ยี่ห้อ CARLO ERBA Assay 99.0%
9. โบแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ยี่ห้อ Ajax Finechem Assay 99.0-100.5%
10. โบแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ยี่ห้อ Ajax Finechem Assay 99.4-100.4%
11. แป้ง (Starch)
12. ไอโอดีน (I_2) ยี่ห้อ QReC Assay 99.8% min
13. เมทิลีนบลู (Methylene Blue, $C_{16}H_{18}N_3S$) ยี่ห้อ QReC Assay 82% min
14. โครเมียม (Cr_2) ยี่ห้อ LAB-SCAN Analytical Science
15. ก๊าซไนโตรเจน (N_2) 99.99%

3.4 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเมล็ดลำไย ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์มาจาก โรงงานอุตสาหกรรมลำไยอบแห้ง บริษัท เจริญทอง จำกัด จังหวัดลำพูน แสดงได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เมล็ดลำไยที่นำมาใช้ในการทดลอง

3.5 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเมล็ดลำไย โดยนำเมล็ดลำไยมาบดและคัดขนาดด้วย ชุดตะแกรงร่อน ให้มีขนาด 2.00 - 4.75 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อทำความสะอาด แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บในภาชนะให้เรียบร้อย ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ และทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.6.1 วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ (Proximate Analysis) ของเมล็ดลำไย เพื่อหาค่าดังต่อไปนี้

1. ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)
2. ปริมาณเถ้า (Ash)
3. ปริมาณความชื้น (Moisture)
4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-89

3.6.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเมล็ดลำไย เพื่อหาค่าดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของคาร์บอน (C)
2. องค์ประกอบของไฮโดรเจน (H)

3. องค์ประกอบของไนโตรเจน (N)

4. องค์ประกอบของซัลเฟอร์ (S)

ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer ตามมาตรฐาน ASTM D 3176-89

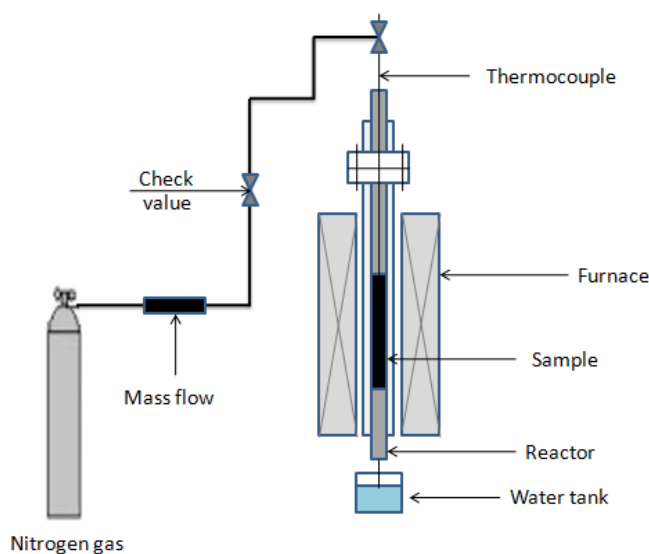
3.6.3 การกระตุ้น

1. นำเมล็ดลำไยที่บดและคัดขนาดแล้วด้วยชุดตะแกรงร่อน ซึ่งมีขนาด 2.00 - 4.75 มิลลิเมตร นำมาแช่ในสารละลาย ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในอัตราส่วนเมล็ดลำไยต่อสารเคมีที่ใช้กระตุ้น เท่ากับ 1:1, 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ

2. ทำการแช่นานประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วเทสารละลายทิ้ง จากนั้นนำเมล็ดลำไยที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3. นำไปบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีตะแกรงรองอยู่ด้านล่าง เพื่อป้องกันการร่วงหล่นของเมล็ดลำไยที่ผ่านการแช่สารเคมี แล้วต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง แล้วนำไปใส่ลงในเตาเผาแบบท่อ ทำการต่อท่อสแตนเลสรูปตัวแอลเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งเพื่อเป็นทางออกของก๊าซและสารระเหย

4. เปิดเตาเผาแบบท่อด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังภาพที่ 3.2 แล้วทำการจับเวลาเมื่อถึงอุณหภูมิที่ศึกษา โดยเวลาที่ศึกษา คือ 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 3.2 แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

5. เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วทำการปิดเครื่องเตาเผาแบบท่อ แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นต้มเดือดหลายๆ ครั้ง แต่ถ้าเป็นถ่านกัมมันต์ที่แช่ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์จะต้องนำไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อน แล้วจึงนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นต้มเดือดหลายๆ ครั้ง จนมีค่า pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

6. จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

7. ทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ดังนี้

7.1 หาร้อยละผลผลิตที่ได้ของผลิตภัณฑ์

7.2 หาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร

7.3 หาร้อยละของเถ้า

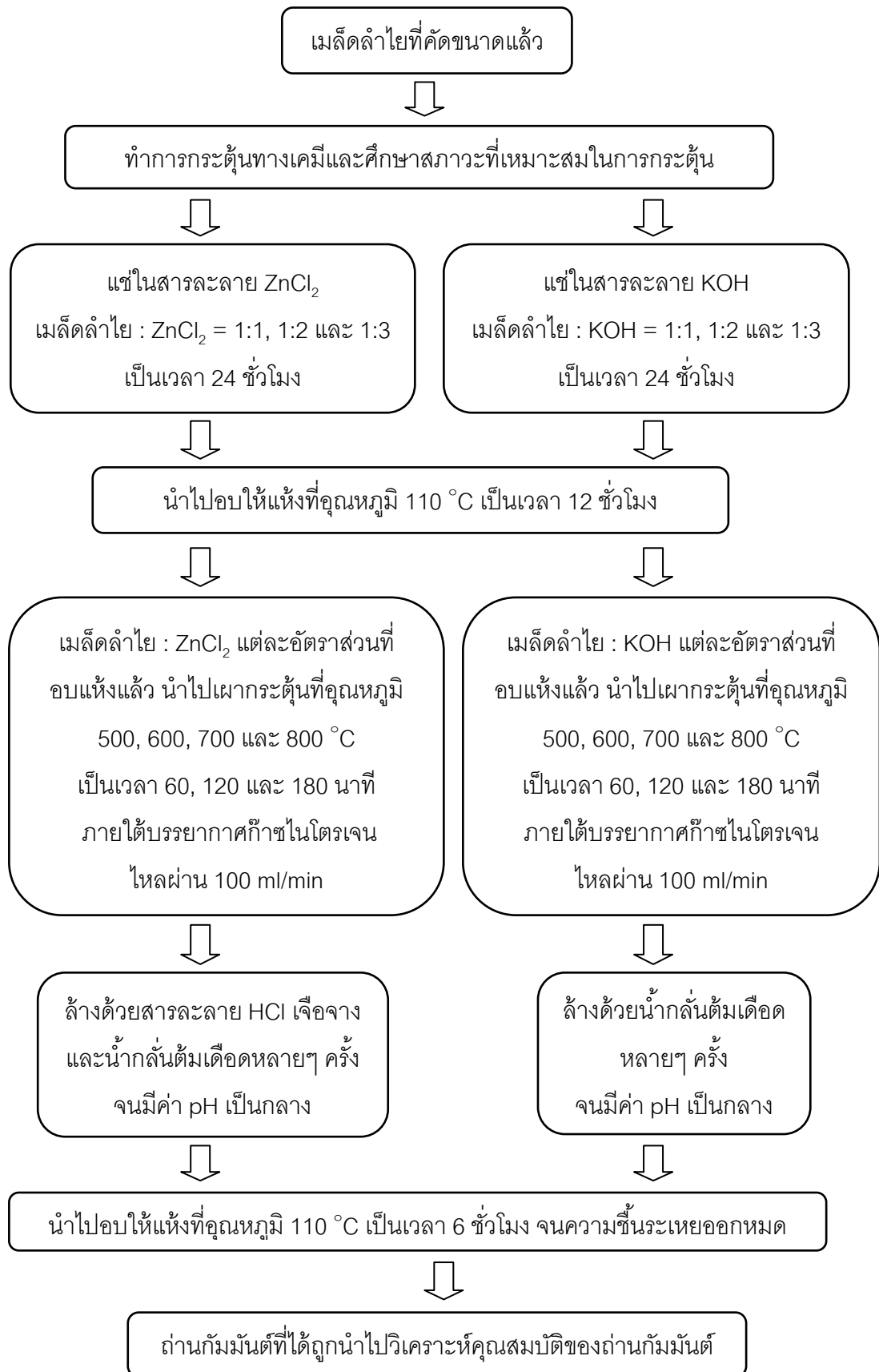
7.4 หาค่าการดูดซับไอโอดีน

7.5 หาค่าการดูดซับเมทิลีนบลู

7.6 ดูลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค SEM

8. เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมแล้ว นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยวิธี BET และนำไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมทิลด์ล้าไย

3.7 ศึกษาความสามารถในการดูดซับของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

ศึกษาความสามารถในการดูดซับของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จาก เมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนี้ พีเอช (pH) และปริมาณถ่านกัมมันต์ แล้วนำผลที่ได้มาเขียนไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ตามมาตรฐาน ASTM D 3860 - 89a โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานโครเมียมโดยทำการทดลองศึกษาที่ความเข้มข้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในภาวะที่เหมาะสม และเตรียมถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ บดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดมิลลิเมตร แล้วนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

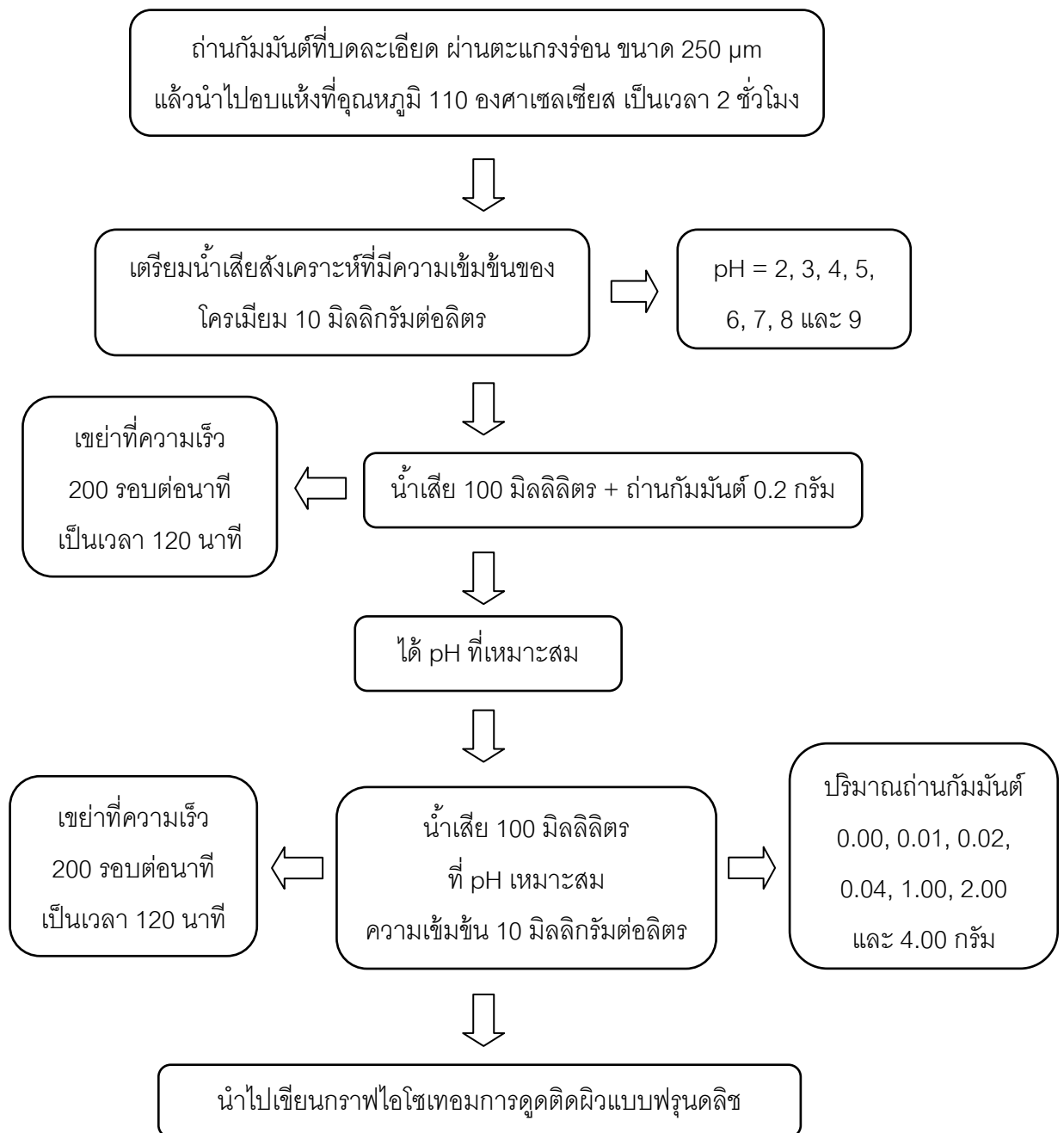
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานโครเมียมที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 จากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที และทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกถ่านออก และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม จะได้ร้อยละของการตกตะกอน

3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานโครเมียมที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เติมผงถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม จากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที และทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกถ่านออก และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม จะได้ pH ที่เหมาะสม

4. อิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ที่เหมาะสม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกัมมันต์ 10 ค่า คือ 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.00, 2.00 และ 4.00 ลงในขวดแต่ละใบ ตามลำดับ แล้วนำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที และทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกถ่านออก และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม

5. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียม แสดงได้ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียม

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 แสดงผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ข้อมูล ได้ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเมล็ดลำไย จากโรงงานผลิตลำไยอบแห้ง ของ บริษัท เจริญทอง จำกัด จังหวัดลำพูน

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) ของเมล็ดลำไย

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น	7.64
สารระเหย	71.69
เถ้า	1.60
คาร์บอนคงตัว*	19.07

หมายเหตุ: * คาร์บอนคงตัว = $100 -$ ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเมล็ดลำไย

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน	46.52
ไฮโดรเจน	6.44
ไนโตรเจน	1.56
ซัลเฟอร์	0.16
ออกซิเจน*	45.32

หมายเหตุ: * ออกซิเจน = $100 -$ ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเมล็ดลำไย ดังตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ของเมล็ดลำไยซึ่งได้นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง พบว่า เมล็ดลำไยมีค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 7.64, 71.69, 1.60 และ 19.07 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีความคาร์บอนคงตัวที่ใกล้เคียงกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น

แคลบ (Dimitrios et. al., 2008) ชั่งข้าวโพด (Narges และ Jalal, 2009) เปลือกวอลนัท (Juan และ Keqiang, 2010) และกะลาแมคคาเดเมีย (อลิสรา นิติวัดนะ, 2554) ซึ่งมีค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 17.70, 18.50, 17.61 และ 21.45 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของเมล็ดลำไย ดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจนร้อยละ 46.52, 6.44, 1.56, 0.16 และ 45.32 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมล็ดลำไยเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจ เนื่องจากว่ามีคุณสมบัติเบื้องต้นที่ดีสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เพราะมีปริมาณคาร์บอนที่สูง มีปริมาณความชื้น แอช และซัลเฟอร์ที่ต่ำ ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (Ioannidou และ Zabaniotou, 2007) แต่อย่างไรก็ตามเมล็ดลำไยยังมีปริมาณสารระเหยมากซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุชีวมวลโดยทั่วไป ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการลดขั้นตอนในการเตรียมถ่านกัมมันต์เป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบ 1 ขั้นตอน โดยนำวัตถุดิบมากระตุ้นด้วยสารเคมีที่ต้องการแล้วนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูง เพื่อช่วยลดปริมาณสารระเหยและช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในวัตถุดิบได้อีกด้วย (Kalderis et. al., 2008)

