

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
เพื่อใช้ในการดูดซับสารละลายคองโกเรด

THE SYNTHESIS OF ACTIVATED CARBON DERIVED FROM COFFEE RESIDUE
ACTIVATED WITH MICROWAVE RADIATION FOR CONGO RED



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-114

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อ
ใช้ในการดูดซับสารละลายคองโกเรด

THE SYNTHESIS OF ACTIVATED CARBON DERIVED FROM COFFEE RESIDUE
ACTIVATED WITH MICROWAVE RADIATION FOR CONGO RED ADSORPTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE SYNTHESIS OF ACTIVATED CARBON DERIVED FROM COFFEE RESIDUE
ACTIVATED WITH MICROWAVE RADIATION FOR CONGO RED
ADSORPTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-220-114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
เพื่อใช้ในการดูดซับสารละลายคองโกเรด

Thesis Title The Synthesis of Activated Carbon Derived from Coffee Residue
Activated with Microwave Radiation for Congo Red Adsorption

นักศึกษา นายทองฉัตร จิ่งสมาน

รหัสประจำตัว 54612020

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-114

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์	อมรเทพ นิลพันธ์
ผศ.ดร.ญาณิพร พิชรวรโชติ	Yp
ผศ.ดร.สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์	HN
ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์	ศิริมา อัครแสงรัตน์
ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์	Hidairat Akrasrit

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อใช้ในการดูดซับสารละลายคองโกเรด
นักศึกษา	นายทองฉัตร จิ่งสมาน
รหัสประจำตัว	54612020
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายคองโกเรด ขั้นตอนแรกคาร์บอนไนซ์กากกาแฟที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM D3173-95 D5832-98 D2866-11 และ D3172 พบว่าที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 48 32 และ 27 ตามลำดับ เลือกถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แซ่สารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วินาที จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 7.05 16.50 และ 468.60 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.02 0.03 และ 0.21 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคองโกเรดโดยปัจจัยได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น เวลาต่างกัน (x_1) น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (x_2) ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด (x_3) และเวลาในการดูดซับ (x_4) ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณการดูดซับคองโกเรดพบว่า ปัจจัยที่มีนัยสำคัญได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น เวลาต่างกัน น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด จากนั้นออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อหาสภาวะที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณคองโกเรดได้มากที่สุด และประเมินค่าปริมาณคองโกเรดสูงสุดที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ด้วยโปรแกรมมินิแทปพบว่า ปริมาณคองโกเรดสูงสุดที่ถูกดูดซับ (Q) = $9.7908 - 5.2886(x_2) + 6.7356(x_3) + 2.3012(x_2x_2) - 3.6286(x_2x_3)$ คำนวณได้เท่ากับ 27.54 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลี่ยของการทดลองเท่ากับ 28.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.57 เปอร์เซ็นต์ สามารถยอมรับผลลัพธ์จากสมการได้ ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายคองโกเรดโดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิชพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ R^2 และค่า Chi-square (χ^2) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิชเท่ากับ 0.964 และ 0.977 และค่า Chi-square (χ^2) เท่ากับ 12.54 และ 1.09 ตามลำดับ ซึ่งงานวิจัยนี้สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมากกว่าแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Synthesis of Activated Carbon Derived from Coffee Residue Activated with Microwave Radiation for Congo Red Adsorption
Student	Mr. Thongchat Chuengsamarn
Student ID.	54612020
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pornsawan Assawasaengrat

ABSTRACT

This research aimed to study the synthesis of activated carbon derived from coffee residue activated with microwave radiation be used as a congo red adsorbent. The first process was to carbonize coffee residue at 400, 500, and 600 °C for an hour. The amount of moisture, volatile, ash and fixed carbon were analyzed by following ASTM D3173-95, D5832-98, D2866-11, and D3172. It was found that the amount of fixed carbon after carbonized at temperature 400, 500, and 600 °C were 48, 32, and 27% respectively. Charcoal at 400 °C was immersed in 40%H₃PO₄ solution which spent 24 hours. After that it was activated by microwave radiation at 200, 500, and 800 Watts respectively in 60 sec. According to the characteristic of surface area and total pore volume by BET technique, it was found that at 200, 500, and 800 Watts, surface area were 7.05, 16.50, and 468.60 m²/g and total pore volume were 0.02, 0.03, and 0.21 cm³/g respectively. Therefore, the carbon activated by microwave radiation at 800 Watts was selected as the subject to examine the factors that influenced the congo red adsorption capacity. The factors were activated carbon 800 Watt different active time (x₁) weight of activated carbon (x₂) concentration of congo red solution (x₃) and extraction time in adsorption (x₄). Full factorial design of experimental was utilized to screen factors significant to adsorption capacity of congo red; the resulted significant factors were x₁, x₂ and x₃. After that, Box-Behnken design was used to find the condition where the activated carbon exhibited its optimal congo red adsorption capacity and then the most congo red adsorption capacity of the activated carbon was assessed in Minitab software. The result showed that the most congo red adsorption capacity (Q) = 9.7908 - 5.2886(x₂) + 6.7356(x₃) + 2.3012(x₂x₂) - 3.6286(x₂x₃), equal to 27.54 mg/g compared with the average adsorption capacity of congo red in the experiments which was equal to 28.80 mg/g, relative error% = 4.57% which was acceptable as the equation result. In the study of adsorption isotherm of congo red using Langmuir equation and Freundlich equation, the results showed that coefficient R-square and Chi-square (χ²) of adsorption isotherm of Langmuir and Freundlich were 0.964 and 0.977, Chi-square (χ²) were 12.54 and 1.09 respectively. Therefore, this research conforms to the adsorption isotherm of Freundlich more than that of Langmuir.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ของการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกคน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตากรุณาอบรมสั่งสอน วิชาความรู้ต่างๆในทุกเรื่อง และคอยแนะนำให้คำปรึกษาที่ดีโดยตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิทยานิพนธ์ อาจารย์ทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือในระหว่างการทำงานวิจัย และการดำเนินงานต่างๆตลอดระยะเวลาที่อยู่ที่นี่

รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ถามไถ่ตลอดเวลา และเป็นแรงผลักดันให้ทำงานวิจัยนี้สำเร็จ โดยเฉพาะ พิมพ์พรรณ ทองพันธ์ุ พรริน จินตนาวิสันต์ และณัฐวดี สระประทุม

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุน และช่วยส่งเสริมให้ประสบความสำเร็จทางด้านการศึกษา สามารถนำความรู้จากการศึกษาไปใช้ประโยชน์

ทองฉัตร จิ่งสมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สีย้อม.....	4
2.1.1 สีย้อมคองโกเรด.....	5
2.2 ถ่านกัมมันต์.....	6
2.2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์.....	6
2.2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	6
2.2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.4 วัตถุประสงค์ในการผลิตถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.5 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	9
2.3 การดูดซับ.....	10
2.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption).....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตให้เนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption).....	10
2.3.3 กลไกการดูดซับ.....	11
2.3.4 อัตราการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ	11
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	11
2.4 ไอโซเทอมการดูดซับ	12
2.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm).....	12
2.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm).....	13
2.5 การออกแบบการทดลองและโปรแกรมมินิแทป (Design of experimental : DOE and Minitab program).....	15
2.5.1 หลักการออกแบบการทดลอง	16
2.5.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial experimental)	17
2.5.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง	18
2.5.4 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken	19
2.5.5 วิธีการหาพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมของการทดลอง	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	24
3.1 สารเคมี	24
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	24
3.3 การเตรียมถ่านชาร์จากกากกาแฟ.....	25
3.4 การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ.....	25
3.5 เตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโกเรตในสารละลาย....	25
3.6 วิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับของโกเรตแบบกะ	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7 วิเคราะห์หาสภาวะเหมาะสมสำหรับการดูดซับคองโกเรตแบบกะ	26
3.8 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ	26
3.9 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	27
4.1 คุณสมบัติของกากกาแฟ	27
4.2 คุณสมบัติของถ่านชาร์	27
4.3 ศึกษาการกระตุ้นถ่านชาร์	29
4.4 ผลการทดลองดูดซับสารละลายคองโกเรต	30
4.4.1 ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อการดูดซับสารละลายคองโกเรต	30
4.4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีนัยสำคัญและหาสภาวะเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายคองโกเรต	34
4.5 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายคองโกเรต	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	43
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์คุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM	49
ภาคผนวก ข. วิธีการออกแบบการทดลอง	51
ภาคผนวก ค. กราฟมาตรฐาน และการคำนวณ	62
ภาคผนวก ง. ข้อมูลการทดลอง	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดึงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ. ผลงานวิชาการ 70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- ง.7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ที่ผ่านการดูดซับ
ด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที 68
- ง.8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm ที่ผ่านการดูดซับ
ด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที 68
- ง.9 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่ความเข้มข้นสมมูลต่างที่เวลา 120 นาที ของสารละลายคองโกเรด
ที่ผ่านการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์
90 วินาที 69
- ง.10 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ ของสมการแลงเมียร์ 69
- ง.11 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ ของสมการฟรุนดลิช 69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของคองโกเรต.....	6
2.2 โครงสร้างแบบอสัณฐาน	6
2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับ	7
2.4 กราฟไอโซเทอมแต่ละชนิด	15
2.5 แผนภูมิพารेट	17
2.6 ตัวอย่างการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์.....	18
2.7 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot).....	20
2.8 เส้นระดับของพื้นผิวตอบสนอง (Contour plot).....	21
4.1 ร้อยละปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวของ อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์.....	28
4.2 ร้อยละผลได้ของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์.....	28
4.3 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์	29
4.4 ผลการเปรียบเทียบปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์	30
4.5 กราฟ Residual plots ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป	32
4.6 ผังพารेटแสดงปัจจัยที่มีนัยสำคัญระดับ $\alpha = 0.05$	33
4.7 กราฟ Residual plots ของการทดลองแบบ Box-Behnken	35
4.8 กราฟ Contour plot ระหว่างน้ำหนักของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นของ สารละลายคองโกเรต.....	37
4.9 กราฟ Surface plot ระหว่างปริมาณคองโกเรตที่ถูกดูดซับ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ และ ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรต	37
4.10 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะเหมาะสมสำหรับดูดซับสารละลายคองโกเรต.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ ของถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองโกเรด 20 60 100 140 200 และ 300 ppm	40
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	41
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช	41
ข.1 การสร้างแบบการทดลอง Factorial	51
ข.2 เลือกจำนวนปัจจัยสำหรับแบบการทดลองแฟคทอเรียล	51
ข.3 เลือกแบบการทดลอง Full factorial	52
ข.4 กำหนดชื่อของปัจจัยของแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล	52
ข.5 เลือกการทดลองแบบสุ่มสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล	52
ข.6 ตารางการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปจากโปรแกรมมินิแทป	53
ข.7 เลือกการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียล	54
ข.8 เลือกค่า Q สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแบบแฟคทอเรียล	54
ข.9 เลือกชนิดของกราฟเพื่อแสดงผล	55
ข.10 แผนภูมิพาร์ตแสดงผลปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณการดูดซับทองโกเรด	55
ข.11 การสร้างแบบการทดลองแบบ Response surface	56
ข.12 เลือกออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken	56
ข.13 กำหนดชื่อของปัจจัยของแบบการทดลองแบบ Box-Behnken	57
ข.14 เลือกการทดลองแบบสุ่มสำหรับแบบการทดลอง Box-Behnken	57
ข.15 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จากโปรแกรมมินิแทป	58
ข.16 การวิเคราะห์ข้อมูล Response surface design	58
ข.17 เลือกค่า Q สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแบบ Box-Behnken	58
ข.18 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบการทดลองแบบ Box-Behnken	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.19 การเลือกเทอมหรือปัจจัยที่มีนัยสำคัญ	59
ข.20 การวิเคราะห์ค่า Response optimizer	60
ข.21 เลือกค่าตอบสนองสำหรับหา Response optimizer	60
ข.22 การตั้งค่าหาค่ามากที่สุดสำหรับค่า Q	60
ข.23 ค่าปัจจัยในสภาวะที่เหมาะสมทำให้ได้ค่า Q มากที่สุด	61
ค.1 กราฟมาตรฐานคองโกเรต	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในประเทศไทยอุตสาหกรรมสิ่งทอ และเครื่องนุ่งห่มมีบทบาทสำคัญต่อการสร้างรายได้ทางเศรษฐกิจให้แก่ประเทศ อุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีลักษณะอุตสาหกรรมแบบครบวงจรตั้งแต่การผลิตเส้นใย ปั่นด้าย ถักทอ และฟอกย้อม เป็นต้น จากฐานข้อมูลกรมโรงงานพบว่าโรงงานฟอกย้อม พิมพ์ผ้า และตกแต่งสิ่งทอส่วนใหญ่เป็นโรงงานขนาดกลาง และขนาดเล็ก อุตสาหกรรมนี้ใช้น้ำในปริมาณมากสำหรับการผลิต และมีการปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1] ทางด้านสภาพของน้ำที่ไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ และการบดบังปริมาณแสงที่ส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงของพืชลดลงเมื่อการสังเคราะห์แสงลดลง ปริมาณออกซิเจนที่เป็นประโยชน์ต่อแหล่งน้ำ และสัตว์น้ำจึงลดลงด้วย อาจทำให้สัตว์น้ำตายหรือเกิดน้ำเน่าเสีย ดังนั้นน้ำเสียดังกล่าวควรได้รับการบำบัดให้ได้มาตรฐานก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลดปัญหามลพิษทางน้ำ เทคโนโลยีการกำจัดน้ำเสียมีด้วยกันหลายเทคโนโลยีเช่น [2] เทคโนโลยีทางกายภาพได้แก่ การดูดซับของถ่านกัมมันต์ และการกรองด้วยเยื่อแผ่น เทคโนโลยีทางเคมีได้แก่ การสร้างรวมตะกอน และการออกซิเดชันทางเคมี และเทคโนโลยีทางชีวภาพได้แก่ การดูดซับด้วยสาหร่าย การย่อยสลายโดยเชื้อรา และการย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย โดยประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปใช้ ส่วนข้อเสียมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่นำมาใช้เช่น เทคโนโลยีทางกายภาพเป็นการนำตัวดูดซับหรือการกรองใช้ในการกำจัดน้ำเสียอาจมีค่าใช้จ่ายสำหรับนำตัวดูดซับหรือตัวกรองทำความสะอาดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เทคโนโลยีทางเคมีเป็นการนำสารเคมีเพื่อใช้กำจัดน้ำเสียแต่อาจเป็นการเพิ่มของเสียสู่ธรรมชาติในรูปแบบหนึ่ง เทคโนโลยีทางชีวภาพเป็นการนำสิ่งมีชีวิตช่วยกำจัดน้ำเสียอาจมีข้อดีอยู่ในการเก็บรักษาความสะดวกในการใช้งาน และอาจรวมไปถึงสารอาหารสำหรับสิ่งมีชีวิตที่นำมาใช้ จากการพิจารณาข้อดีข้อเสียเทคโนโลยีทางกายภาพโดยใช้การดูดซับของถ่านกัมมันต์นั้นเป็นสิ่งที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำความสะดวก สะดวกต่อการใช้งาน และการเก็บรักษาไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ

ถ่านกัมมันต์คือ วัสดุดูดซับจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ วัสดุเหลือทิ้ง หาง่าย และไม่สลายตัวตอนเก็บ วัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตถ่านมีด้วยกันหลายชนิด ตัวอย่างเช่นวัตถุดิบชีวมวลที่มาจากเกษตรกรรม เช่น เปลือกผลไม้ต่างๆ ฟางข้าว และกะลามะพร้าว เป็นต้น ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ใช้ในการดูดซับของเสียในน้ำหรือในอากาศ [3] ตัวอย่างจากงานวิจัยที่ใช้วัสดุชีวมวลในการสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์โดยการใช้เปลือกขนุนผ่านวิธีการบอโนเซชัน และกระตุ้นจนกลายเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับเมทิลีนบลู และอีกหนึ่งงานวิจัยนำเปลือกผลปาล์มเป็นวัตถุดิบในการทำถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแอมโมเนีย [4, 5] วิธีการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยการเผาแบบคาร์บอนเซชันเพื่อให้ได้ถ่านชาร์ และนำไปกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน การกระตุ้นมีทั้งทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระตุ้นทางเคมี โดยทั่วไปการกระตุ้นทางเคมีจะนำถ่านชาร์ไปแช่สารเคมีเช่น H_3PO_4 KOH หรือ NaOH เป็นต้น และใช้ความร้อนเพื่อช่วยกระตุ้นถ่านกัมมันต์ในเตาปฏิกรณ์อีกครั้ง [3] วิธีการกระตุ้นดังกล่าวใช้ความร้อนสูง ระยะเวลาสั้น และสิ้นเปลืองพลังงาน ปัจจุบันมีอีกทางเลือกหนึ่งมาช่วยในกระบวนการกระตุ้นคือ พลังงานไมโครเวฟ หลักการทำงานของไมโครเวฟคือ การส่งคลื่นไมโครเวฟทำให้มีการสั่นของโมเลกุล และเกิดความร้อนขึ้นภายในโมเลกุล เมื่อถ่านกัมมันต์ได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ไอน้ำ สารระเหย ภายในเกิดการระเหยออกหรือสลายตัว ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น [6] การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ไม่ได้ส่งผลต่อคุณภาพที่ต่างจากการกระตุ้นด้วยการให้ความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ แต่การใช้พลังงานไมโครเวฟนั้นมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนที่รวดเร็ว ประหยัดเวลาและพลังงานในการสังเคราะห์ และเทคนิคนี้ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อธาตุคาร์บอน

กากกาแฟเป็นอีกวัสดุดิบหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติ และเหลือทิ้ง จากสถิติความต้องการใช้ปริมาณเมล็ดกาแฟในตลาดโลกในช่วง 5 ปี ตั้งแต่ปี 2553 ถึง ปี 2557 เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.67 ต่อปี ส่วนของประเทศไทยในช่วง 5 ปี ปริมาณความต้องการใช้เมล็ดกาแฟจาก 58,000 ตัน ในปี 2553 เป็น 75,000 ตัน ในปี 2557 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.65 ต่อปี และมีแนวโน้มความต้องการใช้เพิ่มขึ้นเป็น 80,000 ตัน ในปี 2558 [7] จากปริมาณความต้องการเมล็ดกาแฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของกากกาแฟเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยทั่วไปนิยมนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์เช่น ในธุรกิจเสริมความงามนำกากกาแฟทำเป็นวัสดุขัดผิว ทางด้านการเกษตรนำกากกาแฟไปใช้ทำปุ๋ย เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟโดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในส่วนแรกศึกษาเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์สำหรับการเตรียมถ่านชาร์เพื่อนำไปใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ในส่วนที่สองเป็นการกระตุ้นทางเคมีด้วยการแช่สารละลายกรดฟอสฟอริก และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ที่เวลา 60 วินาที เปรียบเทียบพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ด้วยเทคนิค BET และในที่สุดทำยอบแบบการทดลองหาค่าปัจจัยสำคัญสำหรับการดูดซับสารละลายคองโกเรด และหาสภาวะที่ดีที่สุดของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารละลายคองโกเรด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ สำหรับดูดซับสารละลายคองโกเรด
- 1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีนัยสำคัญในการดูดซับสารละลายคองโกเรดโดยใช้หลักการออกแบบ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 เตรียมถ่านชาร์จากกากกาแฟจากเมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิก้าโดยเผาที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศ และคำนวณหาค่าคาร์บอนคงตัวตามมาตรฐาน American Society for Testing and Material (ASTM) D3173-95 D5832-98 D2866-11 และ D3172
- 1.3.2 นำถ่านชาร์ที่มีค่าคาร์บอนคงตัวมากที่สุดมากระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40% โดยปริมาตร และกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ เวลาในการกระตุ้น 60 90 และ 120 วินาที
- 1.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟด้วยเทคนิค BET เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์
- 1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ในเวลาที่แตกต่างกัน น้ำหนักของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด และเวลาในการดูดซับ
- 1.3.5 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของคองโกเรดของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

- 1.4.1 ทราบถึงลักษณะการดูดซับสารละลายคองโกเรดโดยตัวดูดซับทำจากกากกาแฟเป็นวัสดุดิบ
- 1.4.2 เพิ่มทางเลือกใหม่สำหรับวัสดุดูดซับในการดูดซับสีย้อม
- 1.4.3 ทราบถึงปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการดูดซับแบบกะเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อม (Dyes) คือ สารประกอบอินทรีย์มีสีใช้ในอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียดสามารถละลายน้ำได้ หรือทำละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมมาใช้ในกระบวนการย้อมโมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าถึงโมเลกุลของเส้นใยทำให้เกิดพันธะกับวัสดุที่ย้อมโดยตรง สีที่ปรากฏออกมาที่ทำให้สายตามนุษย์ปกติเห็นเกิดจากการเรียกตัวของกลุ่มอะตอมภายในโมเลกุลสีย้อม กลุ่มอะตอมนี้เรียกว่า “โครโมฟอร์ (Chromophore)” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม ได้แก่ ไนโตรโซ (Nitroso) อะโซ (Azo) คาร์บอนิล (Carbonyl) ซัลเฟอร์ (Sulphur) ไนโตร (Nitro) เอทิลีน (Ethylene) และ คาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen) [8-9]

ประเภทของสีย้อมสามารถแบ่งได้ตามโครงสร้างทางเคมีหรือลักษณะการนำไปใช้ การจำแนกประเภทสีย้อมที่นิยมนำคือ การจำแนกตามลักษณะการนำไปใช้โดยสีย้อมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติและวิธีการใช้ที่แตกต่างกันรวมถึงลักษณะของน้ำเสียที่ปล่อยออกมา ซึ่งสามารถจำแนกสีย้อมที่นิยมใช้ในการฟอกย้อมได้ดังนี้ [1]

1. สีเอซิด (Acid dye) เป็นสีเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์เช่น ปอ ป่าน ไหม เป็นต้น ลักษณะการใช้คือ การนำไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีชนิดนี้ไม่ทนการซัก และแห้ง

2. สีอะโซอิก (Azoic dye) เป็นสีย้อมชนิดที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) จากนั้นย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสี สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีชนิดนี้เป็นสีที่ทนต่อการซักแต่ไม่ทนต่อการขัดถู

3. สีเบสิก (Basic or cationic dye) เป็นสีย้อมชนิดเกลือเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบ ละลายน้ำได้นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลเส้นใย สีชนิดนี้ติดทนไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4. สีไตรงัท (Direct dye) เป็นสารประกอบอะโซมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีชนิดนี้ไม่ทนต่อการซักน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สีดีสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีคุณสมบัติกระจายได้ดี ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมที่อุณหภูมิ และความดันสูง สีประเภทนี้ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี

6. สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or chrome dye) เป็นสีที่ใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะเช่น โครเมียม เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีชนิดนี้มีขนาดโมเลกุลใหญ่เกิดจากสีโครมหลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่ายซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

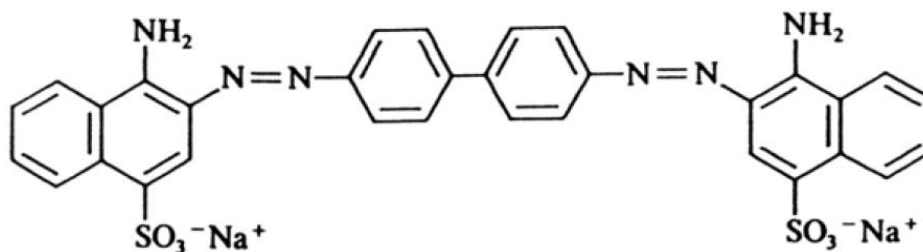
7. สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำมีประจุเป็นลบ มีคุณสมบัติเป็นต่างเมื่ออยู่ในน้ำ เส้นชนิดนี้เหมาะแก่การย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลสีจะยึดเกาะกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีชนิดนี้มี 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิกิตติคุณสมบัติสีให้สีสดใส และติดทนทุกสภาวะ

8. สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์มาแล้วจะละลายน้ำได้ นิยมนำมาย้อมผ้าฝ้าย สีติดทน และมีราคาถูก

9. สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ มีส่วนประกอบทางเคมีสำคัญอยู่ 2 ชนิดคือ สีอินดิโก และสีแอนทราควินอยด์ เมื่อจะย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมไว้สำหรับสีแว็ต ละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีชนิดนี้จะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ต

2.1.1 สีย้อมคองโกเรต [10]

คองโกเรตเป็นสีย้อมสีแดงในกลุ่มสีประเภทอะโซ (Azo) หรือไดอะโซ (Diazo) ตามโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.1 และมีสูตรทางเคมีดังนี้ $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ การจำแนกสีตามลักษณะการนำไปใช้จัดอยู่ในกลุ่มสีไดเรกต์ (Direct dye) มีคุณสมบัติละลายน้ำ และใช้ได้ดีในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส อีกหนึ่งคุณสมบัติของคองโกเรตสามารถเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นกรด-เบส เมื่อค่า pH อยู่ระหว่าง 3.0-5.0 จะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน ผลกระทบคองโกเรตต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่ สีของน้ำเปลี่ยนแปลงทำให้ทัศนียภาพไม่สวยงาม เกิดการขัดขวางการสังเคราะห์แสงของพืช และลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เป็นต้น สำหรับผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้แก่ ในโมเลกุลของสีมีสารก่อมะเร็ง และอาจทำให้เกิดอาการแพ้ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของคองโกเรด

