



วิทยานิพนธ์

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์
จากไผ่ตงและไผ่หมาจู้

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF
ACTIVATED CARBON FROM

Dendrocalamus asper Backer AND *Dendrocalamus latiforus*

นายปรินทร เต็มญารศิริลป

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมี)

ปริญญา

เคมี

สาขา

เคมี

ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู

Preparation and Characterization of Activated Carbon from *Dendrocalamus asper*
Backer and *Dendrocalamus latiflorus*

นามผู้วิจัย นายปรินทร์ เต็มญารศิลป์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์อภิสิทธิ์ สงเสนา, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์พรพรรณ พรศิลป์พิทย, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ระศักดิ์ อุดมโชค, D.Tech.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุจรี ประสิทธิ์พันธ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 4 เดือน เมษายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู

Preparation and Characterization of Activated Carbon
from *Dendrocalamus asper* Backer and *Dendrocalamus latiflorus*

โดย

นายปรินทร์ เต็มญารศิลป์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี)
พ.ศ. 2551

ปริญญ์ เต็มญารัตน์ ปี 2551: การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่แดง และไผ่หมาจู วิทยาลัยวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมี) สาขาเคมี ภาควิชาเคมี ปรชานุกรมการ ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์อภิสิทธิ์ฯ สงสะเกณ, Ph.D. 285 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม และการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จากไผ่ตง และไผ่หมา
งู อายุ 1 - 3 ปี จากบริเวณจังหวัดกาญจนบุรี โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี สารที่ใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ กรด
ฟอสฟอริก โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และกรดไนตริก ผลการศึกษาพบว่า สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ ขึ้นกับ
พันธุ์และอายุของไผ่ ชนิดของสารกระตุ้น ความเข้มข้นของสารกระตุ้น สภาวะที่ใช้ในการกระตุ้น และเวลาที่
ใช้ในการกระตุ้น นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาค่าประจวบแบบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย และ
คาร์บอนคงตัว รวมถึงความเป็นกรดค้างของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ จากนั้นได้ศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์
โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่ผิวโดยฟลูออรีนทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปก
โทรมิเตอร์ และศึกษาความสามารถในการดูดซับ พร้อมทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะของการดูดซับสารต่างๆที่ละลายใน
น้ำ ได้แก่ แคดเมียม(II) เมทิลลีนบลู ฟีนอล และไอโอดีน โดยเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ทาง
การค้า และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มคว้นไม้ที่ได้จากการเผาไม้ไผ่

ในการศึกษาโครงสร้างและหาหมู่ฟังก์ชันที่ผิวมัน พบว่า ถ่านที่ได้รับการกระตุ้นจะมีขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนเพิ่มขึ้น และมีความเข้มของแถบหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลมากขึ้น และในการศึกษาหาความสามารถในการดูดซับ และพื้นที่ผิวจำเพาะนั้น เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้ว พบว่า ในการดูดซับแคดเมียม(II) มีไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์เท่านั้น โดยถ่านกัมมันต์จากไฟผางอายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 0.19 mg/g พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 0.61 Å²/g ในการดูดซับเมทิลลีนบลู มีไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช โดยถ่านกัมมันต์จากไฟผางอายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 14.75 mg/g พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 33.31 Å²/g ในการดูดซับฟีนอล มีไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช โดยถ่านกัมมันต์จากไฟผางอายุ 3 ปี ที่ไม่ได้รับการกระตุ้น สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 2.66 mg/g พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2.70 Å²/g และในการดูดซับไอโอดีน มีไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช โดยถ่านกัมมันต์จากไฟผางอายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถดูดซับได้มากที่สุด คือ 420.34 mg/g พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 638.05 Å²/g

ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้ พบว่า ปริมาณของกรดอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามชนิดและอายุของไม้ไผ่ โดยที่กรดอะซิติกจะมีปริมาณสูงที่สุดในน้ำส้มควันไม้ทุกชนิด

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่อประธานกรรมการ

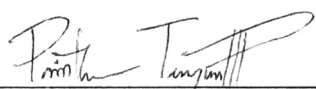
3) 122 / 2559

Parinthorn Temyarasilp 2008: Preparation and Characterization of Activated Carbon from *Dendrocalamus asper Backer* and *Dendrocalamus latiflorus*. Master of Science (Chemistry),
Major Field: Chemistry, Department of Chemistry. Thesis Advisor: Associate Professor
Apisit Songsasen, Ph.D. 285 pages.

The preparation and characterization of activated carbon from *Dendrocalamus asper Backer* (DB) and *Dendrocalamus latiflorus* (DL), 1 – 3 years, from Kanchanaburi province, were studied. The chemical agents used for activation were phosphoric acid (H_3PO_4), potassium hydroxide (KOH) and nitric acid (HNO_3). The results showed that properties of prepared activated carbon depend on the breeds and ages of bamboos, chemical agents and activation conditions such as chemical concentrations and activation time. In addition, proximate analysis (moisture, ash, volatile matter and fixed carbon) and pH were studied. Afterwards, the structure and functional group of activated carbon were studied by SEM and FTIR. Then, the adsorption of cadmium, methylene blue, phenol and iodine from aqueous solutions were also studied and compared with commercial activated carbon and commercial bamboo charcoal. Finally, DB's and DL's vinegars from carbonization, were analyzed in order to measure organic acid concentration.

The results of SEM showed that activated carbon had larger pore sizes and pores distribution than non-activated charcoal. FTIR spectra of the activated carbon showed the stronger band of carbonyl and carboxyl groups at $1600 - 1700\text{ cm}^{-1}$. From the study, Langmuir isotherm was fitted with the adsorption of cadmium(II). The activated carbon of 2 years DB activated by KOH had highest adsorption capacity (0.19 mg/g) and highest specific surface area ($0.61\text{ Å}^2/\text{g}$). However in the study of methylene blue, phenol and iodine adsorption, isotherms were fitted with both Langmuir and Freundlich isotherm. For methylene blue adsorption, the activated carbon of 3 years DL activated by KOH had highest adsorption capacity (14.75 mg/g) and highest specific surface area ($33.31\text{ Å}^2/\text{g}$). For phenol adsorption, the charcoal of 3 years DL had highest adsorption capacity (2.66 mg/g) and highest specific surface area ($2.70\text{ Å}^2/\text{g}$). For iodine adsorption, the activated carbon of 2 years DL activated by KOH had highest adsorption capacity (420.34 mg/g) and highest specific surface area ($638.05\text{ Å}^2/\text{g}$).

