



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
Naresuan University Publishing House

พิมพ์ครั้งที่
2

คาร์บอนกัมมันต์

Activated Carbon

ฉบับปรับปรุง

สัมฤทธิ์ โหม่ง



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร Naresuan University Publishing House

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 อาคารมหาธรรมราชา ชั้น 1 มหาวิทยาลัยนเรศวร
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 โทร. 0 5596 8833-8836 E-mail : nuph@nu.ac.th

www.nupress.grad.nu.ac.th สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร @nupress

สงวนลิขสิทธิ์ ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร ห้ามทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ต่อสาธารณชนไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร เท่านั้น

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

National Library of Thailand Cataloging in Publication Data

สัมฤทธิ์ ไม้พวง.

คาร์บอนกัมมันต์ (ฉบับปรับปรุง) = Activated Carbon.— พิมพ์ครั้งที่ 2.— พิษณุโลก : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2566.
264 หน้า.

1.คาร์บอนกัมมันต์ I. ชื่อเรื่อง.

662.93

ISBN 978-616-426-316-1

ISBN (e-book) 978-616-426-317-8

สพท. 128

ราคา 380 บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2558 | พิมพ์ครั้งที่ 2 (ฉบับปรับปรุง) กรกฎาคม พ.ศ. 2566

จัดพิมพ์โดย สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

วางจำหน่ายที่

1. ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. 0 2218 9812
2. ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทร. 0 2579 0113
3. ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ถนนพระจันทร์ แขวงพระบรมมหาราชวัง เขตพระนคร กรุงเทพฯ 10200 โทร. 0 2613 3899
4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร อาคารมหาธรรมราชา จังหวัดพิษณุโลก 65000 โทร. 0 5596 8833-8836

ประธานกองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ขุติพย์ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ แย้มเม่น • รองศาสตราจารย์สุทัศน์ เขียมวัฒนา • รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ สมกุล •
รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุจันทร์ จำปาไชยศรี • รองศาสตราจารย์ ดร. พญ.สุธาทิพย์ พงษ์เจริญ •
ศาสตราจารย์ ดร. ภญ.กรรณก อิงคินันท์ • รองศาสตราจารย์ ดร.นิทรา กิจธีระวุฒิมังษ์ • ศาสตราจารย์ ดร.สุพิสา ถาน้อย •
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติมา ขาววิชัย • รองศาสตราจารย์ ดร.รุจโรจน์ แก้วอุไร • รองศาสตราจารย์ นาวาโท ดร.วัฒนชัย หมั่นยิ่ง •
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพล พุทธิรักษา • รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ กิจสนาโยธิน • ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยูยงค์ จันทรวิจิตร •
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรรยาภรณ์ สุวพันธ์ • พัชรีย์ ท่วมใจดี • นวิพรพรณ ดันดีพลผล

ประสานงาน รักศักดิ์ เป็ดสีทิฏฐกุล

ฝ่ายขาย/การเงิน พิมพ์ภรณ์ ดวงสาโรจน์ • วสันต์ มาสวัสดิ์

ออกแบบปก ธรรมนูญ กองกุล

ออกแบบรูปเล่ม ธรรมนูญ กองกุล

พิมพ์ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัด พีดีจีดอล กราฟิมพ์ 194/15 ถนนพญาสีไท ตำบล ในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก



สำนักพิมพ์นี้เป็นสมาชิกสมาคมผู้จัดพิมพ์
และผู้จำหน่ายหนังสือแห่งประเทศไทย
<https://pubat.or.th>



ขึ้นต้น
กระดาษคุณภาพ เพื่อผลงานคุณภาพ
กระดาษรีไซเคิล 100%



กรณีต้องการสั่งซื้อหนังสือปริมาณมาก หรือเข้าเรียนติดต่อได้ที่ฝ่ายจัดจำหน่ายสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
โทร. 0 5596 8836 Email : nuph@nu.ac.th

01

unin

01



ลักษณะทั่วไปของคาร์บอนกัมมันต์

คาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะภายในสูง มีโครงสร้างผลึกขนาดเล็กและเป็นแผ่นที่เรียงซ้อนกันอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงมีสมบัติจำเพาะ เช่น มีความคงทนต่อความร้อน ต้านทานต่อการทำลายด้วยกรด มีลักษณะไม่ชอบน้ำ มีจลนศาสตร์การดูดซับที่รวดเร็ว และง่ายต่อการคืนสภาพ อีกทั้งยังมีราคาถูก คาร์บอนกัมมันต์ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (ร้อยละ 87 ถึง 97) และมีธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบอยู่บ้าง เช่น ออกซิเจน กำมะถัน รวมทั้งสารประกอบต่าง ๆ ทั้งที่มีอยู่เดิมในวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตหรือสารที่เติมเข้าไปในระหว่างกระบวนการผลิต [1-3] โดยคาร์บอนกัมมันต์อาจมีแร่ธาตุที่ไร้ประโยชน์เป็นองค์ประกอบในปริมาณร้อยละ 1 ถึง 20 ซึ่งสารเหล่านี้ปกติจะถูกขจัดออกไป แต่ก็ยังคงมีอยู่ในรูปของเถ้าประมาณร้อยละ 0.1–0.2 [4] ทั้งนี้คาร์บอนกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ทำให้สามารถกักเก็บโมเลกุลต่าง ๆ ในพื้นผิวภายในได้ จึงทำให้คาร์บอนกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยปกติปริมาตรรูพรุนรวมของคาร์บอนกัมมันต์มีมากกว่า $0.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ ถึงมากกว่า $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะภายในมีมากกว่า $400 \text{ m}^2/\text{g}$ ถึง $2500 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีความกว้างรูพรุนอยู่ในช่วง 0.3 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 1000 นาโนเมตร [5]

คาร์บอนกัมมันต์ได้ใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับสารทั้งในวัฏภาคก๊าซและของเหลว เช่น ใช้เป็นสารฟอกสีในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล [6] ใช้ในกระบวนการบำบัดหรือทำบริสุทธิ์สารละลายน้ำต่าง ๆ เช่น การขจัดสารมลพิษอินทรีย์ สี สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายและโลหะหนัก [7]



วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์

คาร์บอนกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างของคาร์บอนแบบไม่เป็นระเบียบ ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างของแกรไฟต์ ดังนั้นวัสดุของแข็งคาร์บอนทั้งหลายสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นคาร์บอนกัมมันต์ได้ โดยเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาถูก เช่น วัตถุดิบประเภทถ่านหิน เช่น แร่พีต (peat) ลิกไนต์ (lignite) ถ่านหิน (coal) และผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมวัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมและบ้านเรือน จำพวกสารอินทรีย์ ชีวมวล เซลลูโลส เป็นต้น [6]

ในส่วน of วัตถุดิบประเภทถ่านหินพบว่าโลกของเรามีปริมาณถ่านหินสำรองประมาณ 948 พันล้านตัน ซึ่งมีปริมาณมาก อีกทั้งยังมีข้อดีคือการขนส่ง เก็บง่าย ปลอดภัย และราคาถูก

สามารถนำมาผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ แต่มีข้อเสียที่บางแหล่งอาจมีสารปนเปื้อนจำพวกกำมะถันและ
เถ้าสูง [8] ที่มีผลต่อสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้และก่อกมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

สำหรับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าเพื่อเป็นตัวดูดซับ ต้องการใช้วัตถุดิบตั้งต้น
จากธรรมชาติที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นวัตถุดิบประเภทที่ตีในทางเคมีวัสดุปัจจุบัน
โดยมุ่งไปที่ชีวมวลพืช ซึ่งมีจำนวนมากและมีอย่างต่อเนื่อง ยั่งยืน ราคาถูก สามารถนำไปผลิต
สารคาร์บอนได้อย่างรวดเร็วและมีความรู้ในการดูดซับที่เหมาะสม และหลังจากใช้เป็นตัวดูดซับ
สารมลพิษแล้วสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพใหม่ได้ ทั้งนี้ คาร์บอนกัมมันต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่าง
อื่นได้อย่างกว้างขวาง เช่น เป็นตัวเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับเร่งปฏิกิริยา เป็นขั้วไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ และ
การกักเก็บก๊าซ [9] สำหรับวัสดุเหลือทิ้งหรือผลผลิตพลอยได้ทางการเกษตรอีกมากมายที่ใช้เป็น
วัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้กับชีวมวลที่เป็นของ
เหลือทิ้งเหล่านี้ เช่น แกลบข้าว [10] เมล็ดพุทรา [11] ไม้สน [12] กะลามะพร้าว [13] เปลือกกล้วย
และวงเครือกล้วย [14] เมล็ดลำไย [15] และกากน้ำตาล้า [16] รวมถึงชีวมวลอื่นที่เกิดขึ้นใน
ธรรมชาติ เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน [17] และวัสดุที่เหลือจากกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ
(gasification) ของถ่านหิน [18] เป็นต้น

สำหรับของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิต
ทางการเกษตร รวมทั้งจากบ้านเรือนในแต่ละปีของประเทศไทยมีประมาณ 34 ล้านตัน
ซึ่งเป็นชีวมวลที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูปและสามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้อย่างแพร่หลาย [19]

รวมทั้งยังเป็นการรักษาสังแวดล้อมหรือเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมสำหรับขจัด
สารมลพิษ และเป็นการนำของเหลือทิ้งจากโรงงานมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อโรงงานเองสำหรับ
การบำบัดน้ำเสีย เช่น ชี้ออกจากอุตสาหกรรมไม้ยาง [20] ของเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม [21]
กากตะกอนโรงงานกระดาษ [22] ชีวมวลเกรดต่ำที่เป็นผลผลิตพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม
ผ้าลินินและป่าน [23] ของเหลือทิ้งจากการผลิตไบโอดีเซล [24] หรือแม้แต่กากของเสียจากการ
บำบัดน้ำเสีย [25] รวมถึงสารพอลิเมอร์ เช่น สไตรีน-ไดไวนิลเบนซีนโคพอลิเมอร์ (styrene-
divinylbenzene copolymer) [26] สามารถใช้เป็นตัวดูดซับเริ่มต้นสำหรับการผลิตคาร์บอน
กัมมันต์ได้เช่นกัน

ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากวัตถุดิบชีวมวล สามารถทำได้ทั้งโดย
การกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี หรือโดยการกระตุ้นทั้งทางกายภาพและทางเคมีร่วมกัน

ซึ่งการเพิ่มสมบัติทางพื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์ มีจุดประสงค์เพื่อไปเพิ่มความจุการดูดซับสารมลพิษให้สูงขึ้น โดยพิจารณาถึงกระบวนการกระตุ้น และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนและวิธีการจัดสารปนเปื้อนในคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นหลัก [7] โดยปกติวัสดุชีวมวลที่มีคาร์บอนคงตัวสูง ปริมาณเถ้าต่ำ มีความหนาแน่นหรือมีความแข็งเชิงกลสูง และมีโครงสร้างรูพรุนภายในสูงมาก ๆ เหมาะสำหรับการเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์

สำหรับในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ชนิดเกล็ด วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นถ่านหินหรือถ่านโค้ก (coke) จากเหมืองถ่านหิน ได้ถ่านโค้กัมมันต์ (activated coke) ซึ่งเป็นคาร์บอนกัมมันต์ชนิดเกล็ด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-5 mm เพื่อใช้สำหรับขจัดก๊าซ SO_2 และ NO_x ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านโค้กสำหรับต้มน้ำ [27] แต่วัตถุดิบพวกถ่านหินมีข้อเสียตรงที่มีปริมาณเถ้าสูง (ร้อยละ 23-67) ทำให้ลดคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ รวมทั้งยังมีปริมาณกำมะถันสูงด้วย ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูง [28, 29]



ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์

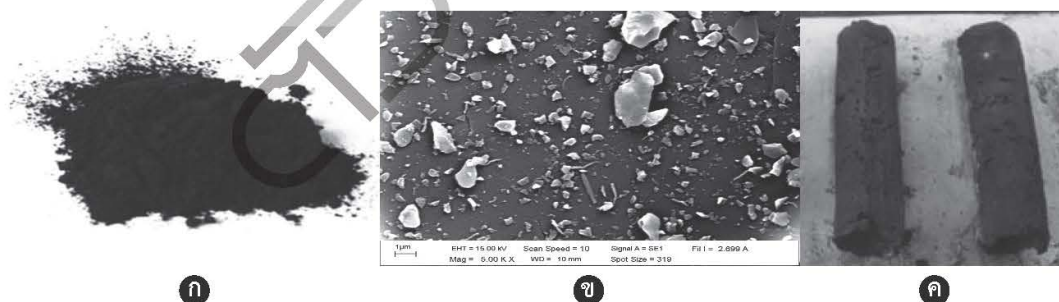
ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ได้มีการแบ่งตามเกณฑ์หลายแบบ ได้แก่ แบ่งตามการใช้ประโยชน์ หรือแบ่งตามคุณสมบัติของเนื้อมวล เช่น ขนาดอนุภาค ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น คาร์บอนกัมมันต์ผง (powdered activated carbons) และคาร์บอนกัมมันต์เกล็ด (granular activated carbons) ซึ่งคาร์บอนกัมมันต์ทั้งสองชนิดนี้มีการผลิตใช้ในเชิงการค้า โดยการนำไปใช้จะพิจารณาตามสภาพของระบบการบำบัด เช่น ในระบบเบดนิ่ง (fixed bed) จะใช้คาร์บอนกัมมันต์ชนิดเกล็ดเพื่อขจัดสารมลพิษก๊าซหรือไอน้ำ นอกจากนี้การแบ่งชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ อาจแบ่งตามลักษณะของรูปร่าง เช่น ใยคาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon fibres) และคาร์บอนกัมมันต์รูปร่างจำเพาะต่าง ๆ [6] ดังจะได้กล่าวต่อไป

1. คาร์บอนกัมมันต์ผง (Powdered Activated Carbon)

คาร์บอนกัมมันต์ผง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเล็กกว่า 0.2 mm โดยส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 0.015 – 0.025 mm ดังแสดงในรูป 1.1ก ทั้งนี้ปริมาณคาร์บอนกัมมันต์ทั้งหมดที่ผลิตได้ในเชิงอุตสาหกรรมประมาณร้อยละ 50 เป็นชนิดผง โดยทั่วไปคาร์บอนกัมมันต์ชนิดผงนี้จะใช้ร่วมกับคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดสำหรับในกรณีที่มีปัญหาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในสารละลายไปสู่บริเวณรูพรุนดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งคาร์บอนกัมมันต์ผงจะช่วยให้

การดูดซับสารปนเปื้อนเข้าสู่สมดุลไวขึ้น [30] แต่โดยปกติจะใช้ถ่านกัมมันต์ผงสำหรับการบำบัดสารในวัฏภาคของเหลวในภาชนะแบบไม่ต่อเนื่องด้วยการกวน (batch stirred vessels) ทั้งนี้ชนิดและปริมาณของคาร์บอนกัมมันต์และเวลาที่ใช้ในการขจัดสารปนเปื้อน เป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องพิจารณาสำหรับทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดอาจทำได้โดยการให้คาร์บอนกัมมันต์ผงแขวนลอยไหลหมุนเวียนในสารละลายเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการแยกออกมาด้วยการทิ้งให้ตกตะกอนหรือกรอง [31] สำหรับการใช้คาร์บอนกัมมันต์ผงบำบัดสารพิษในสถานะก๊าซปกติจะพ่นคาร์บอนกัมมันต์ผงเข้าไปผสมกับไอก๊าซที่ไหลด้วยความเร็วสูง โดยให้มีการกระจายตัวของคาร์บอนกัมมันต์ผงอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจึงทำการกรองแยกคาร์บอนกัมมันต์ผงด้วยแผ่นกรองหรือโดยตัวช่วยตกตะกอนทางไฟฟ้าสถิต [32]

ถ่านกัมมันต์ผงยังได้มีการใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมและการบำบัดน้ำเสียในชุมชน [33] การฟอกสีน้ำตาล อุตสาหกรรมอาหาร เกษษกรรม [34] และการขจัดไอปรอทและไดออกซิน (dioxin) จากไอก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง [35] รวมถึงได้ใช้เติมในกระบวนการสลายชีวภาพด้วยอากาศ (aerobic biodegradation) และในปฏิกรณ์กากตะกอน (sludge reactors) ซึ่งคาร์บอนกัมมันต์ผงสามารถขจัดสารอินทรีย์และไปเพิ่มระดับการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (nitrification) ให้สูงขึ้นได้ [36]



รูป 1.1 ลักษณะสัณฐานของ (ก) คาร์บอนกัมมันต์ผง (ข) คาร์บอนกัมมันต์เกล็ด และ (ค) คาร์บอนกัมมันต์ขั้วรูป [37]

โดยทั่วไปแล้ว ในการผลิตถ่านกัมมันต์ผงจากวัตถุดิบตั้งต้นโดยการกระตุ้นทางกายภาพ ไม่ว่าจะอัดเป็นแท่งหรือไม่ก็ตาม ในขั้นตอนแรกของการผลิต จะทำการหั่นและบดวัตถุดิบให้มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสมก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตคาร์บอนหรือถ่าน (carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น (activation) ทั้งนี้ขนาดอนุภาคของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นยัง

ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นคาร์บอนกัมมันต์ผง ซึ่งโดยปกติแล้วคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้หลังจากขั้นตอนการกระตุ้น ยังคงมีอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วน ที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผลิตถ่าน และการกระตุ้น เนื่องจากการยากมากที่จะควบคุมให้คาร์บอนกัมมันต์มีลักษณะเป็นผงทั้งหมดได้ในระหว่างกระบวนการที่มีความร้อนสูง จึงได้ทำการบดคาร์บอนกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่ให้เป็นผงหลังจากการกระตุ้นสิ้นสุดแล้ว โดยทำการร่อนเพื่อแยกคาร์บอนกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นผงออกมาก่อน จากนั้นร่อนแยกคาร์บอนกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่เป็นคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดที่มีขนาดต่างกัน สำหรับคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ซึ่งปกติไม่ค่อยนิยมนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ จะทำการบดต่อไปเพื่อผลิตเป็นคาร์บอนกัมมันต์ผง [38]