2.2 ถ่านกัมมันต์ [3,11]

2.2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

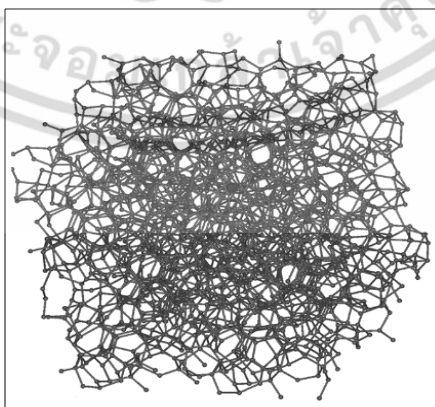
ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่นำวัสดุธรรมชาติที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไม้ กะลามะพร้าว ไม้ และฟางข้าว เป็นต้น นำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซชัน และการกระตุ้นทางกายภาพ หรือทางเคมี โดยลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์จะมีสีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีความสามารถในการดูดซับได้ดี

ถ่านกัมมันต์ได้รับความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการเป็นตัวดูดซับทั้งสถานะก๊าซ และของเหลว เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ทำถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่หาง่าย และมีราคาถูก ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้สำหรับดูดซับของเหลวจะมีลักษณะเป็นผง และสำหรับการดูดซับก๊าซจะมีลักษณะเป็นเม็ด

2.2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.2.2.1 โครงสร้างทางกายภาพ

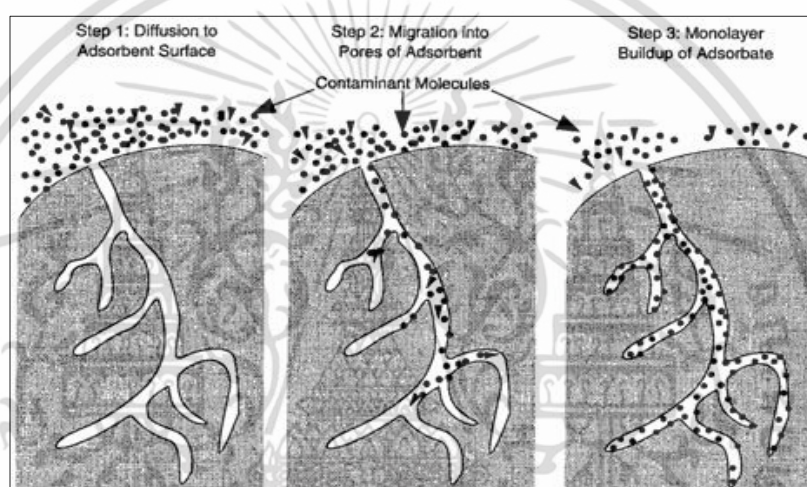
ถ่านกัมมันต์มีลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกไม่แน่นอนเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) แสดงดังรูปที่ 2.2 แตกต่างกับถ่านแกรไฟต์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกชัดเจน ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็ก มีอัตราการดูดติดผิวที่เร็วกว่าขนาดใหญ่เพราะถ่านกัมมันต์ขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าขนาดใหญ่



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบอสัณฐาน [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุนของถ่านกัมมันต์ หากมีรูพรุนมากจะมีพื้นที่ผิวมากหากมีรูพรุนน้อยพื้นที่ผิวก็จะน้อยตาม โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มักพิจารณาขนาดของรูพรุนเป็นอันดับแรกๆ เนื่องจากขนาดรูพรุนของตัวดูดซับต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของตัวถูกดูดซับ ขนาดรูพรุนจะแตกต่างกันตามวิธีการผลิต และการกระตุ้นที่แตกต่างกัน ขนาดของรูพรุนแบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด ดังนี้ รูพรุนที่มีขนาดน้อยกว่า 2 nm เรียกว่า ไมโครพอร์ (Micropores) รูพรุนที่ขนาด 2.0-50 nm เรียกว่า มีโซพอร์ (Mesopores) และ แมโครพอร์ (Macropores) มีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่กว่า 50 nm ลักษณะการเคลื่อนที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดเกาะติดบริเวณรอบนอกของถ่านกัมมันต์ก่อนจะเคลื่อนที่กระจายเข้าไปในรูพรุนขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็กตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับ [13]

2.2.2.2 โครงสร้างทางเคมี

ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่มาจากการเตรียมถ่านที่ได้จากการเผาสารอินทรีย์ด้วยความร้อนแบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การคาร์บอนเซชัน (Carbonization) ในช่วงที่เผาสลายอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน จะถูกกำจัดในรูปแบบของก๊าซ อะตอมคาร์บอนจะมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ และทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง ซึ่งในโพรงนั้นจะมีทาร์และสารอื่นที่เกิดจากการเผาสลาย โพรงเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่สามารถดูดซับสารได้ โดยการล้างทาร์และสารต่างๆ ออกจากโพรงนั้นเรียกกระบวนการนี้ว่า การกระตุ้น (Activation) โดยทั่วไปผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ หรือมีขี้เล็กน้อย แต่เนื่องจากมีกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดพันธะเคมีบนพื้นผิว เนื่องมาจากอะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจนจากสารที่กระตุ้นมารวมตัวกับอะตอมคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ กลุ่มฟังก์ชันนอลที่พบบ่อยได้แก่ Carbonyl group Carboxylic acid anhydrides group และ Phenolic hydroxyl group เป็นต้น เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนอลที่ผิวของถ่านกัมมันต์พบว่า อะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอนบริเวณขอบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นอโรมาติก โดยพันธะระหว่าง O กับ H นั้นจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เช่น โครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจนที่มีขั้ว (Polar) เหมาะสำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขั้ว (Polar organic) ส่วนโครงสร้างที่ไม่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เหมาะสำหรับการดูดซับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar)

2.2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้ตามคุณสมบัติ ดังนี้

1. แบ่งตามชนิดลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered Activated Carbon) สามารถผลิตได้โดยการนำถ่านกัมมันต์มาบด ส่วนรูปร่าง และคุณสมบัติการดูดซับจะมีความแตกต่างกันไปขึ้นกับวิธีการบด มีขนาด 5 ถึง 100 ไมโครเมตร ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับของเหลวส่วนใหญ่

ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) จะทำมาจากวัตถุดิบที่ค่อนข้างแข็ง และมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน เป็นต้น โดยถ่านกัมมันต์ชนิดนี้จะนิยมใช้สำหรับการดูดซับก๊าซพิษ และไอของสารอินทรีย์ระเหย

2. แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น สามารถแบ่งตามชนิดของการกระตุ้นได้ ดังนี้

ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยทางกายภาพ (Physical Activated Carbon) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น นิยมใช้สำหรับดูดซับก๊าซและไอระเหย

ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยทางเคมี (Chemical Activated Carbon) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรด เบส เป็นต้น มักมีรูพรุนขนาดใหญ่

3. แบ่งตามขนาดรูของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) เป็นถ่านที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 2 นาโนเมตร มักใช้กับการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย

ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) เป็นถ่านที่มีรัศมีของรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร ใช้สำหรับในการดูดซับของเหลวหรือสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่

ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) เป็นถ่านที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสี และการผลิตยา

4. แบ่งตามลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ

การดูดซับก๊าซ (Gas Adsorption) ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้สำหรับการดูดซับก๊าซพิษหรือสารอินทรีย์ระเหย ลักษณะของถ่านจะมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่

การดูดซับของเหลว (Liquid Adsorption) ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้สำหรับการฟอกสี หรือการทำให้ของเหลวให้บริสุทธิ์ ลักษณะของถ่านจะมีขนาดรูพรุนที่หลากหลายแต่ส่วนใหญ่รูพรุนจะมีขนาดกลาง

2.2.4 วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์นั้นจะมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติเช่น ไม้ ขี้เลื่อย แกลบ กะลามะพร้าว ถ่านลิกไนท์ เป็นต้น คุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาผลิต

ถ่านกัมมันต์นั้นควรมีลักษณะดังนี้เช่น มีค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สูง เป็นวัสดุเหลือทิ้ง หาได้ง่าย ราคาถูก และไม่สลายตัวเมื่อเก็บ เป็นต้น วัตถุดิบที่นำมาผลิตสามารถแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. วัตถุดิบจากซากสิ่งมีชีวิตโบราณคือ วัตถุดิบที่เกิดจากการทับถมของซากพืช และซากสัตว์ต่างๆ เป็นเวลานานหลายปีได้แก่ ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหิน กากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งลักษณะของวัตถุดิบกลุ่มนี้จะมีลักษณะแข็ง
2. วัตถุดิบจากชีวมวล เป็นวัตถุดิบเกี่ยวกับเกษตรกรรม ประกอบด้วยวัสดุเหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวหรือการแปรรูปพืชผลผลิตทางการเกษตรเช่น ฟางข้าว กะลามะพร้าว เปลือกถั่วลิสง และซังข้าวโพด เป็นต้น วัสดุจากปศุสัตว์เช่น กระดูก เป็นต้น หรืออาจเป็นวัสดุจากวัชพืชเช่น ผักตบชวา เป็นต้น
3. วัตถุดิบจากวัสดุอินทรีย์อุตสาหกรรมคือ วัตถุดิบสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเช่น พอลิเมอร์โมเลกุลสั้นชนิดต่างๆ และพอลิเมอร์ด้วยคุณภาพ เป็นต้น

2.2.5 การผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอนคือ

2.2.5.1 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

เป็นขั้นตอนการนำวัตถุดิบมาเผาแบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือ การเผาวัตถุดิบในสภาวะอับอากาศ หรือไม่มีก๊าซออกซิเจน เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันสารที่ไม่ใช่คาร์บอนหรือองค์ประกอบต่างๆจะถูกกำจัดออกมาในรูปของก๊าซ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ซึ่งขนาดของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับระยะเวลา และอุณหภูมิในการเผา โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะอยู่ระหว่างที่ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส ในการคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่เริ่มต้นของโครงสร้างรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ออกมาในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ โดยลักษณะของถ่านที่ควรมีเป็นของแข็งสีดำตลอด ปราศจากผงฝุ่น และขี้เถ้า ถ่านชาร์หลังจากขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันความสามารถในการดูดซับยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำอยู่จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้มาผ่านการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระตุ้น

2.2.5.2 การกระตุ้น (Activation)

เป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น อาจเนื่องจากการกระตุ้นทำให้เพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น โดยสามารถแบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น โดยนิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำ ออมตวยังยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ หลังจากกระตุ้นแล้วสามารถนำถ่านกัมมันต์ใช้งานได้ทันที โดยไม่มีสารเคมีตกค้าง ในส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมีถึง 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และมีรูปทรงของถ่านขนาดเล็กกว่าชนิดที่กระตุ้นทางเคมี

2. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้น และทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบหรือถ่านชาร์ที่เตรียมไว้ โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้ดีขึ้น และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยการทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งการกระตุ้นทางเคมีได้ออกเป็น 2 แบบ คือ การผสมวัตถุดิบหรือเข้่วัตถุดิบกับสารที่นำมากระตุ้น แล้วจึงนำไปทำการเผาแบบไพโรไลซิสควบคู่ไปกับการทำให้วัตถุดิบกลายเป็นถ่านในขั้นตอนเดียวกัน และอีกหนึ่งวิธีคือ การนำวัตถุดิบมาเผาในที่อับอากาศให้ได้ถ่านก่อน แล้วจึงนำไปเข้หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น จากนั้นจึงนำไปเผาอีกครั้งแบบไพโรไลซิส ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ แต่การกระตุ้นทางเคมีก็ทำให้มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ต้องทำการล้างสารเคมีก่อนนำไปใช้

2.3 การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดไว้บนพื้นผิวของแข็ง โดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแข็งนั้น สารประกอบที่มาเกาะบนพื้นผิวของแข็งเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นผิวให้สารตัวดูดซับมาเกาะบนพื้นผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ดังนั้นตัวดูดซับจึงเป็นของแข็งมีโพรงจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับให้มากขึ้นซึ่งมีผลสามารถทำให้ดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีโครงสร้าง ขนาด และการจัดเรียงตัว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับด้วยเช่นกันประเภทของการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับสารถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วแรงดึงดูดระหว่างประจุ และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ลักษณะสำคัญของการดูดซับแบบกายภาพคือสามารถเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ดียิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึงบรรยากาศ เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่างๆในตู้เย็น และในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว จึงเรียกรการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)

2.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับในลักษณะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังนั้นการดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับปฏิกิริยาเคมีทั่วไป การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิสูงๆ และจะเกิดเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น กล่าวคือ การดูดซับแบบเคมีนี้จะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิว

ของตัวดูดซับเหมือนกับการดูดซับแบบกายภาพ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวเท่านั้น จึงเรียกว่า การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

2.3.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกผ่านของเหลวเข้าถึงผิวหน้าตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นการแพร่กระจายของตัวถูกดูดซับให้เต็มพื้นที่ผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับติดกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

2.3.4 อัตราการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญต่อภาวะเข้าสู่สมดุล อัตราการดูดซับช้าหรือเร็วถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่ช้าที่สุดเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุดโมเลกุลตัวถูกดูดซับถูกส่งไปยังผิวหน้าสัมผัสของเหลวบางๆของตัวดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวของตัวถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับติดผิวขั้นตอนหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับเรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่เป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับติดผิวเช่นกัน

การยึดติดของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (Physical force) หรือทางเคมี (Chemical force) หรืออาจเกิดขึ้นทั้งสองแบบ

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [11,14]

2.3.5.1 ความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุลเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนในการแพร่ระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับทำให้มีปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ถ้าหากปริมาณตัวดูดซับคงที่ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ร้อยละของการดูดซับลดลงเพราะว่าการเพิ่มความเข้มข้นนั้นทำให้ปริมาณตัวถูกดูดซับในสารละลายถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณตัวถูกดูดซับทั้งหมดในสารละลายที่เพิ่มขึ้น

2.3.5.2 ระยะเวลาการดูดซับ

ปริมาณการดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดในช่วงเวลาแรกของระยะเวลาการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแรงขับเคลื่อนมากจากความต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับปริมาณสีย้อมบนตัวดูดซับ จากนั้นปริมาณการดูดซับจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างช้าๆจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลหลังจากเข้าสู่สมดุลแล้วระยะเวลาจะไม่มีผลกระทบต่อระบบระยะเวลาของการดูดซับกับปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ

2.3.5.3 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวมากความสามารถในการดูดซับจะมากตาม การบ่งบอกความสามารถในการดูดซับพื้นที่ผิวอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ ยังมีโครงสร้างรูพรุนที่มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น หากตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

2.3.5.4 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีมีผลต่อการดูดซับทำให้แนวโน้มการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับลดลง เพราะว่ากระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับโมเลกุลน้ำ เพื่อให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับหลุดไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลตัวดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวมากขึ้น

2.4 ไอโซเทอมการดูดซับ [11]

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบดังนี้

2.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของแบบจำลองของแลงเมียร์คือ

1. ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption)
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
3. ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น แต่แต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากัน และคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายดังสมการที่ 2.1

$$q = \frac{q_{\max} K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K_L คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ และ q_{\max} คือ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุดซึ่งอาจให้กำหนดขีดจำกัดของการดูดซับแบบชั้นเดียว C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกลดดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สมดุล q คือ ปริมาณตัวถูกลดดูดซับที่ถูกดูดซับ สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์สามารถแปลงให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $1/q$ และ $1/C$ ดังสมการที่ 2.2

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_{\max} K_L} \right) \frac{1}{C} + \frac{1}{q_{\max}} \quad (2.2)$$

2.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลายโดยมีสมมติฐานดังนี้ พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) มีรูปแบบสมการดังสมการที่ 2.3

$$q = K_F C^n \quad (2.3)$$

เมื่อ K_F และ n คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรอนด์ลิช q คือ ปริมาณตัวถูกลดดูดซับที่ถูกดูดซับ C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกลดดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สมดุล สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรอนด์ลิชสามารถแปลงเป็นสมการเชิงเส้นระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ ดังสมการที่ 2.4

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad (2.4)$$

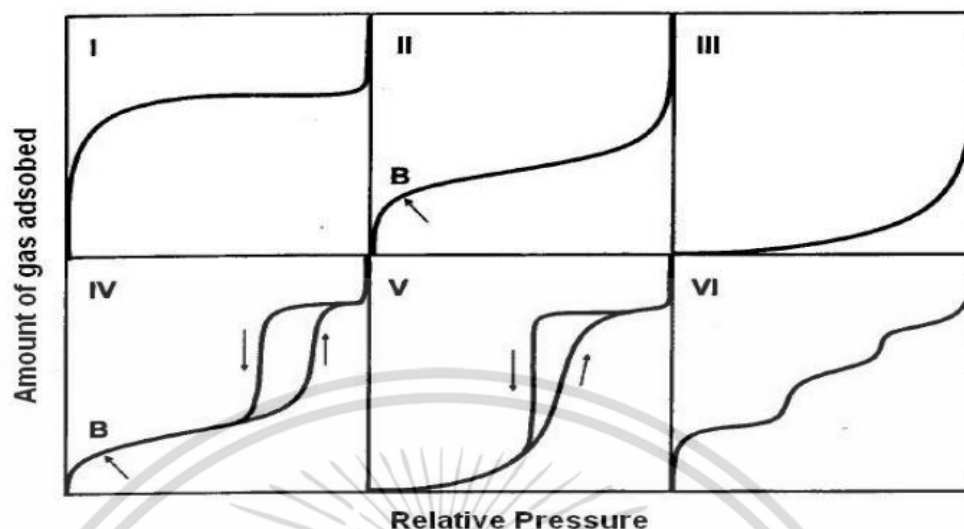
เมื่อ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

$1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 หมายถึง ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดสำหรับการดูดซับ

$1/n$ มีค่ามากกว่า 1 หมายถึง ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณมากสำหรับการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับทางกายภาพทั้งหมดสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ ปัจจุบันมีการแบ่งกลุ่มเรียกว่า BET classification และได้เพิ่มชนิดของไอโซเทอมเป็น 6 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.4 ในการดูดซับนั้นเมื่อค่าความดันย่อยเพิ่มขึ้น (p/p_0) ปริมาณการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น โดยรูปแบบไอโซเทอมที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ไอโซเทอมชนิดที่ I หรือไอโซเทอมแบบแลงเมียร์คือ ลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ของตัวดูดซับของแข็งที่มีขนาดรูพรุนเล็ก และการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าพื้นที่ผิวภายนอก (external surface area) โดยกลไกการดูดซับในช่วงแรก สารถูกดูดซับถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ผิวหรือรูพรุนของตัวดูดซับจะสามารถดูดซับได้ลดลง และเข้าสู่สมดุล ตัวอย่างของการดูดซับแบบที่ I ได้แก่ การดูดซับก๊าซไนโตรเจน บนถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ -196.15 องศาเซลเซียส และการดูดซับบนซีโอไลต์ เป็นต้น
- ไอโซเทอมชนิดที่ II หรือบางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอมแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (Sigmoid or S-shaped isotherm) คือ รูปแบบการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macro porous) ลักษณะการดูดซับอาจเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งในช่วงแรกบริเวณจุด B ในกราฟจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ก่อน จากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับปริมาณจะมากที่ความดันย่อยสูงๆ จากจุด B ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวได้
- ไอโซเทอมชนิดที่ III เป็นลักษณะการดูดซับที่ตัวดูดซับมีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับอ่อนกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับด้วยกันเอง จากที่กล่าวมาข้างต้นจะทำให้เกิดการรวมตัวของสารถูกดูดซับก่อน ทำให้ลักษณะกราฟในช่วงแรกมีปริมาณของสารดูดซับน้อย เมื่อเวลาผ่านไปโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้นที่พื้นผิวทำให้มีแรงดึงดูดสารดูดซับที่เหลืออยู่เพิ่มมากขึ้น
- ไอโซเทอมชนิดที่ IV เป็นการดูดซับของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) 2 – 50 nm เมื่อความดันเพิ่มขึ้นตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าไปในรูพรุนทำให้กราฟมีลักษณะชันมากขึ้น และระดับของกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นภายในรูพรุน (Capillary condensation in pores) ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) คือ เส้นกราฟคายซับไม่ซ้อนทับกับเส้นกราฟของการดูดซับ ในช่วงแรกของกราฟจะคล้ายกับไอโซเทอมชนิดที่ II ซึ่งจุด B แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์
- ไอโซเทอมชนิดที่ V ลักษณะการดูดซับคล้ายกับไอโซเทอมชนิดที่ IV แต่การควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า p/p_0 สูงกว่า เนื่องจากลักษณะกลไกการดูดซับคล้ายกับแบบที่ III คือ แรงระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับมีค่าต่ำ ในส่วนฮิสเทอรีซิสเกิดจากการดูดซับและคายซับด้วยการเอาชนะแรงคะปิลลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ซึ่งลักษณะนี้มักจะไม่พบบ่อยโดยทั่วไป
- ไอโซเทอมชนิดที่ VI หรือไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) เป็นลักษณะการดูดซับที่ละชั้นบนพื้นผิวหน้าที่มีหลายชั้น และมีความเป็นระเบียบสูง



รูปที่ 2.4 กราฟไอโซเทอมแต่ละชนิด [15]

2.5 การออกแบบการทดลองและโปรแกรมมินิแทป (Design of Experiments: DOE and Minitab Program) [16]

การออกแบบการทดลองคือ การเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการศึกษา และกำหนดลำดับจำนวน การทดลองด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อผลการทดลองที่น่าเชื่อถือโดยนำข้อมูลต่างๆไปวิเคราะห์ด้วย หลักสถิติเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของปัญหา โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรนำเข้า (input variable) หรือ ปัจจัย (Factors) ในกระบวนการที่กำลังศึกษาเพื่อทำให้สามารถสังเกตเห็นสาเหตุต่างๆที่ทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) ระหว่างความสัมพันธ์ของปัจจัยกับค่าตอบสนอง ของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลองให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะนำวิธี ทางสถิติมาใช้ในการออกแบบการทดลองเรียกว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical design of experiment) คือ กระบวนการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมในการวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยมีหลักการพื้นฐานได้แก่

- การทำลองซ้ำ (Replication) หมายถึง การทำลองซ้ำแบบเดิมเพื่อประเมินค่าความผิดพลาด โดยพิจารณาความต่างกันของข้อมูลทางสถิติและประเมินค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองได้ ถูกต้องมากขึ้น
- การทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การออกแบบการทดลองโดยไม่เรียงลำดับการ ทดลองเพื่อลดผลกระทบของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง
- การทดลองแบบกลุ่ม (Blocking) หมายถึง การทำการทดลองที่เก็บข้อมูลแบบกลุ่มเพื่อให้ผล การทดลองมีความแม่นยำ (Precision) และสามารถเปรียบเทียบเงื่อนไขต่างๆ ภายในกลุ่มได้

ในการออกแบบแผนการทดลองมีคำศัพท์พื้นฐานที่ควรทราบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปัจจัย (Factors) คือ ตัวแปรนำเข้า (Input) ที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการทดลองซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ ปัจจัยที่ควบคุมได้เช่น เวลา และความเข้มข้นของสาร เป็นต้น และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เช่น อุณหภูมิภายนอก ลม และฝุ่น เป็นต้น
- ระดับปัจจัย (Levels of factor) คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดลองหนึ่ง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง 100 300 และ 500 องศาเซลเซียส คือ การทดลองศึกษาปัจจัย อุณหภูมิ 3 ระดับ
- ตัวแปรตอบสนอง (Responses) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output) ที่ต้องการควบคุมให้ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ
- วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนั้นเช่น การทดลองศึกษาปัจจัย A และ ปัจจัย B ที่ 2 และ 3 ระดับ โดยจะมีวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้แตกต่างกันเท่ากับ $2 \times 3 = 6$ วิธี จะเห็นได้ว่าจำนวนวิธีจะเท่ากับผลคูณของระดับของทุกปัจจัยในการทดลอง
- จำนวนครั้งที่ทดลอง (Runs or Experimental runs) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำ ต่อหนึ่งแผนการออกแบบการทดลองจะเท่ากับผลคูณของจำนวนวิธีปฏิบัติกับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ (Replicates)

2.5.1 หลักการออกแบบการทดลอง

การศึกษาการทดลองด้วยวิธีทางสถิติในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองมีความจำเป็นต้องเข้าใจถึงกระบวนการที่ศึกษา วิธีการเก็บข้อมูล จำนวนข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ และวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บจากการทดลอง โดยมีหลักการดำเนินงานดังนี้