4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว คือ การคาร์บอนไนซ์วัตถุดิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เมล็ดลำไยที่มีขนาดอนุภาค 2.00 – 4.75 มิลลิเมตร เป็นวัตถุดิบ และใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารกระตุ้น ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของเมล็ดลำไยต่อสารเคมี คือ 1:1, 1:2 และ 1:3 อุณหภูมิที่ทำการศึกษา คือ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ โดยเผากระตุ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ศึกษา ผลการทดลองที่ได้แสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

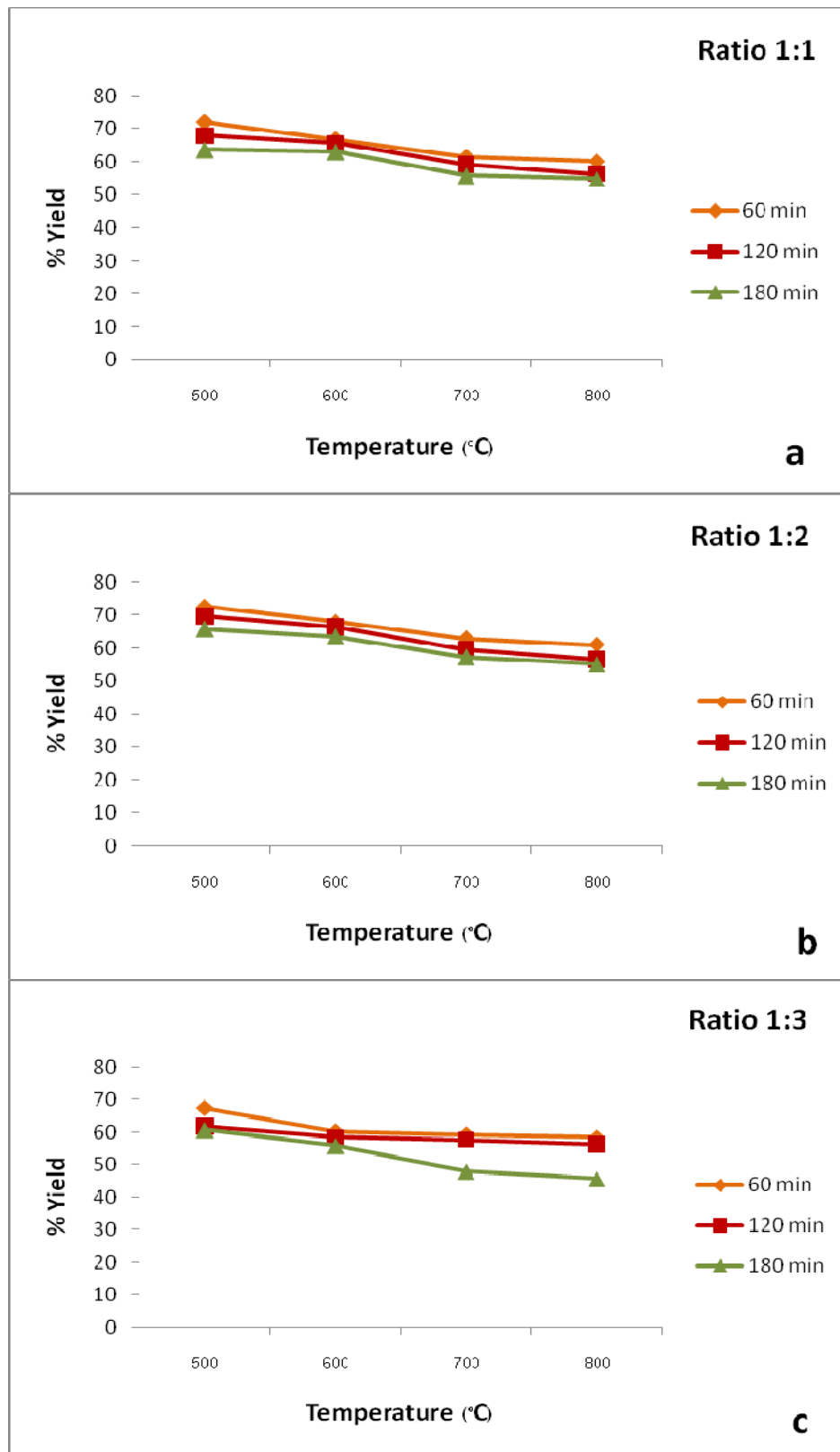
4.2.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยสารเคมี

ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ แสดงดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ พบว่า การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และการกระตุ้นด้วย KOH ในแต่ละอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น จะทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเวลาที่เพิ่มขึ้นสารระเหยบางส่วนที่อยู่ในโครงสร้างของเมล็ดลำไย

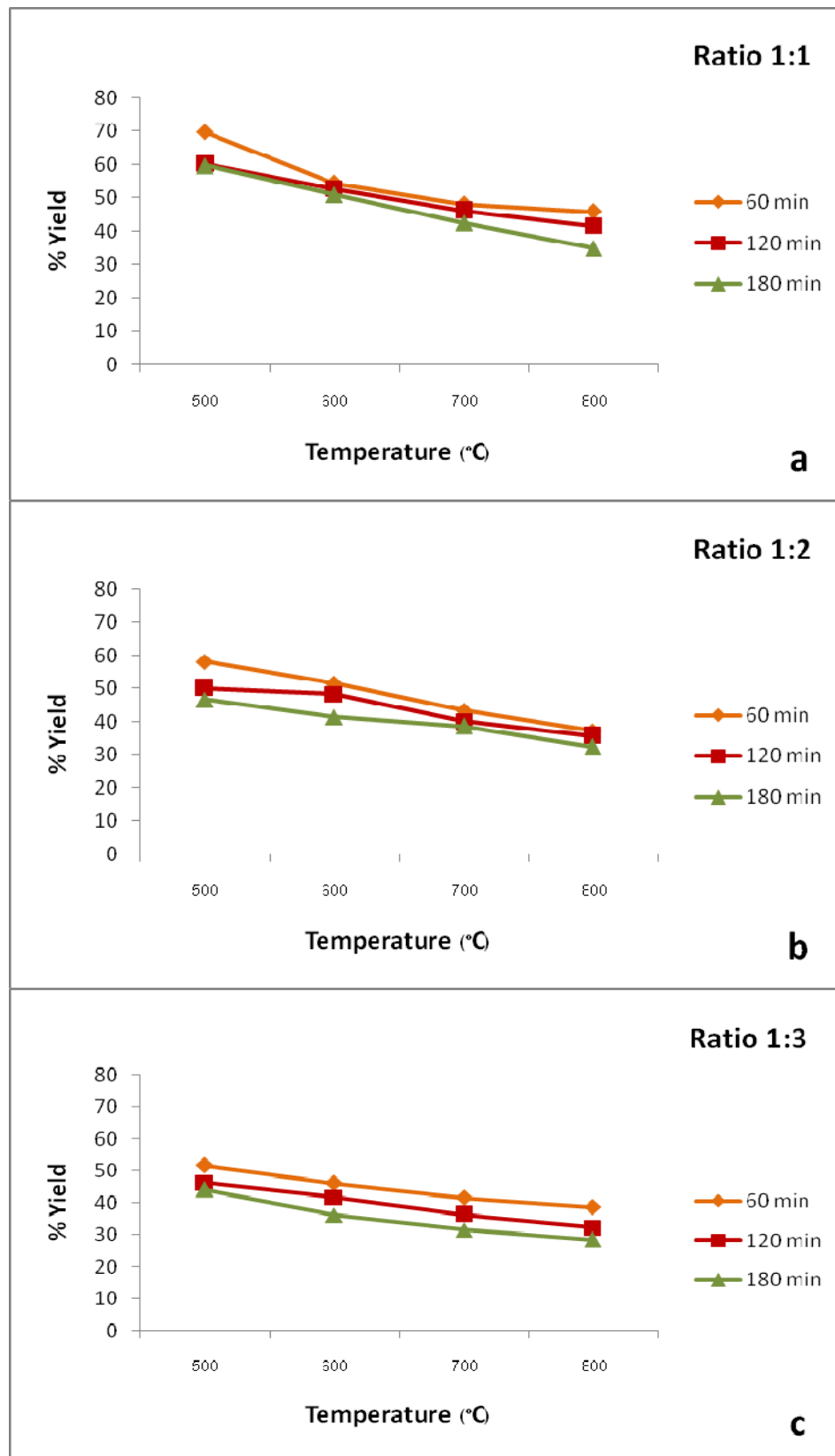
หลุดออกไปได้มากขึ้น จึงทำให้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง และจากการเกิดปฏิกิริยาของ $ZnCl_2$ และ KOH กับโครงสร้างของเมล็ดลำไย ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ลดลงตามอุณหภูมิและเวลาของการกระตุ้นที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากในวัตถุดิบนอกจากจะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมีสารประกอบอื่นๆ อีกมากมาย เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะมีคุณสมบัติในการสลายตัวที่มีค่าแตกต่างกัน (J. J. M. Orfao. et. al., 1999) เมื่อเผาวัตถุดิบ สารประกอบต่างๆ เหล่านี้ก็จะเริ่มสลายตัว และเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผากระตุ้นเพิ่มขึ้น สารที่สลายตัวก็มีจำนวนมากขึ้น จึงทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารเคมีทั้งสองชนิดมีค่าลดลง

ดังนั้นจากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วน 1:2 จะให้ร้อยละผลผลิตที่ได้สูงกว่าอัตราส่วน 1:1 เพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิและเวลาในการเผากระตุ้นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเข้มข้นของสารละลายที่อัตราส่วนดังกล่าวจะมีความหนาแน่นและมีความเป็นขั้ว (polar) ของสารละลายในการซึมแพร่เข้าไปในเนื้อเมล็ดลำไยได้ดีกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ จึงทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้มีค่ามากกว่า และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1:3 ร้อยละผลผลิตที่ได้กลับมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียมวลไปในรูปของสารระเหยและไฮโดรเจน จึงทำให้ร้อยละผลผลิตที่ได้มีค่าลดลง

สำหรับร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH จากภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้น เพิ่มอุณหภูมิ และเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ร้อยละผลผลิตที่ได้จะมีค่าลดลง เนื่องจากว่าปริมาณสารกระตุ้นแทรกเข้าไปในวัตถุดิบมากขึ้น จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีกับวัตถุดิบเกิดปฏิกิริยากันทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยกับไฮโดรเจนออกมามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียมวลเพิ่มขึ้น ร้อยละผลผลิตที่ได้จึงมีค่าลดลง



ภาพที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะต่างๆ

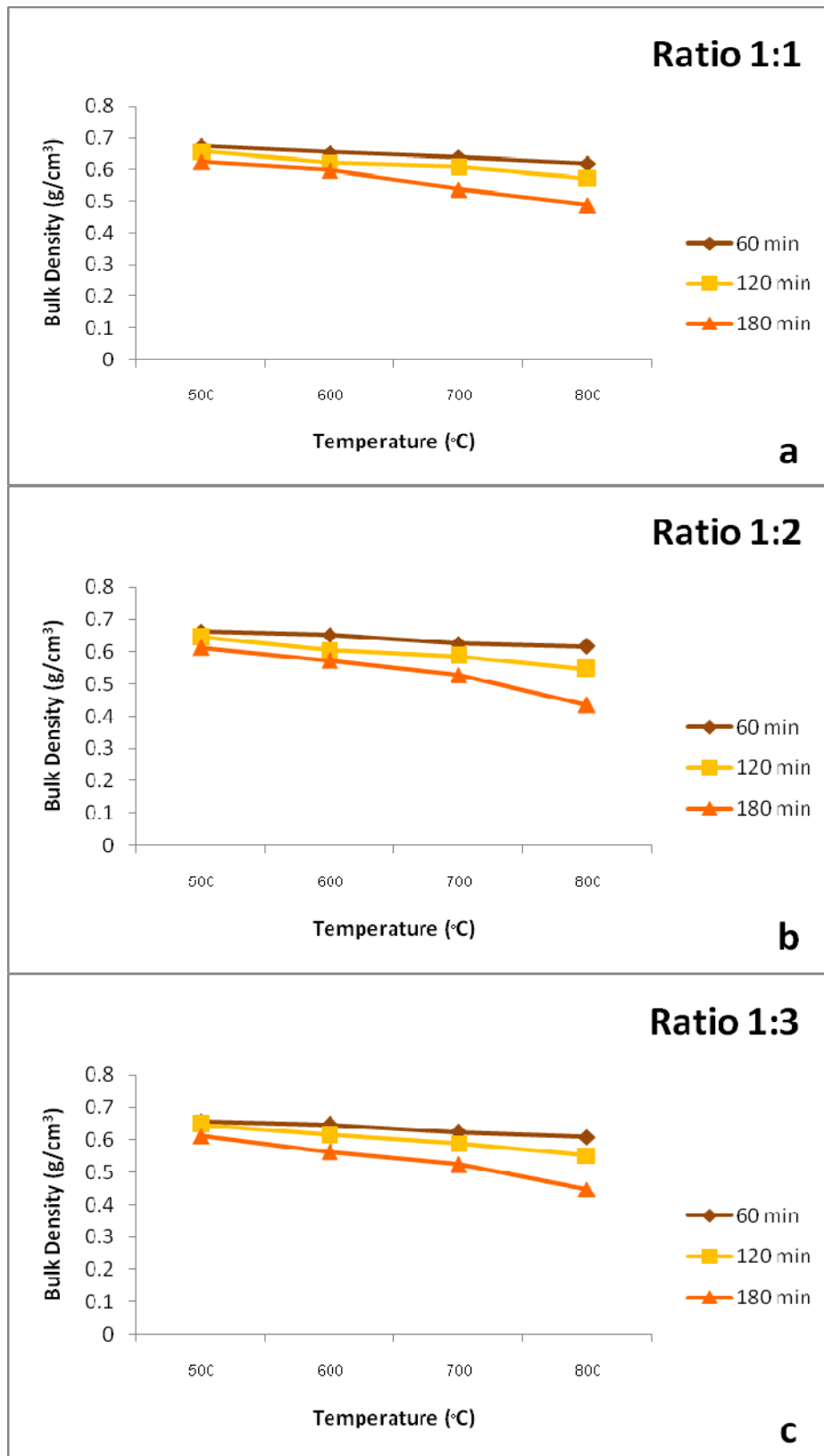
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ

จากการเผากระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่มีขนาดอนุภาค 2.00 - 4.75 มิลลิเมตร ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ศึกษา โดยพิจารณาสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ปริมาณเถ้า ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่า ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ แสดงรายละเอียดผลการทดลองที่ได้ ดังภาพที่ 4.3 - 4.6 ดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ภาวะต่างๆ ดังภาพที่ 4.3 พบว่าผลของอัตราส่วน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ในทุกๆ อัตราส่วน ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นมากขึ้น จะมีการปลดปล่อยสารระเหยออกมาจากโครงสร้างภายในมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างในส่วนนี้จะมีการพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น จึงทำให้ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง

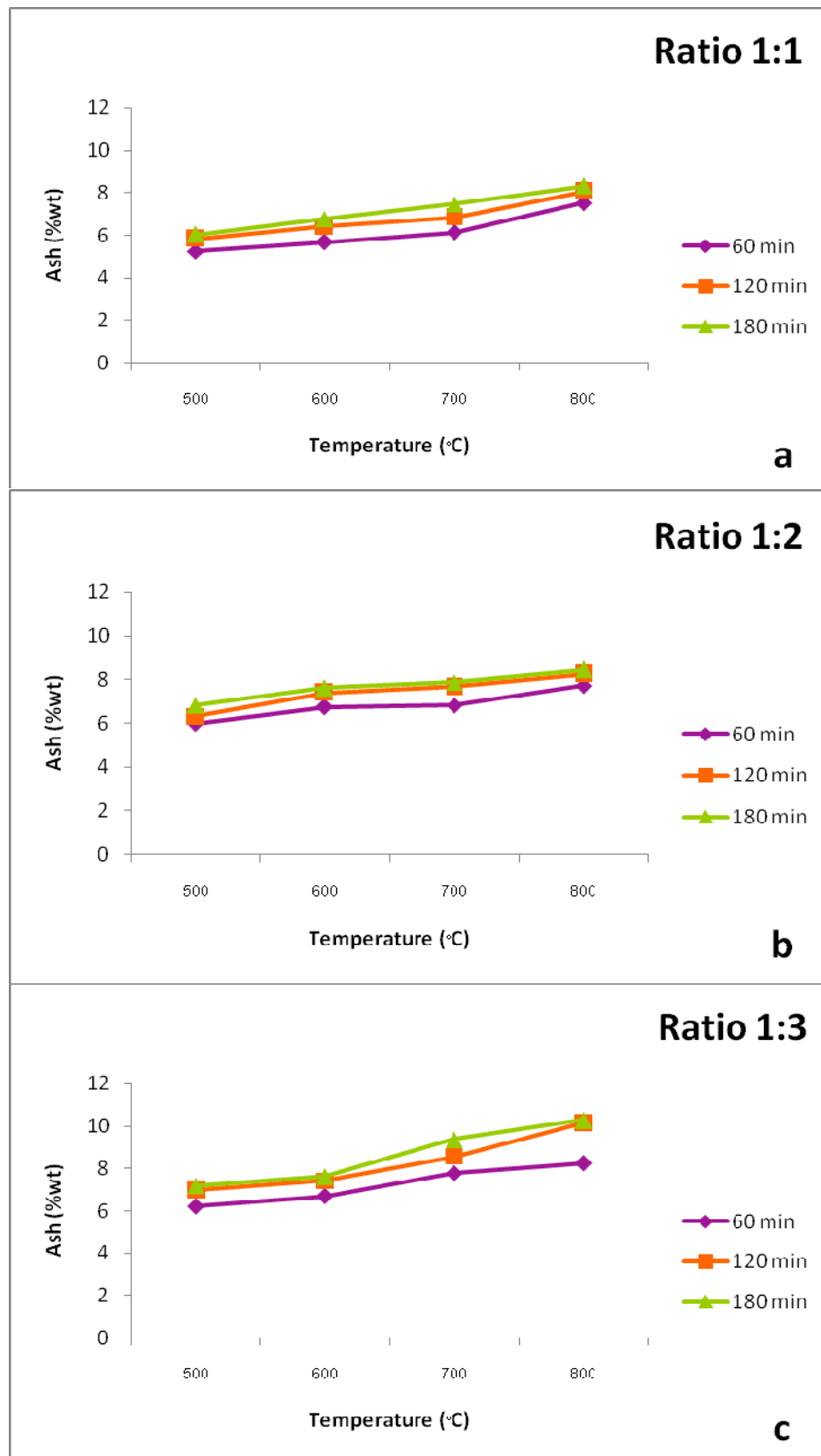
ดังนั้น จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 1:2 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 180 นาที ดังภาพที่ 4.3 (b) มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.4352 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์น้อยกว่าที่อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน คือ มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.4471 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพที่ 4.3 (c) เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วน $ZnCl_2$ มากขึ้น จะเกิดการอิมตัวของถ่านกัมมันต์ทำให้ไม่สามารถดูดซับสารละลายของ $ZnCl_2$ เข้าไปได้อีก จึงทำให้ปฏิกิริยาของ $ZnCl_2$ กับผิวของคาร์บอนที่เกิดขึ้นกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เพราะโครงสร้างของถ่านไม่สามารถพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนเพิ่มขึ้นได้ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จึงไม่ลดลงอีก



ภาพที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ภาวะต่างๆ

4.2.2.2 ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ

เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ภาวะต่างๆ ดังภาพที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นมากขึ้น ปริมาณเถ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ปริมาณเถ้าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะอยู่ในช่วงร้อยละ 5.26 – 8.46 เมื่ออุณหภูมิและเวลามากขึ้น ดังภาพที่ 4.4 (a) และภาพที่ 4.4 (b) ตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วน 1:3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลามากขึ้น ปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นมาก ซึ่งจะพบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 และ 180 นาที ปริมาณเถ้ามีค่าสูงสุด เท่ากับร้อยละ 10.14 และ 10.28 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.4 (c) เนื่องจากว่าปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่นี้เกิดจากการเผาด้วยความร้อน เพราะถ่านที่ได้รับความร้อนที่สูงมากเป็นเวลานานจะทำให้เกิดเถ้ามากขึ้น สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนสารกระตุ้น ปริมาณเถ้าที่ได้ไม่ค่อยมีความแตกต่างกันมากนัก



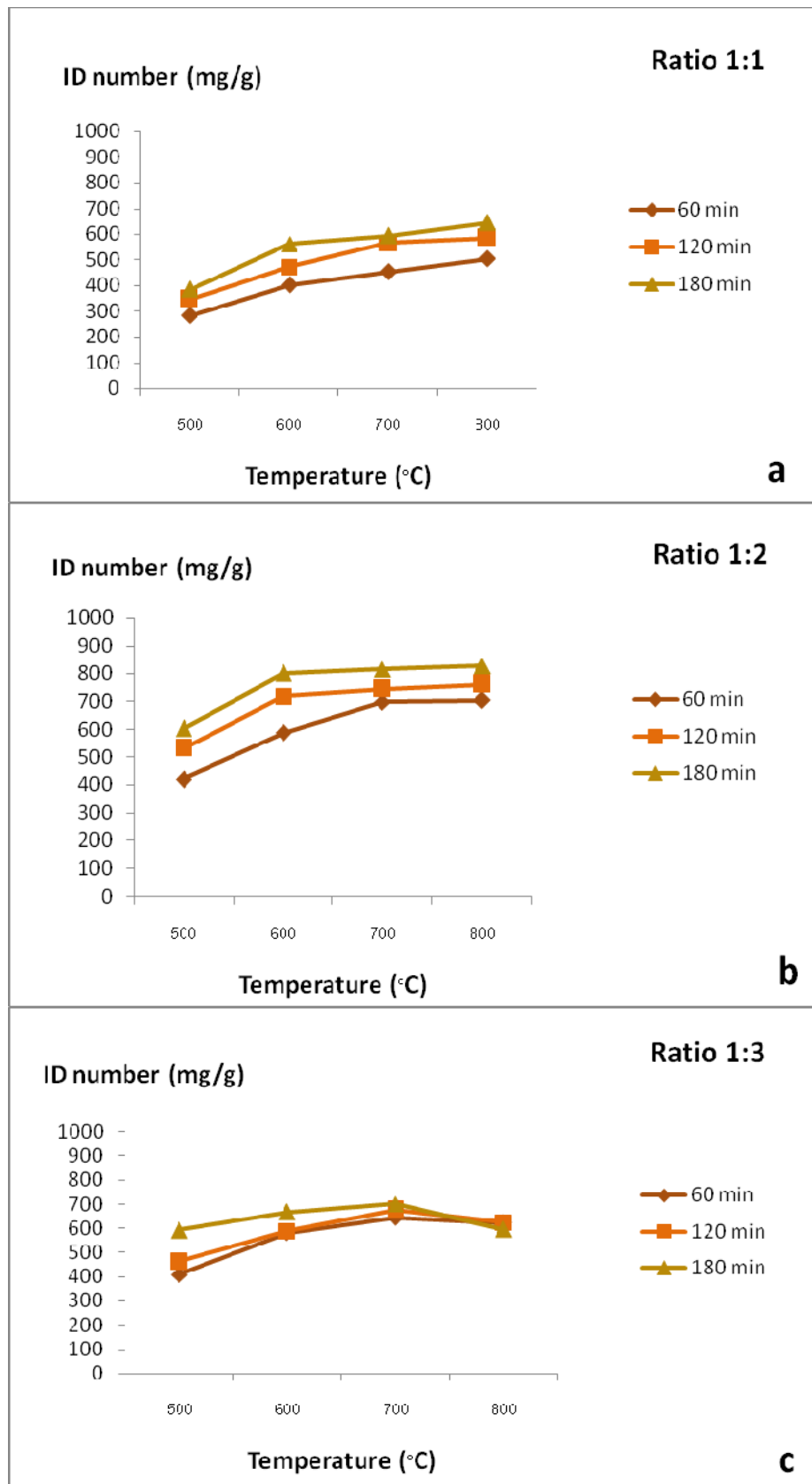
ภาพที่ 4.4 ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่ภาวะต่างๆ

4.2.2.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ

จากผลการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ภาวะอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี คือ $ZnCl_2$ ดังภาพที่ 4.5 พบว่า เมล็ดลำไยที่เตรียมขึ้นโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้นสูงขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $ZnCl_2$ จนถึงอัตราส่วน 1:3 พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้นสูงขึ้น

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:1 ดังภาพที่ 4.5 (a) พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้นสูงขึ้น เนื่องจากว่า $ZnCl_2$ เข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของเมล็ดลำไย จึงทำให้เกิดรูพรุนหรือช่องว่างขนาดเล็กเกิดขึ้น การดูดซับไอโอดีนจึงเพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:2 ดังภาพที่ 4.5 (b) พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเริ่มจะคงที่ เมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้นสูงขึ้น เนื่องจากว่าสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในโครงสร้างของเมล็ดลำไยได้สลายไป จึงทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น การดูดซับไอโอดีนจึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:3 ดังภาพที่ 4.5 (c) พบว่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้นสูงขึ้น แสดงว่าการเพิ่มสารกระตุ้น $ZnCl_2$ อาจทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงไปด้วย เนื่องจากปริมาณของสารกระตุ้น $ZnCl_2$ ที่มากเกินไปจะทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนจึงมีค่าลดลง เพราะฉะนั้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารกระตุ้นจนถึงอัตราส่วนหนึ่ง และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นจนถึงช่วงหนึ่ง (ลลิตา นิต์ศนจารกุล, 2544)

ดังนั้น จากภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:2 จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:1 และ 1:3 ดังภาพที่ 4.5 (a) และภาพที่ 4.5 (c) ตามลำดับ เพราะฉะนั้นที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:2 ดังภาพที่ 4.5 (b) ที่อุณหภูมิในการเผากระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 180 นาที พบว่า มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด คือ 826.95 มิลลิกรัมต่อกรัม



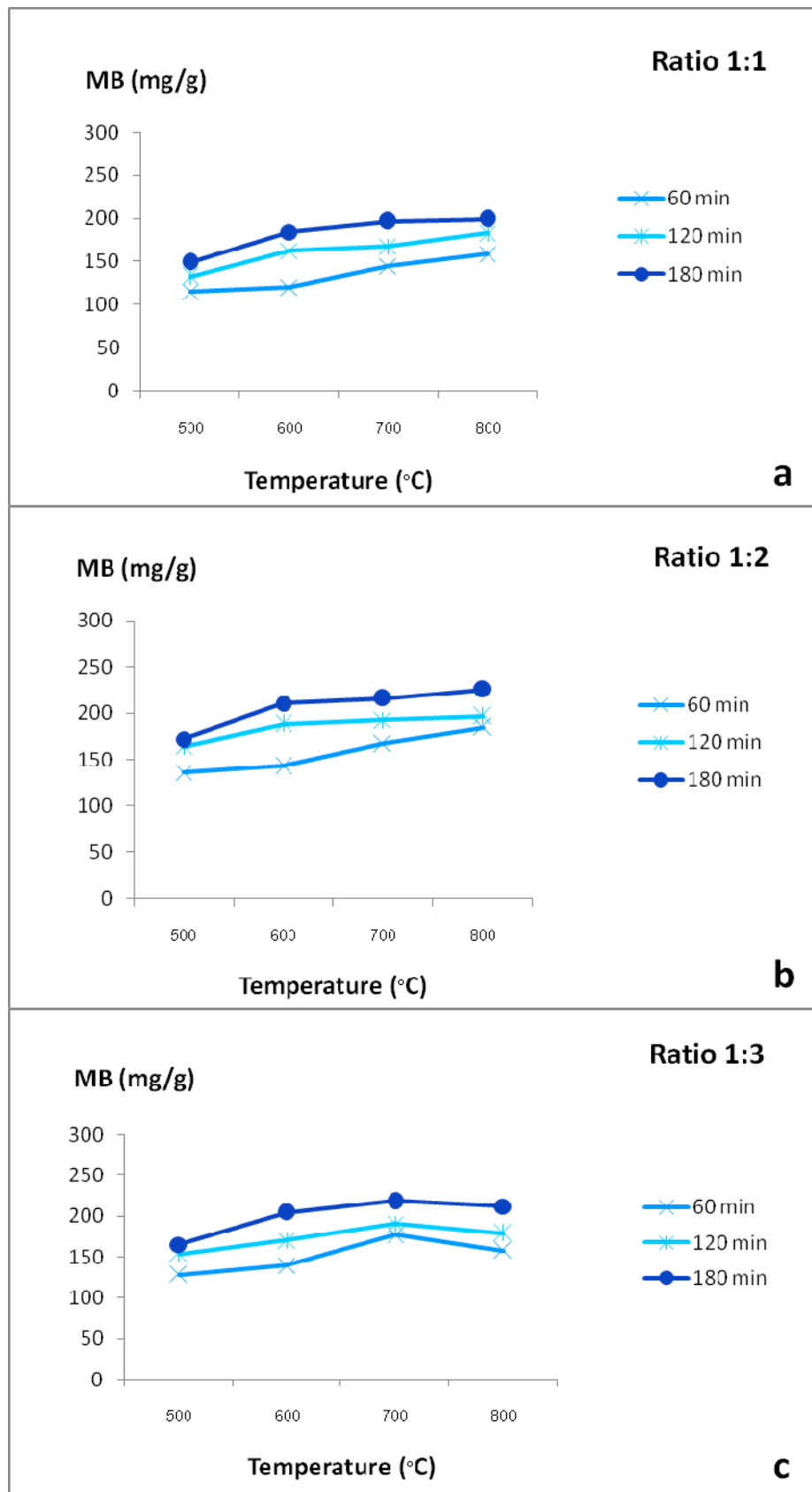
ภาพที่ 4.5 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ในแต่ละภาวะ

4.2.2.4 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ

จากผลการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ภาวะอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี คือ $ZnCl_2$ ดังภาพที่ 4.6 พบว่า เมล็ดลำไยที่เตรียมขึ้นโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้นสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการดูดซับเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $ZnCl_2$ จนถึงอัตราส่วน 1:3 กลับพบว่า ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิ และเวลามากขึ้นเช่นเดียวกับค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $ZnCl_2$ จนถึงอัตราส่วนหนึ่งจะทำให้โครงสร้างของเมล็ดลำไยมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นจากรูพรุนขนาดกลาง ส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีมากขึ้น จึงทำให้ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูลดลง

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:1 และ 1:2 ดังภาพที่ 4.6 (a) และภาพที่ 4.6 (b) ตามลำดับ พบว่า เมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้นจะทำให้รูพรุนขนาดเล็กรวมตัวกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ และจากการที่ผนังรูพรุนขนาดเล็กบางส่วนถูกเผาไหม้กลายเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Kang Sun, 2010) จึงส่งผลทำให้ค่าในการดูดซับเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อให้ความร้อนมากขึ้นสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบก็ถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น สารเคมีก็สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนทำให้รูพรุนขยายใหญ่ขึ้น ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจึงมีค่ามากขึ้น

ดังนั้น จากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:2 จะมีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงกว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ $ZnCl_2$ 1:1 และ 1:3 ดังภาพที่ 4.6 (a) และภาพที่ 4.6 (c) ตามลำดับ เพราะฉะนั้น จากภาพที่ 4.6 (b) ที่อุณหภูมิในการเผากระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 180 นาที พบว่า มีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด คือ 225.65 มิลลิกรัมต่อกรัม