อย่างไรก็ตาม การกระตุ้นทางเคมีจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนกัมมันต์ผงอยู่แล้ว และในบางกรณีถ้ากระตุ้นด้วยสารที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก เช่น การกระตุ้นด้วย KOH ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ KOH มากขึ้นยิ่งจะทำให้ขนาดอนุภาคของคาร์บอนกัมมันต์เล็กลงมาก [39, 40]

คาร์บอนกัมมันต์ผงจะต้องถูกกำจัดทิ้งหลังจากการใช้งานแล้ว ซึ่งไม่สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพใหม่ได้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตที่จะต้องให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในปัจจุบันจึงได้มุ่งไปที่การผลิตคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดเป็นหลัก โดยมีการปรับปรุงคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับใช้เป็นสารดูดซับ [41]

2. คาร์บอนกัมมันต์เกล็ด (Granular Activated Carbon)

คาร์บอนกัมมันต์เกล็ด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคใหญ่กว่า 5 mm ดังแสดงในรูป 1.1 ข ปกติใช้เป็นสารดูดซับในระบบเบดนิ่ง (fixed bed) ของกระบวนการแบบต่อเนื่อง (continuous processes) โดยมีการใช้ในทั้งวัฏภาคของเหลวและก๊าซ แต่ส่วนใหญ่จะใช้ในวัฏภาคก๊าซมากกว่า เช่น การทำให้อากาศบริสุทธิ์ การกรองอากาศ เป็นสารกรองในหน้ากาก ใช้ในการแยกก๊าซ รวมทั้งยังมีการใช้แทนคาร์บอนกัมมันต์ผงในวัฏภาคของเหลว เช่น การสกัดทอง [42] การทำบริสุทธิ์ตัวทำละลายสำหรับนำกลับมาใช้ใหม่และการขจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำสำหรับการผลิตน้ำดื่ม [43] เป็นต้น

คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดมีข้อดีกว่าคาร์บอนกัมมันต์ผง คือ ทำให้ความดันในระบบการบำบัดลดลงน้อยกว่าและยังสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพหรือทำการกระตุ้นใหม่ได้ และเมื่อใช้ในการขจัดสารในตะกอน คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดสามารถเข้าร่วมกับตะกอนได้ดีกว่าคาร์บอนกัมมันต์ผงภายใต้

สภาวะธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดยังมีรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ไม่มากนักและมีพื้นผิวที่เรียกว่าคาร์บอนกัมมันต์ผิวนิ่ง ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า แต่มีความหนาแน่นสูงและความแข็งแรงสูง จึงทำให้มีความคงทนในการใช้งาน โดยคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม คือ [6]

1. คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดไม่ขึ้นรูป หรือคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดชนิดแตกหัก (Unshaped หรือ broken GAC)
2. คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดขึ้นรูปเฉพาะ (Shaped Granular Activated Carbon of a specific form)

ส่วนคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดชนิดแตกหัก (Broken GAC) เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน โดยผ่านเพียงการบดและร่อน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วคาร์บอนกัมมันต์ชนิดนี้เกิดจากคาร์บอนกัมมันต์ผิวนิ่งผสมกับตัวประสานแล้วทำให้มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นจะต้องทำการทุบและบดอีกครั้ง เป็นผลทำให้เกิดการแตกหักและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน [38]

คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดขึ้นรูป เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการขึ้นเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น รูปทรงกระบอก (ดังแสดงในรูป 1.1ค) ซึ่งทำได้โดยการอัดรีด (extrusion) หรือโดยการอัดเป็นเม็ด (pelletisation) ซึ่งผงคาร์บอนกัมมันต์จะผสมกับตัวประสานเพื่อให้การอัดเป็นรูปทรงที่อยู่ตัวได้ [44]

สาเหตุในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดขึ้นรูป ก็เพื่อให้คาร์บอนกัมมันต์ขึ้นรูปมีความหนาแน่นและความแข็งแรง และทนต่อการสึกกร่อน ซึ่งจะส่งผลให้คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดขึ้นรูปมีความคงทนในการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการกระตุ้น โดยเฉพาะการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ ต้องการให้อนุภาคของคาร์บอนกัมมันต์มีความพรุนภายในที่สูงขึ้น จะต้องทำให้ไอก๊าซของสารกระตุ้นกระจายอย่างสม่ำเสมอในทุกอนุภาค จึงต้องทำให้วัตถุดิบคาร์บอนเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตมีขนาดเล็กและมีช่องว่างมาก ๆ เป็นผลทำให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นและความแข็งแรงต่ำ ซึ่งผลทำให้มีการสึกกร่อนสูงในระหว่างการใช้งานบำบัดในวัฏภาคของเหลว [44]

คาร์บอนกัมมันต์เกล็ดขึ้นรูป หรือเรียกอีกชื่อว่า คาร์บอนกัมมันต์อัดขึ้นรูป (activated carbon extrudates) โดยในกระบวนการผลิตจะทำการย่อยวัตถุดิบตั้งต้นให้ละเอียด แล้วทำการขจัดสารระเหยง่ายที่อุณหภูมิสูงในสภาพบรรยากาศเฉื่อยหรือไม่มีออกซิเจนเพื่อให้ได้ถ่าน จากนั้นกระตุ้นด้วยไอน้ำจะได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นก้อน ทำการบดต่อให้ละเอียดจนได้คาร์บอน

กัมมันต์ผง จากนั้นผสมสารประสานที่เหมาะสม จะทำให้ได้เนื้อสารผสมที่เหนียวขึ้น ซึ่งสามารถอัดขึ้นรูปได้

