NARESUAN UNIVERSITY
ANNIVERSARY

คาร์บอนกัมมันต์

Activated Carbon

ฉบับปรับปรุง

พิมพ์ครั้งที่ 2

สัมฤทธิ์ โม้พวง

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
Naresuan University Publishing House
www.nupress.grad.nu.ac.th

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

สพน. 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 ชูทิพย์ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ แย้มแม่น • รองศาสตราจารย์สุทัศน์ เยี่ยมวัฒนา • รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดา สมกุล • รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุจันทร์ จำปาไชยศรี • รองศาสตราจารย์ ดร. พญ.สุธาทิพย์ พงษ์เจริญ • ศาสตราจารย์ ดร. ภญ.กรกนก อิงคนินันท์ • รองศาสตราจารย์ ดร.นิทรา กิจธีระวุฒิวงษ์ • ศาสตราจารย์ ดร.สุทิสา ถาน้อย • รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติมา ชาญวิชัย • รองศาสตราจารย์ ดร.รุจโรจน์ แก้วอุไร • รองศาสตราจารย์ นาวาโท ดร.วัฒนชัย หมั่นยิ่ง • รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพล พุทธรักษา • รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ กิจสนาโยธิน • ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุวยงค์ จันทรวิจิตร • ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรรยารักษ์ สุวพันธ์ • พัชรี ท้วมใจดี • นวิพรรณ ตันติพลาผล

ประสานงาน ภัคคีณี เทิดสิทธิกุล

ฝ่ายขาย/การเงิน พิมพาภรณ์ ดวงสาโรจน์ • วสันต์ มาสวัสดิ์

ออกแบบปก ธรรมนูญ กองกูล

ออกแบบรูปเล่ม ธรรมนูญ กองกูล

พิมพ์ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัด พี.ดีจิตอล การพิมพ์ 194/15 ถนนพญาลิไท ตำบล ในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก

pubat สำนักพิมพ์นี้เป็นสมาชิกสมาคมผู้จัดพิมพ์และผู้จำหน่ายหนังสือแห่งประเทศไทย https://pubat.or.th

Green Read พิมพ์บน กระดาษคุณภาพ เพื่อผลงานคุณภาพ กระดาษถนอมสายตากรีนรีด

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

@nupress สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

เรื่องเล่าจากปก

คาร์บอนกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่ผลิตได้จากถ่านหรือวัสดุคาร์บอนโดยการกระตุ้นด้วยสารออกซิไดซ์ในสภาวะรีดักชันเพื่อให้ถ่านหรือวัสดุคาร์บอนมีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้นรวมทั้งเกิดหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมากขึ้น ในกระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จึงประกอบด้วยกระบวนการสำคัญสองกระบวนการ คือ การคาร์บอไนเซชัน และการกระตุ้น โดยกระบวนการคาร์บอไนเซชัน เป็นการผลิตถ่านหรือคาร์บอนจากวัสดุที่มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนสูงด้วยการให้ความร้อนประมาณ 400-500 °C ในสภาวะรีดักชัน ซึ่งจะได้ถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนสูงมากกว่าร้อยละ 90 ถ่านหรือคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการคาร์บอไนเซชันนี้ จะทำการกระตุ้นด้วยสารออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600-900 °C ในสภาวะรีดักชันเช่นกัน เพื่อได้ผลิตภัณฑ์คาร์บอนกัมมันต์

หากเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตรวจดูโครงสร้างของถ่านหรือวัสดุคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการข้างต้น จะพบโครงสร้างที่มีรูพรุน จึงนำภาพโครงสร้างที่ได้มาสร้างสรรค์เป็นภาพปกและผู้อ่านจะได้พบโครงสร้างของคาร์บอนในวัสดุต่าง ๆ ที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ภายในเล่มนี้

คำนำ

หนังสือคาร์บอนกัมมันต์นี้ ได้เรียบเรียงและปรับปรุงเนื้อหาให้ทันสมัย ต่อการวิจัยที่ก้าวหน้าและเกิดความรู้ใหม่ ๆ มากขึ้น ได้เพิ่มเนื้อหาบางส่วนที่มีการศึกษาวิจัยในการนำคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ และการพัฒนาไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม ในการพิมพ์ครั้งที่ 2 นี้ ได้เพิ่มคาร์บอนกัมมันต์ชนิดใหม่ กระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นและต้นทุนการผลิตที่ลดลง การวิเคราะห์สมบัติที่หลากหลายสำหรับการนำไปใช้ที่ปลอดภัย ได้มาตรฐาน และการนำคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ที่มากขึ้น