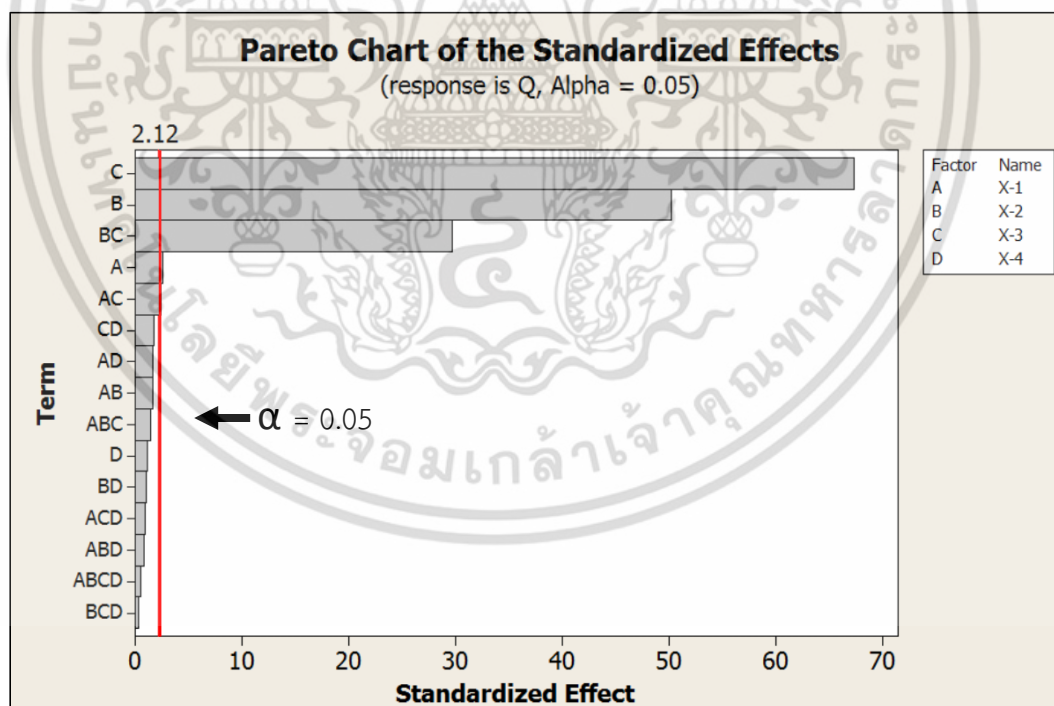
1. ศึกษาทำความเข้าใจกับปัญหา ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการระบุวัตถุประสงค์ของการทดลอง
2. การเลือกปัจจัย (Factor) และระดับปัจจัย (Levels of factor) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตอบสนอง ผู้ทำการทดลองต้องเข้าใจถึงกระบวนการ หรือศึกษาศึกษาการทดลองอื่นที่ผ่านมาเพื่อกำหนดปัจจัยที่สามารถควบคุมระดับของปัจจัยที่กำหนดได้ โดยปกติระดับของปัจจัยจะกำหนดไว้ต่ำสุด 2 ระดับ (ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่สามารถควบคุมได้) หรือมากกว่านั้น
3. กำหนดค่าตอบสนอง (Responses) ควรกำหนดผลลัพธ์จากปัญหาที่ศึกษา
4. การเลือกรูปแบบของการออกแบบการทดลอง โดยการเลือกรูปแบบขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา สนใจผลกระทบของปัจจัยหรือไม่
5. การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูลทำตามรูปแบบแผนการทดลองที่ได้กำหนดไว้ โดยการทดลองควรคำนึงถึงการทดลองซ้ำ และทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากสภาพแวดล้อม และสำหรับผู้ทำการทดลองควรคำนึงถึงการทำได้จริงในทางปฏิบัติและเป็นไปได้ไม่ว่าจะเป็นด้านค่าใช้จ่าย เวลา และจำนวนการทดลอง
6. การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติคือ สามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนอง และสร้างสมการถดถอยระหว่างค่าตอบสนองกับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ อาจใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการช่วยวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อตัดสินใจในข้อสรุปที่ได้ทำตามวัตถุประสงค์นั้นมีความน่าเชื่อถือหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การสรุปและการเสนอแนะ นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลมาเป็นบทสรุปในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ควรนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง และตรวจสอบความถูกต้องของบทสรุป

2.5.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial experimental)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลคือ การออกแบบการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อศึกษาผลกระทบปัจจัยหลัก (Main effect) หรือผลกระทบร่วมหลายปัจจัยพร้อมกัน (Interactions) โดยการทดลองแบบแฟคทอเรียลสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี คือ การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial experimental) และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full factorial experimental) ในงานวิจัยนี้เลือกการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป โดยศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ หรือเรียกว่าการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป แบบ 2^k (2^k Full factorial experimental) เมื่อ k คือ จำนวนปัจจัยที่ทำการทดลอง และเลข 2 คือ จำนวนระดับของปัจจัย เนื่องจากการออกแบบการทดลองเพื่อทำการคัดเลือกปัจจัยออก (Screening experimental) โดยการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนอง (ปริมาณคงโกเรตที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์) พิจารณาจากค่า P-value ($\alpha = 0.05$) หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จากการประมวลผลของโปรแกรมสำเร็จรูปมินิแทปที่แสดงด้วยแผนภูมิพาราโตโดยการเลือกปัจจัยที่มีค่าเกินเส้นสีแดงแสดงดังรูปที่ 2.5



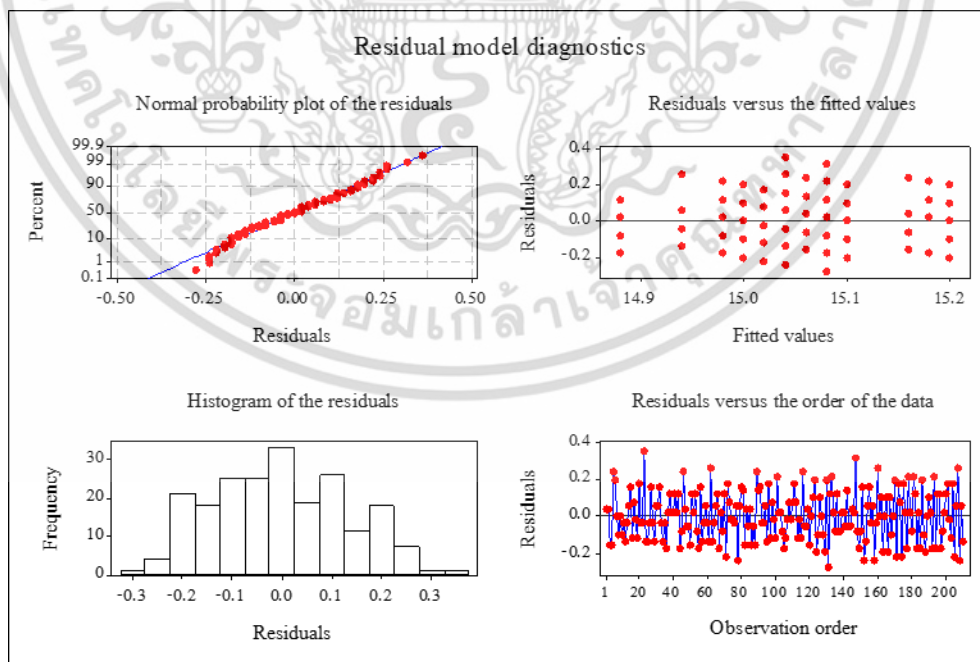
รูปที่ 2.5 แผนภูมิพาราโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.6 เพื่อยืนยันความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในเทอมของความเพียงพอของจำนวนตัวอย่าง และใช้ตัวอย่างวิเคราะห์จากการสุ่มอย่างอิสระ การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองใช้ Residual model diagnostics ซึ่งประกอบด้วย

1. การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality) หมายถึง การวิเคราะห์ต้องกระจายแบบปกติ พิจารณาจากกราฟ Normal probability plot ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ต้องเกาะกลุ่ม และเรียงเป็นเส้นตรงเฉียงขึ้นทางขวา
2. แผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram) ต้องมีลักษณะเป็นแบบระฆังคว่ำคือ ลักษณะของข้อมูลที่ปรากฏเป็นแผนภูมิแท่งควรมีลักษณะแท่งตรงกลางสูงที่สุด และแท่งทางด้านซ้ายและด้านขวาไม่ควรสูงเกินแท่งตรงกลางและไม่เบี่ยงเบนไปด้านใดด้านหนึ่ง
3. การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability) พิจารณาจากกราฟ Residuals versus the fitted values โดยพล็อตระหว่าง Residual กับค่า Fitted value ซึ่งแผนภาพการกระจายตัวต้องไม่มีรูปแบบที่แน่นอนเพื่อใช้ยืนยันว่าความแตกต่างของข้อมูลเกิดจากธรรมชาติของกระบวนการหรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้
4. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independence) จากกราฟ Residuals versus the order of data โดยพล็อตระหว่าง Residuals กับ Observation order ซึ่งแต่ละข้อมูลต้องมีความเป็นอิสระต่อกันหมายถึงไม่มีความเอนเอียง (Bias) ต่อกัน ดังนั้นแผนภาพจึงไม่มีรูปแบบการกระจายตัวที่แน่นอน



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

การทดลองนี้มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ โดยลักษณะการออกแบบของวิธี Box-Behnken ใช้หลักการของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (2^k Full factorial experimental) รวมเข้ากับค่าจุดกึ่งกลาง (Central points) มาเป็นการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3^k) โดยที่ k คือ จำนวนปัจจัย Box-Behnken และเลข 3 คือจำนวนระดับของปัจจัยสามารถเขียนเป็นค่าที่จะนำมาศึกษาแต่ละระดับของปัจจัยได้ดังนี้ ค่าต่ำสุด (-1) ค่ากึ่งกลาง (0) และค่าสูงสุด (+1) ดังตัวอย่างของแบบการทดลองนี้โดยมีกรณีศึกษา 3 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการทดลองแบบ Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

จำนวนการทดลอง	A	B	C
1	-1	-1	0
2	-1	+1	0
3	+1	-1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	+1
11	0	-1	-1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken นี้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear effects) ผลกระทบในเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic effects) และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2 Factor interaction) ข้อจำกัดสำหรับแบบการทดลองนี้คือ จำนวนครั้งที่ทดลองมีจำนวนมากไม่สามารถทำได้จึงเหมาะกับการศึกษาจำนวนปัจจัย 3 ถึง 4 ปัจจัยเท่านั้น

2.5.5 วิธีการหาพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมของการทดลอง

วิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology : RSM) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition) ของระบบหรือการทดลอง โดยอาศัยการออกแบบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

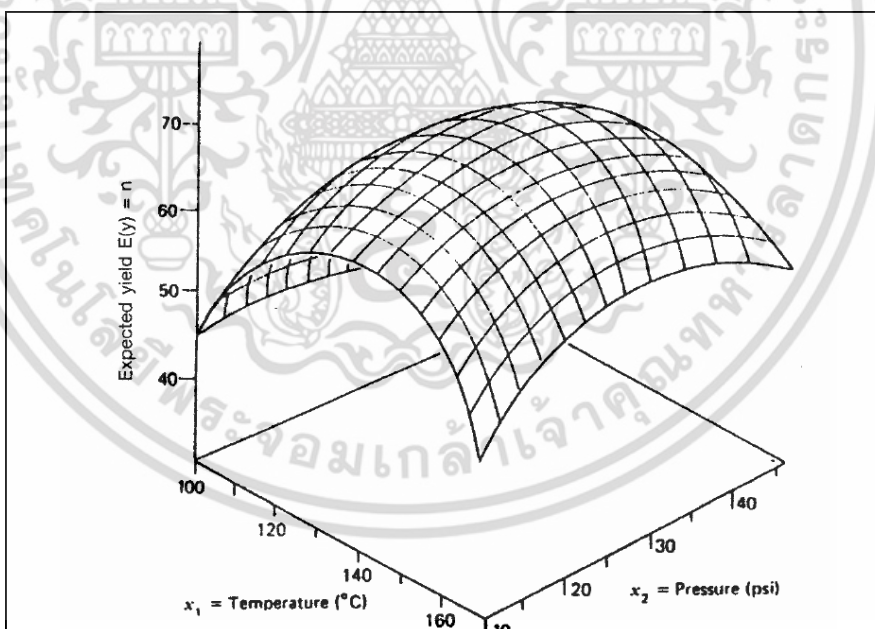
ทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่โดยมีเป้าหมายเพื่อหาระดับของปัจจัยต่างๆที่ทำให้ค่าตอบสนอง (Responses) หรือผลลัพธ์มีค่าเหมาะสมที่สุด ตัวอย่างเช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของปัจจัย x_1 และ x_2 ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ 2.5 เมื่อ ε คือค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง y ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.6 และถ้าระบบหรือการทดลองที่มีจำนวน 2 ปัจจัย สามารถแทนค่าคาดหวังของผลตอบสนอง (Expected response) $E(y)$ เท่ากับ η ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ได้ดังสมการที่ 2.7

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.5)$$

$$E(y) = f(x_1, x_2) \quad (2.6)$$

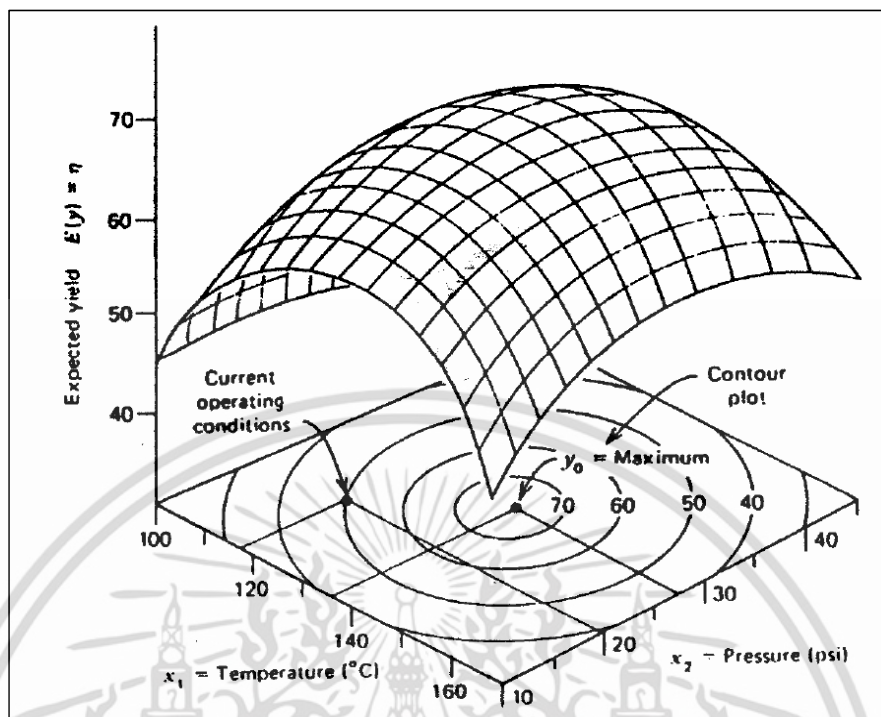
$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.7)$$

ค่าพื้นผิวตอบสนองจากสมการที่ 2.9 โดยมากแล้วจะนำเสนอในรูปแบบของกราฟที่พล็อตระหว่างระดับของปัจจัยที่ศึกษากับค่าพื้นผิวตอบสนองแสดงดังรูปที่ 2.7 และจะพล็อตเส้นระดับของพื้นผิวตอบสนอง (Contour plot) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 พื้นผิวตอบสนอง (Surface plot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เส้นระดับของพื้นผิวตอบสนอง (Contour plot)

โดยทั่วไปการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยต่างๆ มักเขียนอยู่ในรูปสมการลำดับที่ 1 (First order model) แต่หากในกรณีที่กราฟของพื้นผิวตอบสนองมีความโค้งจะสามารถประมาณ และวิเคราะห์ค่าตอบสนองหรือผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองโดยใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 2 โดยมีรูปแบบแสดงดังสมการที่ 2.8

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.8)$$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศศิกร แสงพงษ์ชัย (2554) มีการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ $NaOH$ และ H_3PO_4 ในการศึกษาพบว่า กากกาแฟพันธุ์อะราบิกาและพันธุ์โรบัสตามีองค์ประกอบโดยน้ำหนักของเซลลูโลสประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 77 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 3 เปอร์เซ็นต์ กากกาแฟทั้งสองชนิดมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 66 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ที่ผลิตจากกากกาแฟพันธุ์อะราบิกามีความเหมาะสมมากกว่ากากกาแฟพันธุ์โรบัสต่าในการคาร์บอนไนเซชันที่สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่า สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การนำถ่านชาร์ที่เลือกแล้วมากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนสูงที่สุดเท่ากับ 1,769 m^2/g 0.7947 nm และ 0.7517 cm^3/g ตาม ลำดับ สำหรับไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196.15 องศาเซลเซียส ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ (BET method) คือ ไอโซเทอมชนิดที่ 1 แสดงถึงลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และเป็นการดูดซับก๊าซบนถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก [11]

Tehrani, N.F. และคณะ (2014) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ 40 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร เมื่อนำกากกาแฟแช่กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นต่างกันจากนั้นนำมาเผาแบบไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส และล้างน้ำในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อละลายกรดฟอสฟอริก สารอนินทรีย์ และเถ้า จากการศึกษาพบว่า การเผาที่อุณหภูมิต่างกันแต่ถ่านกัมมันต์ที่แช่ด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน มากที่สุด และมีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกทำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับถ่านกัมมันต์จากการสลายโครงสร้างของพวกพืช (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) โดยเกิดปฏิกิริยา Dehydration กำจัดน้ำ สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ น้ำมันทาร์ (Tar) เพื่อทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ไม่อุดตันในระหว่างการเผาแบบไพโรไลซิส [18]

Yuen, F.K. และ Hameed, B.H. (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีพลังงานไมโครเวฟถูกใช้อย่างกว้างขวางในทางด้านอุตสาหกรรมทางเคมี และงานวิจัย ในหลายกรณีของงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีพลังงานไมโครเวฟได้ถูกบันทึกถึงข้อดีหลายประการเช่น ประหยัดค่าใช้จ่าย เพิ่มอัตราการการเกิดปฏิกิริยา ลดการใช้พลังงาน พลังงานกระตุ้นโดยตรงกับตำแหน่งที่ต้องการ และลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ เป็นต้น หลักการทำงานของพลังงานไมโครเวฟที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์หลักการทำงานของไมโครเวฟคือ การส่งคลื่นไมโครเวฟทำให้มีการสั่นของโมเลกุล และเกิดความร้อนขึ้นภายในโมเลกุล เมื่อถ่านกัมมันต์ได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ไอน้ำ สารระเหย ภายในเกิดการระเหยออกหรือสลายตัว ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยกล่าวว่า ถ่านชาร์นั้นสามารถรับการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟได้ดี และผลิตภัณฑ์ที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟก็มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการกระตุ้นด้วยการเผา [6]

Hesas, R.H. และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลกระทบของถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรกรรมด้วยวิธีการให้ความร้อนโดยพลังงานไมโครเวฟ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟคือ ระดับกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ ระยะเวลาในการให้พลังงาน และอัตราส่วนของสารเคมีต่อถ่านชาร์ เป็นต้น ปัจจัยที่กล่าวมาเหล่านี้มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ทั้งทางกายภาพ และทางเคมีเช่น พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ความสามารถในการดูดซับ และหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ ซึ่งโดยทั่วไปปัจจัยเหล่านี้จะให้ประสิทธิภาพที่ดีทางกายภาพเมื่อค่าปัจจัยเข้าใกล้สภาวะที่ดีที่สุด และจะทำให้ประสิทธิภาพลดลงเมื่อค่าปัจจัยเกิดจุดสภาวะที่เหมาะสม [19]

Hirata, M. และคณะ (2002) ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟกระตุ้นโดยพลังงานไมโครเวฟ กากกาแฟเป็นวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีในน้ำเสีย ในงานวิจัยนี้แยกการสังเคราะห์ออกเป็น 2 แบบคือการคาร์บอนไนซ์โดยใช้เตาเผา และการคาร์บอนไนซ์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟเพื่อเป็นตัวดูดซับสำหรับการดูดซับสีเมทิลีนบลู สีไวโอเลต (basic dye) และสีออเรียน II (acidic dye) พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์มี ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลู และสีไวโอเล็ตได้ดีกว่าการดูดซับสีออเรน II เนื่องจากประเภท ของขี้ และหมูฟังกซ์บนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับประเภทของสีที่ต่างกัน แต่โดยทั่วไปแล้ว การดูดซับของถ่านกัมมันต์สามารถเกิดขึ้นในรูปพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ [20]

Chang, S.H. และคณะ (2011) ได้ศึกษาและนำเสนอขั้นตอนการพิจารณาคัดเลือกปัจจัยที่คาดว่า มีนัยสำคัญต่อการดูดซับโดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial design, 2^{k-1}) โดยกำหนดระดับค่าปัจจัยไว้ 2 ระดับ (2-level) คือ ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด ที่ระดับความ เชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าในการคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญควรพิจารณากราฟ Normal probability ก่อนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลปัจจัยที่นำมาใช้โดยลักษณะจุดในกราฟจะเข้าใกล้เส้นตรง จากนั้นจึงพิจารณาแผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญโดยเลือกปัจจัยระดับ นัยสำคัญ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ [21]

Cheng, Z. และคณะ (2014) ได้ศึกษาการดูดซับสีไดเร็กซ์เรด80 และคองโกเรดของถ่านกัมมันต์ ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จำนวนปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 4 ปัจจัย ระดับค่าปัจจัย 3 ระดับ เพื่อหาปริมาณการดูดซับสีในถ่านกัมมันต์ และการประเมินค่าปริมาณการดูดซับสีที่สภาวะของ ปัจจัยที่เหมาะสมจากโปรแกรมมินิแทป พบว่าปัจจัยที่นำมาศึกษาทั้งหมดมีนัยสำคัญต่อการดูดซับสีใน ถ่านกัมมันต์ ในส่วนของค่าการประเมินปริมาณการดูดซับของสีไดเร็กซ์เรด80 และคองโกเรดที่สภาวะของ ปัจจัยที่เหมาะสมจากโปรแกรมมินิแทปเท่ากับ 769.48 และ 519.90 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อ เปรียบเทียบกับค่าจริงที่ได้จากการทดลองของสีไดเร็กซ์เรด และคองโกเรดเท่ากับ 748.42 และ 516.36 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์ความคาดเคลื่อนจากโปรแกรมมินิแทปกับการทดลองจริงคือ 2.81 เปอร์เซ็นต์ และ 0.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับความคาดเคลื่อนระหว่างโปรแกรม มินิแทปกับการทดลองจริงได้ ดังนั้นการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแทปสามารถนำมาช่วยการ ออกแบบการทดลองต่างๆ สามารถหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการทดลอง และสามารถประเมินค่า ผลลัพธ์ที่ต้องการในสภาวะที่ดีที่สุดได้ [22]

จากงานวิจัยอื่นที่ผ่านมาศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว อาจใช้เวลานาน และพลังงานวัตต์สูงในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ปริมาณพื้นที่ผิวจำนวนมาก โดยไม่มี การศึกษาร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟ และสารเคมี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับ สารเคมีในขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงปริมาณพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น หรือใกล้เคียงกันกับงานวิจัยอื่น แต่ใช้เวลาในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์เพียงไม่กี่วินาที

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.1 สารเคมี

1. กาแฟกาแฟชนิดอาราบิก้า ร้าน True coffee
2. ก๊าซไนโตรเจน 99.99 เปอร์เซ็นต์
3. สารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์
4. ผงคองโกเรด เกรดวิเคราะห์
5. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบ
3. เตาเผา
4. อุปกรณ์สังเคราะห์ถ่านชาร์
5. กระจกนาฬิกา
6. เครื่องกรองสุญญากาศ
7. บีกสุญญากาศ
8. ซ้อนตักสาร
9. กระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 93
10. บีกเกอร์ขนาดต่างๆ
11. แท่งแก้วคนสาร
12. ขวดวัดปริมาตรขนาดต่างๆ
13. กระจกตวง
14. แท่งแม่เหล็ก
15. เครื่องปั่นกวน
16. เครื่องเขย่า
17. ถ้วยและฝาเซรามิค
18. ถ้วย Quartz
19. ตะแกรงร่อนสารขนาดเบอร์ 12 เมช
20. โถดูดความชื้น
21. อุปกรณ์วัดค่า pH
22. เครื่อง Brunauer-Emmet-Teller (BET) จากบริษัท Bel Japan รุ่น BEL SORP-MAX
23. เครื่อง Visible spectrophotometer รุ่น T60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมถ่านชาร์จากกากกาแฟ

1. นำกากกาแฟผ่านกระบวนการล้าง กรอง และอบ จากนั้นนำกากกาแฟผ่านตะแกรงร่อนขนาด 12 เมช และนำกากกาแฟคำนวณหาคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D3173-95 D5832-98 D2866-11 และ D3172 (แสดงไว้ในภาคผนวก ก)
2. นำกากกาแฟที่ผ่านตะแกรงร่อนมาทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านตลอด
3. กากกาแฟหลังจากคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ นำมาทดสอบคำนวณหาคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D3172 เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการคาร์บอนไนซ์กากกาแฟ

3.4 การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ

1. นำสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้สารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทสารละลายกรดฟอสฟอริกลงในถ่านชาร์ในอัตราส่วนสารละลาย 20 มิลลิลิตร ต่อถ่านชาร์ 1 กรัม เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง
2. นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแช่สารละลายไปกระตุ้นในเครื่องไมโครเวฟ ที่เวลา 60 90 และ 120 วินาที โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ 200 วัตต์
3. ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟล้างให้มีค่า pH เท่ากับ 7
4. ทำซ้ำในข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็น 500 วัตต์ และ 800 วัตต์