In the analysis of the concentrations of organic acids in bamboo vinegars, the results indicated that the concentrations of each organic acid depend on breeds and ages of bamboos. In additions, the highest acid concentration of all bamboo vinegars is acetic acid.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

31 / March / 2008

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบพระคุณ รศ.ดร.อภิสิทธิ์ สงเสนา ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.พรพรรณ พรศิลป์พิทย และ รศ.ดร.วีระศักดิ์ อุดมโชค กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ให้คำปรึกษา แนะนำข้อคิดเห็น ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ รวมทั้งสละเวลาในการให้คำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดตลอดในการทำวิจัย รศ.ดร.คณพล จุฑามณี ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ดร.นิคม แหยมสีก ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องเผาในการเผาไม้ไฟให้เป็นถ่าน ผศ.อรณพ หอมจันทร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องไฮเพอร์ฟอแมนซ์ลิควิดโครมาโทกราฟี ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้

ขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย สถาบันค้นคว้าและพัฒนากระบวนการเกษตร ที่สนับสนุนไม้ไฟที่ใช้ในการทำวิจัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการในการทำวิจัยตลอดงานวิจัย

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมี และสำนักเลขานุการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการศึกษามาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ปรินทร์ เต็มญารศิลป์

มีนาคม 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์ และวิธีการ	70
อุปกรณ์	70
วิธีการ	72
ผลและวิจารณ์	86
สรุปและข้อเสนอแนะ	235
เอกสาร และสิ่งอ้างอิง	243
ภาคผนวก	252

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง	8
2	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด	8
3	สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์	15
4	คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์บางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด	22
5	สมบัติต่างๆของแคะเมียม	49
6	สมบัติต่างๆของฟินอล	51
7	สมบัติต่างๆของเมทิลลีนบลู	53
8	สมบัติต่างๆของไอโอดีน	56
9	แสดงสารอินทรีย์ชนิดต่างๆในน้ำส้มควันไม้	60
10	แสดงสมบัติของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ	61
11	ประโยชน์ของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ	64
12	น้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างการเผาให้เป็นถ่าน	86
13	แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าการดูดซับฟินอลของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่	93
14	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ	94
15	แสดงค่าเลขคลื่นของแถบต่างๆที่เกิดขึ้นในอินฟราเรดสเปกตรัม พร้อมการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	104
16	ลักษณะสเปกตรัมจากเทคนิคฟลูออรีทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	115
17	แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด ที่เหมาะสมในการดูดซับแคะเมียม	124
18	แสดงความเป็นกรดต่างของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับแคะเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	129
19	แสดงเวลาสัมผัส ที่เหมาะสมในการดูดซับแคะเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	134

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
20	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช	148
21	ค่าคงที่การดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	151
22	พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	153
23	แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	157
24	แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	162
25	แสดงความเป็นกรดต่างในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	167
26	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลิโนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช	175
27	ค่าคงที่การดูดซับเมทิลลิโนบลูของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	178
28	พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	180
29	แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	184
30	แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	188
31	แสดงความเป็นกรดต่างในการดูดซับฟีนอล ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	193

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
32	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และ แบบ ฟรอยด์ลิช	201
33	ค่าคงที่การดูดซับฟินอลของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	204
34	พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับฟินอลของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	206
35	แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	210
36	แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ ไผ่ แต่ละชนิด	214
37	แสดงความเป็นกรดต่างในการดูดซับไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด	219
38	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และ แบบฟรอยด์ลิช	227
39	ค่าคงที่การดูดซับ ไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	230
40	พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละ ชนิด	232
41	แสดงปริมาณกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่พบในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้ตอง และ ไม้หมาก	234
ตารางผนวกที่		
1	ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่	278

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	9
2 การเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมตามอุณหภูมิที่เผา	12
3 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี	14
4 ปฏิกริยาระหว่าง เซลลูโลส กับ กรดฟอสฟอริก	16
5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ	18
6 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	20
7 แผนภาพอธิบายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์	20
8 เปรียบเทียบการกระจายรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบและวิธีที่ใช้ผลิต	24
9 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์	31
10 ภาพแสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์	32
11 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	37
12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	39
13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	40
14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e (\log \frac{X}{m})$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของฟลอยด์ลีช	41
15 แสดงลักษณะของไผ่ตง (<i>Dendrocalamus asper</i> Backer)	44
16 แสดงลักษณะของไผ่หมาจู (<i>Dendrocalamus latiflorus</i>)	46
17 สูตรโครงสร้างฟินอล และ ตัวอย่างอนุพันธ์ของฟินอล	51
18 สูตรโครงสร้างเมทิลลีนบลู	53
19 แสดงการเปรียบเทียบค่าเลขไอโอไดนของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 2 และ 3 ปี ระหว่างที่เผาที่อุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส	87
20 แสดงการเปรียบเทียบค่าเลขไอโอไดน เมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 ที่เวลาต่างกัน	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	แสดงการเปรียบเทียบค่าเลขไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน	90
22	แสดงการเปรียบเทียบค่าเลขไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	91
23	แสดงการเปรียบเทียบค่าเลขไอโอดีน เมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาต่างๆกัน	91
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัว และความสามารถในการดูดซับของแลงเมียร์ ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	96
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัว และความสามารถในการดูดซับแก๊สมีเทน	96
26	สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ Fluka ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	97
27	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	98
28	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 3 ไมโครเมตร	98
29	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	99
30	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	99
31	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	100
32	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	101
34	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 3 ไมโครเมตร	101
35	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	102
36	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 10 ไมโครเมตร	102
37	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	103
38	สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ระยะเวลาปรากฏในภาพ 2 ไมโครเมตร	103
39	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ Fluka	105
40	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของไม้ไผ่ Bunton	105
41	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	106
42	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	106
43	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	107
44	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	107
45	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	108
46	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	108

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
47 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	109
48 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริก	109
49 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	110
50 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	110
51 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริก	111
52 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	111
53 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	112
54 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริก	112
55 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	113
56 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น	113
57 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริก	114
58 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	114
59 แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟังก์ชัน	118
60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของความเป็นอะโรมาติกและความสามารถในการ ดูดซับคาร์บอน	119
61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของความเป็นอะโรมาติกและความสามารถในการ ดูดซับคาร์บอนแต่ละระลอกไรด์	120

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
62	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับปริมาณของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	121
63	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่าง กับปริมาณของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	126
64	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับปริมาณของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	131
65	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า	135
66	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี	136
67	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี	138
68	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี	140
69	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู อายุ 1 ปี	142
70	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู อายุ 2 ปี	144
71	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู อายุ 3 ปี	146
72	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับปริมาณของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	154
73	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับปริมาณของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	159