หนังสือเล่มนี้จึงประกอบด้วยเนื้อหา 6 บท เริ่มจากบทนำที่กล่าวถึงความเป็นมาของคาร์บอนกัมมันต์ ประเภทและชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีการผลิตใช้ในปัจจุบัน ตามด้วยบทที่ 2 กล่าวถึงกระบวนการผลิต ที่ได้มีการศึกษาและวิจัย ซึ่งมีทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ การขยายขนาดเป็นโรงงานต้นแบบ จนถึงการผลิตในเชิงการค้า ที่ได้พิจารณาถึงต้นทุนต่าง ๆ และรวมถึงการคำนึงถึงความปลอดภัยต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม รวมถึงการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบตั้งต้น บทที่ 3 เน้นถึงการฟื้นสภาพคาร์บอนกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้วโดยวิธีการต่าง ๆ ส่วนในบทที่ 4 กล่าวถึงสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยวิธีการต่าง ๆ วิธีการวิเคราะห์ทั้งเครื่องมือชั้นสูงและแบบพื้นฐาน ที่มีรายละเอียดสำหรับนักวิจัย นิสิต นักศึกษาหรือบุคคลทั่วไปสามารถนำไปใช้การวิเคราะห์ได้ รวมถึงสมบัติมาตรฐานของคาร์บอนกัมมันต์ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ในบทที่ 5 ไมโครและนาโนคาร์บอนกัมมันต์ ที่เกี่ยวกับคาร์บอนกัมมันต์ขนาดไมโครและนาโนในรูปแบบต่าง ๆ สามารถผลิตได้หลายแนวทาง และนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ส่วนบทสุดท้ายเป็นเนื้อหาเกี่ยวกับการนำคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายรูปแบบ ที่ผู้อ่านจะได้เห็นถึงความสำคัญของคาร์บอนกัมมันต์ได้อย่างลึกซึ้งและชัดเจน โดยภาพประกอบภายในเล่ม ส่วนหนึ่งผู้เขียนเป็นผู้สร้างสรรค์ขึ้นเอง อีกส่วนหนึ่งได้รับการอนุญาตให้ใช้สิทธิในผลงานนั้นและ/หรือเขียนอ้างอิงภาพประกอบไว้ครบถ้วนแล้ว

ผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านที่จะได้รู้จักคาร์บอนกัมมันต์มากยิ่งขึ้น ทั้งประเภท การผลิต สมบัติและการพิสูจน์เอกลักษณ์ และการใช้ประโยชน์ของคาร์บอนกัมมันต์ หากหนังสือเล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด น้อมรับการติชมและขออภัยมา ณ โอกาสนี้ พร้อมทั้งผู้เขียนจะได้นำไปแก้ไขต่อไปในภายภาคหน้า

รองศาสตราจารย์ ดร.สัมฤทธิ์ โม้พวง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณผู้ร่วมงานในคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่บริการและอำนวยความสะดวกในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ให้เป็นไปอย่างเรียบร้อยและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่บริการฐานข้อมูลในการค้นคว้าเอกสาร วารสารการวิจัยและข้อมูลสำหรับการเขียนหนังสือเล่มนี้ และสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยที่ให้คำแนะนำ ออกแบบ และดำเนินการจัดพิมพ์ให้เป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และมหาวิทยาลัยนเรศวรที่มีนโยบายส่งเสริมสนับสนุนในการผลิตตำรา หนังสือของคณาจารย์

ขอขอบคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ ตลอดจนนิสิต ที่ร่วมงานในการศึกษาวิจัยและให้ข้อมูลทางวิชาการที่ใช้ในการเขียนหนังสือเล่มนี้

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวที่เป็นกำลังใจในการทำงานและการเขียนหนังสือเล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สัมฤทธิ์ โม้พวง

สารบัญ

1 บทนำ

ลักษณะทั่วไปของคาร์บอนกัมมันต์ 2
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ 2
ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ 4
คาร์บอนกัมมันต์ผง 4
คาร์บอนกัมมันต์เกล็ด 6
ใยคาร์บอนกัมมันต์ 9
ซุเปอร์คาร์บอนกัมมันต์ 10
สรุปท้ายบท 11
เอกสารอ้างอิง 12

2 การผลิตคาร์บอนกัมมันต์

การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ 18
การเตรียมวัตถุดิบ 18
การคาร์บอไนเซชัน 19
การกระตุ้น 22
การกระตุ้นทางความร้อนหรือทางกายภาพ 24
การกระตุ้นทางเคมี 37
การกระตุ้นผสมทางกายภาพและทางเคมี 59
การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ 59
การล้างคาร์บอนกัมมันต์เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ 61
การผลิตคาร์บอนกัมมันต์เกล็ด 63
การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ผง 64
การดัดแปรคาร์บอนกัมมันต์ 65
การดัดแปรด้วยกรด 65

การดัดแปรด้วยเบส....66
การดัดแปรด้วยเกลือโลหะ....67
การผลิตคาร์บอนกัมมันต์แม่เหล็ก....68
การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม....68
การเตรียมวัตถุดิบ....69
การไพโรไลซิส/การกระตุ้น....70
การกลับคืนน้ำล้างและกรด....71
การอบแห้ง/การร่อนและการเก็บรักษา....72
การคำนวณต้นทุนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์....72
สรุปท้ายบท....73
เอกสารอ้างอิง....76

3 การฟื้นสภาพคาร์บอนกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้ว

การฟื้นสภาพทางความร้อน....92
การฟื้นสภาพทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ....94
การฟื้นสภาพด้วยไอน้ำ....95
การฟื้นสภาพด้วยตัวทำละลาย....95
การฟื้นสภาพทางเคมี....96
การฟื้นสภาพทางไฟฟ้าเคมี....97
การฟื้นสภาพทางชีวภาพ....98
การฟื้นสภาพด้วยคลื่นเหนือเสียง....99
สรุปท้ายบท....100
เอกสารอ้างอิง....101

4 สมบัติคาร์บอนกัมมันต์

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์....104
สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนกัมมันต์....105