ภาพที่ 4.6 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ ในแต่ละภาวะ

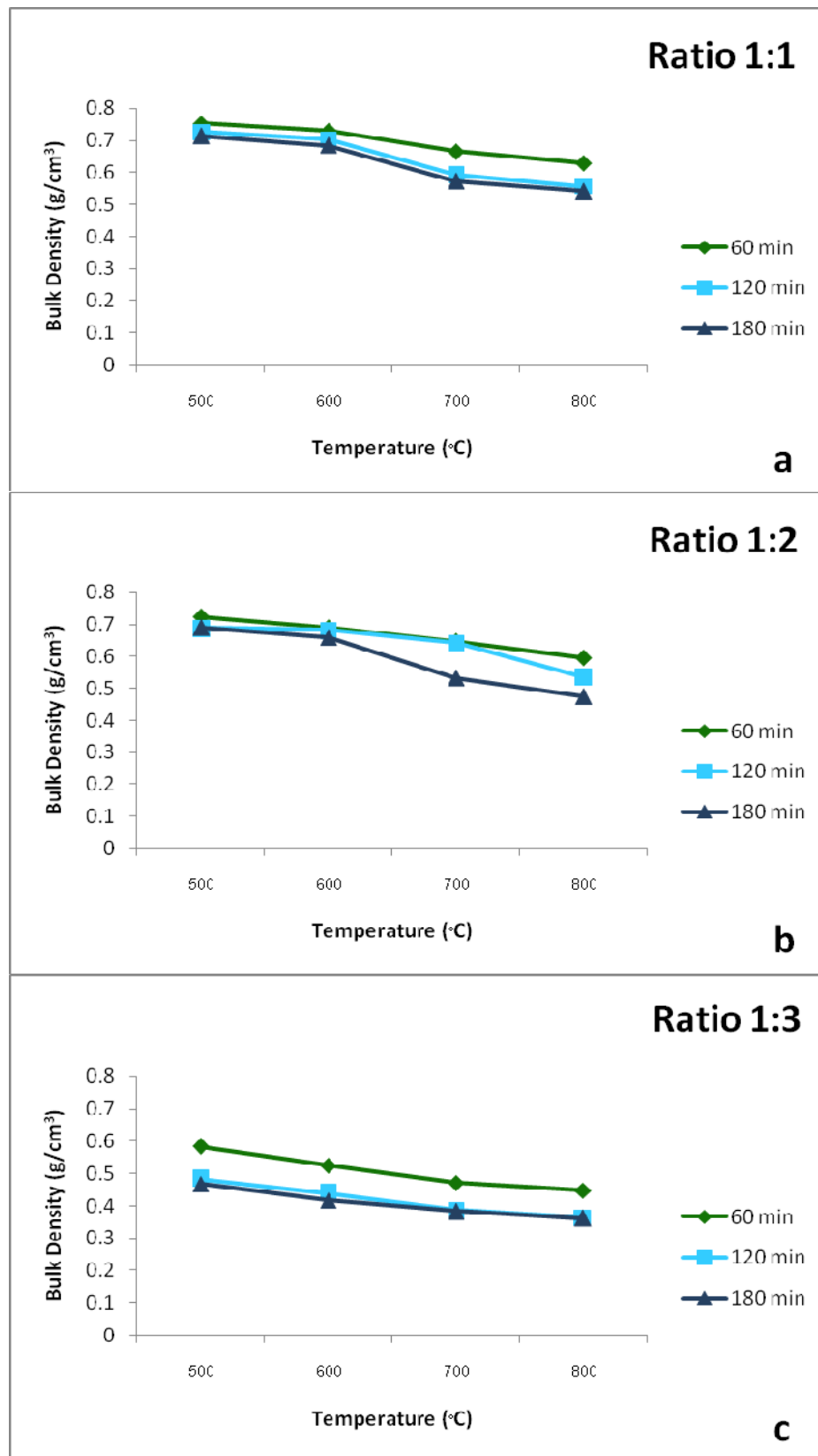
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ

จากการเผากระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่มีขนาดอนุภาค 2.00 - 4.75 มิลลิเมตร ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ศึกษา โดยพิจารณาสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ปริมาณเถ้า ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่า ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ แสดงรายละเอียดผลการทดลอง ดังภาพที่ 4.7 - 4.10 ดังต่อไปนี้

4.2.3.1 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะต่างๆ ดังภาพที่ 4.7 พบว่าผลของอัตราส่วน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จะมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มภาวะต่างๆ เป็นการไล่สารระเหยออกจากโครงสร้างและเป็นการสร้างรูพรุนใหม่ขึ้นทำให้ถ่านกัมมันต์มีความพรุนมากขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จึงมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 120 และ 180 นาที ตามลำดับ ในทุกๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จะลดลงเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.7 (a) และภาพที่ 4.7 (c) และที่อัตราส่วน 1:2 เป็นเวลา 180 นาที ตั้งแต่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจะมีค่าลดลงอย่างมาก ดังภาพที่ 4.7 (b) เพราะฉะนั้นเมื่ออัตราส่วน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นมากขึ้น จะมีการปลดปล่อยสารระเหยและไฮโดรเจนออกมาจากโครงสร้างภายในเพิ่มขึ้น ซึ่งโครงสร้างในส่วนนี้จะมีการพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรมีค่าลดลง

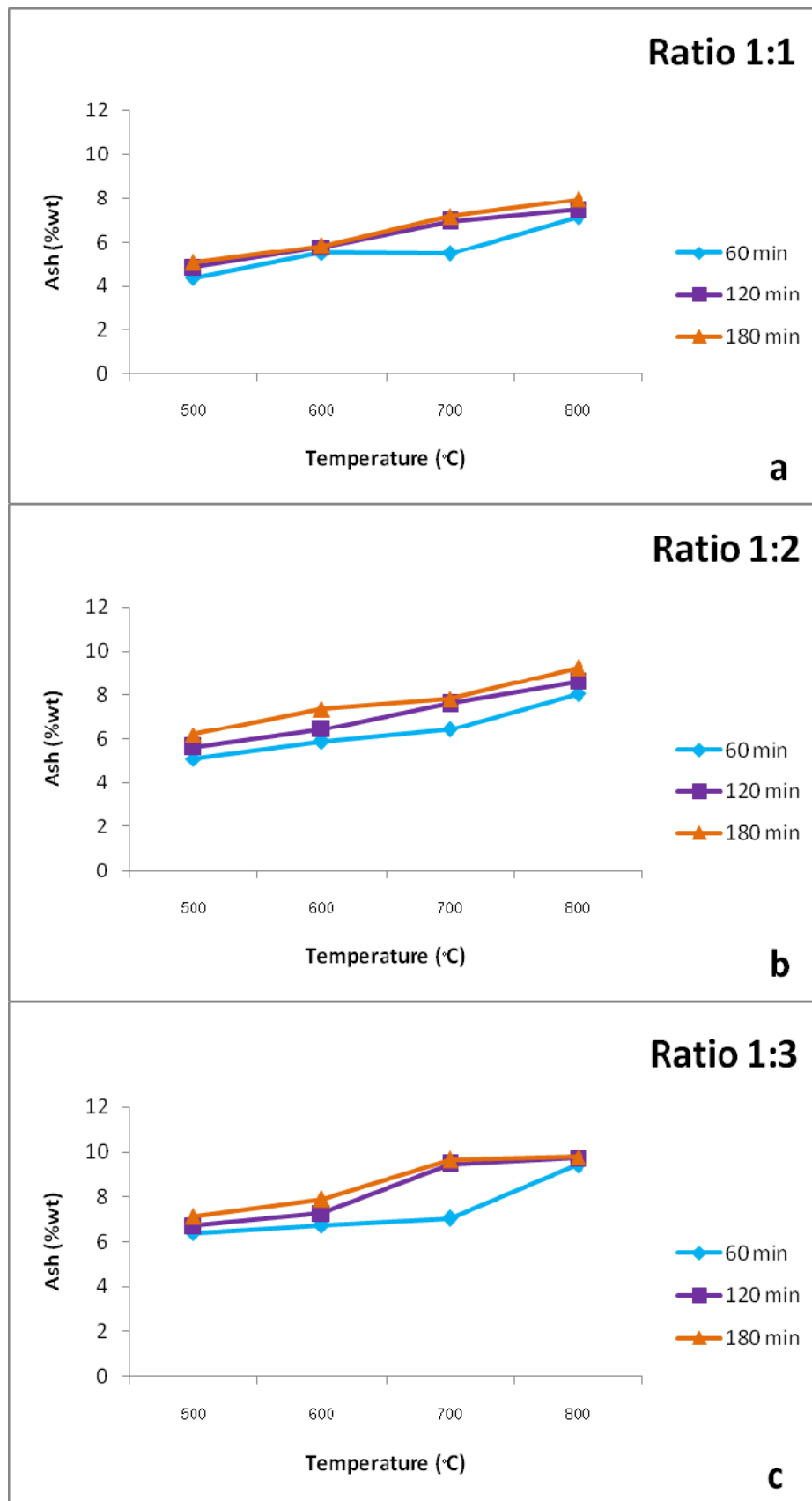
ดังนั้น จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 1:3 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 180 นาที มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร เท่ากับ 0.3618 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์น้อยที่สุด ดังภาพที่ 4.7 (c) เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วน KOH อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับผิวของคาร์บอนเกิดปฏิกิริยากันได้มากขึ้น ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรจึงมีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะต่างๆ

4.2.3.2 ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ

เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะต่างๆ ดังภาพที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น ปริมาณเถ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น และในแต่ละอัตราส่วนจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยพบว่า ที่อัตราส่วน 1:3 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 และ 180 นาที ปริมาณเถ้ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เท่ากับร้อยละ 9.73 และ 9.78 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.8 (c) ซึ่งมีปริมาณเถ้าสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ เมื่ออุณหภูมิ และเวลาเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ซึ่งอยู่ในค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นอกจากนี้ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเผาด้วยความร้อน เพราะถ่านที่ได้รับความร้อนที่สูงมากเป็นเวลานานจะทำให้เกิดปริมาณเถ้ามากขึ้น

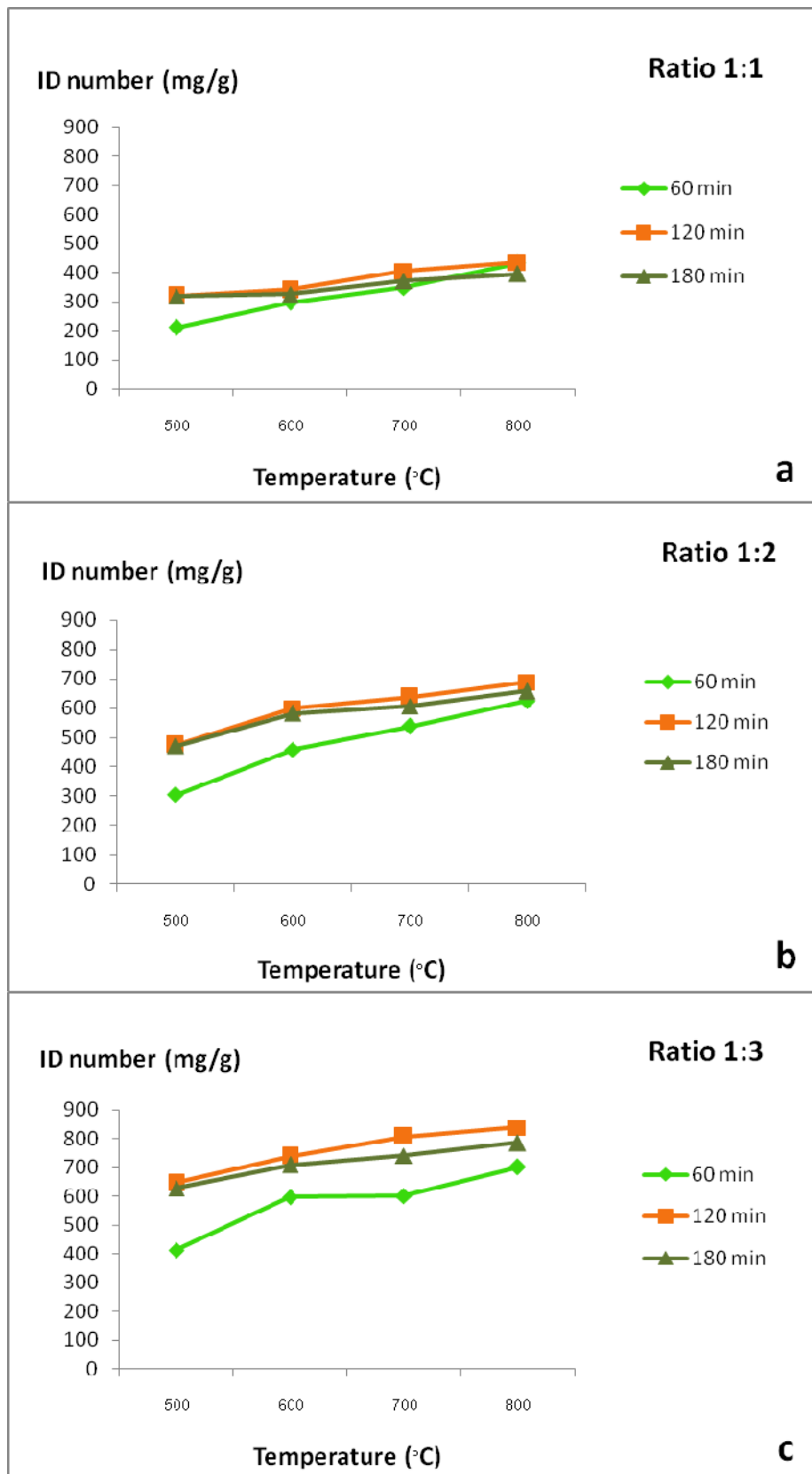


ภาพที่ 4.8 ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ภาวะต่างๆ

4.2.3.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ

จากผลการศึกษาค้นคว้าหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ภาวะอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี คือ KOH ดังภาพที่ 4.9 พบว่า เมล็ดลำไยที่เตรียมขึ้นโดยการกระตุ้นด้วย KOH เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และอัตราส่วนของสาร KOH ค่าการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นจนถึง 180 นาที ในทุกๆ อุณหภูมิ และทุกๆ อัตราส่วน กลับพบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าลดลง เนื่องจากว่าถ้าใช้เวลาในการกระตุ้นนานจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น ผนังระหว่างรูพรุนจึงเกิดการเผาไหม้ และถูกทำลายมากขึ้น ดังนั้นรูพรุนขนาดเล็กก็จะขยายกลายเป็นรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ (R.M. Suzuki. et. al., 2007) นอกจากนี้ อาจเกิดจากการสูญเสียสารกระตุ้น KOH ไปบ้างบางส่วน จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างโครงสร้างของเมล็ดลำไยกับสารกระตุ้น KOH ลดลง การดูดซับไอโอดีนจึงมีค่าลดลง เพราะว่าการดูดซับไอโอดีนเป็นการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็ก

ดังนั้น จากภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ KOH 1:3 จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ KOH 1:1 และ 1:2 ดังภาพที่ 4.9 (a) และภาพที่ 4.9 (b) ตามลำดับ เพราะฉะนั้นจากภาพที่ 4.9 (c) ที่อุณหภูมิในการเผากระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 120 นาที พบว่า มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด คือ 839.62 มิลลิกรัมต่อกรัม