3.5 เตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบความเข้มข้นคองโกเรดในสารละลาย

1. เตรียมสารละลายคองโกเรดที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 10 25 50 75 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 498 นาโนเมตร
2. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสายละลายคองโกเรด

3.6 วิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการดูดซับคองโกเรดแบบกะ

1. เลือกปัจจัยที่ศึกษาผลกระทบต่อการดูดซับแบบกะคือ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์เวลาต่างกัน น้ำหนักตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลาย และเวลาในการดูดซับ
2. ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญโดยใช้โปรแกรม Minitab16 (แสดงไว้ในภาคผนวก ข.1)
3. ทดลองการดูดซับตามวิธีการออกแบบการทดลอง โดยกำหนดปริมาณของสารละลายคองโกเรด 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
4. เก็บสารละลายตัวอย่างตามเวลาที่กำหนดตามแบบการทดลอง และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 498 นาโนเมตร เพื่อหาค่าปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับจากการคำนวณดังสมการที่ 3.1 เพื่อเป็นค่าตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรมออกแบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วิเคราะห์ข้อมูล และคัดเลือกปัจจัยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (แสดงไว้ในภาคผนวก ข.1)

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m} \quad (3.1)$$

เมื่อ Q_t คือ ปริมาณคองโกเรตที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

m คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

3.7 วิเคราะห์หาสภาวะเหมาะสมสำหรับการดูดซับคองโกเรตแบบกะ

1. เลือกปัจจัยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากการศึกษาทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบในการออกแบบการทดลองของ Box-Behnken ในโปรแกรม Minitab16 เพื่อหาสภาวะเหมาะสมสำหรับการดูดซับ (แสดงไว้ในภาคผนวก ข.2)
2. ทดลองการดูดซับตามวิธีการออกแบบการทดลอง โดยกำหนดปริมาณของสารละลายคองโกเรต 25 มิลลิกรัม จากนั้นนำเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
3. เก็บสารละลายตัวอย่าง และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 498 นาโนเมตร เพื่อหาค่าปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับจากการคำนวณดังสมการที่ 3.1 เพื่อเป็นค่าตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรมออกแบบการทดลอง
4. วิเคราะห์ข้อมูล และหาสภาวะเหมาะสมสำหรับการดูดซับ (แสดงไว้ในภาคผนวก ข.2)

3.8 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

1. เตรียมถ่านกัมมันต์ 800 วัตต์ 90 วินาที ชั่ง 0.05 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
2. เตรียมสารละลายคองโกเรตที่ความเข้มข้นแตกต่างกันได้แก่ 20 60 100 140 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และเตรียมสารละลายคองโกเรต 25 มิลลิกรัม ลงในขวดรูปชมพู่
3. นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เก็บสารละลายตัวอย่างทุก 2 นาที จนครบ 10 นาที และเก็บต่อที่เวลา 15 30 45 60 120 และ 180 นาที
4. นำสารละลายที่เก็บวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 498 นาโนเมตร และสร้างกราฟศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

3.9 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET

พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์โดยการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจนภายใต้ความดันมาตรฐานที่อุณหภูมิ -196.15 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ค่าด้วยเทคนิค BET

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากกาแฟ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.63 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 97.02 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.34 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณคาร์บอนคงตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 เปอร์เซ็นต์ กากกาแฟมีปริมาณสารระเหยมากจึงเหมาะสมในการเผาแบบคาร์บอนไอเซชัน เนื่องจากกระบวนการเผาแบบคาร์บอนไอเซชันจะเปลี่ยนปริมาณสารระเหยให้กลายเป็นคาร์บอนคงตัว [23] ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกถ่านชาร์

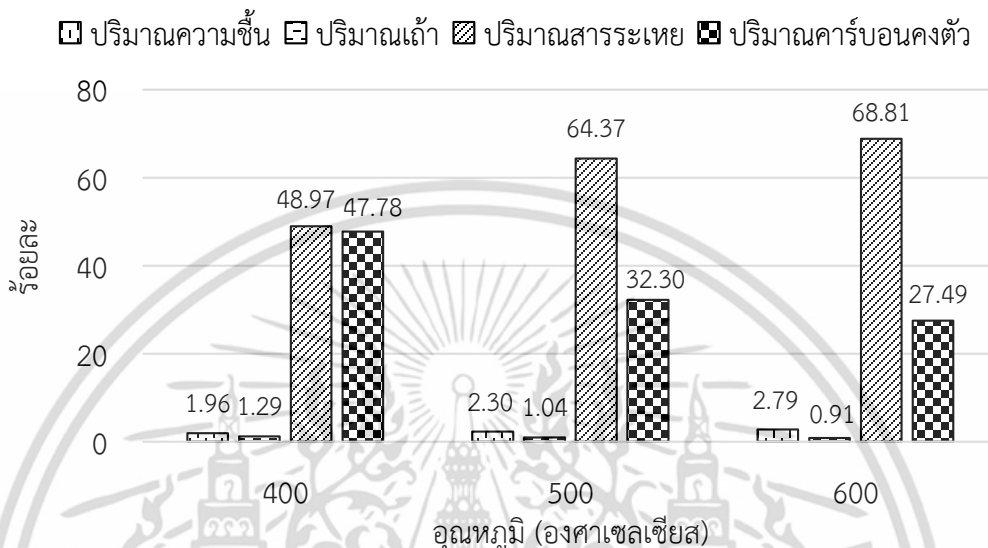
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

การทดลองครั้งที่	ปริมาณความชื้น (%wt)	ปริมาณสารระเหย (%wt)	ปริมาณเถ้า (%wt)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%wt)
1	1.27	97.62	0.29	0.82
2	2.01	96.37	0.40	1.22
3	1.60	97.07	0.35	0.98
เฉลี่ย	1.63	97.02	0.34	1.01

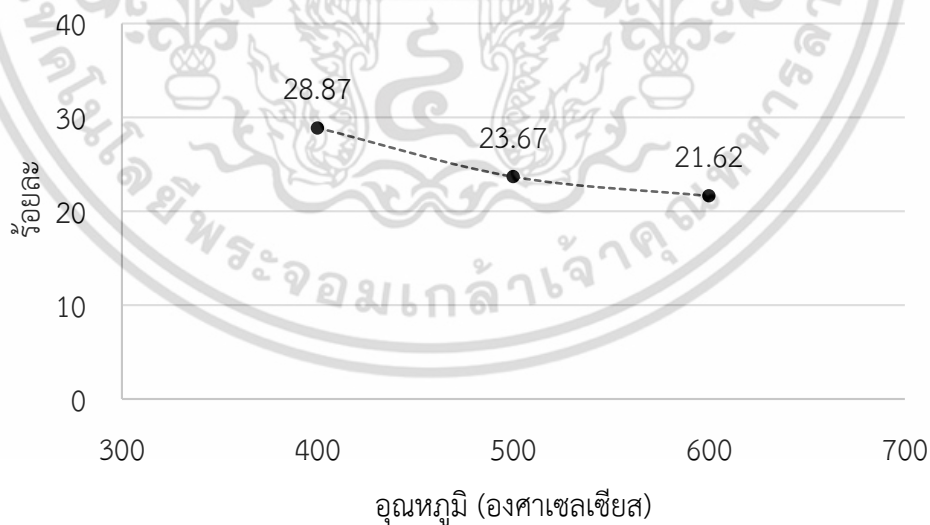
4.2 คุณสมบัติของถ่านชาร์

ศึกษาสถานะของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไอเซชันของกากกาแฟที่อุณหภูมิต่างกัน 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทั่วไปการคาร์บอนไอเซชันจะทำในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส สารระเหยในวัสดุชีวมวลอาจยังไม่สลายตัวเป็นคาร์บอนคงตัว หากอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทำให้ธาตุคาร์บอนเปลี่ยนไปเป็นก๊าซส่งผลให้ปริมาณถ่านชาร์ลดลง [23] จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 1.96 2.30 และ 2.79 ปริมาณเถ้าเท่ากับร้อยละ 1.29 1.04 และ 0.91 ปริมาณสารระเหยเท่ากับร้อยละ 48.97 64.37 และ 68.81 ปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 47.78 32.30 และ 27.49 ตามลำดับ ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามอุณหภูมิ ส่วนปริมาณสารระเหยเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งแปรผกผันกับปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากธาตุคาร์บอนจะสลายตัวเป็นสารระเหยเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้น สำหรับค่าร้อยละผลได้จากอุณหภูมิในการคาร์บอนไอเซชันที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าค่าร้อยละผลได้มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิดจากการสลายตัว

ของคาร์บอน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมแก่การคาร์บอนคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพราะว่ามี ปริมาณคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้มากที่สุด



รูปที่ 4.1 ร้อยละปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวของ อุณหภูมิการคาร์บอน

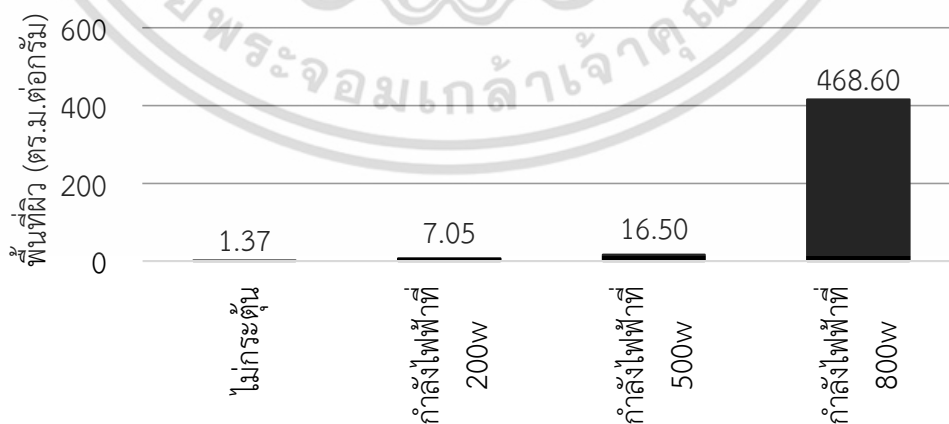


รูปที่ 4.2 ร้อยละผลได้ของอุณหภูมิการคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

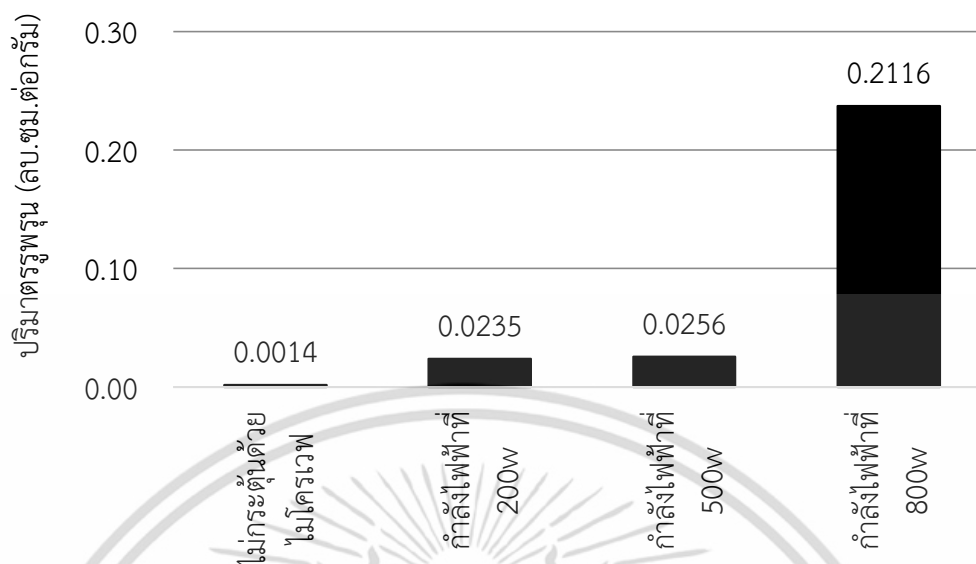
4.3 ศึกษาการกระตุ้นถ่านชาร์

นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อยู่ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อช่วยเกิดการสร้างโพรงของถ่านที่ผลิตจากวัสดุชีวมวล [3] และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าต่างกันคือ 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วินาที วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ พบว่าถ่านชาร์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟมีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1.37 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0014 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 7.05 16.50 และ 468.60 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.02 0.03 และ 0.21 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจะให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงกว่าถ่านชาร์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครเวฟจะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้โมเลกุลของน้ำสั่นจนเกิดความร้อน และส่งผลให้สารที่อยู่โดยรอบได้รับความร้อน และได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของน้ำมันที่อุดตันรูของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ มีจำนวนพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ มีกำลังไฟฟ้าที่สูงสุดของเครื่องไมโครเวฟ ซึ่งส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นของคลื่นมากกว่าที่กำลังไฟฟ้า 200 และ 500 วัตต์ และมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนภายในถ่านชาร์มากกว่า และยังสามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่อุดตันในถ่านชาร์ที่ดีกว่าทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น เมื่อนำถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยเทียบกับถ่านกัมมันต์พาณิชย์ทั่วไป พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์พาณิชย์มีประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม [3] จากงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์พาณิชย์ อาจเนื่องมาจากสภาวะในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ยังไม่เหมาะสมพอสำหรับกากกาแฟ



รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบปริมาณทรูพูนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์

4.4 ผลการทดลองดูดซับสารละลายคองโกเรด

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยการวิเคราะห์พื้นที่ผิว และปริมาณทรูพูนของถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์ ให้พื้นที่ผิว และปริมาณทรูพูนมากที่สุดซึ่งในการเลือกวัสดุดูดซับมักพิจารณาจากพื้นที่ผิวจำนวนมาก จึงใช้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์ มาเป็นตัวดูดซับสำหรับดูดซับสารละลายคองโกเรด โดยการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ เวลาต่างกัน เวลาในการดูดซับ น้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด เป็นต้น

4.4.1 ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อการดูดซับสารละลายคองโกเรด

ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสำหรับศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อการดูดซับสารละลายคองโกเรดแสดงดังตารางที่ 4.2 กำหนดให้ปัจจัย x_1 , x_2 , x_3 และ x_4 เป็นปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อปริมาณคองโกเรดที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (Q) โดยคำนวณจากปริมาณคองโกเรดที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์หารด้วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ที่ระดับปัจจัย 2 ระดับคือ ค่าต่ำสุด (-1) และค่าสูงสุด (+1) และทำการทดลองซ้ำ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ปัจจัย และระดับปัจจัยของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของปัจจัย	
			ต่ำสุด (-1)	สูงสุด (+1)
ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ กระตุ้น ณ เวลาต่างกัน	x_1	วินาที	60	120
น้ำหนักของถ่านกัมมันต์	x_2	กรัม	0.05	1.50
ความเข้มข้นของสารละลาย คองโกเรด	x_3	ppm	20	100
เวลาในการดูดซับ	x_4	นาที	15	45

ตารางที่ 4.3 ปริมาณคองโกเรดที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ศึกษาตามแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

RunOrder	StdOrder	x_1	x_2	x_3	x_4	Q (mg/g)
1	16	1	1	1	1	12.55
2	5	-1	-1	1	-1	27.27
3	11	-1	1	-1	1	2.93
4	21	-1	-1	1	-1	29.26
5	32	1	1	1	1	11.54
6	1	-1	-1	-1	-1	7.95
7	23	-1	1	1	-1	10.77
8	10	1	-1	-1	1	7.61
9	27	-1	1	-1	1	2.78
10	19	-1	1	-1	-1	2.91
11	24	1	1	1	-1	10.98
12	2	1	-1	-1	-1	8.44
13	22	1	-1	1	-1	29.91
14	17	-1	-1	-1	-1	7.32
15	13	-1	-1	1	1	27.32
16	3	-1	1	-1	-1	2.92
17	28	1	1	-1	1	2.88
18	6	1	-1	1	-1	28.42
19	30	1	-1	1	1	30.43
20	29	-1	-1	1	1	28.17

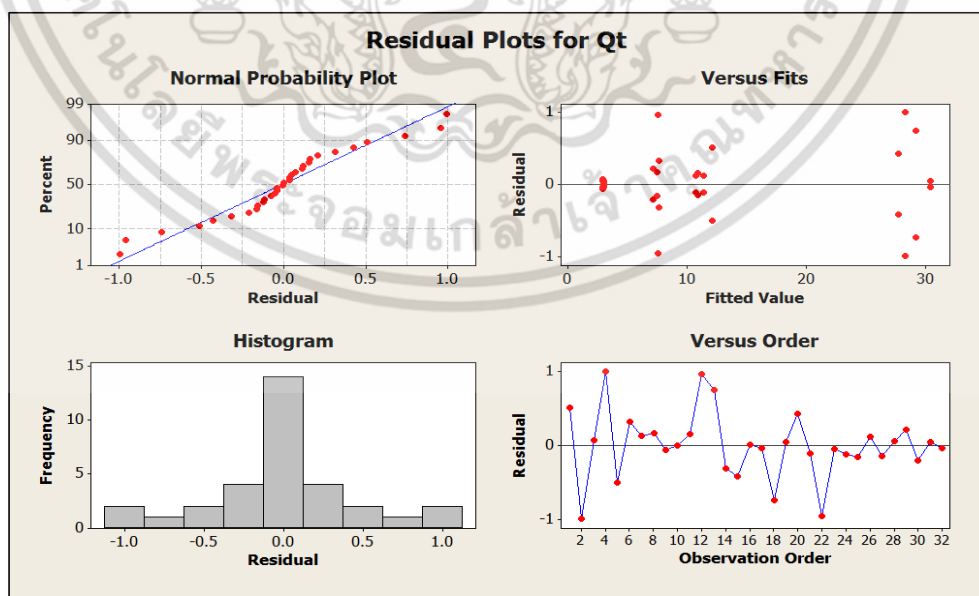
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

RunOrder	StdOrder	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Q (mg/g)
21	15	-1	1	1	1	11.21
22	18	1	-1	-1	-1	6.53
23	20	1	1	-1	-1	2.78
24	7	-1	1	1	-1	10.53
25	26	1	-1	-1	1	7.28
26	31	-1	1	1	1	11.44
27	8	1	1	1	-1	10.67
28	4	1	1	-1	-1	2.88
29	9	-1	-1	-1	1	7.34
30	25	-1	-1	-1	1	6.92
31	12	1	1	-1	1	2.96
32	14	1	-1	1	1	30.34

4.4.1.1 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือข้อสมมติฐาน

หลังจากเก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 ทำการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองจากข้อสมมติฐานข้างต้น เพื่อความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่จะนำมาใช้โดยศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟ Residual plot ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟ Residual plots ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

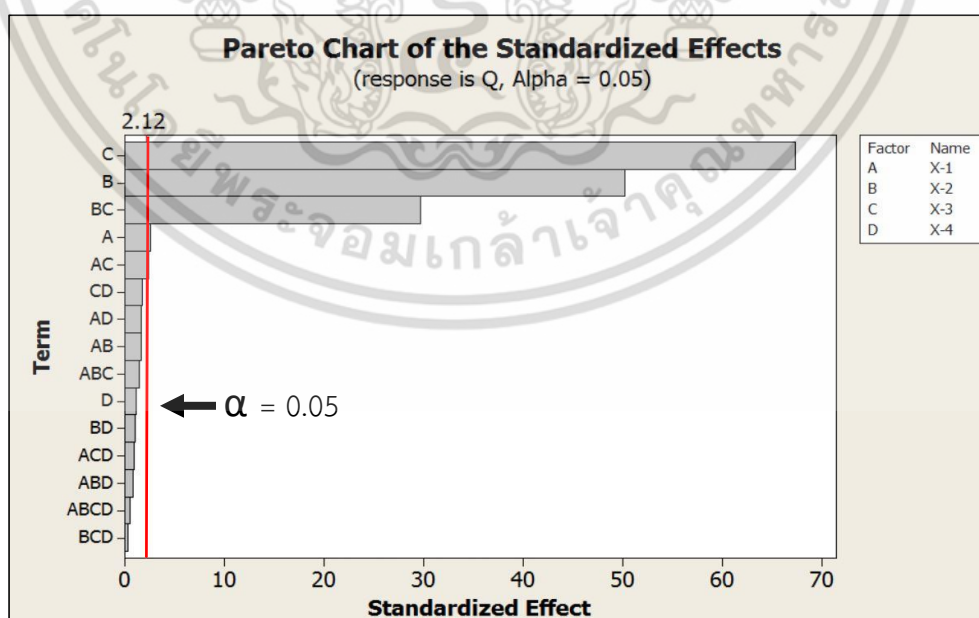
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลจากกราฟ Normal probability plot ถ้าข้อมูลมีความถูกต้องกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเฉียงขึ้นด้านขวา และแผนภาพฮิสโตแกรม (Histogram) มีการกระจายคล้ายระฆังคว่ำสรุปได้ว่าข้อมูลกระจายตัวเป็นแบบปกติ การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ด้วยกราฟ Residual กับ Fitted value พบว่าลักษณะกราฟกระจายตัวปกติเพราะว่ามี การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ด้วยกราฟระหว่าง Residual กับ Observation order พบว่าการกระจายของกราฟที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากการตรวจสอบความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสำหรับ ปัจจัยที่คาดว่า มีนัยสำคัญต่อปริมาณคองโกเรตที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ พบว่าข้อมูลจากการทดลองสามารถนำมา วิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณคองโกเรตที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

4.4.1.2 คัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณคองโกเรตที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญพิจารณาจากแผนภูมิพาเรโตที่แสดงถึงผลกระทบปัจจัยหลัก ผลกระทบระหว่าง 2 ปัจจัย และผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย ดังรูปที่ 4.6 พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญตามลำดับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรต (x_3) น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (x_2) ผลกระทบร่วมระหว่าง น้ำหนักถ่านกัมมันต์และความเข้มข้นของสารละลาย (x_2x_3) ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ เวลาต่างกัน (x_1) และผลกระทบร่วมระหว่างชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ เวลาต่างกันและความเข้มข้นของ สารละลาย (x_1x_3) เพราะปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมานั้นมีค่า $\alpha = 0.05$ (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์) ผลกระทบร่วมมากกว่า 3 ปัจจัยขึ้นไปจะไม่ถูกพิจารณาว่ามีนัยสำคัญ [16]



รูปที่ 4.6 ผังพาเรโตแสดงปัจจัยที่มีนัยสำคัญระดับ $\alpha = 0.05$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีนัยสำคัญและหาสถานะเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายทองโกเรต

จากผลการคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ณ เวลาต่างกัน (x_1) น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (x_2) และความเข้มข้นของสารละลายทองโกเรต (x_3) นำปัจจัยดังกล่าวศึกษาสถานะที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณทองโกเรตได้มากที่สุดดังตารางที่ 4.4 โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่ระดับปัจจัย 3 ระดับคือ ค่าต่ำสุด (-1) ค่ากลาง (0) และค่าสูงสุด (+1) ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ปัจจัย และระดับปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

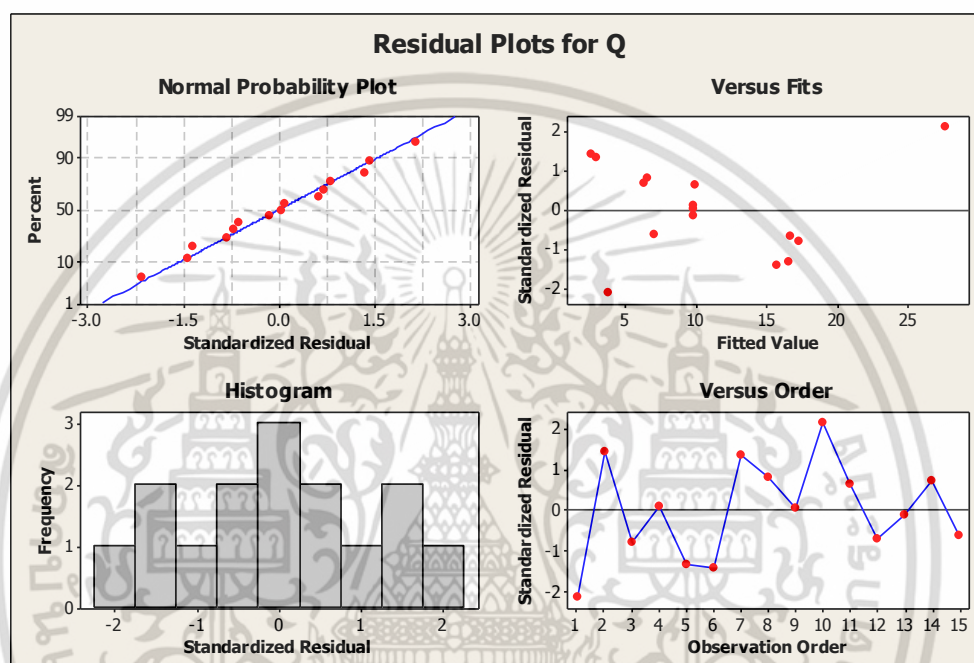
ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
			ต่ำสุด (-1)	กลาง (0)	สูงสุด (+1)
ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ เวลาต่างกัน	x_1	วินาที	60	90	120
น้ำหนักของถ่านกัมมันต์	x_2	กรัม	0.05	1.00	1.50
ความเข้มข้นของสารละลายทองโกเรต	x_3	ppm	20	60	100

ตารางที่ 4.5 ปริมาณทองโกเรตที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ศึกษาตามแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