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับปริมาณของเมทิลลีนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	164
75	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า	168
76	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี	169
77	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี	170
78	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี	171
79	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู อายุ 1 ปี	172
80	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู อายุ 2 ปี	173
81	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่หมาจู อายุ 3 ปี	174
82	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	181
83	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	185
84	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	190
85	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า	194

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
86	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่ตง อายุ 1 ปี	195
87	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่ตง อายุ 2 ปี	196
88	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่ตง อายุ 3 ปี	197
89	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี	198
90	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี	199
91	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี	200
92	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	207
93	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	211
94	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ	216
95	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า	220
96	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่ตง อายุ 1 ปี	221
97	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่ตง อายุ 2 ปี	222

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
98	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่ตง อายุ 3 ปี	223
99	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี	224
100	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี	225
101	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของถ่าน ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี	226
102	แสดงปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลล์ูลอส	233

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
K	=	เคลวิน
m	=	เมตร
cm	=	เซนติเมตร
mm	=	มิลลิเมตร
μm	=	ไมโครเมตร
nm	=	นาโนเมตร
$\text{\AA}$	=	อังสตรอม
pm	=	พิโคเมตร
kg	=	กิโลกรัม
g	=	กรัม
mg	=	มิลลิกรัม
l	=	ลิตร
ml	=	มิลลิลิตร
m^2	=	ตารางเมตร
$\text{\AA}^2$	=	ตารางอังสตรอม
m^2/g	=	ตารางเมตรต่อกรัม
$\text{\AA}^2/\text{g}$	=	ตารางอังสตรอมต่อกรัม
g/l	=	กรัมต่อลิตร
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/g	=	มิลลิกรัมต่อกรัม
mmol/g	=	มิลลิโมลต่อกรัม
dm^3/mg	=	ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อมิลลิกรัม
cm^3/mg	=	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อมิลลิกรัม
g/cm^3	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g/mol	=	กรัมต่อโมล
l/min	=	ลิตรต่อนาที
ml/min	=	มิลลิลิตรต่อนาที

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

J	=	จูล
$\text{kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	=	กิโลจูลต่อโมลเคลวิน
$\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	=	จูลต่อโมลเคลวิน
kJ mol^{-1}	=	กิโลจูลต่อโมล
N/m	=	นิวตันต่อเมตร
$\text{N}^{-1} \text{ m}^{-1}$	=	ต่อนิวตันเมตร
cm^{-1}	=	ต่อเซนติเมตร

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงและไผ่หมาจู[†]

Preparation and Characterization of Activated Carbon from *Dendrocalamus asper* Backer and *Dendrocalamus latiflorus*

คำนำ

เนื่องจาก ปัจจุบันมีมลสารที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ และปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียมากมาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และส่งผลถึงสุขภาพอนามัยของมนุษย์ รวมทั้งการสะสมในแหล่งน้ำ ดินตะกอน และห่วงโซ่อาหาร เมื่อมนุษย์กินพืชหรือสัตว์ที่มีมลสารปนเปื้อน มลสารเหล่านั้นก็จะเข้าสู่ร่างกาย และสะสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จนถึงในระดับหนึ่งมนุษย์ก็จะป่วยเป็นโรคอันเนื่องมาจากพิษของมลสารเหล่านั้น เช่น โรคมินามาตะ โรคอิไต-อิไต อันเป็นผลมาจากการสะสมของโลหะปรอท และโลหะแคดเมียม ตามลำดับ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมหลายประเภทมีมลสาร เช่น โลหะหนัก สีย้อม ปนออกมากับของเสียอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสีย มูลฝอย หรือกากตะกอนต่างๆ จึงทำให้น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีมลสารปนเปื้อนอยู่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสี ซึ่งมีโลหะหนักเป็นส่วนผสมในเม็ดสี ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี นิกเกิล โคบอลต์ โครเมียม แคดเมียม และปรอท เป็นต้น ซึ่งโลหะเหล่านี้จะปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิต หากไม่มีการกำจัดที่ดีพอโลหะหนักเหล่านี้ก็จะปนเปื้อนไปกับน้ำทิ้งซึ่งปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะในขั้นสุดท้าย

การใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดหรือกำจัดมลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยอาศัยการดูดซับ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ซึ่งใช้เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) เป็นวัสดุที่มีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศเพราะแม้ประเทศไทยจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้ แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ จากข้อมูลของกรมศุลกากรในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทย นำเข้าถ่านกัมมันต์ถึง 4,802,834 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 204,881,304 บาท และเพิ่มขึ้นเป็น 5,658,602 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 263,223,505 บาท ในปี พ.ศ. 2549 (กรมศุลกากร, 2550)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและมีมากในธรรมชาติ คือ ไม้ไผ่ กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป โดยไม้ไผ่ที่นำมาศึกษามี 2 พันธุ์ คือ ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper* Backer) และไผ่หมาจู (*Dendrocalamus*

latiflorus) เพื่อศึกษาถึงสมบัติและประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่ในการดูดซับ โลหะหนัก สีย้อม และสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นการนำวัสดุที่มีมากในธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะและปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง (*Dendrocalamus asper Backer*) และไผ่หมาจู (*Dendrocalamus latiflorus*) โดยวิธีทางเคมี
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้
3. ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยศึกษาจากการดูดซับแคดเมียม(II) ฟีนอล เมทิลลีนบลู และไอโอดีน
4. ศึกษาปริมาณของกรดอินทรีย์ที่มีในน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากการเผาไผ่ตง และไผ่หมาจู

การตรวจเอกสาร

1. สารดูดติดผิว

การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊ส ให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้ จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือ คอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent

สารดูดติดผิวหรือสารดูดซับ (adsorbent) คือ สารที่สามารถดูดโมเลกุลต่างๆมาติดผิวได้ ซึ่ง อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char) แอคติเวทเต็ดซิลิกา (activated silica) ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $50 - 200 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ สามารถจับ โมเลกุลได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดผิวประเภทอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2.2 ถ่านกัมมันต์ หรือแอคติเวทเต็ดคาร์บอน (activated carbon) สารดูดติดผิวชนิดนี้อาจ จัดว่าเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $600 - 1,000 \text{ m}^2/\text{g}$

2.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) ชนิดพิเศษสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ เรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $300 - 500 \text{ m}^2/\text{g}$ (ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์) แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่า คือ สามารถปรับคืนสภาพ (regenerate) ได้ง่ายกว่ามาก และสารที่ใช้ในการปรับคืนสภาพ (regenerant) มักเป็นสารที่ราคาถูก เช่น กรดเกลือ

2. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก (microporous structure) เมื่อศึกษาด้วยวิธีการเลี้ยวเบนเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction) จะพบว่าโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือ แกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง เพราะมีผิวเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก และมีความว่องไวในการดูดซับสูง

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้รูพรุนหรือโครงสร้างภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม (angstrom: Å) ถึง 20,000 Å ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูง และมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) สูงด้วยเช่นกัน การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์กระทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดไว้ วิธีวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์อาจกระทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน (iodine number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ลักษณะของสารดูดซับ (nature of adsorbate) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อุณหภูมิ (temperature) และเวลาในการสัมผัส (contact time) เป็นต้น

2.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ คือ

2.1.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. เคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับฟิวลาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. ฟิสิกส์ (physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดส์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2.1.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนบนฟิวลาร์บอน

ก. ขนาดเล็ก (micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 nm มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (transitional pores or mesopores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15 – 100 nm มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic reaction)

ค. ขนาดใหญ่ (macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 nm มักใช้ในการฟอกสี และผลิตยา

2.1.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ก. ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

ข. ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดแก๊สพิษ หรือไอระเหย

2.1.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. ตัวดูดซับแก๊ส (gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือถ่านไม้ที่เผาด้วยความดันสูง

ข. ตัวดูดซับสี (colour adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้เผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านได้จากถ่านไม้ ถ่านขาน้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากถ่านหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล

ค. ตัวดูดซับโลหะ (metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยก ทอง เงิน แพลทินัม และแร่

2.1.5 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

ก. ชนิดผง (powder) มีลักษณะเป็นผง ที่ร่อนผ่านร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร (μm) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Water Works Association (AWWA) แสดงดังตารางที่ 1

ข. ชนิดเม็ด เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านร่อนขนาด 150 μm ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

1) แบบมีรูปร่างแน่นอน (pellet) ขึ้นอยู่กับการอัดผ่านเครื่องอัด ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ และใช้ทำหน้ากักป้องกันแก๊ส และไอพิษต่างๆ

2) แบบมีรูปร่างไม่แน่นอน (granular) ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์

ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดตาม
มอก. 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ AWWA แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)	0.20 – 0.75

ที่มา: มอก. (2547)

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8
ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3) ไม่น้อยกว่า	0.36
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70

ที่มา: มอก. (2547)

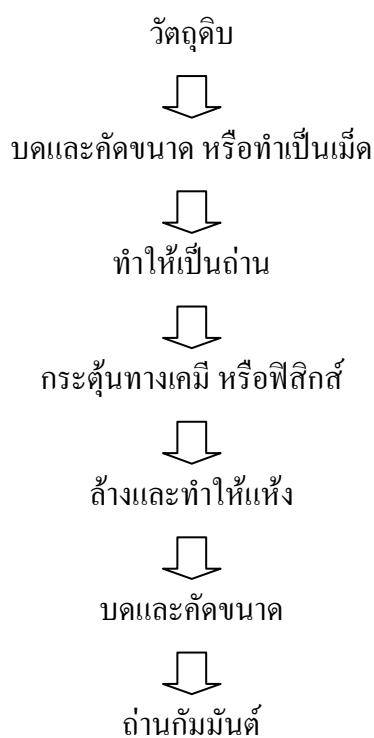
2.1.6 แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่าง เมื่อละลายน้ำ

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ละลายน้ำแล้วมีสมบัติเป็นกรด ส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl)

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ละลายน้ำแล้วมีสมบัติเป็นด่าง ส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว ได้แก่ ฟีนอลิก (phenolic) และคาร์บอกซิลิก (carboxylic)

2.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ (processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนทำให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนเซชัน และขั้นตอนการกระตุ้น



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น จี๊เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ถ่านหิน และพีท เป็นต้น การผลิตถ่านกัมมันต์ อาจเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือ เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนเซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่ถ้าวัตถุดิบมีความแข็ง และเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนเซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้ (บุญชัย, 2536)

นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากระบวนการคาร์บอนไนเซชัน มาผสมกับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง หรือฟุ้งกระจายได้ง่าย แล้วทำการอัดให้เป็นเม็ดก่อนที่จะนำไปทำการคาร์บอนไนเซชันต่อไป

2.2.2 การทำให้เป็นถ่าน หรือการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization)

การคาร์บอนไนเซชัน เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และแก๊ส อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น ทำได้ง่ายโดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C

คาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันควรมีลักษณะดังนี้ มีสีดำตลอด (uniformly black) ปราศจากฝุ่นและขี้เถ้า สารระเหยต่ำ มีความพรุนสูง ค่าคาร์บอนคงตัวสูง เป็นต้น

การคาร์บอนไนเซชันให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติดังต้องการ ทำได้โดยปรับสภาวะของปฏิกิริยาไพโรไลซิสให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ

ก. อุณหภูมิของการคาร์บอนในเซชัน

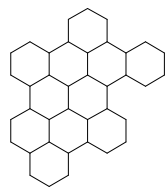
กระบวนการคาร์บอนในเซชัน เป็นการกลั่นสลายเพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆจำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือนกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา ดังภาพที่ 2 ส่วนโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง เช่น น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันาร์ และแก๊สต่างๆ

ข. อัตราการให้ความร้อน

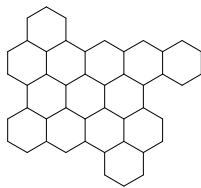
ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือจะได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยากระตุ้น ตัวกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

ค. ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

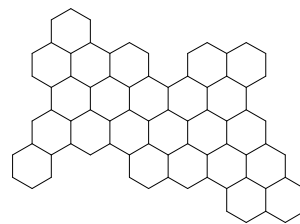
ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบตอปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า พบว่าการคาร์บอนในเซชันโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดไซ์-เบดจะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดไซ์เบด จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนในเซชันก็เพื่อให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัตถุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้น