สำหรับตัวประสานที่ทำให้มีความเหนียวขึ้นควรมีสสมบัติดังนี้ คือทำให้สารผสมอัดขึ้นรูปได้ และยังมีสมบัติการประสานที่ดีในสภาวะอุณหภูมิต่ำในขั้นทำให้แห้งเพื่อให้คงรูปอยู่ได้ รวมทั้งต้องกระทำเป็นตัวประสานที่ดีในสภาวะอุณหภูมิสูงในขั้นการกระตุ้นเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงสูง [9] ตัวประสานแต่ละชนิดมีผลต่อการสีกกร่อนและความแข็งแรงของคาร์บอนกัมมันต์ เช่น พิต จัดเป็นตัวประสานอุณหภูมิสูง โดยการอัดขึ้นรูปจะทำการออกซิไดซ์ของผสมที่อุณหภูมิปานกลางก่อนเพื่อให้พิตมีความเสถียร ซึ่งจะเกิดการเชื่อมไขว้ (cross-link) ผ่านชั้นแกรฟีน (graphene layers) ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นโครงร่างของแข็งที่อุณหภูมิสูงและเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการไพโรไลซิสที่สมบูรณ์ของพิต (ขั้นตอนนี้เหมือนกับขั้นตอนการทำให้เสถียร (stabilization) ของใยคาร์บอน หลังจากการปั่นในขณะเป็นของเหลว) และหลังจากการทำเสถียรคาร์บอนกัมมันต์ขึ้นรูปแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การควบคุมการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุนทั่วทั้งคาร์บอนและพิตที่ถูกคาร์บอนไอซ์และเสถียรแล้ว ซึ่งถ้าไม่ทำตามกระบวนการนี้แล้วจะทำให้ตัวประสานไปปิดกั้นโครงร่างรูพรุนภายในของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ [1]

เหตุจำเป็นที่จะต้องผลิตเป็นคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดสำหรับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นทางเคมี เพราะว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการกระตุ้นทางเคมีจะมีลักษณะเป็นเม็ดฝุ่นและมีผงฝุ่นปกคลุมบนพื้นผิว ซึ่งมีผลทำให้คุณภาพเชิงกลของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ลดลง เช่น การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากผงลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งหลังจากทำให้ร้อนในกระบวนการกระตุ้น คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีความหนาแน่น ความแข็งแรงและการสีกที่ดีกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ [45] โดยเฉพาะในกรณีที่กระตุ้นด้วย KOH ในอัตราส่วนที่สูงจะได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นผงมากขึ้น จึงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องขึ้นรูปหลังการกระตุ้น อย่างไรก็ตามการใช้ตัวประสานบางชนิดสำหรับในการอัดเม็ดหรือการอัดรีด โดยผสมกับคาร์บอนกัมมันต์หลังจากการกระตุ้นแล้วจะทำให้ความจุในการดูดซับ (adsorption capacity) ของคาร์บอนกัมมันต์ขึ้นรูปลดลง ทั้งนี้เพราะว่าตัวประสานไปปิดกั้นรูพรุนบางส่วน [6] แต่โดยทั่วไปจะใช้น้ำช่วยในการอัดเม็ด ทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดเพื่อผลิตเป็นคาร์บอนกัมมันต์เกล็ดที่มีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูง คือประมาณร้อยละ 6–12 โดยน้ำหนัก [44]

3. ไยคาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon Fibres)

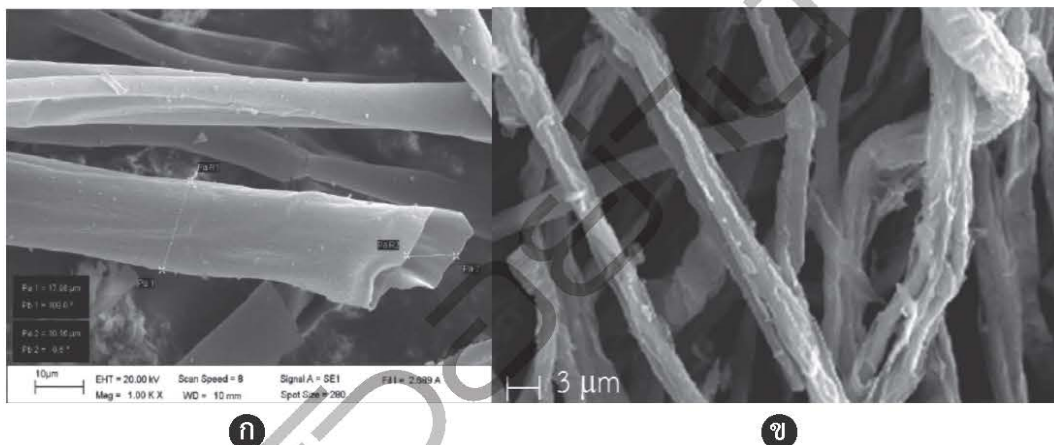
ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้พบคาร์บอนชนิดใหม่ ๆ เกิดขึ้น และสามารถนำมาผลิตเป็นคาร์บอนกัมมันต์ต่อไปได้ เช่น ไยคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งเป็นไยคาร์บอนที่ผ่านการคาร์บอนเซชัน (carbonization) แล้วทำการกระตุ้นในบรรยากาศความร้อนสูง โดยได้เริ่มการผลิตตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 [6]

ไยคาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ดีมาก เพราะว่ามีโครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก มีพื้นที่ผิวสูงและมีหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่ว่องไว ซึ่งได้มีการนำไปใช้ในหลายด้าน เช่น การพิมพ์ การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสีย้อม ในระยะเริ่มต้นของการผลิตไยคาร์บอนกัมมันต์ได้ใช้ใยสังเคราะห์ทางเคมี เช่น พอลิอะคริโลไนไทรล์ (polyacrylonitrile) ไยเหนียวเซลลูโลส เป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งได้ไยคาร์บอนกัมมันต์ที่มีสมบัติการดูดซับดีมากสำหรับการดูดซับไอออนโลหะหนัก สีย้อมโมเลกุลขนาดเล็ก แต่วัตถุดิบเหล่านี้มีการสลายที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีการใช้ไยจากชีวมวลแทน โดยเฉพาะจากของเหลือทิ้ง เช่น เปลือกผลไม้ ลำต้นและของเหลือทิ้งที่สกัดสารอาหารออกไปแล้ว เนื่องจากมีราคาถูก ง่ายในการเตรียมและมีความยั่งยืน รวมทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าขยะชีวมวลด้วย อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับของไยคาร์บอนกัมมันต์ค่อนข้างแตกต่างกัน เมื่อผลิตจากชีวมวลที่แตกต่างกัน เช่น ไยคาร์บอนกัมมันต์จากฝ้าย แสดงความจุในการดูดซับสูงมาก ซึ่งไยชีวมวลมีโครงสร้างขนาดเล็กที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของไยคาร์บอน ยิ่งกว่านั้นกระบวนการกระตุ้นและการตัดแปรพื้นผิวเส้นไยคาร์บอนก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพการดูดซับของไยคาร์บอนด้วย