ความหนาแน่น 105
ความหนาแน่นรวม 105
ความหนาแน่นจริง 107
ความหนาแน่นปรากฏ 107
ความแข็ง 107
ความแข็งเชิงกล 107
ค่าการสึก 108
ขนาดอนุภาค 110
การกระจายขนาดอนุภาค 110
โครงสร้างรูพรุน 111
พื้นที่ผิว 113
การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 113
สมบัติทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ 117
ร้อยละผลผลิต 117
ปริมาณองค์ประกอบธาตุในคาร์บอนกัมมันต์ 119
การวิเคราะห์โดยประมาณ 120
การวิเคราะห์แร่ธาตุโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ CHNS 123
ความเป็นกรด-เบส ของคาร์บอนกัมมันต์ 124
การวัด pH ของคาร์บอนกัมมันต์ 126
การไทเทรตด้วยกรด-เบส 126
การไทเทรตโดยการวัดศักย์ไฟฟ้า 127
เคมีพื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์ 127
สภาพไม่ชอบน้ำของพื้นผิว 130
ความจุการแลกเปลี่ยนไอออนบวก 130
การดูดซับและการวัดการดูดซับ 130
ความจุการดูดซับ 132
การดูดซับบิวเทน 133

การดูดซับไอโอดีน....133
เลขกากน้ำตาล....135
การดูดซับเมทิลีนบลู....135
การดูดซับฟีนอล....136
การดูดซับไฮโดรเจน....137
การทดสอบความเสถียรทางเคมี....138
หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์....138
หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน....138
หมู่ฟังก์ชันที่มีไนโตรเจน....141
สารเชิงซ้อนไฮโดรเจน-คาร์บอน....142
ธาตุอื่น ๆ บนผิวพื้นผิวคาร์บอน....142
สมบัติทางไฟฟ้าเคมี....143
การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy....144
การกระตุ้นด้วย CO_2....145
การกระตุ้นด้วยไอน้ำ....146
การกระตุ้นภายใต้สุญญากาศ....146
กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก....147
การกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH....147
การกระตุ้นด้วยกรด H_2SO_4....149
การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$....149
ถ่านกัมมันต์ล้างด้วยกรด....149
รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคาร์บอนกัมมันต์....150
ลักษณะรามานสเปกตรัมของคาร์บอนกัมมันต์....152
สรุปท้ายบท....154
เอกสารอ้างอิง....156

5 คาร์บอนกัมมันต์โครงสร้างไมโครและนาโน

ไมโคร-นาโนคาร์บอนกัมมันต์ผง 164
แกรฟีน....166
ใยไมโครคาร์บอนกัมมันต์และใยนาโนคาร์บอนกัมมันต์ 168
ท่อนาโนคาร์บอนกัมมันต์....172
สรุปท้ายบท 173
เอกสารอ้างอิง....174

6 ประโยชน์ของคาร์บอนกัมมันต์

การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในวัฏภาคของเหลว 178
การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการผลิตน้ำดื่ม 178
การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการบำบัดน้ำ....179
การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับโลหะ 179
การดูดซับ Cr(VI) 184
การดูดซับปรอท....186
การดูดซับตะกั่ว 186
การดูดซับแพลทินัม 187
การดูดซับแคดเมียม....188
การดูดซับทองแดง....190
การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับสารอินทรีย์....191
การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน....193
การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในระบบเลี้ยงปลา 195
การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในวัฏภาคก๊าซ....196
การบำบัดก๊าซ....196
กระบวนการ Thief....198
การส่งเสริมสำหรับเร่งปฏิกิริยาของคาร์บอนกัมมันต์....198
การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจน 198

1) การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำตาลซูโครส 199
2) การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทน 199
3) การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำมันดิน.....202
4) การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนจากกรดไฮโดรไอโอดิก 203
5) การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการแปรสภาพ
เป็นก๊าซ 203
6) การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์.....204
การเร่งปฏิกิริยาการผลิตก๊าซสังเคราะห์.....204
การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....206
การเร่งปฏิกิริยาการสลายเซลลูโลส.....207
การเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล.....207
การเร่งปฏิกิริยาเซลล์เชื้อเพลิง 210
การเร่งปฏิกิริยาการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส 210
การเร่งปฏิกิริยาการผลิตน้ำมันเครื่องบิน 211
การเร่งปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ.....212
ปฏิกิริยาเฟนตัน 212
ปฏิกิริยาการสลายไซยาไนด์.....213
การใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นวัสดุกักเก็บ.....214
การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการกักเก็บไฮโดรเจน 214
ผลของพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ต่อการกักเก็บไฮโดรเจน 214
ผลของขนาดรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ต่อการกักเก็บไฮโดรเจน.....214
ผลของความดันในระบบการดูดซับต่อการกักเก็บไฮโดรเจน.....215
ผลของอุณหภูมิในระบบการดูดซับต่อการกักเก็บไฮโดรเจน 215
ผลของการเสริมโลหะในคาร์บอนกัมมันต์ต่อการกักเก็บไฮโดรเจน.....215
การกักเก็บพลังงานความร้อน 216
คาร์บอนตะแกรงโมเลกุล.....216
ผงคาร์บอนกัมมันต์ตรวจลายนิ้วมือแฝง 217

การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในตัวเก็บประจุยิ่งยวด 218
คาร์บอนกัมมันต์กับการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิต 222
สรุปท้ายบท 224
เอกสารอ้างอิง.....226

อภิธานศัพท์ 237

ดัชนี 247

01

บทนำ

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 cm^3/g ถึงมากกว่า 1 cm^3/g ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะภายในมีมากกว่า 400 m^2/g ถึง 2500 m^2/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) และผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรม วัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมและบ้านเรือน จำพวกสารอินทรีย์ ชีวมวล เซลลูโลส เป็นต้น [6]