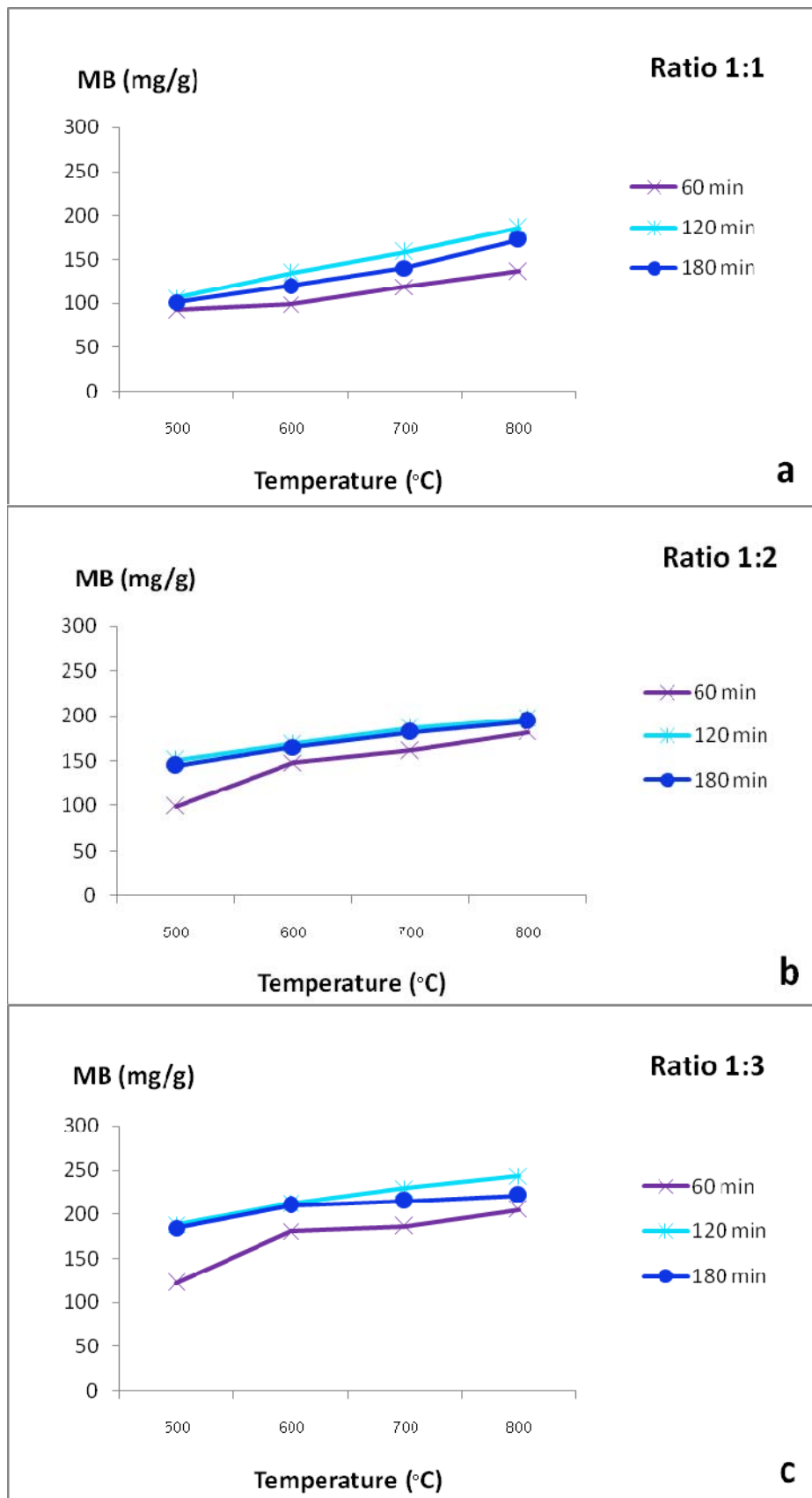
ภาพที่ 4.9 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ในแต่ละภาวะ

4.2.3.4 ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ

จากผลการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ภาวะอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี คือ KOH ดังภาพที่ 4.10 พบว่า เมล็ดลำไยที่เตรียมขึ้นโดยการกระตุ้นด้วย KOH เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และอัตราส่วนของ KOH จะเห็นได้ว่าค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นจนถึง 180 นาที ในทุกๆ อุณหภูมิ และทุกๆ อัตราส่วน กลับพบว่า ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูมีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่าการดูดซับไอโอดีน แสดงว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นมากขึ้น โครงสร้างของเมล็ดลำไยจะมีความร้อนมากขึ้น สารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของเมล็ดลำไยก็จะถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น ทำให้รูพรุนขนาดกลางเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้นอีก เนื่องจากเกิดการแตกสลายของโครงสร้างเมล็ดลำไยเมื่อได้รับปริมาณความร้อนที่มากเกินไป จนกลายมาเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ จึงทำให้ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูมีค่าลดลง เพราะว่าการดูดซับเมทธิลีนบลูเป็นการดูดซับรูพรุนขนาดกลาง

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ KOH 1:2 ดังภาพที่ 4.10 (b) พบว่า ที่เวลาในการกระตุ้น 120 และ 180 นาที ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิจะมีค่าการดูดซับสารเมทธิลีนบลูที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากว่ารูพรุนขนาดกลางนี้ส่วนมากเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนขนาดเล็กที่รวมตัวกันเป็นรูพรุนขนาดกลางขึ้นมา แต่เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นนานขึ้นจะมีผลทำให้เกิดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น เพราะเกิดจากการพังลงของโครงสร้างเมล็ดลำไยซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างที่โหลมารวมกัน (Cross-link) ทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น (Hsisheng Teng และ Hung-Chi Lin. 1998) ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูจึงไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมากขึ้น ดังภาพที่ 4.10 (c) ที่เวลาในการกระตุ้น 120 นาที การแตกตัวของรูพรุนขนาดเล็กเป็นรูพรุนขนาดกลางเริ่มเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น จากค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูที่สูงขึ้น

ดังนั้น จากภาพที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ KOH 1:3 จะมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ KOH 1:1 และ 1:2 ดังภาพที่ 4.10 (a) และภาพที่ 4.10 (b) ตามลำดับ เพราะฉะนั้น จากภาพที่ 4.10 (c) ที่อุณหภูมิในการเผากระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 120 นาที พบว่า จะมีค่าในการดูดซับสารเมทธิลีนบลูสูงสุด คือ 243.37 มิลลิกรัมต่อกรัม



ภาพที่ 4.10 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ในแต่ละภาวะ

4.3 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ได้เลือกภาวะที่เหมาะสมที่สุดมาทำการศึกษหาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารเคมี 1:2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 180 นาที และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารเคมี 1:3 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 120 นาที และนำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Specific Surface Area Analyzer โดยวิธี BET (Brunauer Emmett Teller) ดังตารางที่ 4.3

จากผลการศึกษา พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH มีพื้นที่ผิวสัมผัส เท่ากับ 1032.75 และ 1098.62 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 0.44 และ 0.48 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และขนาดรูพรุน เท่ากับ 1.92 และ 1.97 ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัส ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า แสดงดังตารางที่ 4.3 อาจเนื่องมาจากการใช้วัตถุดิบ และขั้นตอนของกระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	ค่าพื้นที่ผิวสัมผัส (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	ขนาดรูพรุน (nm)
LG1	1032.75	0.44	1.92
LG2	1098.62	0.48	1.97
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	975.15	0.38	1.89

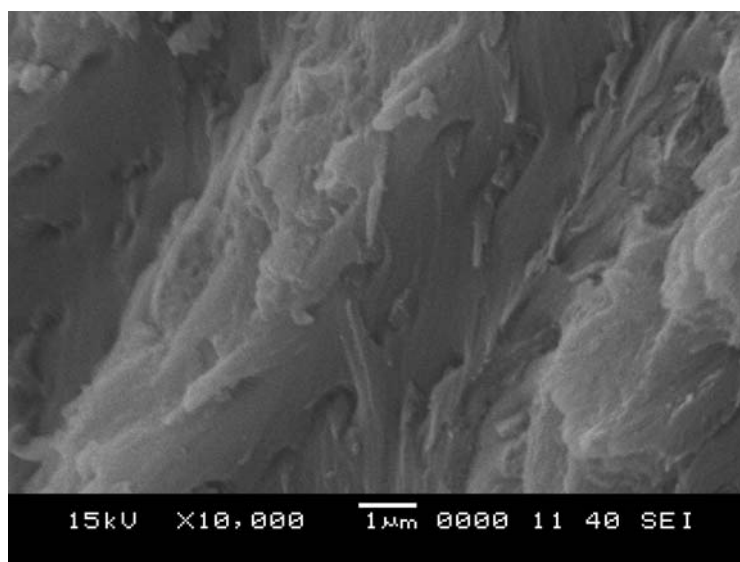
หมายเหตุ : LG1 คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

LG2 คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

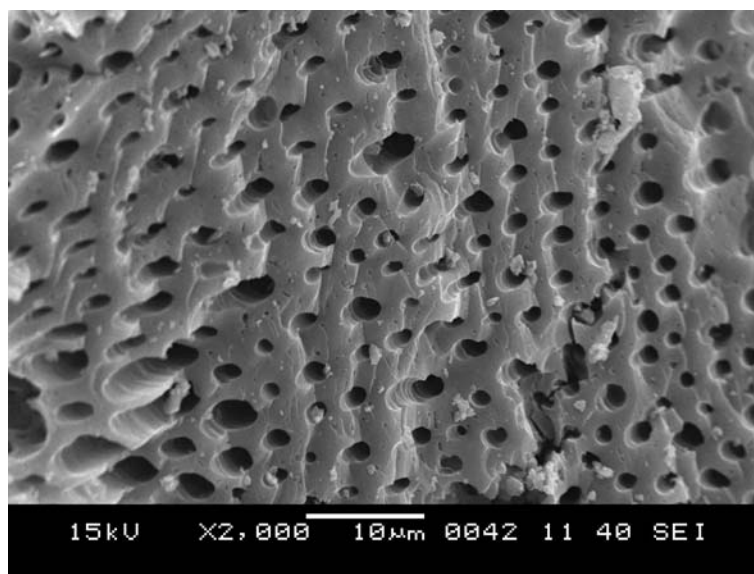
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิต พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น ซิงค์คลอไรด์ 1:2 อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1:3 อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที เป็นภาวะที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูสูงสุด จึงได้นำมาศึกษา ลักษณะสัณฐานวิทยา โดยทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยสารเคมี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope : SEM)

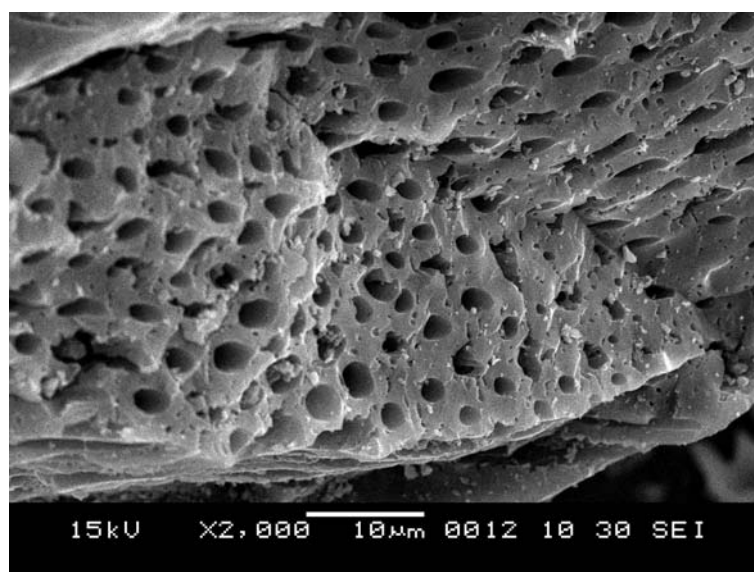
จากผลการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวและความพรุนของเมล็ดลำไย ก่อนการกระตุ้นด้วยสารเคมีซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้น พบว่า พื้นผิวด้านนอก มีความพรุนน้อยมาก ดังภาพที่ 4.11 แต่เมื่อนำมาเตรียมให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ KOH ที่ภาวะที่เหมาะสมจากที่กล่าวข้างต้นนั้น พบว่า มีรูพรุนกระจายของพื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดลำไยก่อนการกระตุ้น ดังภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 ตามลำดับ โดยลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นของถ่านกัมมันต์มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเมล็ดลำไยก่อนกระตุ้นด้วยสารเคมี
ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



ภาพที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



ภาพที่ 4.13 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

4.5 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

ขั้นตอนการทดลองนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในภาวะที่เหมาะสม โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว คือ พีเอช (pH) และปริมาณของถ่านกัมมันต์ แล้วนำมาทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรูนดลิช (Freundlich isotherm) โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process)

4.5.1 ผลของค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการดูดติดผิว

นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.2 กรัม แล้วนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกเอาถ่านออก และนำน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมจะได้ค่า pH ที่เหมาะสม จากผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.5 และภาพที่ 4.14

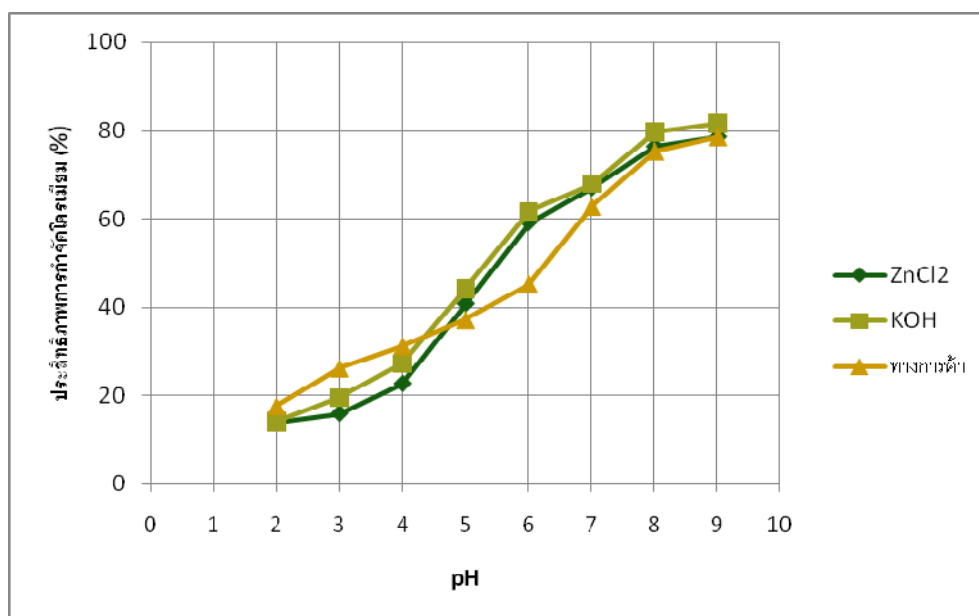
ตารางที่ 4.4 การตกตะกอนของโครเมียมที่ค่า pH ต่างๆ

(ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 mg/L)

pH	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/L)				การตกตะกอน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
2	9.043	9.546	9.258	9.282	7.18
3	8.941	8.607	8.832	8.793	12.07
4	8.470	8.492	8.266	8.409	15.91
5	7.824	7.655	7.729	7.736	22.64
6	7.168	7.314	7.086	7.189	28.11
7	6.708	6.772	6.593	6.691	33.09
8	3.576	3.698	3.714	3.663	63.37
9	2.425	2.364	2.331	2.373	76.27

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่า pH ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

pH	ถ่านกัมมันต์								
	ถ่านกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$			ถ่านกระตุ้นด้วย KOH			ถ่านกัมมันต์ทางการค้า		
	pH หลัง เขย่า	โครเมียม ที่เหลือ (mg/L)	% removal	pH หลัง เขย่า	โครเมียม ที่เหลือ (mg/L)	% removal	pH หลัง เขย่า	โครเมียม ที่เหลือ (mg/L)	% removal
2	2.08	8.603	13.97	2.13	8.594	14.06	2.17	8.225	17.75
3	3.44	8.411	15.89	3.32	8.056	19.44	3.52	7.368	26.32
4	4.31	7.734	22.66	4.02	7.283	27.17	6.69	6.863	31.37
5	5.16	5.922	40.78	5.10	5.598	44.02	7.38	6.277	37.23
6	6.19	4.078	59.22	7.24	3.842	61.58	8.45	5.469	45.31
7	7.23	3.292	67.08	7.51	3.216	67.85	8.67	3.718	62.82
8	8.21	2.359	76.41	8.31	2.052	79.48	9.26	2.475	75.25
9	9.17	2.137	78.63	9.27	1.847	81.53	9.21	2.142	78.58



ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากตารางที่ 4.4 ถึง 4.5 และภาพที่ 4.14 ผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ที่ค่า pH ต่างๆ กัน ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH มากขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 13.97, 15.89, 22.66, 40.78, 59.22, 67.08, 76.41 และ 78.63 ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 14.06, 19.44, 27.17, 44.02, 61.58, 67.85, 79.48 และ 81.53 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ที่ pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 17.75, 26.32, 31.37, 37.23, 45.31, 62.82, 75.25 และ 78.58 ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 81.53 รองลงมา คือ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม เท่ากับ ร้อยละ 78.63 และ 78.58 ตามลำดับ ที่ pH ค่าเดียวกัน คือ 9 ซึ่งเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ KOH และยังพบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ อีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของการดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู และการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์ที่ได้ทำการทดลองในเบื้องต้น

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าจากการตกตะกอนของโครเมียม พบว่า โครเมียมจะเริ่มตกตะกอนที่ค่า pH ประมาณ 7 – 8 แต่จะตกตะกอนมากที่สุดที่ค่า pH 9 แสดงว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จึงไม่ใช่การดูดติดผิวเพียงอย่างเดียว แต่ส่วนหนึ่งเป็นเพราะว่ามีการตกตะกอนร่วมด้วย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร้อยละการตกตะกอนของโครเมียมที่ค่า pH ต่างๆ พบว่า การตกตะกอนของโครเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 76.27 ที่ค่า pH 9 แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงของ pH ที่มีการตกตะกอนมากที่สุดของโครเมียม แต่ก็ยังมีปริมาณโครเมียมเหลืออยู่ เพราะว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงเป็นการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์อยู่

เพราะฉะนั้น ในการตกตะกอนสามารถคำนวณได้จากการนำค่าร้อยละการกำจัดทั้งหมดมาลบกับค่าร้อยละการกำจัดโครเมียมที่ได้จากการปรับค่า pH นั้นๆ พบว่า ที่ค่า pH เท่ากับ 7 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมากที่สุด (จากการคำนวณ) โดยประสิทธิภาพใน

การกำจัดโครเมียมของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า คือ 33.99, 34.76 และ 49.73 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า pH เท่ากับ 7 ในการทดลองขั้นต่อไป

4.5.2 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า pH เท่ากับ 7 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกัมมันต์ 10 ค่า คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.00, 2.00 และ 4.00 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ ตามลำดับ จากนั้นนำขวดไปเขย่า (Shaker) ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที แล้วทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นจึงนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกถ่านออกและนำน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (แสดงได้ดังภาคผนวก ข) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 ถึง 4.8 และภาพที่ 4.15 ถึง 4.17

ในการทดลองหาไอโซเทอมการดูดติดผิว ตามมาตรฐาน ASTM D3860 – 89a (Standard practice for determination of adsorptive capacity of activated carbon by aqueous phase isotherm technique) ซึ่งได้กำหนดน้ำหนักของถ่านในการทดลองเป็น 10 ค่า น้ำหนัก ได้แก่ 0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.00, 2.00 และ 4.00 กรัม แต่เมื่อทำการทดลองพบว่า น้ำหนักของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ที่ได้นำมาศึกษาในการทดลองจะสามารถใช้ได้ตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.40 กรัม เท่านั้น เนื่องจากว่าถ่านน้ำหนักมากขึ้นจะทำให้ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์โครเมียมที่เหลือในน้ำเสียได้ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าเกิดจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองโดยการลดปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลองเหลือเพียง 7 ค่า ดังนี้ 0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20 และ 0.40 กรัม

4.5.2.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ต่อการดูดติดผิวของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.15

ตารางที่ 4.6 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/L)				X_f (mg)	X ($X_i - X_f$) (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0.00	4.179	4.265	4.428	4.291	0.4291 (X_i)	-	-
0.01	3.682	3.747	3.891	3.773	0.3773	0.0517	5.173
0.02	3.240	3.414	3.427	3.360	0.3360	0.0930	4.652
0.04	2.124	2.199	2.210	2.178	0.2178	0.2113	5.283
0.10	1.364	1.373	1.395	1.377	0.1377	0.2913	2.913
0.20	0.284	0.295	0.297	0.292	0.0292	0.3481	1.741
0.40	0.056	0.068	0.072	0.065	0.0065	0.3295	0.824

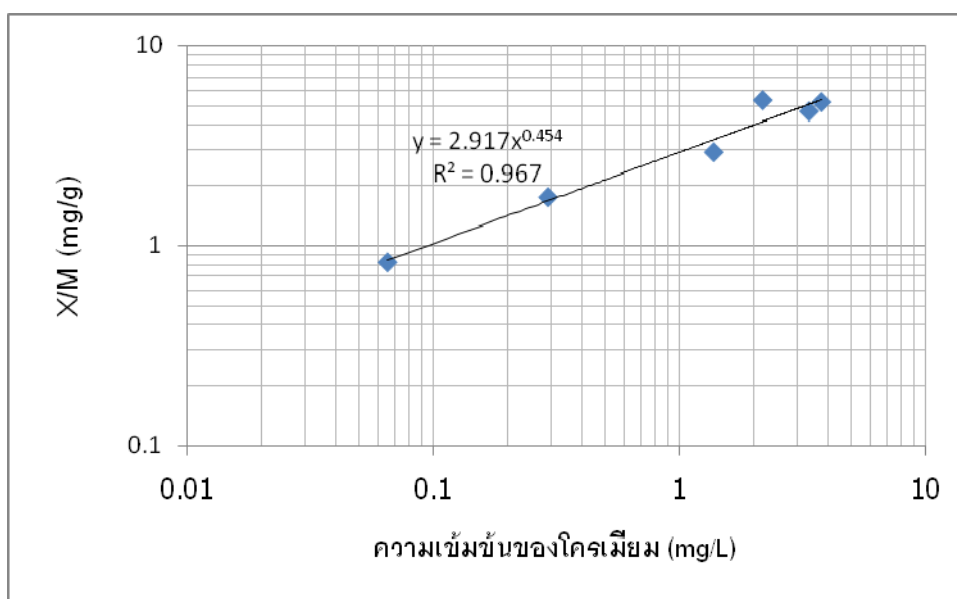
โดย ค่า X = ปริมาณของสารโครเมียมที่ถูกดูดซับ (mg)

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)

X_i = ปริมาณของสารโครเมียมในสารละลายเริ่มต้น (mg)

X_f = ปริมาณของสารโครเมียมที่เหลือในสารละลาย (mg)

C = ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/L)



ภาพที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วย ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

จากภาพที่ 4.15 แสดงกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบพหุนคติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 2.917x^{0.454}$ และ ค่า $R^2 = 0.967$

4.5.2.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพหุนคติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ต่อการดูดติดผิวของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.16

ตารางที่ 4.7 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/L)				X_f (mg)	X ($X_i - X_f$) (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0.00	4.352	4.021	4.257	4.210	0.4210 (X_i)	-	-
0.01	3.722	3.512	3.573	3.602	0.3602	0.0608	6.077
0.02	3.247	3.128	3.155	3.177	0.3177	0.1033	5.167
0.04	2.466	2.120	2.167	2.251	0.2251	0.1959	4.898
0.10	1.227	1.115	1.141	1.161	0.1161	0.3049	3.049
0.20	0.451	0.272	0.377	0.367	0.0367	0.3843	1.922
0.40	0.094	0.073	0.085	0.084	0.0084	0.4126	1.032

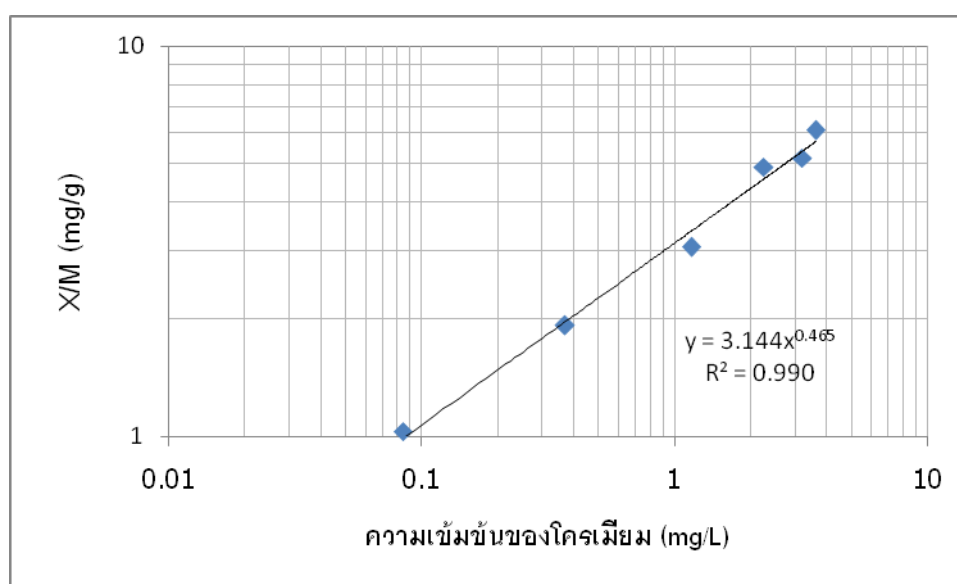
โดย ค่า X = ปริมาณของสารโครเมียมที่ถูกดูดซับ (mg)

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)

X_i = ปริมาณของสารโครเมียมในสารละลายเริ่มต้น (mg)

X_f = ปริมาณของสารโครเมียมที่เหลือในสารละลาย (mg)

C = ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/L)



ภาพที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

จากภาพที่ 4.16 แสดงกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรอนดลิชของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วย KOH สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 3.144x^{0.465}$ และ ค่า $R^2 = 0.990$

4.5.2.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนดลิชของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ทางการค้าต่อการดูดติดผิวของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.17

ตารางที่ 4.8 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/L)				X_f (mg)	X ($X_i - X_f$) (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0.00	4.238	4.542	4.326	4.369	0.4369 (X_f)	0	0
0.01	3.965	3.987	3.984	3.979	0.3979	0.0390	3.903
0.02	3.403	3.459	3.428	3.430	0.3430	0.0939	4.695
0.04	2.549	2.957	2.648	2.718	0.2718	0.1651	4.128
0.10	1.012	1.024	1.018	1.018	0.1018	0.3351	3.351
0.20	0.285	0.478	0.364	0.376	0.0376	0.3993	1.997
0.40	0.084	0.096	0.087	0.089	0.0089	0.4280	1.070

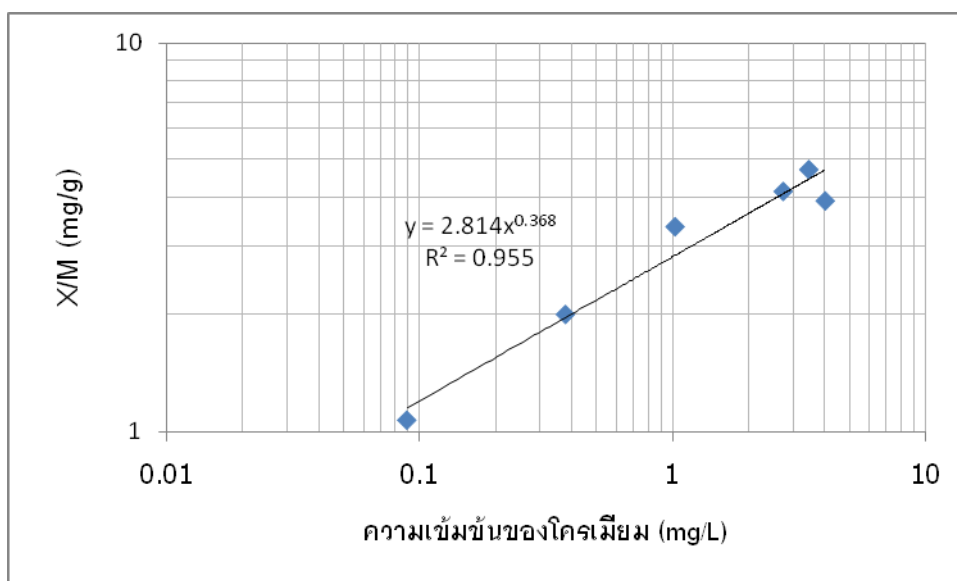
โดย ค่า X = ปริมาณของสารโครเมียมที่ถูกดูดซับ (mg)

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)

X_i = ปริมาณของสารโครเมียมในสารละลายเริ่มต้น (mg)

X_f = ปริมาณของสารโครเมียมที่เหลือในสารละลาย (mg)

C = ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/L)



ภาพที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วย ถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากภาพที่ 4.17 แสดงกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบพหุนดลิตซ์ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 2.814x^{0.368}$ และ ค่า $R^2 = 0.955$

เส้นไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จาก เมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ดังภาพที่ 4.15 ถึงภาพที่ 4.17 สามารถอธิบายได้จากสมการพหุนดลิตซ์ คือ $X/M = KC^{1/n}$ หรือ $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$ เมื่อนำค่า X/M และค่า C ไปวาดลงบนกราฟ \log เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ซึ่งความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะพิจารณาได้จากค่า X/M ซึ่งเป็นปริมาณของสารโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของถ่านที่ใช้ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นไอโซเทอมการดูดติดผิวที่อยู่เหนือเส้นอื่นๆ จะมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวได้ดีกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, KOH และถ่านกัมมันต์ทางการค้า สามารถใช้ค่าคงที่ K และ $1/n$ ที่ได้จากสมการพหุนดลิตซ์ โดยที่ $\log K$ เป็นจุดตัดแกน y และ $1/n$ เป็นความชันของสมการเส้นตรง ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดติดผิวได้ โดยถ้าค่า $\log K$ และ $1/n$ มีค่ามาก ก็จะทำให้เห็นถึงความสามารถในการดูดติดผิวสูง แต่ถ้าค่า $\log K$ และ $1/n$ มีค่าน้อย ก็จะทำให้เห็นถึงความสามารถในการดูดติดผิวต่ำ

โดยวิธีการคำนวณจากสมการเส้นตรง คือ $y = mX + c$ และจากสมการพหุนดลิตซ์ คือ $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$ เมื่อ $\log C$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ $c = \log K$ ดังนั้น $K = 10^c$ เมื่อนำค่า c และ m มาแทนในสมการจะได้ $K = 10^c$ และ $m = 1/n$ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า จากสมการการดูดติดผิวแบบพหุนดลิตซ์

ถ่านกัมมันต์	โครเมียม	
	K (mg/g)	1/n
LG1	2.917	0.45
LG2	3.144	0.47
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	2.814	0.37

หมายเหตุ : LG1 คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

LG2 คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

จากตารางที่ 4.9 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีค่า K สูงสุด คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ซึ่งมีค่าสูงสุด โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียม เท่ากับ 3.144 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมา คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียม เท่ากับ 2.917 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียม เท่ากับ 2.814 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ KOH มีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียมมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

นอกจากนี้ยังพบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH ยังมีค่า 1/n สูงในการดูดติดผิวโครเมียม ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยมีค่า 1/n เท่ากับ 0.47, 0.45 และ 0.37 ตามลำดับ แสดงว่า ค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ และพบว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ KOH มีค่า 1/n สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า เพราะสารที่ถูกดูดติดผิวมีความเข้มข้นสูง ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ KOH จึงมีแนวโน้มในการดูด

ติดผิวได้ดี ดังนั้น จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการหาพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์จากที่กล่าวมาข้างต้น นั่นคือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ KOH มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า และนอกจากนี้ผลที่ได้ยังมีความสอดคล้องกับการหาค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทธิลินบลูจากที่กล่าวมาข้างต้นอีกด้วย นั่นคือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH มีความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมได้มากกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นทางเคมีแบบขั้นตอนเดียว (Single stage) ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการกระตุ้นทางเคมี และสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น คือ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยทำการกระตุ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed) ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

จากการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ พบว่า ภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของเมล็ดลำไยต่อสารกระตุ้น $ZnCl_2$ 1:2 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติ ดังนี้ มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร เท่ากับ 0.4352 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณเถ้าร้อยละ 8.86 ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เท่ากับ 826.95 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด เท่ากับ 225.65 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวสัมผัส เท่ากับ 1032.75 ตารางเมตรต่อกรัม