RunOrder	StdOrder	x_1	x_2	x_3	Q (mg/g)
1	10	0	1	-1	2.49
2	5	-1	0	-1	3.24
3	1	-1	-1	0	16.85
4	15	0	0	0	9.89
5	7	-1	0	1	15.80
6	8	1	0	1	14.85
7	6	1	0	-1	3.63
8	4	1	1	0	6.96
9	13	0	0	0	9.83
10	11	0	-1	1	28.97
11	12	0	1	1	10.28
12	2	1	-1	0	16.22
13	14	0	0	0	9.66
14	3	-1	1	0	6.67
15	9	0	-1	-1	6.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเก็บข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.5 และตรวจสอบความน่าเชื่อถือข้อสมมติฐานแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่ากราฟ Normal probability plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง และกราฟแสดงความแปรปรวนที่คงที่มีลักษณะการกระจายตัวไม่มีแบบแผน และมีอิสระต่อกัน ดังนั้นข้อสมมติฐานของปัจจัยที่นำมาศึกษา สภาวะที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณคองโกเรตได้มากที่สุดมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และสามารถสร้างสมการพหุนามอันดับสอง



รูปที่ 4.7 กราฟ Residual plots ของการทดลองแบบ Box-Behnken

4.4.2.1 คัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และสร้างแบบจำลองสมการลำดับที่ 2

วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการสร้างรูปแบบจำลองสมการลำดับที่ 2 จากตารางที่ 4.6 โดยพิจารณาจากค่า P ที่มีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 0.05 คือ ปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยที่มีนัยสำคัญได้แก่ x_2 , x_3 , x_2x_2 , และ x_2x_3 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองสมการลำดับที่ 2 ลดรูปอยู่ในระบบ coded units ได้ดังสมการที่ 4.1

$$Q = 9.7908 - 5.2886x_2 + 6.7356x_3 + (2.3012x_2x_2) - (3.6286x_2x_3) \quad (4.1)$$

เมื่อได้สมการลำดับที่ 2 ของแบบจำลอง พิจารณาค่า R^2 กับค่า $R^2(\text{adj})$ เท่ากับ 98.82 เปอร์เซ็นต์ และ 98.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของทั้งสองค่าแสดงให้เห็นว่ามีเพียง 0.47 เปอร์เซ็นต์ ที่เทอมของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญจะรวมอยู่ในแบบจำลอง

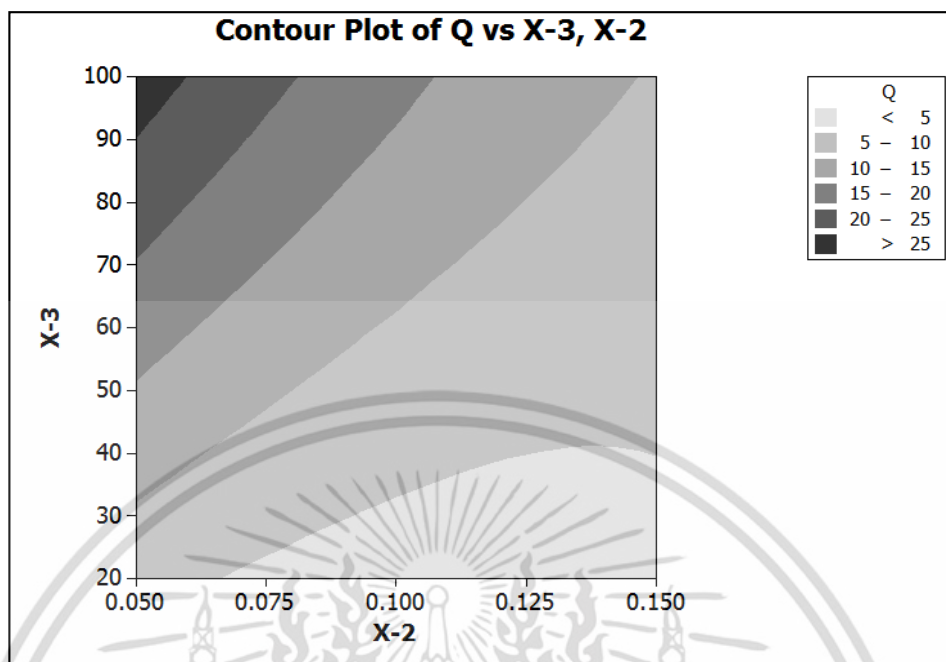
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ Box-Behnken

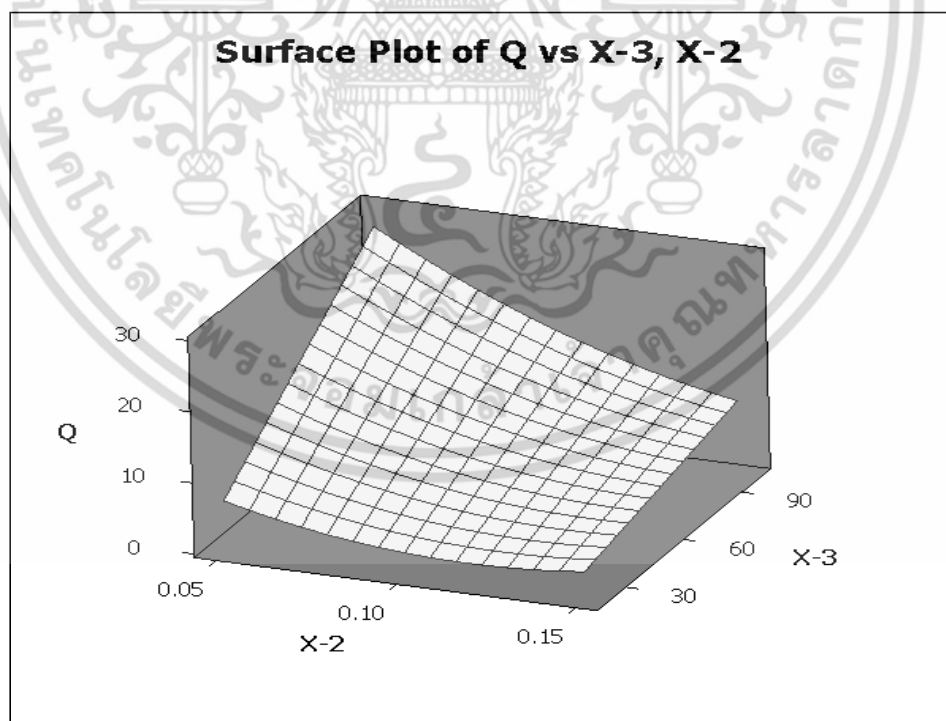
Term	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constant	9.7908	0.6567	14.908	0.000
x_1	-0.1151	0.4022	-0.286	0.786
x_2	-5.2886	0.4022	-13.15	0.004
x_3	6.7356	0.4022	16.748	0.000
x_1x_1	-0.4161	0.5920	-0.703	0.514
x_2x_2	2.3012	0.5920	3.887	0.012
x_3x_3	0.0064	0.5920	0.011	0.992
x_1x_2	0.2302	0.5688	0.405	0.702
x_1x_3	-0.3361	0.5688	-0.591	0.580
x_2x_3	-3.6286	0.5688	-6.380	0.001

4.4.2.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายทองโกเรต

ในการศึกษาสถานะที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณทองโกเรตได้มากที่สุดสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญคือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (x_2) และความเข้มข้นของสารละลายทองโกเรต (x_3) แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าปริมาณทองโกเรตที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (Q) มีค่ามากที่สุดเมื่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.05 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายทองโกเรตเท่ากับ 100 ppm จากการวิเคราะห์กราฟ Contour plot และ Surface plot ค่า Q มีแนวโน้มสูงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองโกเรตเพิ่มขึ้น ส่วนน้ำหนักของถ่านกัมมันต์นั้นเมื่อมีค่าน้อยจะทำให้ค่า Q เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า Q มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ แต่หากใช้น้ำหนักตัวดูดซับน้อยเกินไปอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากจำนวนตัวดูดซับน้อยเกินไปทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายที่ความเข้มข้นสูงลดลง



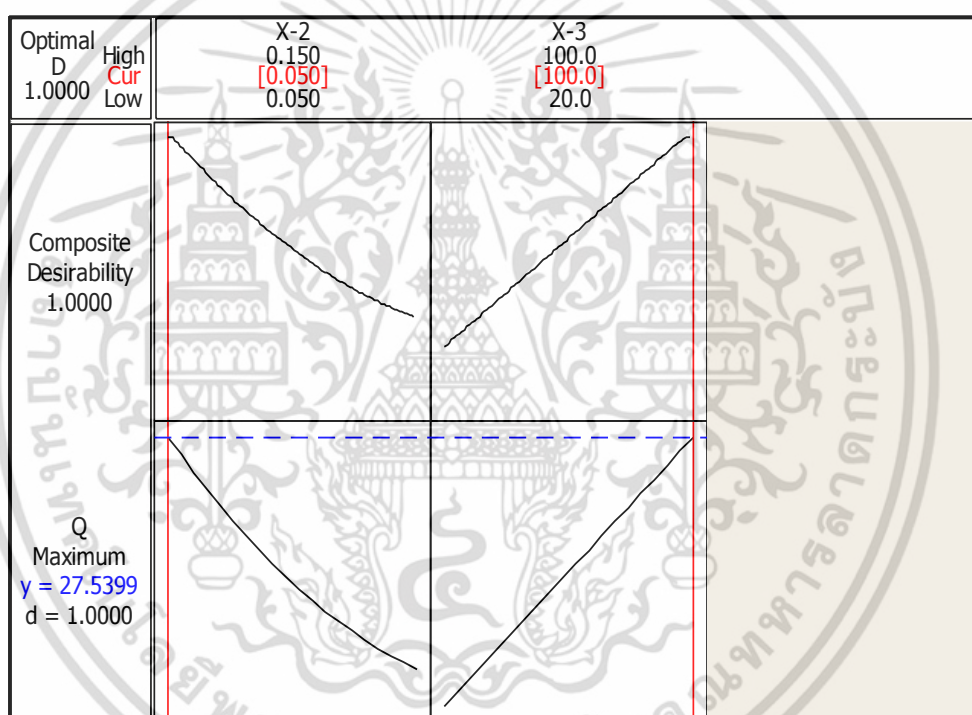
รูปที่ 4.8 กราฟ Contour plot ระหว่างน้ำหนักของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด



รูปที่ 4.9 กราฟ Surface plot ระหว่างปริมาณคองโกเรดที่ถูกดูดซับ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองสามารถหาสถานะที่เหมาะสม (Response optimization) สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายทองโกเรด [15] โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมินิแทปแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าค่า Q_{Maximum} คือ ค่าปริมาณทองโกเรดสูงสุดที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์เท่ากับ 27.54 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ เมื่อปัจจัยที่มีนัยสำคัญสำหรับสถานะที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณทองโกเรดได้มากที่สุดคือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ 0.05 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายที่ 100 ppm ค่าปัจจัยต่างๆที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถตรวจสอบระดับความน่าเชื่อถือจากดัชนีชี้วัด D-optimality ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เมื่อค่า D เข้าใกล้หรือเท่ากับ 1 ค่า Q_{Maximum} จะมีความเชื่อถือมากที่สุด [22]



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อสถานะเหมาะสมสำหรับดูดซับสารละลายทองโกเรด

4.4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญตามโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อยืนยันผลการทดลอง

ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลที่คำนวณได้จากโปรแกรมมินิแทป โดยใช้ค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญดังรูปที่ 4.10 คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.05 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายทองโกเรดที่ 100 ppm โดยใช้ตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ที่เวลากระตุ้น 60 90 และ 120 วินาที เนื่องจากชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ เวลาต่างกัน เป็นปัจจัยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีนัยสำคัญ ($x_1, P > 0.05$) เปรียบเทียบปริมาณคองโกเรดที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ระหว่างผลจากการทดลอง (Q จากการทดลอง) กับผลจากโปรแกรมมินิแทป (Q จากโปรแกรม) แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าผลจากการทดลองของถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 60 90 และ 120 วินาที สามารถดูดซับปริมาณคองโกเรดได้ใกล้เคียงกันเท่ากับ 28.26 28.97 และ 29.16 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคองโกเรดที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากโปรแกรมมินิแทปเท่ากับ 27.54 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.56 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองกับผลจากโปรแกรมมินิแทป

ตัวดูดซับ	Qจากการทดลอง (mg/g)	Qจากโปรแกรม (mg/g)	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเวลา 60 วินาที	28.26	27.54	4.56
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเวลา 90 วินาที	28.97	27.54	
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเวลา 120 วินาที	29.16	27.54	

จากผลการดูดซับปริมาณคองโกเรดของถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 60 90 และ 120 วินาที พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนมีความแตกต่างกัน แต่ขนาดของรูพรุนมีขนาดใกล้เคียงกันเท่ากับ 1.81 นาโนเมตร ดังนั้นพื้นที่ผิวไม่ได้แสดงผลที่มีนัยต่อการดูดซับ

ตารางที่ 4.8 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 60 90 และ 120 วินาที

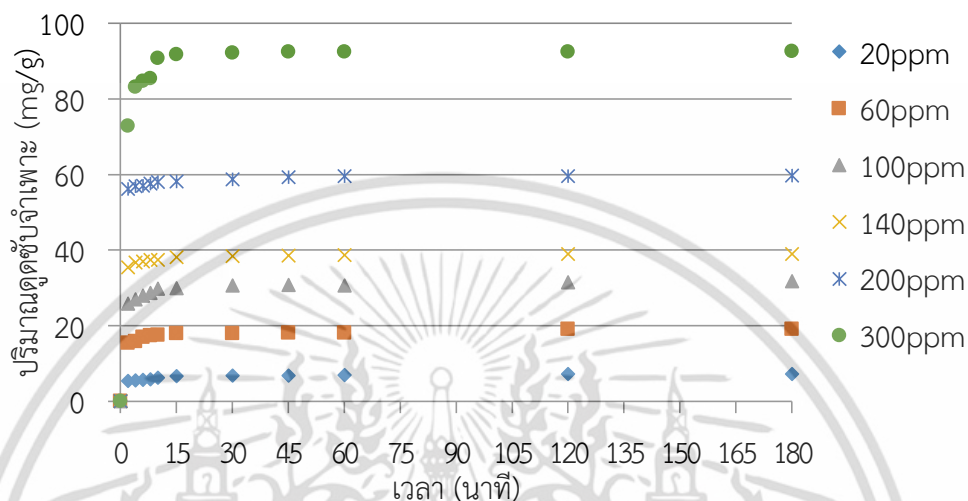
ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	ขนาดรูพรุน (nm)
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเวลา 60 วินาที	469	0.21	1.81
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเวลา 90 วินาที	737	0.33	1.80
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟเวลา 120 วินาที	617	0.29	1.81

4.5 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายคองโกเรด

ศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับของสารละลายคองโกเรดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที เป็นตัวดูดซับที่

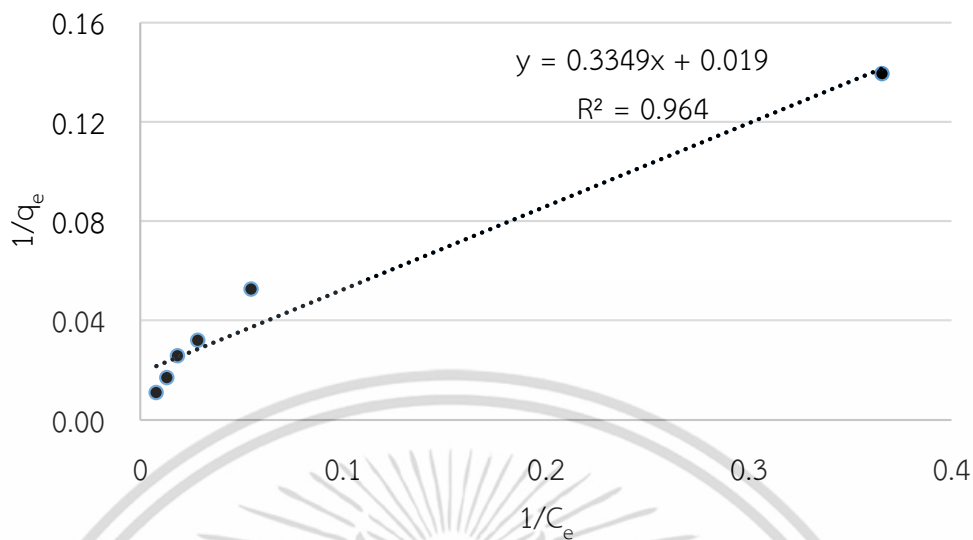
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรด 20 60 100 140 200 และ 300 ppm กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณดูดซับจำเพาะกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.11

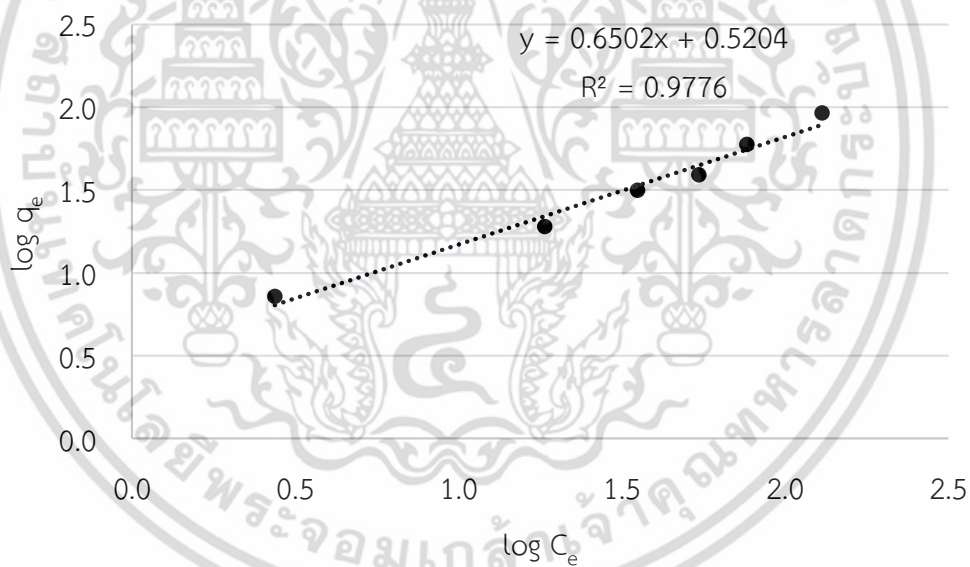


รูปที่ 4.11 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ ของถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20 60 100 140 200 และ 300 ppm

จากรูปที่ 4.11 พบว่าปริมาณดูดซับจำเพาะส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 15 นาที เนื่องจากตัวดูดซับในช่วงแรกมีรูพรุนจำนวนมาก ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเวลาผ่านไป 15 นาที การดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเนื่องจากรูพรุนของตัวดูดซับถูกเติมเต็มไปด้วยสารที่ถูกดูดซับ จากนั้นหาความสัมพันธ์ของปริมาณดูดซับจำเพาะที่เข้าสู่สมดุลที่ความเข้มข้นต่างๆ และความเข้มข้นที่สมดุล โดยใช้สมการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรุนดลิชแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ ของสมการแลงเมียร์ สามารถหาค่าปริมาณดูดซับสูงสุด (q_{max}) และค่าคงที่แลงเมียร์ (K_L) จากสมการเส้นตรง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ ของสมการฟรุนดลิช สามารถหาค่าคงที่ฟรุนดลิช (K_F) และค่าคงที่ ($1/n$) จากสมการเส้นตรงแสดงดังตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ และ R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

ตัวดูดซับ	Langmuir				Freundlich			
	q_{\max}	K_L	R^2	χ^2	$1/n$	K_F	R^2	χ^2
ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ด้วยพลังงานไมโครเวฟ เวลา 90 วินาที	52.632	0.057	0.964	12.54	0.650	3.311	0.977	1.09

จากตารางที่ 4.9 สามารถเขียนเป็นสมการแลงเมียร์ดังนี้ $q = \frac{3.158C_e}{1 + 0.057C_e}$ มีค่าสัมประสิทธิ์ R^2

และค่า Chi-square (χ^2) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์เท่ากับ 0.964 และ 12.54 ตามลำดับ และสามารถเขียนเป็นสมการฟรุนดลิชดังนี้ $q = 3.311C_e^{0.650}$ มีค่าสัมประสิทธิ์ R^2 และค่า Chi-square (χ^2) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชเท่ากับ 0.977 และ 1.09 ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการให้มีค่าใกล้เคียง 1 และค่า Chi-square (χ^2) น้อยที่สุด พบว่าสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีความสอดคล้องมากกว่าสมการของแลงเมียร์ ดังนั้นสามารถอธิบายแบบจำลองการดูดซับได้ตามแบบสมมติฐานของฟรุนดลิชว่าตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) และค่าพารามิเตอร์ n จากสมการฟรุนดลิชแบ่งออกได้เป็น 3 กรณีดังนี้ $n=1$ หมายถึงไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง $1/n$ น้อยกว่า 1 หมายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดสำหรับการดูดซับ และ $1/n$ มากกว่า 1 หมายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณมากสำหรับการดูดซับ จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าพารามิเตอร์ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.650 จากผลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าการดูดซับสารละลายคองโกเรตแบบชั้นเดียวบนพื้นผิว และมีพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Hirata, M. และคณะ [20] ตัวดูดซับผลิตจากกากกาแฟนำไปทดลองดูดซับสีย้อม Orange II ซึ่งสารประกอบทางเคมีคล้ายกับคองโกเรต ผลการทดลองพบไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบฟรุนดลิช และอาจเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวโดยมีพื้นผิวตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ขั้นตอนแรกการผลิตถ่านชาร์จากการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชันคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้ของถ่านชาร์มากที่สุดเท่ากับ 47.78 และ 28.87 ตามลำดับ ในการคาร์บอนเซชันหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนคงตัว และผลที่ได้มีแนวโน้มลดลง ขั้นตอนที่สองการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แช่สารละลายกรดฟอสฟอริก 24 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 200 500 และ 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟคือที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ โดยจะให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงสุดคือ 468.60 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.21 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงทำให้โมเลกุลของน้ำสั่นจนเกิดความร้อน และยังสามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่อุดตันอยู่ในถ่านชาร์ ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน สูงขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของโครเรดโดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบโดยใช้โปรแกรมมินิแทปเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการดูดซับปริมาณโครเรดที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ได้แก่ ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ณ เวลาต่างกัน (x_1) น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (x_2) และความเข้มข้นของสารละลายโครเรด (x_3) หลังจากการคัดเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการดูดซับเพื่อช่วยในการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อหาสภาวะที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณโครเรดได้มากที่สุดจากโปรแกรมมินิแทป พบว่าถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณโครเรดได้มากที่สุด ($Q_{Maximum}$) เท่ากับ 27.54 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยมีสภาวะที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับปริมาณโครเรดได้มากที่สุดคือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (x_2) เท่ากับ 0.05 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโครเรด (x_3) เท่ากับ 100 ppm ซึ่งปัจจัยชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ณ เวลาต่างกัน (x_1) ไม่มีผลต่อปริมาณดูดซับโครเรด เนื่องจากถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ เวลา 60 90 และ 120 วินาที มีขนาดของรูพรุนใกล้เคียงกันทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโครเรดของถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกัน เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือจากโปรแกรมจึงทำการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยกำหนดปัจจัยเหมือนกับโปรแกรมประเมินเพื่อให้ได้ค่า $Q_{Maximum}$ พบว่าค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองเท่ากับ 28.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.56 แสดงว่าค่าจากโปรแกรมมินิแทปสามารถยอมรับได้ ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายคองโกเรดโดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q = \frac{3.158C_e}{1 + 0.057C_e}$$
 และ $q = 3.311C_e^{0.650}$ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ R² และ Chi-square (χ^2) ของแบบจำลองแลงเมียร์ และฟรุนดลิชเท่ากับ 0.964 และ 0.977 และค่า Chi-square (χ^2) เท่ากับ 12.54 และ 1.09 ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชมีความสอดคล้องมากกว่าแบบแลงเมียร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาจากกาแฟต่างชนิดนำมาสังเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพในการดูดซับ
- 2) ศึกษาการใช้สารเคมีในการกระตุ้นถ่านชาร์ที่มีคุณสมบัติเป็นเบส
- 3) ศึกษาปัจจัยที่ผลต่อการดูดซับเพิ่มเติมด้วยการออกแบบการทดลองรูปแบบอื่นเพื่อลดจำนวนการทดลอง
- 4) ศึกษาดูดซับแบบแพ็คคอลัมน์ และการดูดซับแบบต่อเนื่อง
- 5) ศึกษาตำแหน่งการวางถ่านกัมมันต์ในไมโครเวฟเพื่อดูการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งเท่ากันหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม. **คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.** กรุงเทพฯ : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556.
- [2] Chooaksorn, W. “Color removal technology in industrial wastewater.” **Burapha Sci. J.** Vol.17. Jan. 2012. pp. 181-191.
- [3] Chatsiriwech, D. **Adsorption process.** Bangkok : Chulalongkorn university press. 2009.
- [4] Foo, K.Y. and Hameed, B.H. “Potential of jackfruit peel as precursor for activated carbon prepared by microwave induced NaOH activation.” **Elsevier bioresource technology.** Vol.112. Feb. 2012. pp. 143-150.
- [5] Guo, J. Xu, W.S. Chen, Y.L. and Lua, A.C. “Adsorption of NH₃ onto activated carbon prepared from palm shells impregnated with H₂SO₄.” **Elsevier journal of colloid and interface science.** Vol.281. Oct. 2005. pp. 285-290.
- [6] Foo, K.Y. and Hameed, B.H. “Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves.” **Elsevier advances in colloid and interface science.** Vol.149. Jan. 2009. pp. 19-27.
- [7] ณัฐวณิ ยมโชติ. สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. **สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2558.** กรุงเทพฯ : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2558.
- [8] รัชนิย์ รุกขชาติ, ร.อ.หญิง. “**สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง.**” [Online]. Available : http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.htm. 2016.
- [9] ขนิษฐา. “**สีย้อม.**” [Online]. Available : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3&read=true&count=true. 2016.
- [10] Hunger, K. **Industrial dyes chemistry, properties, application.** Freiburg : Kühn & Weyh. 2003.
- [11] ศศิกร แสงพงษ์ชัย. “**การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ.**” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Wikimediacommons. “Amorphous carbon.png.” [Online]. Available : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amorphous_Carbon.png. 2016.
- [13] กรมควบคุมมลพิษ. “การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.” [Online]. Available : http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm. 2016.
- [14] พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์. “การดูดซับสี้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ.” *วิศวกรรมลาดกระบัง*. ปีที่ 27, ฉบับที่ 4. ธันวาคม 2553. หน้า 61-66.
- [15] Zumbuhl group. “Determination of the surface area by the BET method.” [Online]. Available : https://zumbuhl lab.unibas.ch/pdf/talks/080425_Tobias_BET.pdf. 2016.
- [16] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, รศ.ดร. และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, รศ.ดร. *การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป. 2551.
- [17] ณัฐวุฒิ ศักดิ์สง่าวงษ์. “การจัดการพลังงานในกระบวนการผลิตพาทาลิกแอนไฮไดรด์และไดออกทิลพาทาลิต.” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2555.
- [18] Tehrani, N.F. Aznar, J.S. and Kiros, Y. “Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons.” *Elsevier journal of cleaner production*. Vol.91. Dec. 2014. pp. 64-70.
- [19] Hesas, R.H. Sahu, J.N. and et.al. “The effect of a microwave heating method on the production of activated carbon from agricultural waste: A review.” *Elsevier journal of analytical and applied pyrolysis*. Vol.100. Dec. 2012. pp. 1-11.
- [20] Hirata, M. Kawasaki, N. Nakamura, T. and et.al. “Adsorption of dyes onto carbonaceous materials produced from coffee grounds by microwave treatment.” *Elsevier journal of colloid and interface science*. Vol.254. March 2002. pp. 17-22.
- [21] Chang, S.H. Teng, T.T. and Ismail, N. “Screening of factors influencing Cu(II) extraction by soybean oil-based organic solvents using fractional factorial design.” *Elsevier journal of environmental management*. Vol.92. June 2011. pp. 2580-2585.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] Cheng, Z. Zhang, L. and et.al. “Adsorption behavior of direct red 80 and congo red onto activated carbon/surfactant: Process optimization, kinetics and equilibrium.” Elsevier *spectrochimica acta part A: molecular and biomolecular spectroscopy*. Vol.137. Sep. 2014. pp. 1126-1143.
- [23] Yokoyama, S. **The asia biomass handbook a guide for biomass production and utilization**. Tokyo : The Japan institute of energy. 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์คุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ASTM D3173-95