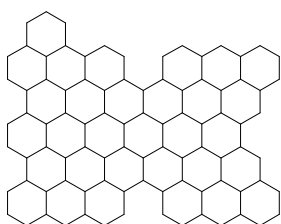
(a) 400 °C



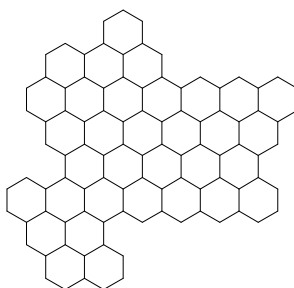
(b) 510 °C



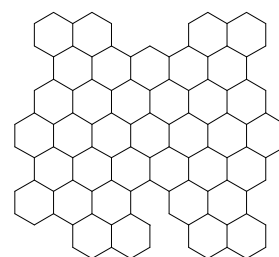
(c) 610 °C



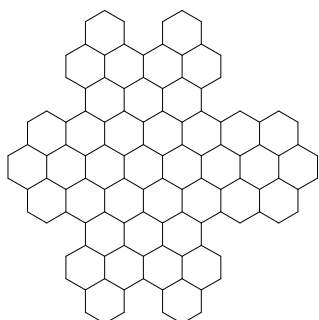
(d) 700 °C



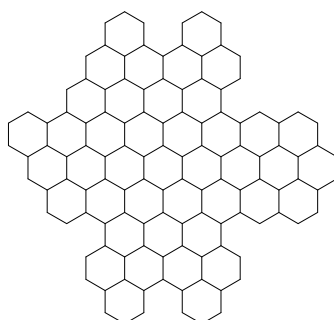
(e) 800 °C



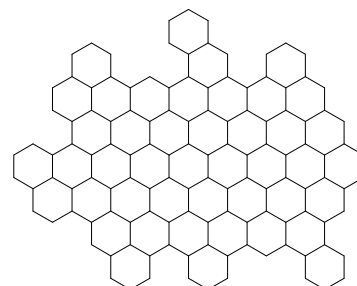
(f) 900 °C



(g) 1,000 – 1,100 °C



(h) 1,200 °C



(i) 1,300 °C

ภาพที่ 2 โครงสร้างการจัดเรียงคาร์บอนอะตอมเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เผา
ที่มา: Hassler (1974)

2.2.3 การกระตุ้น (activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น

Mukherjee *et al.* (1947) ได้ให้ความหมายของการถูกกระตุ้นไว้ 3 ความหมาย คือ

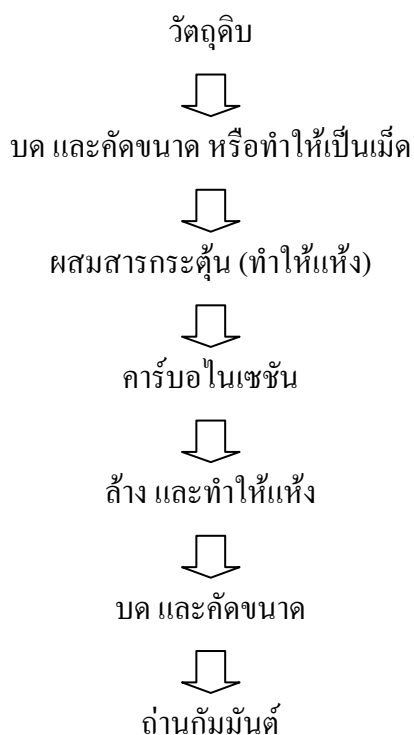
- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active surface area) โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว เป็นการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active centers)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด สาเหตุหนึ่งเนื่องจากว่าวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี และประสิทธิภาพในการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะ และชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ

ก. วิธีการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้น แสดงดังภาพที่ 3 และข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก ($400 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นแสดงในตารางที่ 3 สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

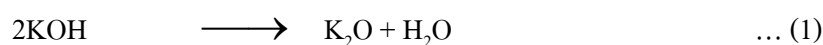
ตารางที่ 3 สารเคมี ที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดบอริก (H_3BO_3)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2)
กรดไนตริก (HNO_3)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)
กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)		โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (KSCN)
		แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)
		แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

ที่มา: wikipedia (2008b)

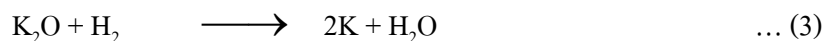
1) การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียมไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในวัตถุดิบ ปฏิกิริยาของการกระตุ้นถ่านด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูง แสดงดังนี้



สมการที่ 1 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ คาร์บอนในถ่านหินเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ดังสมการที่ 2

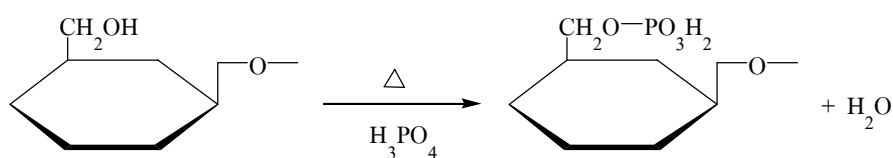
จากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Toshiro *et al.*, 1993)

2) การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

กรดฟอสฟอริกเป็นสารที่มีความสามารถในการทำละลายสูง ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุดิบได้อย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่ม พบว่าการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลนั้นทำให้โครงสร้างของเซลล์โลสเกิดความเสถียร และองค์ประกอบของฟอสเฟตยังทำให้โครงสร้างของเซลล์โลสเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างหลังจากการให้ความร้อน



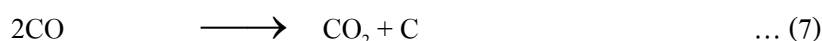
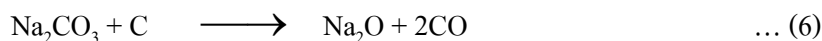
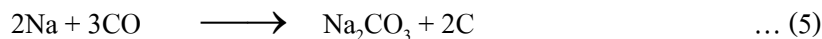
ภาพที่ 4 ปฏิกริยาระหว่าง เซลลูโลส กับ กรดฟอสฟอริก

ที่มา: ญัฐยา (2545)

3) การกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

เมื่อนำเอาวัสดุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของฟลักแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700°C โมเลกุลของน้ำ แก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกระตุ้นด้วยเกลือของโซเดียม มีดังนี้