ในทางทฤษฎี ไยชีวมวลแบบกลวงเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ดีสำหรับการเตรียมไยคาร์บอนกัมมันต์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงหลังจากการคาร์บอนเซชันและการกระตุ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อสมบัติการดูดซับ นอกจากนี้ไยคาร์บอนกลวงยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น ความหนาแน่นต่ำ ความสูงและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี ที่สำคัญกว่านั้นคือความกลวงและร่องตามยาวของเส้นไยมีประโยชน์ในการเพิ่มพื้นที่ผิวเฉพาะที่ถือเป็นคุณสมบัติโครงสร้างที่สำคัญสำหรับการเตรียมไยคาร์บอนกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง [45] เช่น ไยคาร์บอนกลวงจากฝ้าย [44] ดังแสดงในรูป 1.2 (ก) ซึ่งโลหะต่าง ๆ สามารถยึดเกาะพื้นผิวได้ดีในการผลิตเป็นคอมโพสิต (composite)

ไยคาร์บอนกัมมันต์มีสมบัติแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของไยวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น เช่น การผลิตไยคาร์บอนกัมมันต์จากไยใบปาล์ม โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสังกะสีคลอไรด์ (ZnCl_2)

กับกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และกระตุ้นทางกายภาพด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ กับไอน้ำ ซึ่งพบว่า การกระตุ้นทางเคมีได้ผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ อีกทั้งยังใช้อุณหภูมิการกระตุ้นที่ต่ำกว่า นอกจากนี้การกระตุ้นทางเคมีได้เียวคาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงถึง $1190 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีปริมาตรรูพรุนมากถึง $0.543 \text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งเกิดรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่การกระตุ้นทางกายภาพเกิดรูพรุนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น [47] สำหรับเียวคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากเียวใบสับปะรดที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600°C ได้เียวคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว $636.35 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กถึงร้อยละ 83.92 [46] ดังแสดงในรูป 1.2 (ข)



รูป 1.2 (ก) เียวคาร์บอนกลวงจากเียวกล้วย [45] (ข) เียวคาร์บอนกัมมันต์จากเียวใบสับปะรดจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก 1:2 %w/v ของเส้นเียวต่อกรด และคาร์บอนในเซชันที่ 600°C [48]

4. ซูเปอร์คาร์บอนกัมมันต์ (super activated carbons)

คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ เรียกว่า ซูเปอร์คาร์บอนกัมมันต์ (super activated carbons) ซึ่งมีการใช้สำหรับการทำให้สารบริสุทธิ์เป็นสารเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับเร่งปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซและการกักเก็บพลังงาน เนื่องจากมีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงมาก และยังมีเสถียรทางเคมีและความร้อนสูงมากด้วย [49] เช่น การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกากสาที่เป็นของเสียจากโรงงานผลิตไวน์ โดยการกระตุ้นด้วย KOH ในสัดส่วนร้อยละ 60 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 900°C ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนขนาด $0.9613 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ $2015 \text{ m}^2/\text{g}$ [50]



สรุปท้ายบท

คาร์บอนกัมมันต์เป็นสารคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูพรุนสูงที่เกิดจากการทำลายชิ้นแกรไฟต์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ของสารออกซิไดซ์ในกระบวนการกระตุ้น โดยเฉพาะการเกิดรูพรุนขนาดเล็กที่มีสมบัติในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบคาร์บอนเป็นหลัก ซึ่งอาจเป็นวัตถุดิบที่เป็นสารชีวมวลจากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ หรือวัตถุดิบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นถ่านแล้ว เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ถ่านโค้ก เป็นต้น โดยสารชีวมวลจะต้องผ่านกระบวนการผลิตคาร์บอนเพื่อขจัดองค์ประกอบสารระเหยง่าย หรือสารที่ไม่ใช่คาร์บอนก่อนการทำการกระตุ้น ส่วนวัตถุดิบที่เป็นถ่านอยู่แล้วสามารถทำการกระตุ้นเพื่อเป็นคาร์บอนกัมมันต์ได้โดยไม่ต้องผ่านการคาร์บอนไนเซชัน ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์เพื่อใช้ในการค้าส่วนใหญ่จะมีสองรูปแบบ คือ คาร์บอนกัมมันต์แบบผงเพื่อใช้ในการดูดซับสารในวัฏภาคของเหลวที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามต้องใช้เวลาในกระบวนการดูดซับ ในขณะที่คาร์บอนกัมมันต์แบบเกล็ดใช้ในการดูดซับสารได้ทั้งในวัฏภาคของเหลวและก๊าซ ซึ่งมีความสะดวกในการนำใช้มากกว่าแบบผง นอกจากนี้คาร์บอนกัมมันต์ยังสามารถผลิตได้จากคาร์บอนในรูปอื่น ๆ ได้อีก เช่น ไยคาร์บอนกัมมันต์ เป็นต้น ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับหรือใช้ประกอบในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีมาก และในปัจจุบันได้มีการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ ที่เรียกว่าซูเปอร์คาร์บอนกัมมันต์