อบด้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก ชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยพร้อมฝาปิดที่เตรียมไว้ นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก คำนวณร้อยละของปริมาณความชื้นจากสมการที่ ก.1

$$\text{ร้อยละของปริมาณความชื้น} = [(C - D)/(C - B)] * 100 \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (กรัม) C หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักสารก่อนอบ (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักสารหลังอบ (กรัม)

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย ASTM D5832-98

นำถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยพร้อมฝาปิดที่เตรียมไว้ นำไปเผาที่ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก คำนวณหาร้อยละของสารระเหยจากสมการที่ ก.3

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่เสียไป} = [(C - D)/(C - B)] * 100 \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและฝาปิด (กรัม) C หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและฝาปิดรวมกับสารตัวอย่างก่อนเผา (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องและฝาปิดรวมกับสารตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

$$\text{ร้อยละของปริมาณสารระเหย} = (\text{ก.2}) - (\text{ก.1}) \quad (\text{ก.3})$$

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ASTM D2866-11

นำถ้วยกระเบื้องเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่เตรียมไว้ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วางไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก คำนวณหาร้อยละของปริมาณเถ้าจากสมการที่ ก.4

$$\text{ร้อยละของปริมาณเก่า} = [(D - B)/(C - B)] * 100 \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม) C หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องรวมกับสารตัวอย่างก่อนเผา (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องรวมกับสารตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

ก.4 การคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว ASTM D3172

ปริมาณคาร์บอนคงตัวคือส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้หลังจากที่กำจัดความชื้น สารระเหย และเก่าคำนวณได้จากสมการที่ ก.5

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - (M + V + A) \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ M หมายถึง ร้อยละความชื้น (ก.1)

V หมายถึง ร้อยละสารระเหย (ก.3)

A หมายถึง ร้อยละเก่า (ก.4)

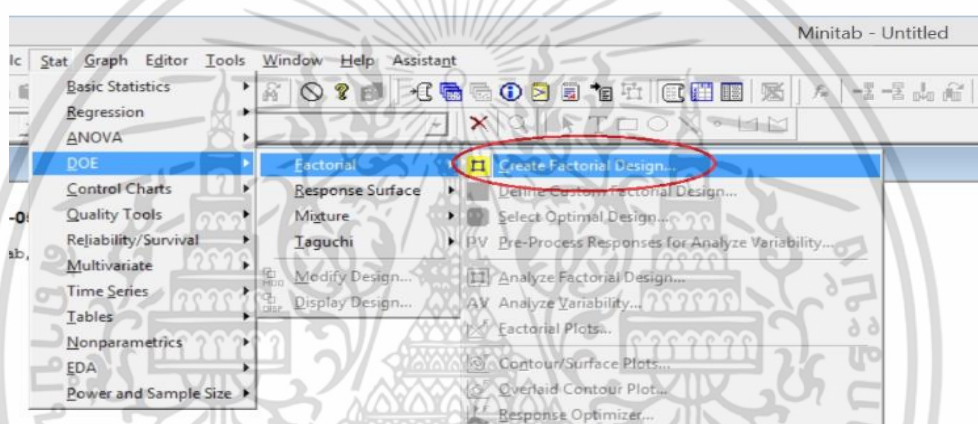


ภาคผนวก ข.

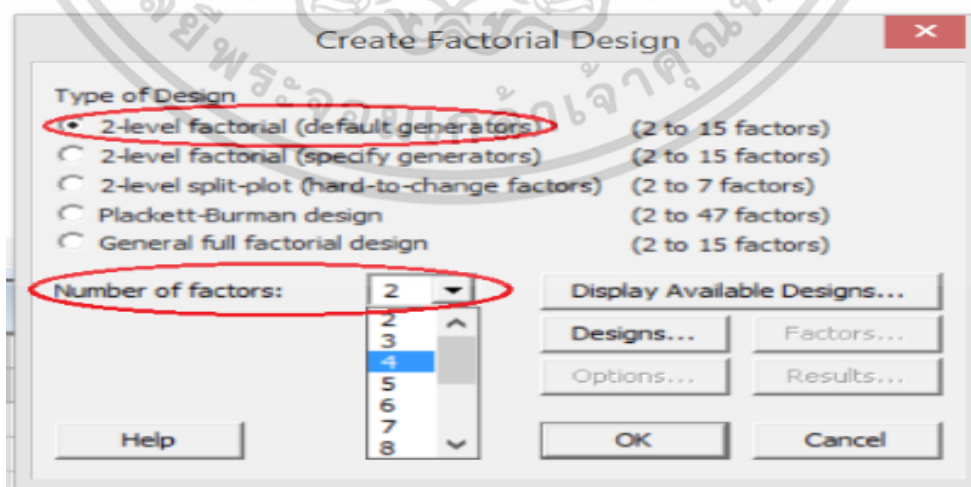
วิธีการออกแบบการทดลอง

ข.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (2^k factorial design)

การสร้างการออกแบบการทดลองในโปรแกรมมินิแทปโดยเลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design ดังรูปที่ ข.1 เลือกจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษาดังรูปที่ ข.2 และคลิก Designs เพื่อเลือกแบบการทดลองแบบ Full Factorial ดังรูปที่ ข.3

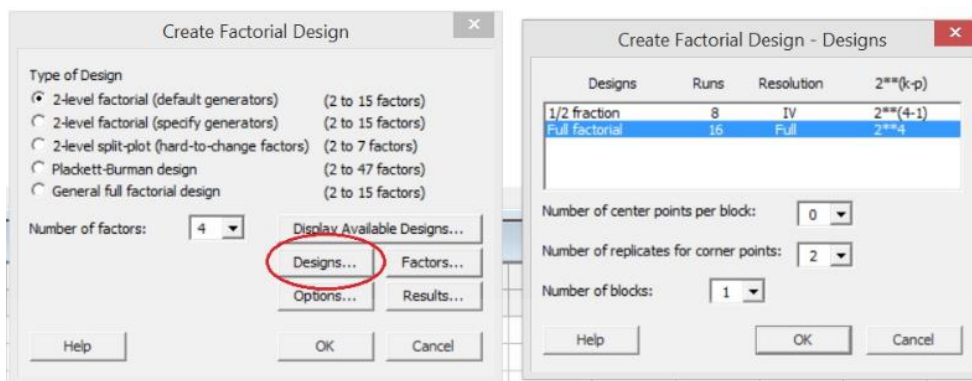


รูปที่ ข.1 การสร้างแบบการทดลองแบบ Factorial



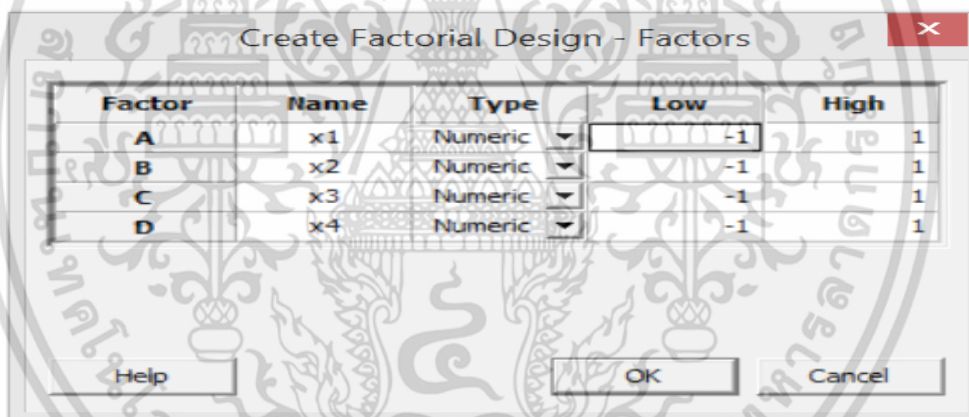
รูปที่ ข.2 เลือกจำนวนปัจจัยสำหรับแบบการทดลองแฟคทอเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

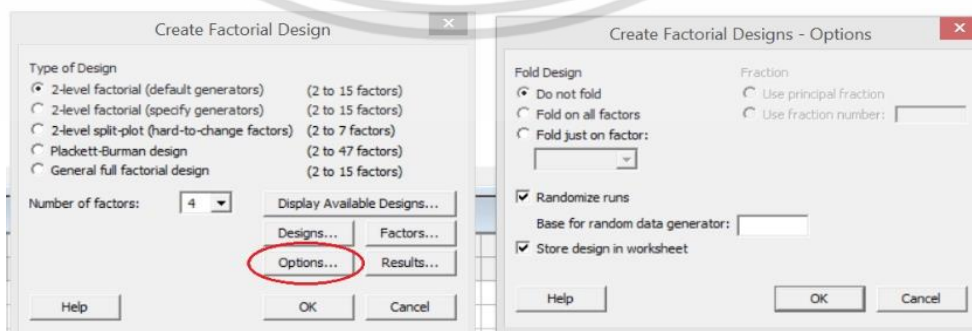


รูปที่ ข.3 เลือกแบบการทดลอง Full factorial

กำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อปริมาณการดูดซับของโครเมต (Q) ดังตารางที่ ข.1 โดยเปลี่ยนชื่อของปัจจัยเป็นดังรูปที่ ข.4 และคลิก options เลือกการทดลองแบบสุ่มได้ดังรูปที่ ข.5 เพื่อลดความผิดพลาดในการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้



รูปที่ ข.4 กำหนดชื่อของปัจจัยของแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล



รูปที่ ข.5 เลือกการทดลองแบบสุ่มสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ปัจจัยที่ใช้สำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของปัจจัย	
			ต่ำสุด (-1)	สูงสุด (+1)
ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ กระตุ้น ณ เวลาต่างกัน	x_1	วินาที	60	120
น้ำหนักของถ่านกัมมันต์	x_2	กรัม	0.05	1.50
ความเข้มข้นของ สารละลายคองโกเรด	x_3	ppm	20	100
เวลาในการดูดซับ	x_4	นาที	15	45

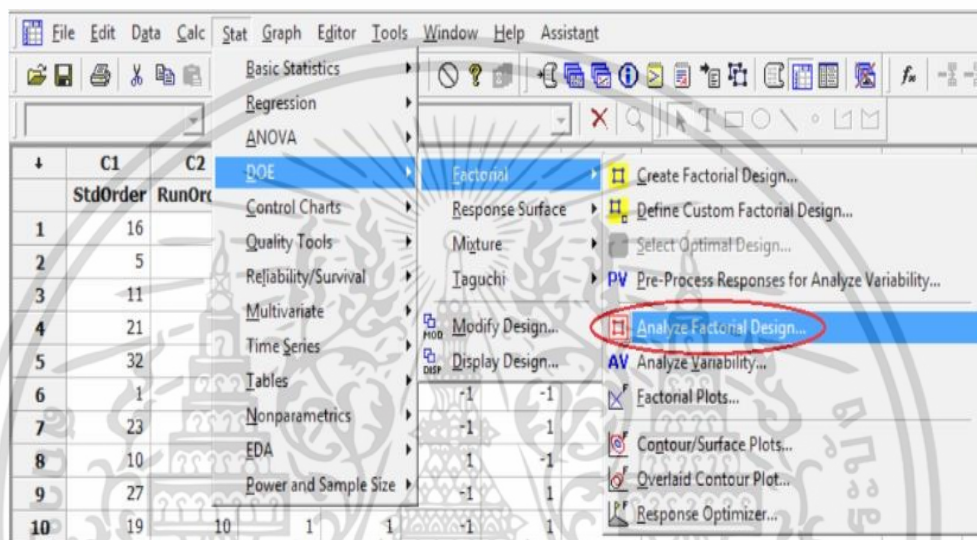
เมื่อตั้งค่าแบบการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นดังกล่าวโปรแกรมจะแสดง worksheet ตารางสำหรับ
แบบการทดลอง และใส่ค่า Q ที่ได้หลังจากการศึกษาตามการออกแบบการทดลองเพื่อเป็นคำตอบสนอง
สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ ข.6

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	X-1	X-2	X-3	X-4	Q
1	16	1	1	1	1	1	1	1	12.5530
2	5	2	1	1	-1	-1	-1	-1	27.2653
3	11	3	1	1	-1	1	-1	-1	2.9260
4	21	4	1	1	-1	-1	1	-1	29.2551
5	32	5	1	1	1	1	1	1	11.5375
6	1	6	1	1	-1	-1	-1	-1	7.9546
7	23	7	1	1	-1	1	1	-1	10.7728
8	10	8	1	1	1	-1	-1	1	7.6073
9	27	9	1	1	-1	1	-1	1	2.7836
10	19	10	1	1	-1	1	-1	-1	2.9130
11	24	11	1	1	1	1	1	-1	10.9783
12	2	12	1	1	1	-1	-1	-1	8.4446
13	22	13	1	1	-1	-1	1	-1	29.9053
14	17	14	1	1	-1	-1	-1	-1	7.3174
15	13	15	1	1	-1	-1	1	1	27.3233
16	3	16	1	1	-1	1	-1	-1	2.9242
17	28	17	1	1	1	1	-1	1	2.8827
18	6	18	1	1	1	-1	1	-1	28.4217
19	30	19	1	1	-1	-1	1	1	30.4263
20	29	20	1	1	-1	-1	1	1	28.1740
21	15	21	1	1	-1	1	1	1	11.2105
22	18	22	1	1	1	-1	-1	-1	6.5279
23	20	23	1	1	1	1	-1	-1	2.7860
24	7	24	1	1	-1	1	1	-1	10.5317
25	26	25	1	1	1	-1	-1	-1	7.2802
26	31	26	1	1	-1	1	1	1	11.4440
27	8	27	1	1	1	1	1	-1	10.6700
28	4	28	1	1	1	1	-1	-1	2.8834
29	9	29	1	1	-1	-1	-1	1	7.3400
30	25	30	1	1	-1	-1	-1	1	6.9200

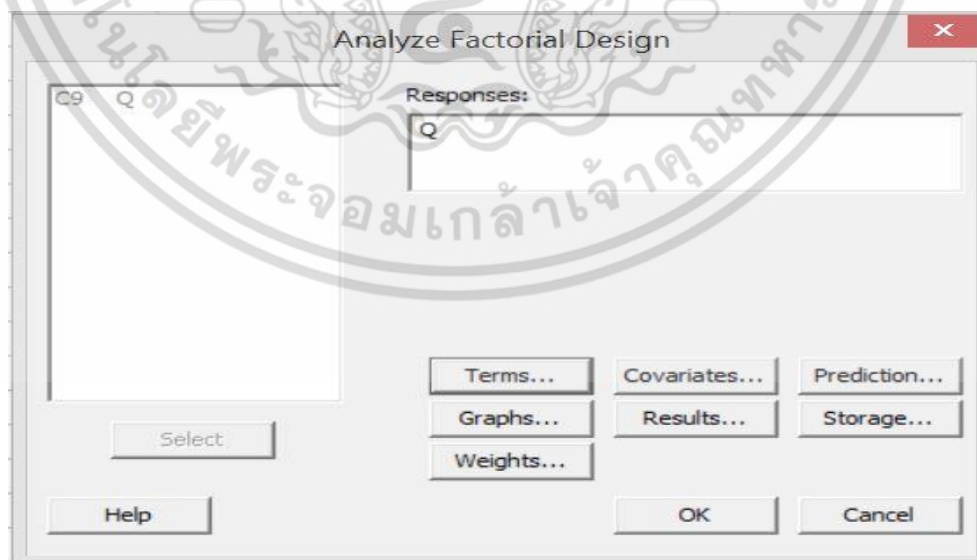
รูปที่ ข.6 ตารางการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปจากโปรแกรมมินิแทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญเลือกคำสั่ง Stat > DOE > Factorial > Analyze Factorial Design ดังรูปที่ ข.7 จากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ข.8 ดับเบิลคลิกที่ C9 Q เพื่อให้ช่อง Responses แสดงคำว่า Q และคลิกที่ Graphs โปรแกรมแสดงผลดังรูปที่ ข.9 เลือก Effects plots เป็น Pareto กำหนดค่าระดับนัยสำคัญ Alpha เท่ากับ 0.05 คลิก OK โปรแกรมจะปรากฏแผนภูมิ ดังรูปที่ ข.10

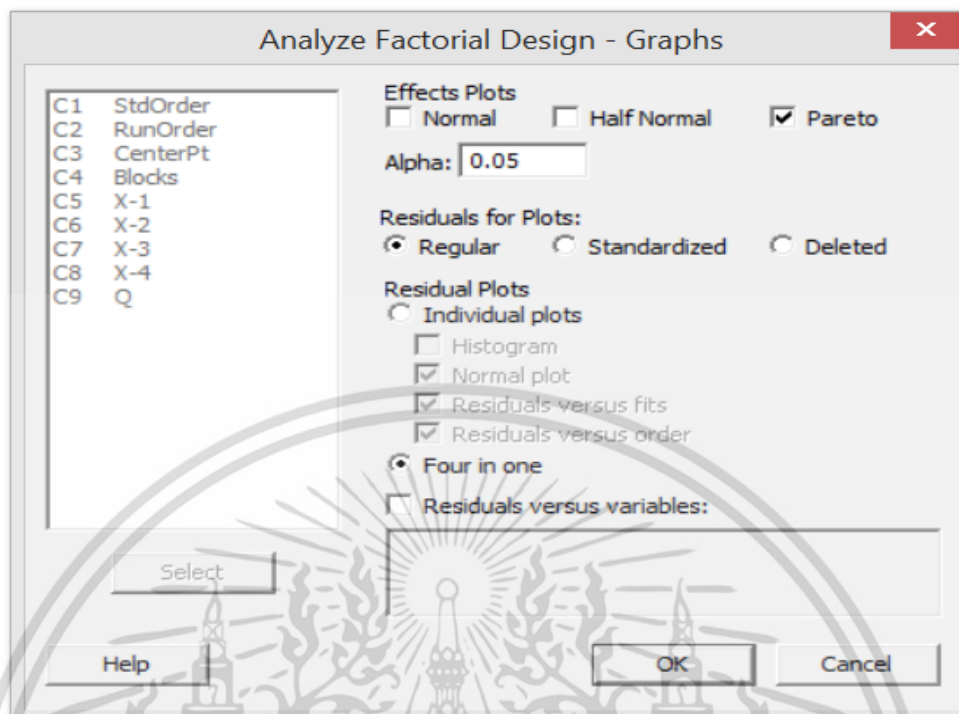


รูปที่ ข.7 เลือกการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียล

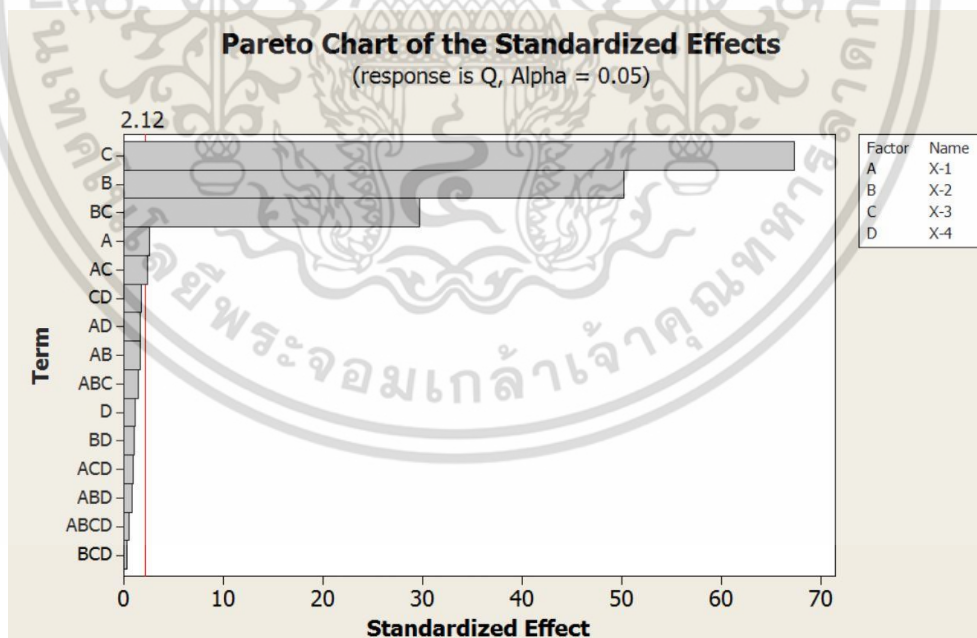


รูปที่ ข.8 เลือกค่า Q สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแบบแฟคทอเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 เลือกชนิดของกราฟเพื่อแสดงผล



รูปที่ ข.10 แผนภูมิพารेटอแสดงผลปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณการดูดซับของโกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

การสร้างการออกแบบการทดลองในโปรแกรมมินิแทปโดยเลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response surface > Create Response Surface Design ดังรูปที่ ข.11 จากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ข.12 คลิกเลือก Box-Behnken และจำนวนปัจจัยตามที่ต้องการศึกษาดังตารางที่ ข.2



รูปที่ ข.11 การสร้างแบบการทดลองแบบ Response surface



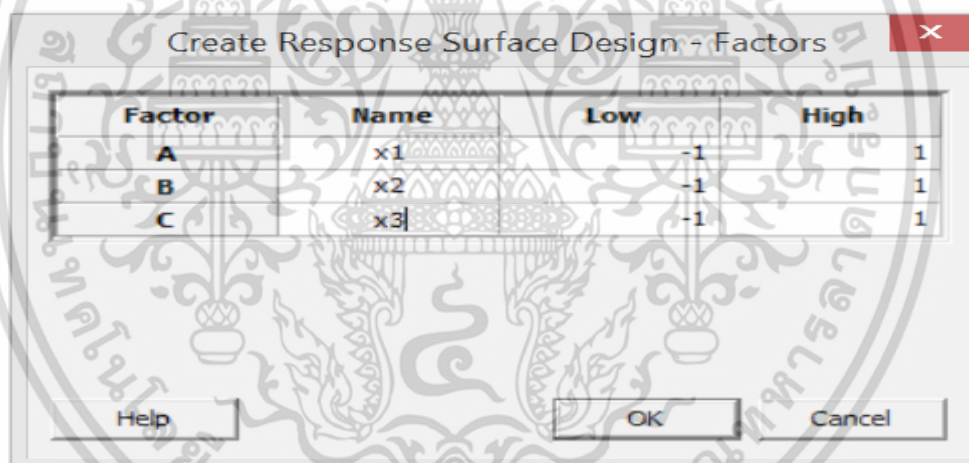
รูปที่ ข.12 เลือกออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