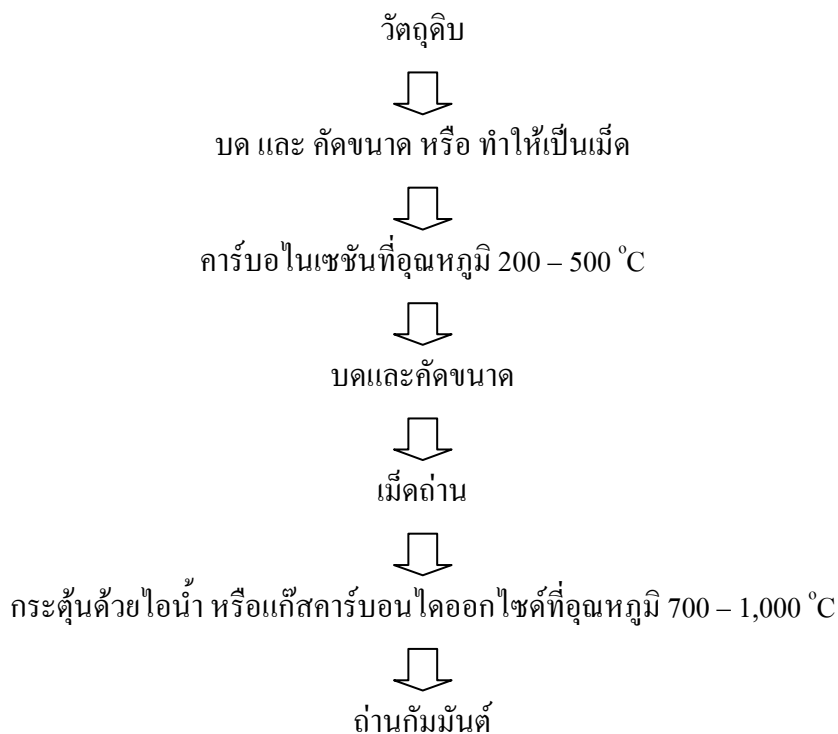
ข. วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดส์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) และอากาศ (air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน การกระตุ้นอาจอาศัยความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง $1,200^\circ\text{C}$ แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดส์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊ส คือ (Hassler, 1967)

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- สมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี ($700 - 1,200^\circ\text{C}$) ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

จากการกระตุ้นถ่านชาร์ พบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำให้ผลดีกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าการกระตุ้นด้วยอากาศ การกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิสูงพอที่จะให้เกิดการออกซิไดส์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 1,000 °C เพราะจะลดคุณสมบัติการดูดซับ การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้อุณหภูมิ 800 – 900 °C ส่วนการกระตุ้นด้วยอากาศ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C

กระบวนการกระตุ้น คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดส์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากผิวคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนในเซชันประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมาก เกิดช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูที่ถูกอุดไว้ พร้อมทั้งสร้างรูใหม่ขึ้นมาด้วย

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน แก๊สออกซิไดส์ที่ถูกนำเข้ามาอบผิวของอนุภาคจะแพร่เข้าไปในรู ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดส์จะต่ำ เป็นผลให้ได้รูพรุนที่ต้องการช้า ที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าอัตราการแพร่ของตัวออกซิไดส์เข้าไปในอนุภาค ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่ผิวนอกของอนุภาค ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดรูพรุน

อัตราเร็วของกระบวนการออกซิเดชัน ขึ้นอยู่กับความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของถ่านกับตัวออกซิไดส์ ถ้าความว่องไวสูงก็จะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำ พบว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันถ่านหินบิทูมินัส ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันถ่านหินแอนทราไซต์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดส์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และแก๊สออกซิเจน พบว่า แก๊สออกซิเจนจะมีความสามารถสูงที่สุด โดยที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถต่ำที่สุด

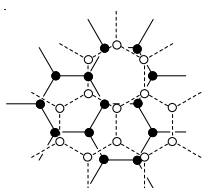
2.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.3.1 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

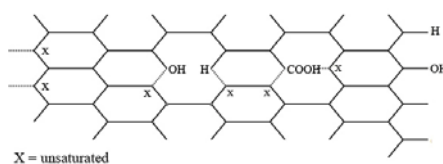
ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ผลึกแกรไฟต์ประกอบด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะโควาเลนต์กับอีก 3 อะตอมในระนาบ (plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ระยะห่างระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 Å อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) แต่ละระนาบห่างกัน 3.354 Å การสลับตำแหน่ง (displacement) ในทิศทางขนานกับชั้น (layer) ของคาร์บอน จะเกิดง่ายเพราะแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย

เมื่อศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย โครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเลี้ยวเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันใน แนวราบ การจัดเรียงตัวของผลึกเล็กๆจะมีทิศทางไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอนไ- เซชัน ผลึกเล็กๆนี้ มีความสูงประมาณ 9 – 12 Å เส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัดกว้างประมาณ 20 – 30 Å ประกอบด้วยระนาบของชั้นแกรไฟต์ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9 เท่า ของความกว้างของ อะตอมคาร์บอนรูปหกเหลี่ยม (ภาพที่ 6)

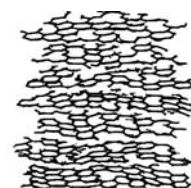
โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ได้มีการพยายามแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามโครงสร้างของผลึก ตัวอย่างเช่น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โครงสร้างที่เปลี่ยนเป็นแกรไฟต์ง่าย (easily undergoing graphitization) ที่อุณหภูมิสูง และ โครงสร้างที่เปลี่ยนเป็นแกรไฟต์ได้เพียงเล็กน้อย (ที่สถานะ เดียวกัน) (undergoing graphitization to a small degree) ดังภาพที่ 7 และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ที่ใช้กันทั่วไป แสดงดังตารางที่ 4



ที่มา: Suzuki (1990)

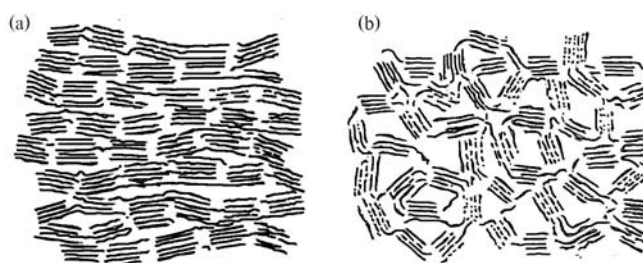


ที่มา: Berl (1938)



ที่มา: Mattson and Mark (1971)

ภาพที่ 6 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 7 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เป็นแกรไฟต์ง่าย (a) กับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์ เล็กน้อย (b)

ที่มา: Jankowska *et al.* (1991)

2.3.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียองค์ประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น

เมื่อพิจารณาผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้อยู่ลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ ที่ความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางอาจมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี เป็นต้น

Dubin (1966) ได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกเป็น

ก. แมโครพอร์ (macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 500 Å ปริมาตรอยู่ระหว่าง $0.2 - 0.8 \text{ cm}^3/\text{g}$ พื้นที่ผิวไม่เกิน $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