1. DiPanfilo, R., Egiebor, N.O. Activated carbon production from synthetic crude coke. *Fuel Processing Technology*, 46, 157–169, 1996.
2. Prahas, D., Kartika, Y., Indraswati, N., Ismadji, S. Activated carbon from jackfruit peel waste by H_3PO_4 chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization. *Chemical Engineering Journal*, 140, 32–42, 2008.
3. Olorundare, O.F., Krause, R.W.M., Okonkwo, J.O., Mamba, B.B. Potential application of activated carbon from maize tassel for the removal of heavy metals in water. *Physics and Chemistry of the Earth*, 50–52, 104–110, 2012.
4. Cheung, W.H., Lau, S.S.Y., Leung, S.Y., Ip, A.W.M., McKay, G. Characteristics of chemical modified activated carbons from bamboo scaffolding. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(3) 515–523, 2012.
5. Choma, J., Jaroniec, M. Characterization of nanoporous carbons by using gas adsorption isotherms. *Activated carbon surfaces in environmental remediation*. Elsevier Ltd. pp.107–158, 2006.
6. Menéndez-Díaz, J.A., Martín-Gullón, I. Types of carbon adsorbents and their production. *Interface Science and Technology*, 7, 1–47, 2006.
7. Dias, J.M., Alvim-Ferraz, M.C.M., Almeida, M.F., Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M. Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 85, 833–846, 2007.
8. <https://th.wikipedia.org/wiki/ถ่านหิน>, 22/9/2565
9. Chen, Y., Zhu, Y., Wang, Z., Li, Y., Wang, L., Ding, L., et al. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process—A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 163, 39–52, 2011.
10. Ahmedna, M., Marshall, W.E., Rao, R.M. Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. *Bioresource Technology*, 71, 113–123, 2000.
11. Omri, A., Wali, A., Benzina, M. Adsorption of bentazon on activated carbon prepared from *Lawsonia inermis* wood: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S2, S1729–S1739, 2016.
12. Malaika, A., Kozłowski, M. Hydrogen production by propylene-assisted decomposition of methane over activated carbon catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 10302–10310, 2010.

13. Maroto-Valer, M.M., Dranca, I., Clifford, D., Lupascu, T., Nastas, R., Leond, C.A.L. Thermal regeneration of activated carbons saturated with ortho- and meta-chlorophenols. *Thermochimica Acta*, 444, 148–156, 2006.
14. Mopoung, S. Surface properties of granulated active charcoal prepared from peels and bunch-stalks of banana charcoal. *Nu Science Journal*, 4(S1), 113–122, 2007.
15. Mopoung, S., Nogklai, W. Chemical and surface properties of longan seed activated charcoal. *International Journal of Physical Sciences*, 3(10), 234–239, 2008.
16. Mopoung, S., Preechachan, P. Properties of charcoal and activated carbon prepared from soybean milk residue. *NU Science Journal*, 6(2), 135–146, 2010.
17. Zhang, H., Tang, Y., Cai, D., Liu, X., Wang, X., Huang, Yu, Z. Hexavalent chromium removal from aqueous solution by algal bloom residue derived activated carbon: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 801–808, 2010.
18. García-García, A., Gregório, A., Franco, C., Pinto, F., Boavida, D., Gulyurtlu, I. Unconverted chars obtained during biomass gasification on a pilot-scale gasifier as a source of activated carbon production. *Bioresource Technology*, 88 (1), 27–32, 2003.
19. วีรชัย อางหาญ, สมรัฐ เกิดสุวรรณ, และ วีรัช อยู่ชา. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาแนวทางบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงและลดการเกิดหมอกควัน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554, 2555.
20. Kumar, B.G.P., Shivakamy, K., Miranda, L.R., Velan, M. Preparation of stem activated carbon from rubberwood sawdust (*Hevea brasiliensis*) and its adsorption kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, B136, 922–929, 2006.
21. Budinova, T., Petrov, N., Parra, J., Baloutzov, V. Use of an activated carbon from antibiotic waste for the removal of Hg(II) from aqueous solution. *Journal of Environmental Management*, 88, 165–172, 2008.
22. Khalili, N.R., Vyas, J.D., Weangkaew, W., Westfall, S.J., Parulekar, S.J., Sherwood, R. Synthesis and characterization of activated carbon and bioactive adsorbent produced from paper mill sludge. *Separation and Purification Technology*, 26, 295–304, 2002.
23. Williams, P.T., Reed, A.R. Pre-formed activated carbon matting derived from the pyrolysis of biomass natural fibre textile Waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 70, 563–577, 2003.
24. Foo, K.Y., Hameed, B.H. Utilization of biodiesel waste as a renewable resource for activated carbon: Application to environmental problems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2495–2504, 2009.

25. Rozada, F., Calvo, L.F., García, A.I., Martín-Villacorta, J., Otero, M. Dye adsorption by sewage sludge-based activated carbons in batch and fixed-bed systems. *Bioresource Technology*, 87, 221–230, 2003.
26. Puziy, A.M., Poddubnaya, O.I., Martínez-Alonso, A., Suárez-García, F., Tascoín, J.M.D. Synthetic carbons activated with phosphoric acid I. Surface chemistry and ion binding properties. *Carbon*, 40, 1493–1505, 2002.
27. Itaya, Y., Kawahara, K., Lee, C.-W., Kobayashi, J., Kobayashi, N., Hatano, S., et al. Dry gas cleaning process by adsorption of H_2S into activated cokes in gasification of carbon resources. *Fuel*, 88, 1665–1672, 2009.
28. Dalai, A.K., Jasimuz Zaman, J., Hall, E.S., Tollefson, E.L. Preparation of activated carbon from Canadian coals using a fixed-bed reactor and a spouted bed-kiln system. *Fuel*, 75(2), 227–237, 1996.
29. Tsyntsarski, B., Marinov, S., Budinova, T., Yardim, M.F., Petrov, N. Synthesis and characterization of activated carbon from natural asphaltites. *Fuel Processing Technology*, 116, 346–349, 2013.
30. Dwivedi, C.P., Sahu, J.N., Mohanty, C.R., Raj Mohan, B., Meikap, B.C. Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb(II) removal. *Journal of Hazardous Materials*, 156, 596–603, 2008.
31. Ormad, M.P., Miguel, N., Claver, A., Matesanz, J.M., Ovelleiro, J.L. Pesticides removal in the process of drinking water production. *Chemosphere*, 71, 97–106, 2008.
32. Ayotamuno, M.J., Okparanma, R.N., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D. Chromium removal from flocculation effluent of liquid-phase oil-based drill-cuttings using powdered activated carbon. *Applied Energy*, 84, 1002–1011, 2007.
33. Harrelkas, F., Azizi, A., Yaacoubi, A., Benhammou, A., Pons, M.N. Treatment of textile dye effluents using coagulation–flocculation coupled with membrane processes or adsorption on powdered activated carbon. *Desalination*, 235, 330–339, 2009.
34. Kailappan, R., Gothandapani, L., Viswanathan, R. Production of activated carbon from prosopis (*Prosopis juliflora*). *Bioresource Technology*, 75, 241–243, 2000.
35. Sasmaz, E., Kirchofer, A., Jew, A.D., Saha, A., Abram, D., Jaramillo, T.F., et al. Mercury chemistry on brominated activated carbon. *Fuel*, 99, 188–196, 2012.
36. Aghamohammadi, N., Aziz, H.B.A., Isa, M.H., Zinatizadeh, A.A. Powdered activated carbon augmented activated sludge process for treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 98, 3570–3578, 2007.