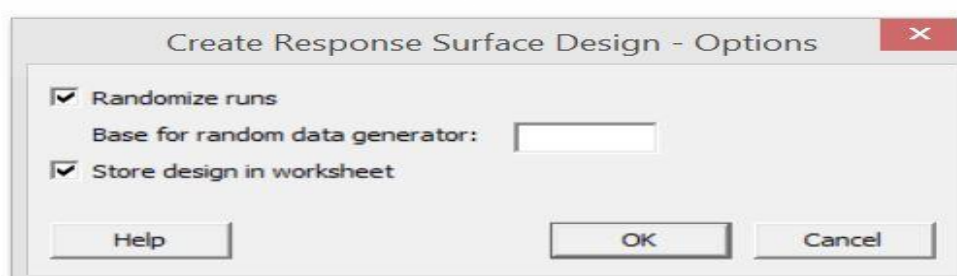
คลิก Factors เปลี่ยนชื่อปัจจัยโดยใช้สัญลักษณ์ตามตารางที่ ข.2 และคลิก options เลือกการทดลองเป็นแบบสุ่ม หลังจากเสร็จการตั้งค่าต่างๆดังรูปที่ ข.13-14 คลิก OK โปรแกรมจะแสดงตารางการออกแบบการทดลอง และใส่ค่า Q ที่ได้หลังจากการศึกษาตามการออกแบบการทดลองเพื่อเป็นค่าตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ ข.15

ตารางที่ ข.2 ปัจจัยที่ใช้สำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของปัจจัย	
			ต่ำสุด (-1)	สูงสุด (+1)
ชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้น ณ เวลาต่างกัน	x_1	วินาที	60	120
น้ำหนักของถ่านกัมมันต์	x_2	กรัม	0.05	1.50
ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด	x_3	ppm	20	100



รูปที่ ข.13 กำหนดชื่อของปัจจัยของแบบการทดลองแบบ Box-Behnken



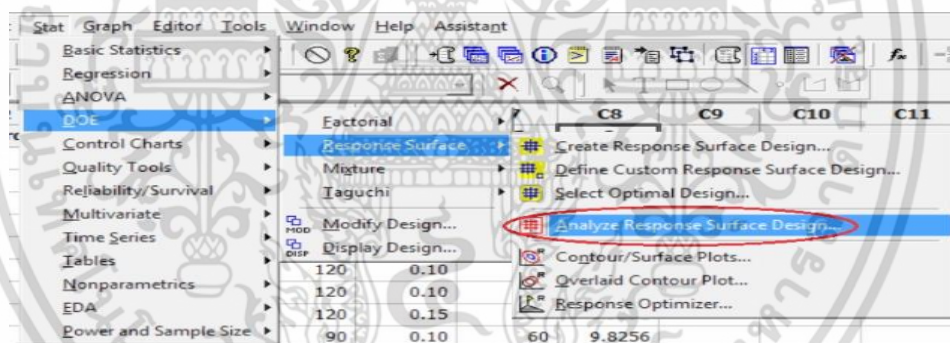
รูปที่ ข.14 เลือกการทดลองแบบสุ่มสำหรับแบบการทดลอง Box-Behnken

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

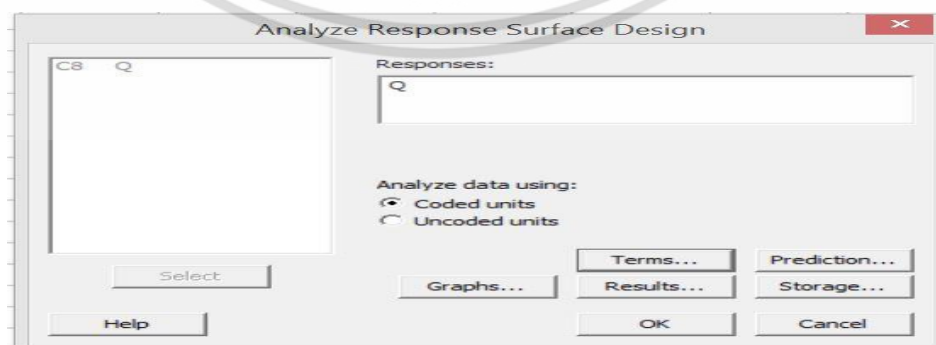
+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	X-1	X-2	X-3	Q
1	10	1	2	1	90	0.15	20	2.4866
2	5	2	2	1	60	0.10	20	3.2413
3	1	3	2	1	60	0.05	60	16.8532
4	15	4	0	1	90	0.10	60	9.8874
5	7	5	2	1	60	0.10	100	15.8082
6	8	6	2	1	120	0.10	100	14.8488
7	6	7	2	1	120	0.10	20	3.6261
8	4	8	2	1	120	0.15	60	6.9591
9	13	9	0	1	90	0.10	60	9.8256
10	11	10	2	1	90	0.05	100	28.9674
11	12	11	2	1	90	0.15	100	10.2769
12	2	12	2	1	120	0.05	60	16.2198
13	14	13	0	1	90	0.10	60	9.6593
14	3	14	2	1	60	0.15	60	6.6716
15	9	15	2	1	90	0.05	20	6.6628

รูปที่ ข.15 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จากโปรแกรมมินิแทป

การวิเคราะห์ข้อมูลเลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design ดังรูปที่ ข.16 จากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ข.17 ดับเบิลคลิกที่ C8 Q เพื่อให้ช่อง Responses แสดงคำว่า Q คลิก OK โปรแกรมจะแสดงข้อมูลการวิเคราะห์ดังรูปที่ ข.18



รูปที่ ข.16 การวิเคราะห์ข้อมูล Response surface design



รูปที่ ข.17 เลือกค่า Q สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแบบ Box-Behnken

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

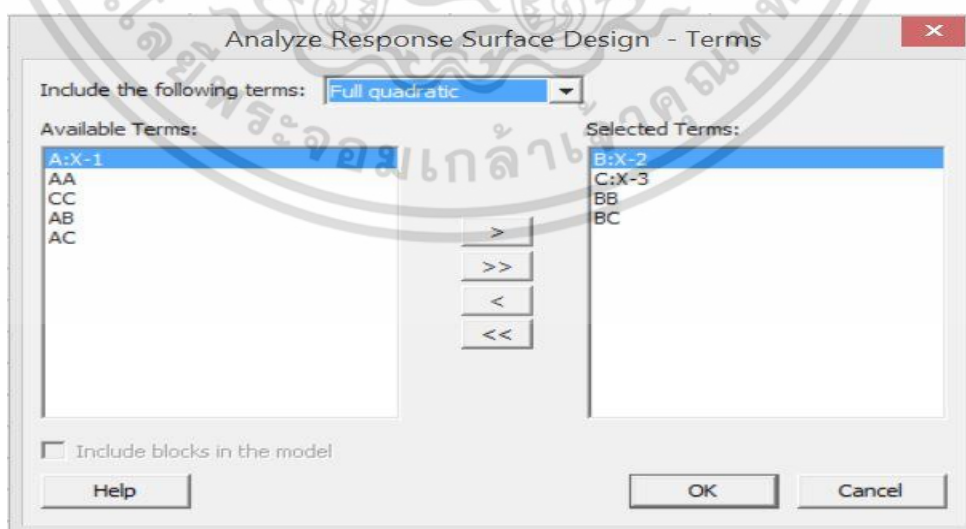
The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Q

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	9.79077	0.6567	14.908	0.000
X-1	-0.11506	0.4022	-0.286	0.786
X-2	-5.28862	0.4022	-13.150	0.000
X-3	6.73556	0.4022	16.748	0.000
X-1*X-1	-0.41608	0.5920	-0.703	0.514
X-2*X-2	2.30124	0.5920	3.887	0.012
X-3*X-3	0.00642	0.5920	0.011	0.992
X-1*X-2	0.23023	0.5688	0.405	0.702
X-1*X-3	-0.33605	0.5688	-0.591	0.580
X-2*X-3	-3.62858	0.5688	-6.380	0.001

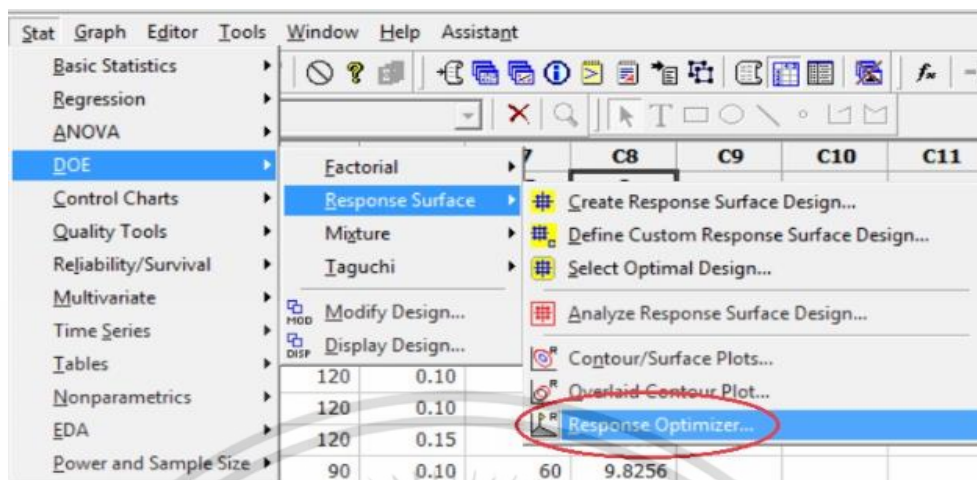
รูปที่ ข.18 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

การวิเคราะห์ค่า Response optimizer ควรเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญโดยพิจารณาจากค่า $P < 0.05$ ในรูปที่ ข.18 โดยกดคำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลซ้ำอีกครั้งดังรูปที่ ข.16 จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ข.17 คลิกที่ Terms โดยเลือกเทอมหรือปัจจัยที่มีนัยสำคัญให้อยู่ในช่องทางขวาดังรูปที่ ข.19 จากนั้นคลิก OK หลังจากนั้นจึงสามารถหาค่า Response optimizer เลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Response optimizer ดังรูปที่ ข.20 โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ข.21 และคลิกเลือก C8 Q ให้อยู่ในช่องด้านขวา กดคำว่า Set up และเลือกเป้าหมายที่ค่า Q มากที่สุดดังรูปที่ ข.22 กด OK โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างสรุปค่าปัจจัยในสถานะที่เหมาะสม (ตัวเลขในแถว Cur) ทำให้ได้ค่า Q มากที่สุด ดังรูปที่ ข.23

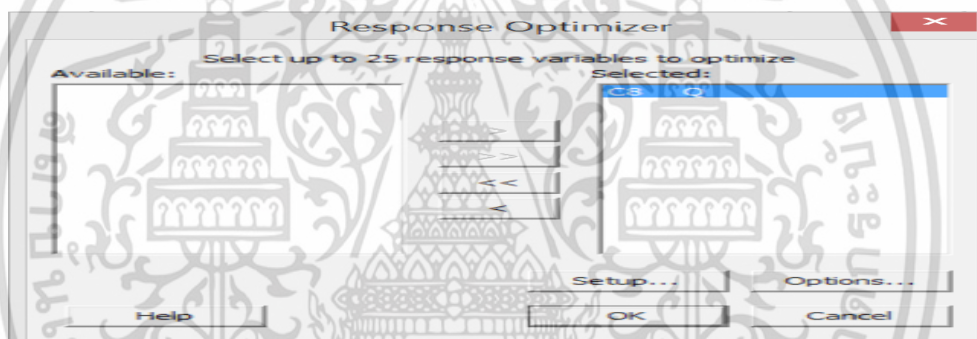


รูปที่ ข.19 การเลือกเทอมหรือปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

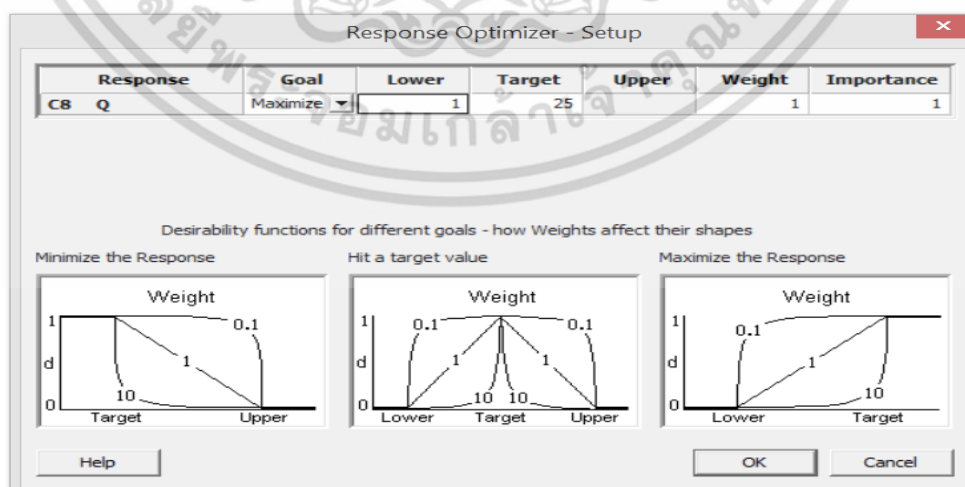
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.20 การวิเคราะห์หาค่า Response optimizer

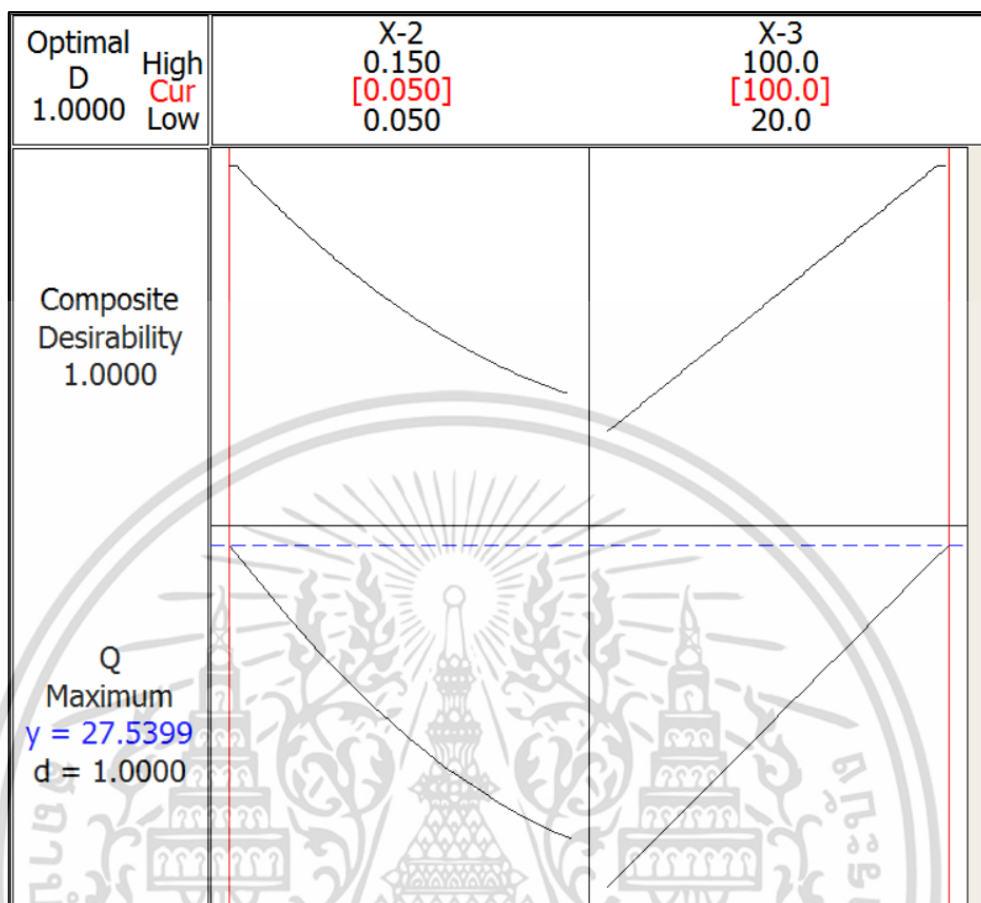


รูปที่ ข.21 เลือกค่าตอบสนองสำหรับหา Response optimizer



รูปที่ ข.22 การตั้งค่าหาค่ามากที่สุดสำหรับค่า Q

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.23 ค่าปัจจัยในสถานะที่เหมาะสมทำให้ได้ค่า Q มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

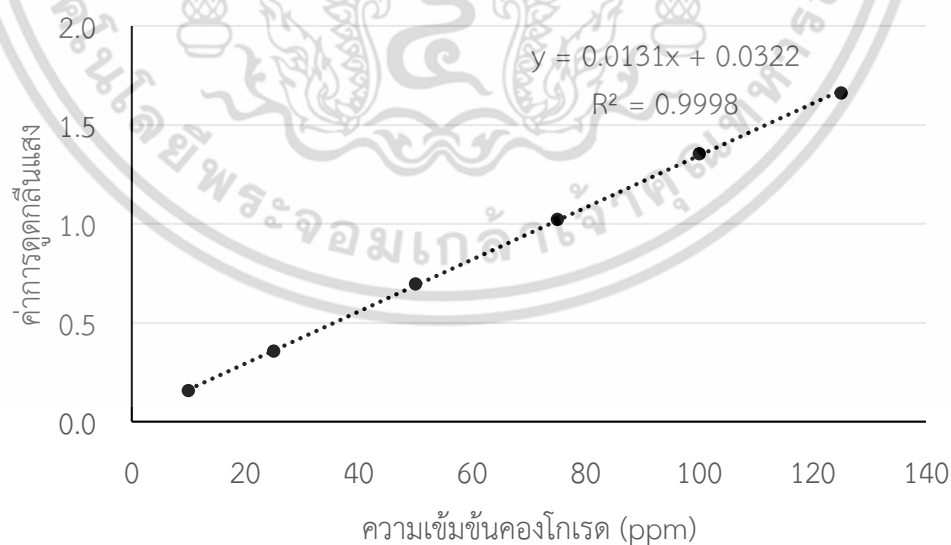
กราฟมาตรฐาน และการคำนวณ

ค.1 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลาย
คองโกเรด

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานคองโกเรด

ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
10	0.157
25	0.358
50	0.697
75	1.023
100	1.353
125	1.662

ใช้ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดที่ 10 25 50 75 100 และ 125 ppm สร้างเป็นกราฟมาตรฐานคองโกเรดดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานคองโกเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายจากการวัดค่าการดูดกลืนแสง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และค่าความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดสามารถหาได้จากกราฟมาตรฐานของสารละลาย ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ ค.1

$$y = 0.0131x + 0.0322 \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ y หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสง และ x หมายถึง ค่าความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด (ppm)

ตัวอย่างการคำนวณเตรียมสารละลายคองโกเรดที่ความเข้มข้น 100 ppm สำหรับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาเริ่มต้นดูดซับได้เท่ากับ 1.353 ดังนั้นคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรตได้ดังสมการที่ ค.2

$$x = \frac{1.353 - 0.0322}{0.0131} = 100.82 \quad (\text{ค.2})$$

ค.3 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ

ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ค.3

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m} \quad (\text{ค.3})$$

เมื่อ Q_t คือ ปริมาณคองโกเรดที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)

C_t คือ ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (ppm)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

m คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับสารละลายคองโกเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm ด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 60 วินาที น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0.0546 กรัม และปริมาตรของสารละลายคองโกเรดเท่ากับ 0.025 ลิตร วัดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นได้เท่ากับ 101.59 ppm เมื่อเวลาดูดซับผ่านไป 15 นาที ความเข้มข้นของสารละลายวัดได้เท่ากับ 37.70 ppm จึงคำนวณปริมาณการดูดซับจำเพาะสารละลายคองโกเรดที่เวลาผ่านไป 15 นาที ดังสมการที่ ค.4

$$Q_{15} = \frac{(101.59 - 37.70) \times 0.025}{0.0546} = 29.25 \quad (\text{ค.4})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการทดลอง

ง.1 ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงศึกษาตามการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ ง.1 ค่าการดูดกลืนแสงศึกษาตามการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

StdOrder	x ₁ (วินาที)	x ₂ (กรัม)	x ₃ (ppm)	x ₄ (นาที)	น้ำหนักที่ชั่งจริง ของถ่านกัมมันต์ (g)	ค่าการดูดกลืนแสง		
						ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	60	0.05	20	15	0.0535	0.067	0.070	0.0685
2	120	0.05	20	15	0.0513	0.063	0.066	0.0645
3	60	0.15	20	15	0.1550	0.050	0.058	0.0540
4	120	0.15	20	15	0.1562	0.052	0.049	0.0505
5	60	0.05	100	15	0.0540	0.532	0.523	0.5275
6	120	0.05	100	15	0.0514	0.539	0.528	0.5335
7	60	0.15	100	15	0.1504	0.465	0.473	0.4690
8	120	0.15	100	15	0.1565	0.418	0.430	0.4240
9	60	0.05	20	45	0.0546	0.073	0.074	0.0735
10	120	0.05	20	45	0.0508	0.080	0.082	0.0810
11	60	0.15	20	45	0.1536	0.048	0.048	0.0480
12	120	0.15	20	45	0.1520	0.048	0.048	0.0480
13	60	0.05	100	45	0.0586	0.519	0.529	0.5240
14	120	0.05	100	45	0.0561	0.477	0.465	0.4710
15	60	0.15	100	45	0.1567	0.439	0.446	0.4425
16	120	0.15	100	45	0.1537	0.357	0.347	0.3520
17	60	0.05	20	15	0.0519	0.098	0.095	0.0965
18	120	0.05	20	15	0.0502	0.099	0.087	0.0930
19	60	0.15	20	15	0.1533	0.061	0.062	0.0615
20	120	0.15	20	15	0.1507	0.055	0.058	0.0565
21	60	0.05	100	15	0.0546	0.526	0.526	0.5260
22	120	0.05	100	15	0.0537	0.526	0.517	0.5215
23	60	0.15	100	15	0.1566	0.477	0.481	0.4790
24	120	0.15	100	15	0.1528	0.488	0.480	0.4840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 (ต่อ)

StdOrder	X ₁ (วินาที)	X ₂ (กรัม)	X ₃ (ppm)	X ₄ (นาทีก)	น้ำหนักที่ซึ่งจริง ของถ่านกัมมันต์ (g)	ค่าการดูดกลืนแสง		
						ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
25	60	0.05	20	45	0.0575	0.080	0.094	0.0870
26	120	0.05	20	45	0.0540	0.090	0.089	0.0895
27	60	0.15	20	45	0.1618	0.067	0.052	0.0595
28	120	0.15	20	45	0.1516	0.060	0.073	0.0665
29	60	0.05	100	45	0.0570	0.526	0.517	0.5215
30	120	0.05	100	45	0.0530	0.524	0.512	0.5180
31	60	0.15	100	45	0.1505	0.460	0.461	0.4605
32	120	0.15	100	45	0.1511	0.454	0.445	0.4495

ตารางที่ ง.2 ค่าการดูดกลืนแสงศึกษาตามการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

StdOrder	X ₁ (วินาที)	X ₂ (กรัม)	X ₃ (ppm)	น้ำหนักที่ซึ่งจริงของ ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	60	0.05	60	0.0586	0.295	0.314	0.3045
2	120	0.05	60	0.0623	0.298	0.287	0.2925
3	60	0.15	60	0.1599	0.262	0.264	0.2630
4	120	0.15	60	0.1559	0.254	0.253	0.2535
5	60	0.1	20	0.1207	0.078	0.074	0.0760
6	120	0.1	20	0.1121	0.069	0.067	0.0680
7	60	0.1	100	0.1037	0.493	0.480	0.4865
8	120	0.1	100	0.1122	0.470	0.475	0.4725
9	90	0.05	20	0.0517	0.100	0.101	0.1005
10	90	0.15	20	0.1558	0.071	0.085	0.0780
11	90	0.05	100	0.0531	0.533	0.546	0.5395
12	90	0.15	100	0.1545	0.509	0.518	0.5135
13	90	0.1	60	0.1043	0.280	0.275	0.2775
14	90	0.1	60	0.1057	0.277	0.282	0.2795
15	90	0.1	60	0.1022	0.284	0.286	0.2850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ตารางที่ ง.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm ที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักที่ซั่งจริงของถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
2	0.0628	0.088	0.098	0.0930
4	0.0627	0.086	0.092	0.0890
6	0.0620	0.091	0.083	0.0870
8	0.0589	0.084	0.097	0.0905
10	0.0561	0.084	0.093	0.0885
15	0.0553	0.065	0.093	0.0788
30	0.0524	0.090	0.081	0.0853
45	0.0539	0.076	0.083	0.0795
60	0.0554	0.070	0.073	0.0715
120	0.0536	0.068	0.068	0.0680
180	0.0539	0.065	0.066	0.0655

ตารางที่ ง.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm ที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักที่ซั่งจริงของถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
2	0.0623	0.298	0.287	0.2925
4	0.0615	0.284	0.283	0.2835
6	0.0572	0.286	0.285	0.2855
8	0.0555	0.291	0.291	0.2910
10	0.0553	0.287	0.289	0.2880
15	0.0540	0.288	0.285	0.2865
30	0.0540	0.289	0.282	0.2855
45	0.0544	0.276	0.286	0.2810
60	0.0537	0.289	0.285	0.2870
120	0.0522	0.277	0.271	0.2740
180	0.0521	0.270	0.275	0.2725