ข. มีโซพอร์ (mesopores) หรือทรานซิชั่นนัลพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 20 – 500 Å ปริมาตรอยู่ระหว่าง $0.1 - 0.5 \text{ cm}^3/\text{g}$ พื้นที่ผิว 20 – 100 m^2/g ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gels) อะลูมินาเจล (alumina gels) อะมิโนซิลิเกตคะตะลิสต์ (aminosilicate catalyst)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์บางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ลักษณะสมบัติ	ชื่อการค้า			
	Darco	Calgon	Westvaco	
	GAC	Filtrisorb	Nuclar	Witco
	20 - 40	300	WV-L	517
	mesh	(8 x 30)	(8 x 30)	(12 x 30)
พื้นที่ผิว, m^2/g (BET)	650	950 – 1,050	1,000	1,050
ความหนาแน่นปรากฏ, g/cm^3	0.40	0.48	0.48	0.48
ความหนาแน่นของการไหลย้อนกลับ, lb/ft^3	22.5	26	26	30
ความหนาแน่นจริง, g/cm^3	*	2.1	2.1	2.1
ความหนาแน่นของอนุภาค, g/cm^3	*	1.3 – 1.4	1.4	0.92
ขนาดประสิทธิภาพ	0.5	0.8 – 1.0	0.85 – 1.05	0.89
สัมประสิทธิ์ความคงตัว	1.3	< 1.9	< 1.8	1.44
ปริมาตรโพรง	0.95	0.85	0.85	0.60
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, mm	0.7	1.5 – 1.7	1.5 – 1.7	1.2
ร้อยละสูงสุดเมื่อผ่านตะแกรงร่อน				
ใหญ่กว่าเบอร์ 8 (%)	-	15	8	-
ใหญ่กว่าเบอร์ 12 (%)	10	-	-	5
เล็กกว่าเบอร์ 30 (%)	-	4	5	5
เล็กกว่าเบอร์ 40 (%)	5	-	-	-
ไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)	600	900	950	1,000
แอมบราชันนัมเบอร์	*	78	70	85
เถา (%)	0.4	8	7.5	0.5
ความชื้นสูงสุด (%)	12	2	2	1

* = ไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

- = ไม่มีถ่านที่ผ่านตะแกรงร่อน

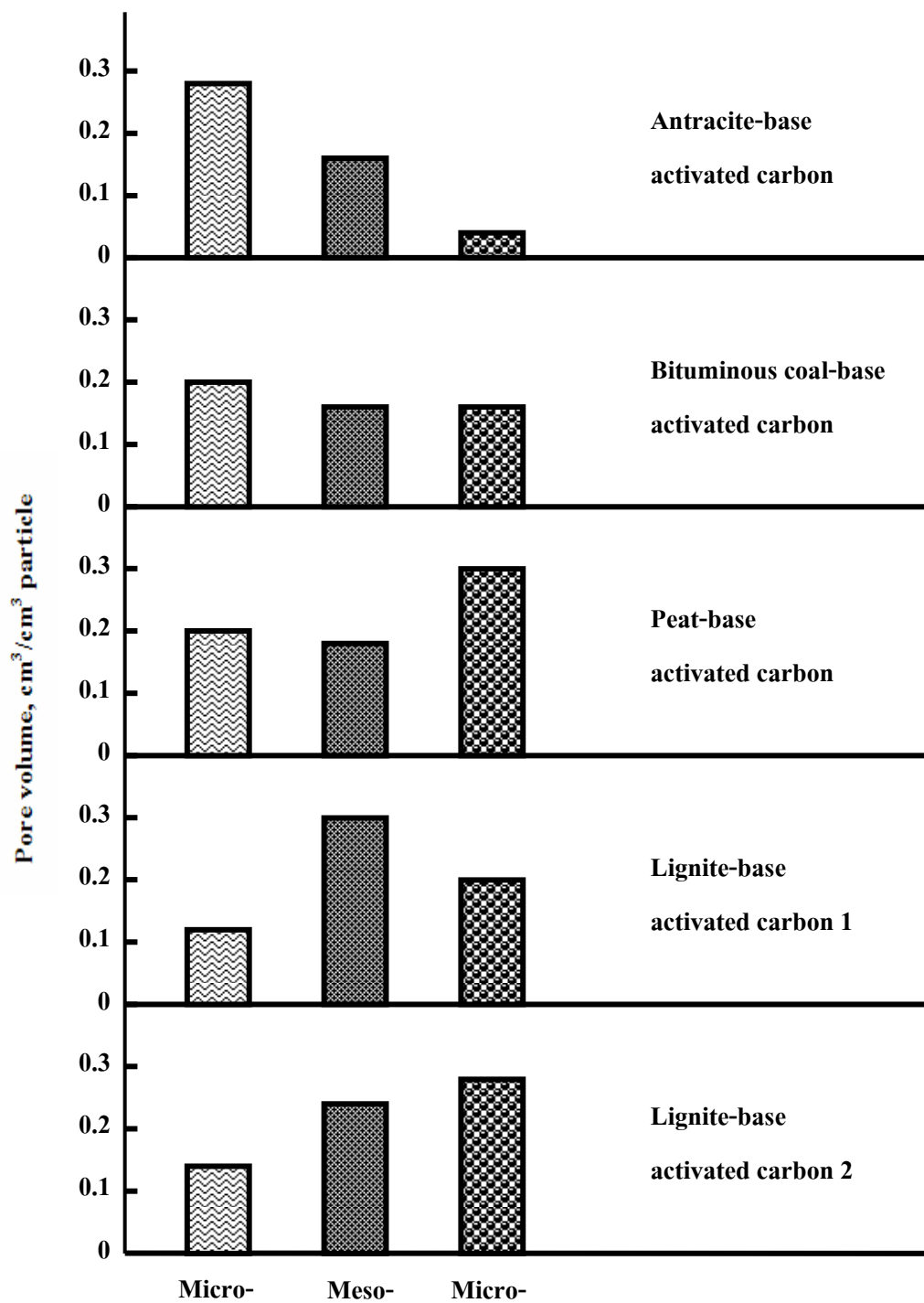
ที่มา: Reschem (2008)

ก. ไมโครพอร์ (micropores) ขนาดรัศมีน้อยกว่า 20 Å ปริมาตร $0.2 - 0.6 \text{ cm}^3/\text{g}$ พื้นที่ผิวจำเพาะมาก โดยมีค่ามากถึง $1,500 \text{ m}^2/\text{g}$ ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (zeolite)

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ $200 - 300 \text{ cm}^3/\text{g}$ สำหรับรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีผลต่อการดูดซับ จะมีประมาณร้อยละ 90 – 95 ของพื้นที่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าบริเวณผิวของถ่านเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่ก็มีโอกาสที่จะหลุดออกง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันบริเวณผิวถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า $400 - 500^\circ\text{C}$ และพวกออกไซด์ของด่าง ซึ่งพบมากในถ่านที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ $800 - 1,000^\circ\text{C}$

2.3.3 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงอะโรมาติก (aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและมีช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆที่ได้จากการเผาผลาญ ออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบ และวิธีผลิตที่ใช้
ที่มา: Bansal *et al.* (1988)