37. Mopoung, S., Sriprang, N., Namahoot, J., Pumfang, N., Chuayudom, L., Rattanprasisit, W., et al. Functionalization and Formation of Drinking Water Filter Rod from Lignite with Zeolite, Bentonite, and Clay. *Carbon – Science and Technology*, 8(1), 55-62, 2016.
38. Lima, I.M., McAloon, A., Boateng, A.A. Activated carbon from broiler litter: Process description and cost of production. *Biomass and Bioenergy*, 32, 568–572, 2008.
39. Chandra, T.C., Mirna, M.M., Sunarso, J., Sudaryanto, Y., Ismadji, S. Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40, 457–462, 2009.
40. Liu, X., Zhang, C., Geng, Z., Cai, M. High-pressure hydrogen storage and optimizing fabrication of corncob-derived activated carbon. *Microporous and Mesoporous Materials*, 194, 60–65, 2014.
41. Inagaki, M., Park, K.C., Endo, M. Carbonization under pressure. *New Carbon Materials*, 25(6), 409–420, 2010.
42. Poinern, G.E.J., Senanayake, G., Shah, N., Thi-Le, Z.N., Parkinson, G.M., Fawcett, D. Adsorption of the aurocyanide, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ complex on granular activated carbons derived from macadamia nut shells – A preliminary study. *Minerals Engineering*, 24, 1694–1702, 2011.
43. Gibert, O., Lefèvre, B., Fernández, M., Bernat, X., Paraira, M., Pons M., Fractionation and removal of dissolved organic carbon in a full-scale granular activated carbon filter used for drinkingwater production. *Water Research*. 47, 2821–2829, 2013.
44. Rizhikovs, J., Zandersons, J., Spince, S., Dobeles, G., Jakab, E. Preparation of granular activated carbon from hydrothermally treated and pelletized deciduous wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93, 68–76, 2012,
45. Wang, D., Wang, Z., Zheng, X., Tian, M. Activated carbon fiber derived from the seed hair fibers of *Metaplexis japonica*: Novel efficient adsorbent for methylene blue. *Industrial Crops & Products*, 148, 2020, 112319.
46. Singse, W., Mopoung S., Sirikulajor, A. Synthesis and Characterization of Al, Cu, Zn, Mg-Kapok carbon fiber composites. *Scientific Research and Essays*, 7(15), 1592-1604, 2012.
47. Avelar, F.F., Bianchi, M.L., Gonçalves, M., Gaspar da Mota, E. The use of piassava fibers (*Attalea funifera*) in the preparation of activated carbon. *Bioresource Technology*, 101, 4639–4645, 2010.
48. Mopoung, S., Amornsakchai, P. Microporous Activated Carbon Fiber from Pineapple Leaf Fiber by H_3PO_4 Activation. *Asian Journal of Scientific Research*, 9(1), 24-33, 2016.

49. Zhang, Z., Lei, Y., Li, D., Zhao, J., Wang, Y., Zhou, G., et al. Sudden heating of H_3PO_4 -loaded coconut shell in CO_2 flow to produce super activated carbon and its application for benzene adsorption. *Renewable Energy*, 153, 1091-1099, 2020.
50. Li, L., Wu, M., Song, C., Liu, L., Gong, W., Ding, Y., et al. Efficient removal of cationic dyes via activated carbon with ultrahigh specific surface derived from vinasse wastes. *Bioresource Technology*, 322, 2021, 124540.

Copyright

หนังสือเล่มนี้เป็นการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องดนตรีสยามที่ปรากฏในจดหมายเหตุของชาวฝรั่งเศสในสมัยสมเด็จพระนารายณ์มหาราชแห่งกรุงศรีอยุธยา โดยศึกษาจากเอกสารต้นฉบับภาษาฝรั่งเศสสู่ฉบับแปลภาษาอังกฤษและฉบับแปลภาษาไทย จำนวนทั้งสิ้น 82 ฉบับ มีเนื้อหาครอบคลุมด้านการขนานนามเครื่องดนตรีที่มีการถอดเสียงคำภาษาไทย การใช้คำยืมจากดนตรีตะวันตก คำบรรยายที่บ่งชี้ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของเครื่องดนตรีแต่ละเครื่อง บทบาทหน้าที่ของการบรรเลงที่พบในบริบทต่าง ๆ ตลอดจนภาพรวมของวัฒนธรรมดนตรีในราชสำนักสยามในช่วงเวลานั้นเพื่อประมวลสู่การสกัดสาระข้อเท็จจริงและวิพากษ์ประเด็นข้อสันนิษฐานต่าง ๆ ที่บันทึกขึ้นจากพื้นความรู้ ทัศนคติ และวัฒนธรรมของผู้บันทึกชาวยุโรป ดังนั้น สารคดีในจดหมายเหตุที่บันทึกโดยชาวฝรั่งเศสกลุ่มนี้จึงมีคุณค่าและความสำคัญต่อการศึกษาทางด้านประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมดนตรีไทย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ เชิดชู

การศึกษา

ปริญญาตรี ศิลปกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญาโท ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญาเอก ศิลปกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจุบัน

อาจารย์ประจำภาควิชาดนตรี คณะมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
Naresuan University Publishing House



ISBN 978-616-426-314-7



ราคา 520 บาท

<https://www.nupress.grad.nu.ac.th>