ในส่วนของวัตถุดิบประเภทถ่านหินพบว่าโลกของเรามีปริมาณถ่านหินสำรองประมาณ 948 พันล้านตัน ซึ่งมีปริมาณมาก อีกทั้งยังมีข้อดีคือการขนส่ง เก็บง่าย ปลอดภัย และราคาถูก

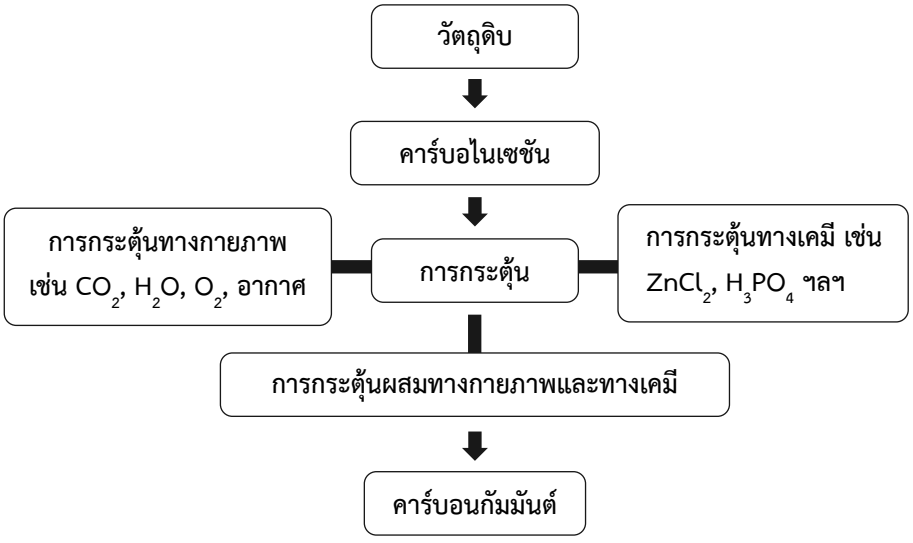
02

การผลิตคาร์บอนกัมมันต์

02

การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ (Production of Activated Carbon)

การผลิตคาร์บอนกัมมันต์มีได้หลากหลายวิธี โดยสามารถแบ่งได้เป็นสองวิธีหลักดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.1 คือการกระตุ้นทางกายภาพหรือการกระตุ้นทางความร้อน (physical activation หรือ thermal activation) ซึ่งประกอบด้วยการขจัดสารระเหยง่ายด้วยความร้อน (thermal devolatilization) ตามด้วยกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซของถ่าน (char gasification) ด้วยสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น และการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการทำให้เกิดถ่านของวัตถุดิบเริ่มต้นในสภาวะเฉื่อย ตามด้วยการกระตุ้นด้วยสารเคมี [1] โดยการผลิตคาร์บอนกัมมันต์มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูป 2.1 แผนภาพกระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์โดยวิธีต่าง ๆ

1. การเตรียมวัตถุดิบ (Pretreatments)

วัตถุดิบก่อนการเข้ากระบวนการผลิตถ่านจะต้องทำการลดปริมาณน้ำก่อนเพื่อลดพลังงานที่สูญเสียไปสำหรับการขจัดน้ำในระหว่างการผลิตถ่าน ซึ่งกระบวนการทำแห้ง (Drying process) เป็นกระบวนการหลักสำหรับการขจัดความชื้นออกจากชีวมวล ที่ต้องใช้ความร้อนในปริมาณมาก แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าในระหว่างการไพโรไลซิส (pyrolysis) ได้ปริมาณความร้อนเป็นจำนวนมากที่สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการทำแห้งชีวมวลได้ ทำให้สามารถลดต้นทุนในการทำแห้งวัตถุดิบตั้งต้นได้

03

การฟื้นสภาพคาร์บอนกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้ว

03

การฟื้นสภาพคาร์บอนกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้ว (Regeneration of Exhausted Activated Carbons)

ความสามารถของคาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับจะลดลง เมื่อมีการใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง แสดงถึงการมีโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปอยู่ในรูพรุนและบนพื้นผิวจนอิ่มตัว สุดท้ายความสามารถการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ได้หมดสภาพไป ซึ่งระดับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างตัวถูกดูดซับที่อยู่ในรูพรุนและพื้นผิวเท่ากับที่มีอยู่ในสารละลาย หรือในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายก่อนผ่านคาร์บอนกัมมันต์และหลังผ่านคาร์บอนกัมมันต์มีเท่ากัน ตรงจุดนี้เรียกว่า จุดเบรกทรูหรือจุดไหลทะลุ (breakthrough point) ทำให้คาร์บอนกัมมันต์นี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ต่อไปจึงจำเป็นต้องแทนที่ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ใหม่ คาร์บอนกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้วมีสองทางเลือก คือ กำจัดทิ้งโดยการเผาหรือฝังกลบกับการฟื้นสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งตามหลักการแล้ว การฟื้นสภาพมีข้อดีที่ชัดเจน คือ ลดปริมาณการผลิตคาร์บอนกัมมันต์และลดต้นทุนการผลิต แต่อย่างไรก็ตามการฟื้นสภาพของคาร์บอนกัมมันต์ที่หมดสภาพอาจมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ใหม่ไม่มากนัก ยิ่งกว่านั้นกระบวนการฟื้นสภาพโดยทั่วไป ยังทำให้คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตใหม่ ซึ่งหลังจากการฟื้นสภาพหลาย ๆ ครั้ง ความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์จะลดลงตามลำดับจนถึงจุดหนึ่งที่ไม่สามารถฟื้นสภาพได้อีก [1] โดยเฉพาะการฟื้นสภาพของคาร์บอนกัมมันต์ชนิดผงค่อนข้างยาก เพราะว่ากระบวนการทางการค้าทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนปริมาณมาก ดังนั้นส่วนใหญ่ในการฟื้นสภาพจะทำกับคาร์บอนกัมมันต์ชนิดเกล็ด แม้ว่าจะมีต้นทุนการผลิตมากกว่าชนิดผง แต่อย่างไรก็ตามการฟื้นสภาพคาร์บอนกัมมันต์จะคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่ต้องต่ำกว่าการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ใหม่เป็นหลัก ส่วนการจะเลือกวิธีไหนนั้นขึ้นอยู่กับความร้อนที่ใช้ในการคายดูดซับและการยึดเหนี่ยวของตัวดูดซับเป็นหลัก โดยส่วนใหญ่กระบวนการที่ใช้ในการฟื้นสภาพคาร์บอนกัมมันต์มีดังนี้