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย KOH พบว่า ภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนของเมล็ดลำไยต่อสารกระตุ้น KOH 1:3 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสมบัติ ดังนี้ มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร เท่ากับ 0.3640 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณเถ้าร้อยละ 9.73 ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เท่ากับ 839.62 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุด เท่ากับ 243.37 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวสัมผัส 1098.62 ตารางเมตรต่อกรัม

จากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ พบว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นด้วยสาร $ZnCl_2$ และ KOH สมบัติที่ได้ของถ่านกัมมันต์มีค่าที่ใกล้เคียงกับสมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ดังนั้น ผลงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปเป็นแนวทางในการผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไปได้ ซึ่งคุณภาพของถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีสมบัติ ดังนี้คือ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร เท่ากับ 0.3 – 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับไอโอดีน

>600 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เท่ากับ 200 – 350 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณเถ้า ร้อยละ <10 และพื้นที่ผิวบีอีที เท่ากับ 700 – 1200 ตารางเมตรต่อกรัม

5.1.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่เตรียมได้ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากผลการทดลอง ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, KOH และ ถ่านกัมมันต์ทางการค้า ได้ทำการทดลองที่ค่า pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 พบว่า ค่า pH มีผลต่อ ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของโครเมียม โดยมีการดูดติดผิวของโครเมียมสูงสุดที่ค่า pH เท่ากับ 7 ซึ่งมีค่าการดูดติดผิว เท่ากับ ร้อยละ 67.08, 67.85 และ 62.82 ตามลำดับ และเกิดตะกอนจาก การปรับค่า pH เท่ากับ ร้อยละ 33.09 ซึ่งค่า pH ที่ได้นี้จะดูจากการตกตะกอนร่วมด้วย ดังนั้นจึง เลือกว่าค่า pH เท่ากับ 7 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

5.1.2.1 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ แบบฟรอนดลิชของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบ ฟรอนดลิช พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$, KOH และถ่านกัมมันต์ทาง การการค้า มีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียม ที่ค่า pH เท่ากับ 7 ซึ่งมีค่าการดูดติดผิว เท่ากับ 2.917, 3.144 และ 2.814 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้น ด้วย $ZnCl_2$ และ KOH มีค่า $1/n$ สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งมีค่า เท่ากับ 0.45, 0.47 และ 0.37 ตามลำดับ ดังนั้น ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย KOH มีค่า K และ $1/n$ สูงสุดใน การดูดติดผิวโครเมียม ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และถ่านกัมมันต์ ทางการค้า แสดงว่า ค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ เตรียมได้จากเมล็ดลำไย นั่นคือ ถ้าสารที่ถูกดูดติดผิวมีความเข้มข้นสูง ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย ที่กระตุ้นด้วย KOH และ $ZnCl_2$ จึงมีแนวโน้มในการดูดติดผิวได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ เช่น การกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น เพื่อช่วยลดปัญหาในการล้างสารเคมีที่ตกค้างซึ่งอาจเป็นอันตรายได้

2. ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีแบบ 2 ขั้นตอน คือ มีกระบวนการการคาร์บอนไนซ์ร่วมด้วย แต่อาจเปลี่ยนเป็นสารเคมีชนิดอื่น เช่น NaOH หรือ H_3PO_4 เป็นต้น เพื่อเป็นการพัฒนาให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

3. ศึกษาและพิจารณาภาวะในการหาอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารเคมี อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการวิจัย เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และเพื่อเป็นการพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีต้นทุนต่ำ

4. ควรมีการศึกษาทดลองนำถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยโดยการกระตุ้นทางเคมีไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับพิษสารอื่นๆ เช่น โลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็น แคดเมียม ตะกั่ว หรือนิกเกิล เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรรถนิการ์ สิริสิงห์. 2541. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร. ศุภกากร, กรม. 2554. สถิติการนำเข้า-ส่งออก ถ่านกัมมันต์ในประเทศ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.customs.go.th/wps/wcm/connect/Library+cus501th/InternetTH/11/> [20 ตุลาคม 2554]
- จิราพร เงินแจ่ม และบุริมภัทร ปกธรศิริ. 2549. การผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงจากเปลือกเมล็ดทานตะวัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัฐยา พูนสุวรรณ. 2545. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ (Adsorption Processes). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2553. ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้. ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญชัย ตระกูลมหชัย. 2537. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรัชญา แสงเงินอ่อน. 2548. การผลิตถ่านกัมมันต์จากพลาสติก และยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปรินทร์ เต็มถาวรศิลป์. 2551. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ปิยะพร บารมี. 2542. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- พรพรรณ ใจประดับเพชร. 2549. การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัม
มันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รติกร อิศระเสนีย์. 2539. การผลิตถ่านกัมมันต์จากยางรถยนต์ที่ใช้น้ำมันแล้ว โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ
ร้อนนวดด้วย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลลิตา นิตศนจารุกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดซับผิวโดยใช้
ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ฝ่ายเทคโนโลยีอาหาร. 2552.
วารสารเกษตรกรรมธรรมชาติ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.tistr-foodprocess.net/download/article/Lumyai_th.htm. [28 มิถุนายน 2553]
- สุพรรณิ จันท์ภิรมณ์. 2550. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเม็ดลำไย โดยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ
และทางเคมี. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 14(1): 63-76.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2553. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตรที่สำคัญ. สำนักงานเศรษฐกิจ
การเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ประเทศไทย. [ออนไลน์] แหล่งที่มา:
www.oae.go.th/download/prcai/Longan09.xls [1 กรกฎาคม 2553]
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัม
มันต์: Standard for activated carbon. มอก. 900-2547. กรุงเทพมหานคร.
- อริชัย นพแก้ว. 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อกัก
เก็บ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อลิสรา นิตวิวัฒน์. 2554. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียโดยการกระตุ้นทาง
กายภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อำไพ ชนะไชย และจินดารัตน์ พิมพ์สมาน. 2549. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยการ
กระตุ้นทางเคมี. วิศวกรรมสารเอเชียอาคเนย์ ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มิถุนายน-พฤศจิกายน.

ภาษาอังกฤษ

Adriano, D.C 1986. Trace Elements in Terrestrial Environments : Biogeochemistry,
Bioavailability and Risks of Metals. New York : Berlin Heidelberg.

A. Marcilla, S. Garcia Garcia, M. Asensio and J.A. Conesa. 2000. Influence of thermal
treatment regime on the density and reactivity of activated carbons from almond
shell. Carbon. 38: 429-440.

Bansal, R.C., Donnet, J. and Stoeckli, F. 1988. Active carbon. New York : Marcel
Dekker, United State of America.

Cookson, J.T., Jr. 1978. Adsorption mechanisms : the chemistry of organic adsorption
on activated carbon. In Cheremisinoff, P.N., and Ellerbusch, F. (eds.). Carbon
adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.

Dimitrios Kalderis, Sophia Bethanis, Panagiota Paraskeva and Evan Diamadopoulos.
2008. Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-
stage chemical activation method at low retention times. Bioresource
Technology. 99: 6809-6816.

G.G. Stavropoulos, A.A. 2005. Zabaniotou. Production and characterization of activated
carbons from olive-seed waste residue. Journal of Microporous and Mesoporous
Materials. 82: 79-85.

Guo, J., and Lua, A.C. 2000. Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step
CO₂ activation for gaseous pollutant removal. Carbon. 38: 1089-1097.

Hsisheng Teng and Hung-Chi Lin. 1998. Activated carbon production from low ash
subbituminous coal with CO₂ activation. AIChE Journal. 44(5): 1170-1177.

- Ioannidou, O., Zabaniotou, A. 2007. Agricultural residues as precursors for activated carbon production-a review. Renewable Sustainable Energy Reviews. 11: 1966-2005.
- J. J. M. Orfao., F. J. A. Antunes and J. L. Figueiredo. 1999. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. Fuel. 78: 349-358.
- Jai Y.F. 1998. Adsorption of gold and silver species on activated carbon. Master's Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, United Kingdom.
- Juan Yang and Keqiang Qiu. 2010. Preparation of activated carbons from walnut shells via vacuum chemical activation and their application for methylene blue removal. Chemical Engineering Journal. 165: 209-217.
- Kang Sun. 2010. Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. Biomass and Bioenergy. 34: 539-544.
- Lussier, M.G., Shull, J.C., and Miller, D.J. 1994. Activated carbon from cherry stones. Carbon. 32: 1493-1498.
- Marsh, H. 1997. Introduction to carbon technologies. Spain : Secretariado.
- Narges Bagheri and Jalal Abedi. 2009. Preparation of high surface area activated carbon from corn by chemical activation using potassium hydroxide. Chemical Engineering Research and Design. 87: 1059-1064.
- O.Ioannidou and A.Zabaniotou. 2007. Agricultural residues as precursors for activated carbon production-a review. Renewable Sustainable Energy Reviews. 11: 1966-2005.
- Otowa, T., Tanibata, R. and Itoh, M. 1993. Production and adsorption characteristics of maxsorb: high-surface-area active carbon. Gas separation & purification. 7(4): 241-245.
- 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.

- Ramathibodi Poison Center. 2001. CHROMIUM. Bulletin. October – December, 9(4).
[Online] Available from : <http://www.ra.mahidol.ac.th/poisoncenter/bulletin/bul%20%2001/v9n4/Chromium.html>. [22 December 2011]
- R.M. Suzuki., A.D. Andrade and J.C. Sousa. 2007. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. Bioresource Technology. 98: 1985-1991.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K. S. W. 1999. Adsorption by powders and porous solid: Principles methodology and application. London: Academic Press.
- Suat Ucar, Murat Erdem, Turgay Tay and Selhan Karagoz. 2009. Preparation and characterization of activated carbon produced from pomegranate seeds by $ZnCl_2$ activation. Journal of Applied Surface Science. 255: 8890-8896.
- Tan I.A.W., Ahmad A.L., Hameed B.H. 2007. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. Chemical Engineering Journal. 137(3): 462-470.
- Walid K. Lafi. 2000. Production of activated carbon from acorns and olive seeds. Journal of Biomass and Bioenergy. 20: 57-62.
- Yehaskel, A. 1978. Activated Carbon. Manufacture and Regeneration, Park Ridge, New Jersey : Noyes Data Corporation.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของเมล็ดลำไย

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของเมล็ดลำไย ตามวิธี ASTM D3172-89 โดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศ และคำนวณค่าที่ได้เพื่อรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) ยกเว้นค่าความชื้นที่รายงานเทียบน้ำหนักกับสารที่แห้งในอากาศ (Air dry basis) วิธีวิเคราะห์ครอบคลุมการวิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

การเตรียมสารตัวอย่าง

- บดตัวอย่างอย่างรวดเร็วและคัดขนาดของตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 μm (No.60) โดยการบดต้องใช้เวลาไม่มากนัก เพราะอาจทำให้มีความร้อนขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นและสารระเหยได้
- นำตัวอย่างที่บดได้มาผสมรวมกันและเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

1. วิธีหาค่าความชื้น (Moisture, M)

- เผลถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นเป็นเวลาประมาณ 15-30 นาที
- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงเทคนิคตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ก่อนอบแห้ง รวมน้ำหนักของขวดชั่งและฝา
- นำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้หลังอบแห้ง รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาคำนวณค่าความชื้น ดังนี้

$$M = [(A-B)/A] \times 100$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)

B = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการอบแห้ง (กรัม)

2. วิธีหาปริมาณร้อยละสารระเหย (Volatile matter, VM)

- เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงเทคนิคตำแหน่งที่ 4 (คือ มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา และปิดฝา

- นำไปเผาในเตาเผาแบบท่อ โดยวางไว้หน้าเตาเผาเป็นเวลา 2 นาที (อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำเข้าไปเผาที่กึ่งกลางของเตาเผาเป็นเวลา 6 นาที (อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส)

- นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังการเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา

คำนวณหาค่าสารระเหย ดังนี้

$$\text{Weight loss, \%} = [(A-B)/A] \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)

B = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

$$VM = C - D$$

เมื่อ VM = ร้อยละของสารระเหย

C = Weight loss, %

D = ร้อยละของความชื้น

3. ค่าเถ้า (Ash,A)

- เผาถั่วด้วยกระบี่อบพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถั่วด้วยกระบี่อบพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงเทคนิคตำแหน่งที่ 4 (คือ มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถั่วด้วยกระบี่อบพร้อมฝา

- นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ประมาณ 3 ชั่วโมง

- นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังการเผา รวมน้ำหนักของถั่วด้วยกระบี่อบพร้อมฝา

คำนวณค่าเถ้า ดังนี้

$$\text{Ash} = [(A-B)/C] \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักของถั่วด้วยกระบี่อบพร้อมฝาและตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

B = น้ำหนักของถั่วด้วยกระบี่อบพร้อมฝา (กรัม)

C = น้ำหนักของถั่วด้วยกระบี่อบพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

4. ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon,FC)

คำนวณค่าคาร์บอนคงตัว ดังนี้

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

เมื่อ FC = ร้อยละของคาร์บอนคงตัว

M = ร้อยละของความชื้น

A = ร้อยละของเถ้า

VM = ร้อยละของสารระเหย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์

วิธีวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ash, A)

วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 2866-83 โดยวิเคราะห์ และรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของที่ไม่มีควมชื้น (dry basis) รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 μm (No. 60)
- เผาด้วยกระบี่อบทนความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วปล่อยให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งด้วยกระบี่อบทนความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ (X_0)
- ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งที่ 150 ± 5 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักที่คงที่ ประมาณ 3 ชั่วโมง ใส่ในถ้วยกระบี่อบทนความร้อน ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือ มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) และบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ รวมน้ำหนักของถ้วยกระบี่อบทนความร้อน (X_1)
- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 ± 25 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วปล่อยให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ค่อยๆ เปิดฝาหม้อดูดความชื้น เพื่อป้องกันไม่ให้เถ้าที่ได้ฟุ้งกระจาย ชั่งและบันทึกตัวอย่างที่ได้ของตัวอย่างหลังเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระบี่อบทนความร้อน (X_2)

คำนวณค่าเถ้าได้จากสูตร

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

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์

วิธีวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density, BD)

วิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ (Bulk density, BD) ตามวิธี ASTM D 2854-89 รายละเอียดการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 – 120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

- ชั่งกระบอกตวงที่มีความจุ 10 มิลลิลิตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือ มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม) บันทึกผล (X_0)

- ใส่ตัวอย่างลงไปในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่

- ถ้าระดับที่คงที่นั้นไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้วกระแทกกันกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิลิตร

- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง บันทึกผล (X_1)

คำนวณค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จากสมการ

$$BD \text{ (g/cm}^3\text{)} = (X_1 - X_0) / 10$$

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมุติว่าเป็นสารพิษในน้ำ ตามวิธี ASTM D 4607-86 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

สารเคมีที่ใช้

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร เทใส่ในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
- น้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งน้ำแข็ง 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนักเป็น 10 กรัม น้ำแข็งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น
- สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 24.820 กรัมในน้ำ 75 มิลลิลิตร เติมโดยโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.1 กรัม และเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยละลายไอโอดีน 12.700 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 กรัม ด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง จนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายโปแตสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.100 นอร์มอล เตรียมโดยอบโปแตสเซียมไอโอเดตที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วชั่งมา 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร

กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

- ปิเปตสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2 กรัม เขย่าให้ละลาย เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาณ 5 มิลลิลิตร
- ไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

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

โดย N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรท (มิลลิลิตร)

กรรมวิธีเทียบมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี
คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนได้จาก

$$N_2 = (P \times R) / S$$

โดย N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรท (มิลลิลิตร)

กรรมวิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดให้ละเอียดน้อยกว่า 250 μm (No. 60)
 - อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
 - ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือ มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด
- หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าน้อยกว่า เท่ากับและมากกว่า 0.02 น้ำหนักประมาณของตัวอย่าง ดูจากตารางที่ ข.1

- ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจำนวน 10 มิลลิลิตร (ตวงด้วยปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์

- ใส่สารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที

- กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ที่สารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก

- ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ด้วยปิเปต

- ไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร (S) คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมมูลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$X/M \text{ (mg/g)} = [A - (2.2 \times B \times S)] / W$$

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

โดย X/M คือ มิลลิลิตรของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

A คือ $N_1 \times 1269.30$

B คือ $N_2 \times 12.693$

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

- นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่างแกนราบ คือ log C แกนตั้งฉาก คือ log X/M จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

- จากเส้นความสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง C = 0.02 หรือ log C = -1.639 จะทราบค่าบนแกนตั้งฉาก สมมุติเท่ากับ Y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า IA ดังนี้

$$IA \text{ (มิลลิกรัม/กรัม)} = 10^Y$$

ตารางที่ ง.1 นำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

FIND M FOR CALCULATE IODINE NUMBER BY USING ASTM D4607

M				M			
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.388
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.799	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.666	0.567	2750	0.411	0.360	0.3091

ภาคผนวก จ

วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในน้ำ ตามวิธี JIS 1470-1975 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องเขย่าตามแนวราบ
2. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง
3. เครื่องเซนติฟิวจ์

วิธีเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- อบโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งมา 9.0 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้ คือ A
- อบโซเดียมโมโนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้ คือ B
- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

2. สารละลายเมทิลีนบลู

2.1 การเตรียม

อบสารเมทิลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที ชั่งมา 1.2060 กรัม (สมมุติว่ามีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5)

ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1. จนมีปริมาตรเป็น 4,000 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้นี้มี ความเข้มข้น 0.3000 มิลลิกรัมต่อกรัม กวนสารละลายอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปใช้

2.2 การสร้างกราฟมาตรฐาน

ดูดสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้ มา 5.0 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมี ปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ให้สารละลายนี้ คือ M ซึ่งมีความเข้มข้น 0.3000 มิลลิกรัมต่อกรัม เจือ จางสารละลาย M ให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้

ดูดมา 1.0 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00030 มก./มล.