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖.5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm ที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

เวลา (นาท)	น้ำหนักที่ซั่งจริงของถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
2	0.0628	0.52	0.519	0.5195
4	0.0591	0.534	0.539	0.5365
6	0.0582	0.514	0.526	0.5200
8	0.0568	0.52	0.52	0.5200
10	0.0561	0.498	0.493	0.4955
15	0.0533	0.526	0.541	0.5335
30	0.0526	0.5335	0.5215	0.5275
45	0.0546	0.5180	0.4710	0.4945
60	0.0518	0.537	0.538	0.5375
120	0.0524	0.51	0.505	0.5075
180	0.0527	0.498	0.49	0.4940

ตารางที่ ๖.6 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 140 ppm ที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

เวลา (นาท)	น้ำหนักที่ซั่งจริงของถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
2	0.0557	0.773	0.778	0.7755
4	0.0535	0.781	0.781	0.7810
6	0.0536	0.770	0.774	0.7720
8	0.0524	0.781	0.786	0.7835
10	0.0527	0.774	0.776	0.7750
15	0.0520	0.769	0.772	0.7705
30	0.0520	0.762	0.767	0.7645
45	0.0519	0.760	0.762	0.7610
60	0.0515	0.764	0.769	0.7665
120	0.0522	0.746	0.744	0.7450
180	0.0520	0.745	0.747	0.7460

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗.7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

เวลา (นาที่)	น้ำหนักที่ซั่งจริงของถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
2	0.0544	1.083	1.087	1.0850
4	0.0540	1.080	1.078	1.0790
6	0.0538	1.083	1.077	1.0800
8	0.0530	1.086	1.093	1.0895
10	0.0530	1.076	1.078	1.0770
15	0.0543	1.035	1.033	1.0340
30	0.0520	1.090	1.088	1.0890
45	0.0524	1.062	1.060	1.0610
60	0.0523	1.055	1.058	1.0565
120	0.0520	1.062	1.063	1.0625
180	0.0529	1.035	1.033	1.0340

ตารางที่ ๗.8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm ที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

เวลา (นาที่)	น้ำหนักที่ซั่งจริงของถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
2	0.0638	0.373	0.372	0.3725
4	0.0545	0.385	0.383	0.3840
6	0.0560	0.365	0.359	0.3620
8	0.0564	0.353	0.356	0.3545
10	0.0535	0.349	0.351	0.3500
15	0.0525	0.356	0.353	0.3545
30	0.0533	0.343	0.345	0.3440
45	0.0528	0.348	0.347	0.3475
60	0.0529	0.346	0.347	0.3465
120	0.0530	0.348	0.343	0.3455
180	0.0528	0.346	0.348	0.3470

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.3 ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

ตารางที่ ง.9 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่ความเข้มข้นสมดุลต่างๆ ที่เวลา 120 นาที ของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เวลา 90 วินาที

ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g)	ความเข้มข้นสมดุล (ppm)
20	7.17	2.73
60	18.99	18.34
100	31.41	35.37
140	38.86	54.41
200	59.59	76.47
300	92.45	129.89

ตารางที่ ง.10 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ ของสมการแลงเมียร์

ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด (ppm)	$1/q_e$	$1/C_e$
20	0.1394	0.3659
60	0.0527	0.0545
100	0.0318	0.0283
140	0.0257	0.0184
200	0.0168	0.0131
300	0.0108	0.0077

ตารางที่ ง.11 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ ของสมการฟรุนดลิช

ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด (ppm)	$\log q_e$	$\log C_e$
20	0.8558	0.4366
60	1.2786	1.2635
100	1.4971	1.5486
140	1.5895	1.7357
200	1.7752	1.8835
300	1.9659	2.1136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ผลงานวิชาการ

		ISSN 0125-1724
		LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL
<h1>วิศวกรรมลาดกระบัง</h1>		
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		
ปีที่ 33 ฉบับที่ 1	ปีพฤษภาคม 2559	
บทความวิชาการ		
1. กระบวนการอบอุ่นหลังความเครียดต่ำ-หนึ่งชั้น สำหรับการเพิ่มสัดส่วนขอบเกรนแบบ low-Σ CSLB ในเหล็กกล้าไร้สนิม 316L	1	
<i>อัญชลี บุญเลิศ อรุมา สันตวิสิ์ กรรณชัย กัลยาศิริ ปัญญา ชันธุสุวรรณ</i>		
2. การสังเคราะห์ฟอโนโนคาร์บอนบนเส้นใยคาร์บอน	7	
<i>ลลิตา เพ็ชรราชบุรี พนมกร ขวาชอง อภิชาติ อาจนาลัย</i>		
บทความวิจัย		
3. การศึกษาหาพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์	12	
<i>ดวงดาว ไหมควัฒนะ ชุมพล ยวงโย สุพัฒตรา เกษราพงศ์ สมลักษณ์ บุญรงค์</i>		
4. อิทธิพลของสายพันธุไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน	18	
<i>ชาตรี หอมเขียว สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน</i>		
5. อิทธิพลของลวดตาข่ายสแตนเลสต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สทรงตั้งแบบ Vertical Port 24	24	
<i>อนิรุตต์ มัทธจักร บงกช บุญเพชร อมรพันธุ์ แสงส่อง วีรยุทธ จันทะโยธา</i>		
6. Influence of Packing Limit on Gas-Solid Fluidized Bed Flow Pattern by Computational Fluid Dynamics	30	
<i>Kasamawan Taorat Eakarach Bumrunthaichaichan Santi Wattananusorn</i>		
7. การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ	36	
<i>ทองฉัตร จิงสมาน พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์</i>		
8. PI Controller Optimization for Indirect Current Control for Single-Phase Shunt Active Filter	42	
<i>Kanapot Yodmanee Wanchak Lenwari</i>		
9. การประเมินสมรรถนะ และความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีระบบติดตามดวงอาทิตย์และแบบมุมรับแสงคงที่ในประเทศไทย	48	
<i>ศศิวิมล ทรงไทร พีระวุฒิ ชินวรรังสี อัครวิน หงษ์สิงห์ทอง ณัฐกานต์ อุดมเดชาวัฒน์</i>		
<i>ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์ ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์ จรรย์ ศรีธราธิคุณ กอบศักดิ์ ศรีประภา</i>		
10. การประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองนำฝน-น้ำท่า InfoWorks PDM ในลุ่มแม่น้ำวังทอง	54	
<i>วิษุวัฒน์ แต่สมบัติ สุทธิพงษ์ อุลวย</i>		
11. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลากต่อพื้นที่รับน้ำฝนเพื่อการออกแบบโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดเล็กของประเทศไทย	60	
<i>ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์ ชัยวัฒน์ เต็งประกอบกิจ เนตรชนก ภูระหงษ์</i>		
12. กำลังรับแรงเฉียงของเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสฝังลึกมากในดินเหนียว	66	
<i>สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ บุญชัย อุทฤษฏิน</i>		
13. ข้อเสนอแนะเพื่อการแก้ไขปัญหาราจรสำหรับงานเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	72	
<i>เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์ พงศ์ธร หงษา สิทธิวัฒน์ ศรีมงคล</i>		
14. การออกแบบเส้นทางทรงหลายรูปแบบเพื่อการส่งออกผลไม้	78	
<i>ศักรธร บุญทวีวัฒน์</i>		

<http://www.kmitl.ac.th/ej>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ

Synthesis Activated Carbon from Coffee Residue by Using Microwave Radiation

ทองนิตร์ จิงสมาน¹ พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ขั้นตอนแรกการคาร์บอนไนซ์กากกาแฟที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM พบว่าที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 48 32 และ 27 ตามลำดับ นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แช่สารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในอัตราส่วนถ่านชาร์ 1 กรัมต่อสารละลาย 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วินาที จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET พบว่าที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 7.05 16.50 และ 416.10 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 0.02 0.03 และ 0.24 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ การกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงสุด เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลถ่านกัมมันต์ และเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการระเหยของไอน้ำ และเกิดการสลายตัวของสารระเหยที่อุดตันในถ่านชาร์

คำสำคัญ : การสังเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ กากกาแฟ ไมโครเวฟ

Abstract

This research examined synthesis of activated carbon derived from coffee residue by being activated with microwave radiation. The first part of process was to carbonize coffee residue at 400, 500, and 600 °C respectively. Each carbonization spent 1 hour. The amount of moisture, volatile, ash and fixed carbon were analyzed by following American Society for Testing and Materials (ASTM). It was found that the amount of fixed carbon at temperature 400, 500, and 600 °C were 48, 32, and 27% respectively. Charcoal at 400 °C was immersed in 40% H_3PO_4 solution, ratio of charcoal 1 g. per solution 20 ml. in 24 hrs. After that it was activated by microwave radiation at 200, 500, and 800 Watt respectively in 60 sec. According to characteristic of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

surface area and total pore volume by BET technique, it was found that at 200, 500, and 800 Watt, surface area were 7.05, 16.50, and 416.10 m^2/g and total pore volume were 0.02, 0.03, and 0.24 cm^3/g respectively. Microwave powered at 800 Watt, activated carbon consequently gave the most surface area and total pore volume. The microwave radiation at 800 Watt also transmitted high frequency electromagnetic wave which caused the vibration in molecule of the activated carbon. The vibration simultaneously generated heat which was capable of water evaporation and volatility in charcoal.

Keywords : Synthesis, Activated carbon, Coffee residue, Microwave

1. บทนำ

จากสถิติความต้องการใช้ปริมาณเมล็ดกาแฟในตลาดโลกในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาตั้งแต่ปี 2553 ถึง ปี 2557 เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.67 ต่อปี ส่วนของประเทศไทยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาปริมาณความต้องการใช้เมล็ดกาแฟจาก 58,000 ตัน ในปี 2553 เป็น 75,000 ตัน ในปี 2557 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.65 ต่อปี และมีแนวโน้มความต้องการใช้เพิ่มขึ้นเป็น 80,000 ตัน ในปี 2558 [1] จากปริมาณความต้องการเมล็ดกาแฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของกากกาแฟเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยทั่วไปนิยมนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์เช่น ในธุรกิจเสริมความงามนำกากกาแฟทำเป็นวัสดุขัดผิว ทางด้านการเกษตรนำกากกาแฟไปใช้ทำปุ๋ย เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์คือวัสดุดูดซับจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ วัสดุเหลือทิ้ง หาง่าย และไม่สลายตัวตอนเก็บ วัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตถ่านกัมมันต์มีด้วยกันหลายชนิดตัวอย่างเช่น วัตถุดิบชีวมวลที่มาจากเกษตรกรรม เช่น เปลือกผลไม้ต่างๆ ฟางข้าว และกะลามะพร้าว เป็นต้น ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ใช้ในการดูดซับของเสียในน้ำหรือในอากาศ [2] ตัวอย่างจากงานวิจัยที่ใช้วัสดุชีวมวลในการสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์โดยการใช้เปลือกขนุนผ่านวิธีการบอไนเซชัน และกระตุ้นจนกลายเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับเมทิลีนบลู และอีกหนึ่งงานวิจัยนำเปลือกผลปาล์มเป็นวัตถุดิบในการทำถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแอมโมเนีย [3, 4] วิธีการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยการเผา

แบบคาร์บอนไนเซชันเพื่อให้ได้ถ่านชาร์ และนำไปกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน การกระตุ้นมีทั้งทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมี โดยทั่วไปการกระตุ้นทางเคมีจะนำถ่านชาร์ไปแช่สารเคมีเช่น H_3PO_4 , KOH หรือ NaOH เป็นต้น และใช้ความร้อนเพื่อช่วยกระตุ้นถ่านกัมมันต์ในเตาปฏิกรณ์อีกครั้ง [2] วิธีการกระตุ้นดังกล่าวใช้ความร้อนสูง ระยะเวลา และสิ้นเปลืองพลังงาน ปัจจุบันมีอีกทางเลือกหนึ่งมาช่วยในกระบวนการกระตุ้นคือ พลังงานไมโครเวฟ หลักการทำงานของไมโครเวฟคือ การส่งคลื่นไมโครเวฟทำให้มีการสั่นของโมเลกุล และเกิดความร้อนขึ้นภายในโมเลกุลเมื่อถ่านกัมมันต์ได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ไอน้ำ สารระเหย ภายในเกิดการระเหยออกหรือสลายตัว ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น [5] การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ไม่ได้ส่งผลต่อคุณภาพที่ต่างจากการกระตุ้นด้วยการให้ความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ แต่การใช้พลังงานไมโครเวฟนั้นมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนที่รวดเร็ว ประหยัดเวลาและพลังงานในการสังเคราะห์ และเทคนิคนี้ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อธาตุคาร์บอนอีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟโดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในส่วนแรกศึกษาเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชันสำหรับการเตรียมถ่านชาร์เพื่อนำไปใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ในส่วนที่สองเป็นการกระตุ้นทางเคมีด้วยการแช่สารละลายกรดฟอสฟอริก และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 60 วินาที เปรียบเทียบพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ด้วยเทคนิค BET

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมกากกาแฟ

นำกากกาแฟล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อทำความสะอาด และปรับ ให้มีค่า pH~7 จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำกากกาแฟที่อบวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM

2.2 การเตรียมถ่านชาร์

ชั่งกากกาแฟที่ผ่านการล้าง และอบ 100 กรัม ใส่เครื่อง ปฏิกรณ์ เเผากากกาแฟแบบคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อวินาที และมีแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านตลอดเวลาในการเผา หลังจากนั้นเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 500 และ 600 °C ตามลำดับ วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านชาร์ตามมาตรฐาน ASTM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนในเซชัน

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆตามมาตรฐาน ASTM [6]

2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ASTM D3173-95

อบด้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่ง น้ำหนัก ชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยพร้อม ฝาปิดที่เตรียมไว้ นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่ง น้ำหนัก คำนวณร้อยละของปริมาณความชื้นจากสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละของปริมาณความชื้น} = [(C - D)/(C - B)] * 100 \quad (1)$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด (กรัม) C หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนัก สารก่อนอบ (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝาปิดรวมกับน้ำหนักสารหลังอบ (กรัม)

2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย ASTM D5832-98

นำถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็น เวลา 30 นาที วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และ ชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งสารตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ใน ถ้วยพร้อมฝาปิดที่เตรียมไว้ นำไปเผาที่ 950 °C เป็นเวลา 7 นาที วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่ง น้ำหนัก คำนวณหาร้อยละของสารระเหยจากสมการที่ 3

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่เสียไป} = [(C - D)/(C - B)] * 100 \quad (2)$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและฝาปิด (กรัม) C หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและฝาปิดรวมกับสารตัวอย่าง ก่อนเผา (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องและฝา ปิดรวมกับสารตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

$$\text{ร้อยละของปริมาณสารระเหย} = (2) - (1) \quad (3)$$

2.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ASTM D2866-11

นำถ้วยกระเบื้องเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ เตรียมไว้ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วาง ไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก คำนวณหาร้อยละ ของปริมาณเถ้าจากสมการที่ 4

$$\text{ร้อยละของปริมาณเถ้า} = [(D - B)/(C - B)] * 100 \quad (4)$$

เมื่อ B หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม) C หมายถึง น้ำหนักถ้วยกระเบื้องรวมกับสารตัวอย่างก่อนเผา (กรัม) และ D หมายถึงน้ำหนักถ้วยกระเบื้องรวมกับสารตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

2.3.4 การคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว ASTM D3172

ปริมาณคาร์บอนคงตัวคือส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ หลังจากที่ได้กำจัดความชื้น สารระเหย และเถ้า คำนวณได้จาก สมการที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - (M + V + A) \quad (5)$$

เมื่อ M หมายถึงร้อยละความชื้น (1) V หมายถึงร้อยละสารระเหย (3) และ A หมายถึงร้อยละเถ้า (4)

2.4 การกระตุ้นถ่านชาร์โดยไมโครเวฟ

นำถ่านชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากที่สุดแช่ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในอัตราส่วนกากกาแฟ 1 กรัมต่อสารละลาย 20 มิลลิลิตร จากนั้นกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับเป็นเวลา 60 วินาที เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟนำมาล้างให้มีค่า pH~7 และอบแห้ง

2.5 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET

พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์โดยการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจนภายใต้ความดันมาตรฐานที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน และประเมินค่าด้วยเทคนิค BET

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

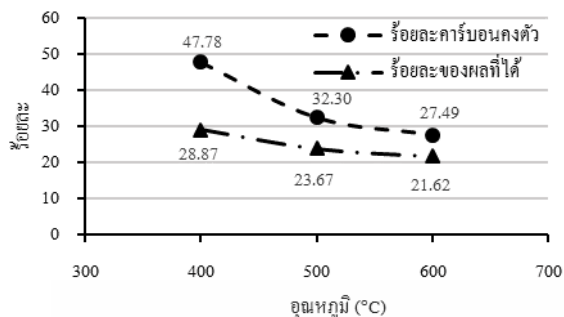
การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากกาแฟ แสดงดังในตารางที่ 1 พบว่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.63 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 97.02 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.34 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณคาร์บอนคงตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 เปอร์เซ็นต์ กากกาแฟมีปริมาณสารระเหยมากจึงเหมาะสมในการเผาแบบคาร์บอนในเซชันเนื่องจากกระบวนการเผาแบบคาร์บอนในเซชันจะเปลี่ยนปริมาณสารระเหยให้กลายเป็นคาร์บอนคงตัว [7] ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกถ่านชาร์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

การทดลองครั้งที่	ปริมาณความชื้น (%wt)	ปริมาณสารระเหย (%wt)	ปริมาณเถ้า (%wt)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%wt)
1	1.27	97.62	0.29	0.82
2	2.01	96.37	0.40	1.22
3	1.60	97.07	0.35	0.98
เฉลี่ย	1.63	97.02	0.34	1.01

3.2 คุณสมบัติของถ่านชาร์

ศึกษาสภาวะของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ของกากกาแฟที่อุณหภูมิต่างกัน 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทั่วไปการคาร์บอนไนซ์จะทำในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส สารระเหยในวัสดุชีวมวลอาจยังไม่สลายตัวเป็นคาร์บอนคงตัว หากอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทำให้ธาตุคาร์บอนเปลี่ยนไปเป็นก๊าซส่งผลให้ปริมาณถ่านชาร์ลดลง [7] รูปที่ 1 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้ พบว่าการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 47.78 32.30 และ 27.49 ตามลำดับ และมีร้อยละผลได้เท่ากับร้อยละ 28.87 23.67 และ 21.62 ตามลำดับ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมแก่การคาร์บอนไนซ์คือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพราะว่ามีปริมาณคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้มากที่สุด หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนคงตัว และร้อยละผลได้มีแนวโน้มลดลง

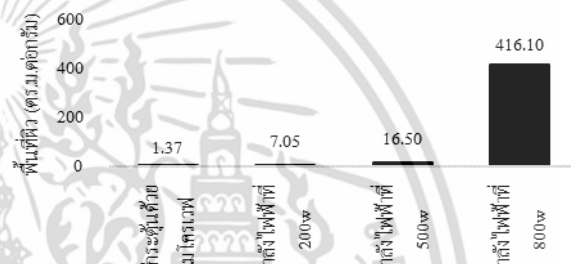


รูปที่ 1 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ต่อร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ และร้อยละผลที่ได้

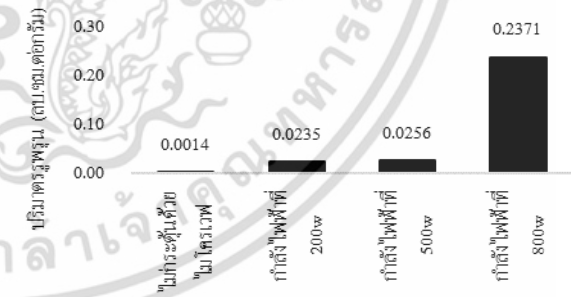
3.3 ศึกษาการกระตุ้นถ่านชาร์

นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 °C แช่ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อช่วยเกิดการสร้างโพรงของถ่านที่ผลิตจากวัสดุชีวมวล [2] และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าต่างกันคือ 200 500 และ 800 วัตต์ ตามลำดับ เป็นเวลา 60 วินาที วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ แสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ พบว่าถ่านชาร์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟมีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1.37 ตร.ม.ต่อกรัม และ 0.0014 ลบ.ซม.ต่อกรัม ตามลำดับ และถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 7.05 16.50 และ 416.10 ตร.ม.ต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.02 0.03 และ 0.24 ลบ.ซม.ต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟจะให้พื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุนสูงกว่าถ่านชาร์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นจาก 200 500 และ 800 วัตต์ ส่งผลให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่

กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่า 200 และ 500 วัตต์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตความร้อนขึ้นภายในอนุภาคของถ่านชาร์มากกว่า และยังสามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่อุดตันในถ่านชาร์ที่ดีกว่า ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น เมื่อนำถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยเทียบกับถ่านกัมมันต์พาณิชย์ทั่วไป พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์พาณิชย์มีประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม [2] จากงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า ถ่านกัมมันต์พาณิชย์ อาจเนื่องมาจากสภาวะในการผลิต ถ่านกัมมันต์ยังไม่เหมาะสมสำหรับกากกาแฟ



รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์

4. สรุปผล

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยการกระตุ้นด้วยพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟ ในส่วนแรกการผลิตถ่านชาร์จากการคาร์บอนใน-
เซชันที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1
ชั่วโมง พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์คือ
อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณร้อยละคาร์บอนคง-
ตัว และร้อยละผลได้ของถ่านชาร์มากที่สุดเท่ากับ 47.78 และ
28.87 ตามลำดับ ในการคาร์บอนไนซ์ในเซชันหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
ปริมาณคาร์บอนคงตัว และผลที่ได้มีแนวโน้มลดลง ส่วนที่
สองการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์นำถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอน
ไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แช่สารละลายกรดฟอสฟอ-
ริก 24 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 200 500
และ 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที พบว่าสถานะที่เหมาะสมใน
การกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟคือ ที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์
โดยจะให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูงสุดคือ 416.10 ตร.ม.
ต่อกรัม และ 0.24 ลบ.ซม.ต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากคลื่น
ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่
มีความถี่สูงโดยจะผลิตความร้อนขึ้นภายในอนุภาคของถ่าน
ชาร์ และยังสามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่ออก
ตันอยู่ในถ่านชาร์ ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว และ
ปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น ดังนั้นการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้
เพื่อช่วยกระตุ้นถ่านกัมมันต์จึงมีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่
ผิว และปริมาตรรูพรุน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเครื่องมือวิเคราะห์จากศูนย์
เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระ-
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Yomchot, "The situation and trend of major
agricultural products in 2015," Office of agricultural
economics, pp.77 – 88, 2014.

- [2] D. Chatsiriwech, Adsorption process, Chulalongkorn
university press, Bangkok, 2009.
- [3] K.Y. Foo and B.H. Hameed, "Potential of jackfruit peel
as precursor for activated carbon prepared by microwave
induced NaOH activation," Elsevier bioresource
technology, Vol.112, pp.143-150, Feb., 2012.
- [4] J. Guo, W.S. Xu, Y.L. Chen and A.C. Lua, "Adsorption
of NH_3 onto activated carbon prepared from palm shells
impregnated with H_2SO_4 ," Elsevier journal of colloid
and interface science, Vol.281, pp.285-290, Oct., 2005.
- [5] K.Y. Foo and B.H. Hameed, "Recent developments in
the preparation and regeneration of activated carbons by
microwaves," Elsevier advances in colloid and interface
science, Vol.149, pp.19-27, Jan., 2009.
- [6] American Society for Testing and Materials, "ASTM
D3173-95 D5832-98 D2866-11 D3172," [Online],
Available: <http://www.astm.org>. 2014.
- [7] S. Yokoyama, "A guide for biomass production and
utilization," The Japan institute of energy, pp.94-100,
2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายทองฉัตร จิ่งสมาน
วัน เดือน ปีเกิด 12 สิงหาคม 2532
ที่อยู่ 31 ซ.สมเด็จพระเจ้าพระยา 6 ถนนสมเด็จพระเจ้าพระยา
เขต คลองสาน กรุงเทพมหานคร 10600
โทรศัพท์ 089-1163640
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 สายวิทย์-คณิต โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย
กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2554 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีปิโตรเคมี (หลักสูตรนานาชาติ)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

- ต.ค. 2552 – พ.ย. 2552 : ฝึกประสบการณ์วิชาชีพ ตำแหน่งเจ้าหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพ
น้ำมันเชื้อเพลิง และน้ำมันเครื่อง ณ บริษัท ปตท. จำกัดมหาชน
- ต.ค. 2554 – พ.ย. 2554 : ประกาศนียบัตรจาก Technische Universitat Bergakademie
Freiberg, Germany ทางด้านวิชา Fuel Geology, Recovery/Mining, Storage and Usage
of oil and Gas, and Field trips
- มี.ค. 2555 – ส.ค. 2555 : ร่วมทำโครงการงานวิจัยกับกรมควบคุมมลพิษ
- ก.ย. 2557 – ก.พ. 2558 : ทำงานที่บริษัท World Wide Solution 2014 Co., Ltd. ตำแหน่ง
วิศวกรฝ่ายขาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้