1. การฟื้นสภาพทางความร้อน (Thermal Regeneration)

การฟื้นสภาพทางความร้อน มีหลากหลายวิธีและอาจทำพร้อม ๆ กับการลดความดัน ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ในการฟื้นสภาพคาร์บอนกัมมันต์ที่หมดสภาพ โดยทั่วไปเป็นการไพโรไลซิสคาร์บอนที่อุณหภูมิระหว่าง 600 °C ถึง 1000 °C ในเตาเผาชนิดต่าง ๆ เช่น เตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) เตาเผาแบบหลายชั้น (multiple hearth) เตาเผาชนิดแบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized

04

สมบัติคาร์บอนกัมมันต์

04

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ เป็นปัจจัยที่สำคัญมากสำหรับการเป็นสารดูดซับ ซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์สำหรับการนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ต่าง ๆ โดยต้องพิจารณาลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ที่แตกต่างกัน สมบัติที่สำคัญทางกายภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิว ความพรุน ความหนาแน่น ขนาดอนุภาคและความต้านทานการสึก [1] ส่วนสมบัติทางการดูดซับเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของศักยภาพการใช้งานของคาร์บอนสำหรับการขจัดสารปนเปื้อนจากน้ำ สารละลายหรืออากาศ โดยลักษณะที่สำคัญที่จะกำหนดความสามารถของคาร์บอนในการดูดซับอนุภาคสารถูกดูดซับ คือ การกระจายขนาดอนุภาค (pore size distribution) และความจุการดูดซับ (adsorptive capacity) ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบการวัดประสิทธิภาพการดูดซับด้วยสารประกอบมาตรฐานหลายชนิด โดยแสดงค่าเป็นตัวเลข เช่น เลขไอโอดีน (iodine number) เลขกากน้ำตาล (molasses number) เป็นต้น ซึ่งประสิทธิผลของคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นสารดูดซับที่ดีจะต้องมีลักษณะ คือ พื้นที่ผิวสูง ระดับความว่องไวต่อปฏิกิริยาของพื้นผิวสูง สามารถดูดซับสารได้ทั่วไป และมีขนาดรูพรุนเหมาะสม [2]

นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์ที่มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของการดูดซับด้วย โดยทั่วไปโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์มีความซับซ้อน มีลักษณะชั้นผิวแผ่นบางที่แตกหักและขรุขระ ซึ่งเป็นผลทำให้คาร์บอนกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูง โดยสามารถเห็นถึงภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นต้น ส่วนสมบัติทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์มีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยการมีอะตอมธาตุต่าง ๆ นอกจากคาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน ฟอสฟอรัส เป็นต้น ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวบนคาร์บอน ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีออกซิเจน หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีไนโตรเจน หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีกำมะถันและหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่มีฟอสฟอรัส เป็นต้น โดยลักษณะและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวเหล่านี้เกิดจากการดัดแปร หรือกระตุ้นคาร์บอนด้วยความร้อนหรือทางเคมีที่เหมาะสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้วิธีการตรวจสอบสมบัติเหล่านี้มีได้หลายวิธี เช่น การไทเทรต (titration) วิธีทางสเปกโตรสโคปี (spectroscopy) เป็นต้น [2] ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