ดูดมา 1.5 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00045 มก./มล.

ดูดมา 2.0 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00060 มก./มล.

ดูดมา 2.5 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00075 มก./มล.

ดูดมา 3.0 มล. เจือจางเป็น 100 มล. ความเข้มข้น = 0.00090 มก./มล.

วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร บันทึกค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำไปสร้างกราฟระหว่างแกนราบ คือ ความเข้มข้นในหน่วย 100 มก./มล. แกนตั้งฉาก คือ ค่า การดูดกลืน จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $\tan \theta$

หมายเหตุ ค่า $\tan \theta$ เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายที่เตรียมได้ ใน การทดลองนี้กำหนดว่าค่าดังกล่าวต้องอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.2 เท่านั้น ถ้าไม่ได้ค่าตามนี้ให้ถือว่า สารละลายที่เตรียมมาใช้ไม่ได้

กรรมวิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 250 μm (No. 60)
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูด ความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักเท่ากับ D ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือ มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดชมพูขนาด 300 มิลลิลิตร ซึ่งมีจุกปิด
- ใส่สารละลายเมทิลีนบลู 50 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ 10 วินาที สังเกตดูว่าสีของ สารละลายเจือจางหรือไม่ ถ้าเจือจางให้ใส่สารละลายเมทิลีนบลูลงไปอีก ครึ่งละ 50 มิลลิลิตร

- เมื่อสีของสารละลายไม่เจือจาง ให้ใส่สารละลายเพิ่มอีก 50 มิลลิลิตร เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลของการดูดซับเท่ากับ 0.3 มก./ก. แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที

- เทสารละลายส่วนบนลงในหลอดเซนติฟิวจ์ แล้วนำไปเซนติฟิวจ์ด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที

- ดูดสารละลายส่วนบนมา 0.5 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร (ค่าคงที่ของการเจือจาง, $C = 100/0.5 = 200$) ถ้าวัดการดูดกลืนแสง แล้วอยู่นอกช่วงของกราฟมาตรฐาน ให้เพิ่มปริมาตรหลังการเจือจาง เช่น เจือจางเป็น 200 มิลลิลิตร ($C = 400$) เป็นต้น

- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร

ค่าการดูดกลืนแสง (Methylene blue adsorption, MB) (มิลลิกรัมต่อกรัม) คำนวณได้จาก

$$MB \text{ (mg/g)} = [0.3000A/D] - [ABC/100D \tan \theta]$$

โดย A = ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ตอนเริ่มต้น, มิลลิลิตร

B = ค่าการดูดกลืนแสง

C = ค่าคงที่ของการเจือจาง = 200 (หรือ 400)

ภาคผนวก จ

วิธีการหาไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

จากการทดลองจะใช้สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ในการอธิบายการดูดซับสารปนเปื้อนด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบว่าสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชเป็นสมการที่เหมาะสมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยได้แสดงสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ซึ่งมีดังต่อไปนี้

$$X/m = KC^{1/n}$$

โดยที่ X = ปริมาณของสารโครเมียมที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

X_i = ปริมาณของสารโครเมียมในสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัม)

X_f = ปริมาณของสารโครเมียมที่เหลือในสารละลาย (มิลลิกรัม)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)

C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

$K, 1/n$ = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

จากตารางที่ 4.9 ในบทที่ 4 ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ต่อการดูดติดผิวของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ผลดังนี้

ตารางที่ ๔.1 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/L)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.00	4.179	4.265	4.428	4.291
0.01	3.682	3.747	3.891	3.773
0.02	3.240	3.414	3.427	3.360
0.04	2.124	2.199	2.210	2.178
0.10	1.364	1.373	1.395	1.377
0.20	0.284	0.295	0.297	0.292
0.40	0.056	0.068	0.072	0.065

ใช้สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช จากสมการ

$$X/m = KC^{1/n}$$

จากตารางที่ ๔.1 ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (X_c) จะเท่ากับ

$$= 3.773 \text{ mg/L} \times 100 \text{ mL} \times (1 \text{ L} / 1000 \text{ mL})$$

$$= 0.3773 \text{ mg}$$

ดังนั้น เมื่อนำมาคำนวณสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชจะได้ ดังตารางที่ ๔.2

ตารางที่ จ.2 การคำนวณการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของ โครเมียมที่เหลือ (mg/L)	ปริมาณโครเมียม ที่เหลือ X_f (mg)	X (mg) $(X_i - X_f)$	X/m (mg/g)
0.00	4.291	0.4291 (X_i)	-	-
0.01	3.773	0.3773	0.0517	5.173
0.02	3.360	0.3360	0.0930	4.652
0.04	2.178	0.2178	0.2113	5.283
0.10	1.377	0.1377	0.2913	2.913
0.20	0.292	0.0292	0.3481	1.741
0.40	0.065	0.0065	0.3295	0.824

แล้วนำข้อมูลจากตารางที่ได้มาวาดกราฟลงบนกราฟ log โดยให้แกน x เป็นค่าปริมาณโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัม) และแกน y เป็นค่า X/m (ปริมาณของโครเมียมที่ถูกดูดซับ, มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะได้เส้นกราฟที่เป็นเส้นตรง

โดยประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด สามารถใช้ค่าคงที่ K และ $1/n$ ที่ได้จากสมการพุนดลิช โดยที่ $\log K$ เป็นจุดตัดแกน y และ $1/n$ เป็นความชันของสมการเส้นตรง โดยมีวิธีการคำนวณจากสมการเส้นตรง คือ $y = a + bx$ และจากสมการพุนดลิช คือ $\log X/m = \log K + (1/n)\log C$ เมื่อ $\log C$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ $a = \log K$ ดังนั้น $K = 10^a$ เมื่อนำค่า a และ b มาแทนในสมการจะได้ $K = 10^a$ และ $b = 1/n$

ภาคผนวก ข

สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 900 – 2547 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและเภสัชกรรม ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมอาหาร น้ำตาล น้ำมันพืช น้ำอัดลม โมโนโซเดียมแอส – กลูตาเมต (Monosodium L – Glutamate) ใช้ดูดก๊าซใน กั้นกรองบุหรี เครื่องทำให้อากาศบริสุทธิ์ในโรงงานและใช้ในการกรองน้ำ

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านที่มีคุณสมบัติดูดซับสี กลิ่น รส บางชนิดได้เป็นอย่างดี ถ่านชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ผลิตได้จากถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านกะลามะพร้าว หรือถ่านกระดูก ด้วยกรรมวิธีก่อกัมมันต์

2.2 ค่าไอโอดีน (Iodine number) หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับเป็น 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

3. ชนิด และชั้นคุณภาพ

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

3.1 ชนิดผง (powdered activated carbon)

3.2 ชนิดเม็ด (granular activated carbon) แบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ

3.2.1 ชั้นคุณภาพพิเศษ (premium grade)

3.2.2 ชั้นคุณภาพที่ 1 (first grade)

3.3 ชนิดอัดเม็ด (pelletised activated carbon)

3.4 ชนิดแท่ง (block activated carbon)

4. ขนาด

4.1 ชนิดผง ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

4.2 ชนิดเม็ด และชนิดอัดเม็ด ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

4.3 ชนิดแท่ง ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย

5. คุณลักษณะที่ต้องการ

5.1 ลักษณะทั่วไป

5.1.1 ชนิดผง ต้องเป็นผงสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

5.1.2 ชนิดเม็ด และชนิดอัดเม็ด ต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

5.1.3 ชนิดแท่ง ต้องเป็นแท่ง ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

5.2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี

5.2.1 ชนิดผง ต้องมีค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600 และความหนาแน่นปรากฏ อยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5.2.2 ชนิดเม็ด ต้องมีค่าไอโอดีน ชั้นคุณภาพพิเศษไม่น้อยกว่า 1000 และชั้นคุณภาพที่ 1 ไม่น้อยกว่า 600 ความชื้น ร้อยละไม่เกิน 8 ความหนาแน่นปรากฏ ไม่น้อยกว่า 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความแข็ง (abrasion resistance) ร้อยละไม่น้อยกว่า 70

5.2.3 ชนิดอัดเม็ด ต้องมีค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600 ความชื้น ร้อยละไม่เกิน 8 ความหนาแน่นปรากฏ ไม่น้อยกว่า 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความแข็ง (abrasion resistance) ร้อยละไม่น้อยกว่า 70

5.2.4 ชนิดแท่ง ต้องมีค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600 และความชื้น ร้อยละไม่เกิน 8

ภาคผนวก ซ

ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย

ตารางที่ ซ.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ (°c)	เวลา (min) อัตราส่วน	ร้อยละผลผลิต					
		กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$			กระตุ้นด้วย KOH		
		1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
500	60	72.17	72.58	67.58	69.91	58.27	51.74
	120	68.00	69.71	61.98	60.34	50.16	46.39
	180	63.74	65.76	60.79	59.81	46.73	44.31
600	60	67.05	68.00	60.35	54.56	51.63	46.21
	120	65.68	66.54	58.50	52.72	48.39	41.84
	180	63.15	63.44	55.85	51.08	41.45	36.17
700	60	61.68	62.99	59.41	48.19	43.38	41.59
	120	59.22	59.56	57.75	46.28	40.18	36.33
	180	55.84	57.34	47.92	42.53	38.62	31.58
800	60	60.34	61.06	58.60	45.93	37.15	38.62
	120	56.48	56.68	56.25	41.63	35.76	32.27
	180	55.00	55.29	45.73	34.81	32.39	28.53

ตารางที่ ๕.2 ค่าการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ภาวะต่างๆ

ภาวะการกระตุ้น			On dry basic			
เมล็กลำไย : $ZnCl_2$	เวลา (min)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	BD (g/cm^3)	Ash (%wt)	IA (mg/g)	MB (mg/g)
1 : 1	60	500	0.6751	5.26	282.03	115.38
		600	0.6537	5.68	402.92	120.08
		700	0.6392	6.14	452.96	144.69
		800	0.6184	7.53	504.03	158.92
	120	500	0.6583	5.82	346.75	132.63
		600	0.6220	6.41	472.83	162.55
		700	0.6098	6.85	566.40	168.12
		800	0.5734	8.05	585.45	183.28
	180	500	0.6247	6.04	384.05	149.50
		600	0.5981	6.77	562.38	184.75
		700	0.5365	7.47	594.07	196.63
		800	0.4876	8.29	643.49	199.04
1 : 2	60	500	0.6628	5.98	419.13	135.82
		600	0.6524	6.74	587.56	142.77
		700	0.6257	6.81	698.46	166.92
		800	0.6175	7.72	704.38	184.64
	120	500	0.6449	6.32	531.73	164.27
		600	0.6053	7.38	718.75	188.17
		700	0.5871	7.66	743.99	192.47
		800	0.5466	8.25	759.99	196.73
	180	500	0.6138	6.82	603.23	171.89
		600	0.5733	7.61	800.11	210.34
		700	0.5284	7.88	814.04	216.12
		800	0.4352	8.46	826.95	225.65
1 : 3	60	500	0.6549	6.23	409.81	128.27
		600	0.6473	6.71	581.79	139.62
		700	0.6236	7.78	644.88	157.74
		800	0.6094	8.26	621.43	177.04
	120	500	0.6472	6.97	492.81	153.91
		600	0.6145	7.41	589.31	170.61
		700	0.5893	8.55	676.28	179.07
		800	0.5514	10.14	625.12	190.44
	180	500	0.6127	7.18	591.99	165.03
		600	0.5640	7.62	666.09	204.34
		700	0.5239	9.36	700.95	211.92
		800	0.4471	10.28	595.19	218.35

ตารางที่ ๓.3 ค่าการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไยที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ภาวะต่างๆ

ภาวะการกระตุ้น			On dry basic			
เมล็ดลำไย : ZnCl ₂	เวลา (min)	อุณหภูมิ (°c)	BD (g/cm ³)	Ash (%wt)	IA (mg/g)	MB (mg/g)
1 : 1	60	500	0.7521	4.36	211.60	92.68
		600	0.7293	5.51	298.12	98.57
		700	0.6647	5.48	349.64	118.66
		800	0.6285	7.13	434.37	136.18
	120	500	0.7256	4.85	320.54	106.15
		600	0.7033	5.76	340.61	134.39
		700	0.5924	6.94	405.10	158.61
		800	0.5568	7.48	435.66	185.93
	180	500	0.7145	5.07	318.88	101.06
		600	0.6854	5.83	326.30	120.16
		700	0.5741	7.17	372.31	140.52
		800	0.5429	7.95	395.50	172.35
1 : 2	60	500	0.7243	5.11	304.20	98.25
		600	0.6905	5.87	459.47	106.14
		700	0.6482	6.44	538.56	120.16
		800	0.5970	8.05	625.69	138.72
	120	500	0.6884	5.64	476.06	111.04
		600	0.6812	6.43	599.36	196.39
		700	0.6408	7.61	637.73	215.33
		800	0.5349	8.59	688.54	229.53
	180	500	0.6902	6.21	471.86	107.45
		600	0.6593	7.36	582.06	147.85
		700	0.5338	7.82	607.79	182.15
		800	0.4761	9.26	658.18	205.89
1 : 3	60	500	0.5827	6.38	413.82	121.87
		600	0.5254	6.75	598.81	180.45
		700	0.4716	7.04	602.57	186.45
		800	0.4473	9.42	701.37	196.74
	120	500	0.4829	6.71	646.39	204.83
		600	0.4385	7.27	739.40	211.73
		700	0.3871	9.45	807.20	216.04
		800	0.3640	9.73	839.62	243.37
	180	500	0.4685	7.13	628.31	184.26
		600	0.4176	7.89	710.38	200.02
		700	0.3832	9.65	742.02	208.49
		800	0.3618	9.78	786.10	218.57

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐวิภา จงรัก เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน 2530 ที่อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจาก สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552