05

คาร์บอนกัมมันต์โครงสร้างไมโครและนาโน

05

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า วัสดุขนาดไมโครและนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในระดับไมโครเมตรและน้อยกว่า 100 nm มีความแข็งแรงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและคุณสมบัติเชิงเคมี เชิงไฟฟ้า หรือเชิงกายภาพที่ไม่คาดคิดซึ่งแตกต่างจากวัสดุขนาดที่ใหญ่กว่า และเช่นเดียวกัน วัสดุคาร์บอนกัมมันต์ขนาดไมโครและนาโน ก็ได้แสดงสมบัติในคอมโพสิต (composite) ที่มีส่วนผสมของไมโคร/นาโนคาร์บอนกัมมันต์ ที่มีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น การหดตัวลดลง มีรอยแตกที่ลดลง และความคงทนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ได้ซุเปอร์คาร์บอนกัมมันต์ ดังเช่นการผสมนาโนคาร์บอนกัมมันต์ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลทำให้ความสามารถการไหลของซีเมนต์ลดลง เนื่องจากนาโนคาร์บอนกัมมันต์มีพื้นที่สูงจึงไปเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของซีเมนต์กับอนุภาคนาโนคาร์บอนกัมมันต์ แต่สามารถไปเพิ่มความแข็งแรงทางแรงกด (compressive strength) ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น สำหรับเป็นตำแหน่งตั้งต้นที่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน นอกจากนี้ยังสามารถลดความพรุนและการหดตัวหลังแห้งได้อย่างมาก รวมถึงการทนต่อสารเคมีและน้ำทะเล ทนความร้อนและรังสีต่าง ๆ [1] ซึ่งไมโคร-นาโนคาร์บอนกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัสดุธรรมชาติและวัสดุสังเคราะห์ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสำหรับการใช้วัสดุนาโนคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในวัสดุคอมโพสิตต่าง ๆ รวมถึงเส้นใยคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น แกรฟีนออกไซด์ และแผ่นเกล็ดนาโนแกรฟีน เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และเชิงไฟฟ้าในคอมโพสิต ที่มีความแข็งแรง ความเหนียว ความเสถียรของมิติ และป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2] นอกจากนี้ยังมีการใช้นาโนคาร์บอนในกระบวนการดูดซับ ในรูปของท่อนาโนคาร์บอนกัมมันต์ ท่อนาโนคาร์บอนดัดแปร ใยคาร์บอนกัมมันต์ แกรฟีนและแกรฟีนออกไซด์ [2, 3]

ไมโครคาร์บอนกัมมันต์และนาโนคาร์บอนกัมมันต์ผลิตได้หลายรูปแบบทั้งจากสารสังเคราะห์และจากวัตถุดิบธรรมชาติ อย่างไรก็ตามมีการสังเคราะห์ผ่านการไพโรไลซิสของของเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นทางเลือกที่คุ้มค่ามากเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานในเชิงพาณิชย์ [2] ดังจะได้กล่าวถึงชนิดของไมโคร-นาโนคาร์บอนกัมมันต์ต่าง ๆ ต่อไปนี้

1. ไมโคร-นาโนคาร์บอนกัมมันต์ผง (Micro-Nano Structured Activated Carbon Powder)

ในการพัฒนาวัสดุถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูง และว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา จำเป็นต้องผลิตให้มีขนาดในระดับไมโครหรือนาโน โดยเฉพาะคาร์บอนกัมมันต์ขนาดนาโน เป็นตัวดูดซับ

06

ประโยชน์ของคาร์บอนกัมมันต์

06

เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง เพราะว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก รวมทั้งมีสมบัติทางโครงสร้างรูพรุนและเคมีพื้นผิวที่เหมาะสม สามารถนำมากลับฟื้นสภาพได้ ซึ่งทำให้ลดต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมาก จึงมีการใช้คาร์บอนกัมมันต์ในจุดประสงค์ที่หลากหลาย เช่น เป็นสารดูดซับ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นพาหะตัวเร่งปฏิกิริยา [1] ใช้ในการแยกก๊าซและทำบริสุทธิ์ก๊าซต่าง ๆ ใช้สำหรับการทำแห้งก๊าซ ลดมลพิษ และกักเก็บก๊าซธรรมชาติ [2] ใช้ในการดักจับ CO_2 จากก๊าซเชื้อเพลิงในระหว่างการเผาไหม้ [3] สำหรับในระดับอุตสาหกรรมจำนวนมากได้มีการใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการทำบริสุทธิ์ ได้แก่ การบำบัดน้ำและทำน้ำบริสุทธิ์ เช่น ใช้ในการบำบัดน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม บำบัดน้ำใช้จากชุมชน บำบัดน้ำเสีย กรองน้ำในสระน้ำ ใช้ในระบบกรองในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ [4, 5] ใช้ในการควบคุมมลพิษในอากาศ กำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในสภาพแวดล้อม [6] เช่น บ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรมและในห้องควบคุม ส่วนในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ได้ใช้คาร์บอนกัมมันต์ในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การฟอกขาวน้ำตาล การทำบริสุทธิ์สารประกอบอินทรีย์ การขจัดคลอรีน การขจัดคาเฟอีนและสารต่าง ๆ [6] รวมทั้งมีการใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายอุตสาหกรรม เช่น การแยกก๊าซ [7] การขนส่ง และการกักเก็บก๊าซ [8] การกลับคืนทอง [9] การทำบริสุทธิ์ยาและสารต่าง ๆ [10] ในทางการแพทย์ มีการใช้คาร์บอนกัมมันต์ในโรงพยาบาล คลินิกหรือสำนักงานทางการแพทย์ สำหรับการขจัดสารพิษ ควบคุมกลิ่น การกรอง หน้ากากหายใจและตกแต่งแผล [11]

การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในวัฏภาคของเหลว

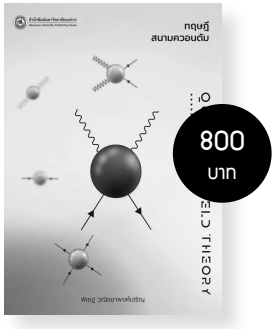
คาร์บอนกัมมันต์ มีการนำไปใช้บำบัดวัฏภาคของเหลวต่าง ๆ ในการขจัดสารปนเปื้อนของสารละลาย เช่น ขจัดสารมลพิษอินทรีย์ สี สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายและโลหะหนัก เป็นต้น

1. การใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการผลิตน้ำดื่ม

ได้มีการใช้คาร์บอนในการผลิตน้ำดื่มมามากกว่า 4,000 ปี และมีการใช้ถ่านสำหรับการขจัดรสชาติของน้ำดื่มตั้งแต่ก่อนคริสต์ศักราช 2000 และตั้งแต่ปี ค.ศ. 1820 ได้มีการใช้คาร์บอนกัมมันต์ในกระบวนการบำบัดน้ำเพื่อขจัดรส กลิ่น สี และลดสารมลพิษต่าง ๆ [12]

ในโรงงานผลิตน้ำดื่ม มีกระบวนการหลัก ๆ ที่ประกอบด้วยกระบวนการรวมตัว–การตกตะกอน–การเทแยก โดยที่หลังจากกระบวนการตกตะกอนและแยกน้ำจากตะกอนแล้ว ทำการออกซิเดชันต่อด้วยคลอรีนหรือโอโซน สุดท้ายทำการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ เพื่อขจัด

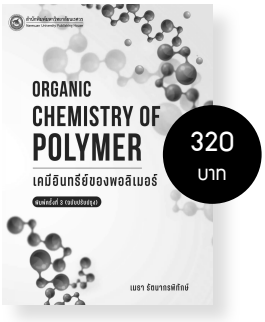
หนังสือแนะนำ



ทฤษฎีสนามควอนตัม Quantum Field Theory

ผู้แต่ง : รศ. ดร.พิเชฐ วณิชชาพงศ์เจริญ์

ทฤษฎีสนามควอนตัม คือ กรอบของทฤษฎีที่อธิบายสนามที่มีสมบัติทางควอนตัม โดยที่สนามคือฟังก์ชันของตำแหน่งในกาลอวกาศ หนังสือเล่มนี้เขียนขึ้นเพื่ออธิบายหลักการ แนวคิด และการคำนวณในทฤษฎีสนามควอนตัม โดยเน้นอภิปรายประเด็นของการนำทฤษฎีสนามควอนตัมไปอธิบายหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์อนุภาค โดยมีประเด็นหลัก ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นที่เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาทฤษฎีสนามควอนตัม การวิเคราะห์สนามอิสระ การวิเคราะห์ทฤษฎีสนามสเกลาร์ที่มีอันตรกิริยาในตัว การวิเคราะห์พลศาสตร์ไฟฟ้าเชิงควอนตัมรวมทั้งตัวอย่างทิศทางการพัฒนาของเนื้อหาที่นอกเหนือจากที่อภิปรายในส่วนหลัก หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับผู้สอนระดับบัณฑิตศึกษา หรือการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง เนื่องจากอธิบายแนวคิด การวิเคราะห์ และวิธีการคำนวณโดยละเอียด รวมทั้ง มีการวิจารณ์ประเด็นที่สำคัญและสรุปท้ายบท เพื่อให้ผู้อ่านตรวจสอบความเข้าใจ และทราบความเชื่อมโยงเบื้องต้นกับเนื้อหาอื่น นอกจากนี้ หนังสือเล่มนี้ยังมีโจทย์ปัญหาและเฉลย เพื่อให้ผู้อ่านได้เสริมความเข้าใจในเนื้อหา



เคมีอินทรีย์ของพอลิเมอร์
(ฉบับปรับปรุง)

ผู้แต่ง : รศ. ดร.เมธา รัตนากรพิทักษ์

หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับผู้อ่านทั่วไปและผู้ที่สนใจเกี่ยวกับเคมีอินทรีย์ของพอลิเมอร์ ซึ่งจะทำให้มีความเข้าใจกลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอินทรีย์และการจำแนกประเภทปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ นอกจากนี้ ยังกล่าวถึงเทคนิคการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันและการออกแบบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ รวมทั้งปฏิกิริยาการเชื่อมต่อโมเลกุลที่ต้องการบนโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ทางเคมีอินทรีย์ผนวกกับความรู้ทางด้านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์ฟังก์ชันที่มีสมบัติตามความต้องการและสามารถประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมได้

ฟังก์ชันเมทริกซ์วางนัยทั่วไป
Generalized Matrix Functions

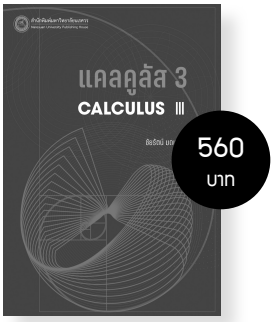
ผู้แต่ง : รศ. ดร.กิจติ รอดเทศ

ฟังก์ชันเมทริกซ์วางนัยทั่วไปเป็นฟังก์ชันค่าจำนวนเชิงซ้อนบนปริภูมิเมทริกซ์จัตุรัส (ภาคขยายของฟังก์ชันดีเทอร์มิแนนต์) ซึ่งถูกนิยามไว้ในปีคริสต์ศักราช 1918 โดยนักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซียนามว่า อิสไช ชูร์ หลังจากนั้นฟังก์ชันนี้ได้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งทางทฤษฎีและทางการประยุกต์ หนังสือเล่มนี้ มุ่งเน้นอธิบายถึงสมบัติต่าง ๆ ของฟังก์ชันเมทริกซ์วางนัยทั่วไป โดยแสดงให้เห็นถึงเทคนิคการพิสูจน์ที่น่าสนใจ รวมถึงการนำสมบัติที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในพีชคณิตเชิงหลายเส้น ทฤษฎีเมทริกซ์ ทฤษฎีการไม่แปรผัน และทฤษฎีกราฟ อีกทั้งได้เสนอข้อความ คาดการณ์ และปัญหาปลายเปิดที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันเมทริกซ์วางนัยทั่วไปไว้อย่างหลากหลาย เพื่อให้ผู้อ่านนำไปวิจัยต่อยอดต่อไป

คณิตศาสตร์ประกันชีวิตเบื้องต้น

ผู้แต่ง : รศ. ดร.ชัยรัตน์ มดนาค

คณิตศาสตร์และสถิติเป็นหัวใจหลักของอุตสาหกรรมประกันภัย การทำประกันเป็นข้อตกลงระหว่าง “ผู้เอาประกัน” กับ “ผู้ให้ประกัน” โดยมี “กรมธรรม์” เป็นพันธสัญญาที่ระบุว่าผู้เอาประกันต้องจ่ายเบี้ยประกันเท่าใด และจะได้รับผลประโยชน์ใดบ้าง ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ที่ระบุจะไม่สามารถแก้ไขได้หลังจากเซ็นสัญญาร่วมกันแล้ว สิ่งสำคัญที่สุดในกรมธรรม์ คือ เบี้ยประกันเรียกเก็บและเงินผลประโยชน์ ซึ่งจะต้องมีการคำนวณ อย่างรอบคอบโดยใช้หลักสถิติและคณิตศาสตร์ที่สำคัญหนังสือเล่มนี้ รวบรวมหลักคณิตศาสตร์และสถิติพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการต่อยอดองค์ความรู้ให้กับผู้อ่าน โดยหลักประกันภัยในการประกันชีวิตเพียงอย่างเดียว



แคลคูลัส 3 Calculus III

ผู้แต่ง : รศ. ดร.ชัยรัตน์ มดนาค

แคลคูลัส 3 (Calculus III) เป็นเนื้อหาขั้นตอนสุดท้ายของแคลคูลัส หนังสือ เล่มนี้แบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกเป็นการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับหนึ่งและอันดับสูง การใช้ผลการแปลงลาปลาซและลาปลาซผกผันสำหรับการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับส่วนที่สองเป็นการหาอนุพันธ์และปริพันธ์ของฟังก์ชันหลายตัวแปรและแคลคูลัสของเวกเตอร์ เช่น ปริพันธ์ตามผิวและทฤษฎีบทของเกาส์และสโตกส์ เป็นต้น ทฤษฎีบทและตัวอย่างในหนังสือเล่มนี้ มีความละเอียดสูงและชัดเจน ซึ่งเหมาะสมกับผู้ที่มีความสนใจแคลคูลัสในทุกระดับ ทุกอาชีพ โดยเฉพาะผู้ที่ต้องการคำปรึกษา ทางด้านแคลคูลัสสามารถศึกษาและเข้าใจได้ด้วยตนเอง

เทคนิคเหมืองข้อมูล
Data Mining Techniques

ผู้แต่ง : ผศ. ดร.จรัสศรี รุ่งรัตนาอุบล

เทคนิคเหมืองข้อมูลเป็นหนึ่งในความรู้สมัยใหม่ที่หลายองค์กรนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ การวางแผนกลยุทธ์ การปรับปรุงการให้บริการและการดำเนินงานต่าง ๆ เหมืองข้อมูลเป็นศาสตร์ที่ผสมผสานระหว่างสถิติ ปัญญาประดิษฐ์และการรู้จำรูปแบบ และ การจัดการข้อมูลหรือฐานข้อมูลเข้าไว้ด้วยกัน หนังสือเล่มนี้อธิบายหลักการทำงานเหมืองข้อมูลและเทคนิคเหมืองข้อมูลต่าง ๆ จึงเหมาะกับบุคคลทั่วไปที่สนใจศึกษาการทำงานของเหมืองข้อมูลเพื่อเป็นทักษะเพิ่มเติม หรือเพื่อต้องการนำเหมืองข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัย หรือเพื่อสกัดสารสนเทศที่สำคัญจากข้อมูลขนาดใหญ่และนำสารสนเทศที่ได้ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยผู้อ่านจะได้เรียนรู้การทำงานของเทคนิคเหมืองข้อมูลที่สำคัญ เช่น การค้นหาเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด k ตัว เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ เทคนิค การสร้างกฎเพื่อการจำแนก ตัวจำแนกเบย์อย่างง่าย โครงข่ายประสาทเทียม การวิเคราะห์การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นและแบบเคมีน การวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ด้วยขั้นตอนอะไพรออรี่ การวิเคราะห์การถดถอย เป็นต้น โดยผู้อ่านจะเข้าใจการทำงานของแต่ละเทคนิคอย่างเป็นขั้นตอนซึ่งจะเป็น พื้นฐานในการเรียนรู้เทคนิคเหมืองข้อมูลที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นต่อไปได้ นอกจากนี้ผู้อ่านยังสามารถใช้โปรแกรมเหมืองข้อมูลเวกา (Weka) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้งานสำหรับศึกษาการทำงานของเทคนิคเหมืองข้อมูลและการประยุกต์ใช้เพื่องานวิจัย

สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

สั่งซื้อหนังสือออนไลน์

จัดส่งถึงบ้านสะดวกรวดเร็ว

สั่งซื้อทันที

กรณีต้องการสั่งซื้อหนังสือปริมาณมาก หรือเข้าชั้นเรียนติดต่อได้ที่
ฝ่ายจัดจำหน่ายสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

nuph@nu.ac.th
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร
0 5596 8833-8836
nu_publishing

NUPH
online store
www.nupress.grad.nu.ac.th