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงหกเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์เกิดการดูดซับทางเคมี (chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 – 500 °C และกลายสภาพเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 °C และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนีย และซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมฮาโลเจน (halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน หรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

- ก. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น
- ข. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาดของโมเลกุล ประจุไฟฟ้าของโมเลกุล และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น
- ค. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย
- ง. สมบัติของสารละลาย เช่น ค่าความเป็นกรด่าง อุณหภูมิ เป็นต้น
- จ. ระยะเวลาในการดูดซับ

2.3.5 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละอุตสาหกรรมจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

ก. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับแก๊สหรือไอ

- ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหาร และที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ
- ใช้แยกเบนซีน (benzene) ออกจากแก๊สอุตสาหกรรม
- ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดย ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
- กำจัดสิ่งเจือปนออกจากแก๊ส เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน อีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
- กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ (organic sulfur) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสิ่งเจือปนอื่นๆจากโรงงานอุตสาหกรรม
- กำจัดกลิ่นในอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง

ข. ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ใน

อุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกเอาสบู่ และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
- แยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เกลาติน น้ำส้ม เพ็กติน ซ็อกโกแลต น้ำผลไม้ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำอัดลม เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้ได้เครื่องดื่มที่มีรสชาติดีขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยาและเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (streptomycin) คาเฟอีน (caffeine) โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate) รวมทั้งกรดต่างๆ
- ใช้ในการกำจัดสีร สี และกลิ่น ในน้ำดื่ม นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst carrier) เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation)

- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮดรอกซิลอะมิโนฟีนีลอะซินิกแอซิด (hydroxyl aminophenylarsonic acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบา และพาราไซค์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่กินยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีแก๊สมากในกระเพาะอาหารอีกด้วย

3. การดูดซับ (adsorption)

3.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวดำ (low surface free energy) จะถูกดูดซับได้ดีในเวลาที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงกว่า (higher surface free energy) จะไม่ถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานอิสระที่ผิวของตัวถูกดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (surface tension) และพื้นที่ผิว (surface area) ดังนี้

$$G_{sf} = \gamma A \quad \dots (8)$$

เมื่อ G_{sf} เป็นพลังงานอิสระที่ผิว (J)

γ เป็นแรงตึงผิว (N/m)

A เป็นพื้นที่ผิว (m^2)

เมื่อความตึงผิวหรือพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานซึ่งจะเป็น ΔS_{sf} ความตึงผิวของของเหลว คือ แรงตึงผิวต่อหน่วยความยาว (ตั้งฉากกับแรง) ที่ถูกแรงนี้กระทำ ปกติแรงตึงผิวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ $0^\circ C$ น้ำจะมีความตึงผิวเท่ากับ $75.6 \times 10^{-3} N \cdot m^{-1}$ และที่ $20^\circ C$ น้ำจะมีความตึงผิวเท่ากับ $72.8 \times 10^{-3} N \cdot m^{-1}$ ความตึงผิวของของเหลวเป็นค่าเฉพาะของของเหลวชนิดนั้น เช่น แรงตึงผิวของปรอทที่ $20^\circ C$ มีความตึงผิวเท่ากับ $456 \times 10^{-3} N \cdot m^{-1}$ ซึ่งแตกต่างจากค่าความตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน การดูดซับจะเกิด

ได้ ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาอาจเป็นโมเลกุลของแก๊ส หรือตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับของแก๊สหรือตัวถูกละลายในสารละลายจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของแก๊สในสถานะแก๊สกับโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็ง หรือเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของตัวละลายในสารละลายกับโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของแข็ง

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงดูดโมเลกุล หรือคอลลอยด์ ซึ่งอาจอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะและติดบนผิว ถือได้ว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสารระหว่างสถานะต่างๆ ทั้ง 3 สถานะ ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง

สำหรับการดูดซับ หรือ การเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็ง เกิดขึ้นในสองลักษณะด้วยกัน คือ

ก. การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (lyophobicity of solute)

ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะพยายามแทรกตัวอยู่ระหว่างน้ำกับของแข็ง และดูดติดที่ผิวของของแข็งในที่สุด

ข. ความชอบของตัวถูกละลายที่จะไปเกาะติดที่ผิวของของแข็ง (high affinity of solute to solid) โดยในการเกาะติดจะมีแรงอยู่ 3 แบบ ดังนี้

- แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attraction force) มีลักษณะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนที่มีประจุ จะไปแลกเปลี่ยนติดกับโมเลกุลของสารอื่นได้ พวกไดวาเลนต์ (divalent) จะดูดซับที่ผิวของวัตถุอื่นได้ดีกว่าพวกโมนวาเลนต์ (monovalent)
- แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ จะมีลักษณะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) โดยตัวถูกละลายจะไม่เลือกเกาะติดที่ส่วนใดส่วนหนึ่ง แต่สามารถเกาะติดได้อย่างอิสระ และ เคลื่อนที่ได้ในระหว่างผิวของสารทั้งสอง บางครั้งเรียกได้ว่าเป็นการดูดซับในอุดมคติ (ideal adsorption) การดูดซับแบบนี้ เกิดขึ้นได้ดีในที่มีอุณหภูมิต่ำ

- ธรรมชาติทางเคมี (chemical nature) คือตัวถูกดูดซับจะเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดได้ดีในที่ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกชื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ว่า chemical adsorption, activated adsorption หรือ chemisorptions การดูดซับในลักษณะนี้ ตัวถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระหว่างผิวของสารทั้งสอง และเป็นได้เฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

การดูดซับ เป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลว หรือ แก๊ส โดยให้สารละลายหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยกลไกการดูดซับมี 2 ประเภท

3.1.1 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เป็นผลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวของสารประกอบทางเคมี การดูดซับแบบนี้ จะอาศัยการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ โดยมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของทั้งสองฝ่าย มีความร้อนเกิดขึ้นสูง จากการศึกษาโดยอาศัยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (electron spin resonance) และ วัดค่าแมกเนติกซัสเซพทิบิลิตี (magnetic susceptibility) สามารถยืนยันได้ว่ามีการดูดซับทางเคมี โดยเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60 – 70 kJ/mol การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถถูกดูดซับอยู่บนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monomolecular layer) และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง กล่าวคือ จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้น และการดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดผกผันกลับได้ (irreversible) หรือผกผันกลับได้แต่น้อยมาก ใช้เวลาการดูดซับนาน นั่นคือ เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะไม่มีสารหลุดออกมา หรือ ถ้าหลุดออกมาก็อาจทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยาก และมักมีการเปลี่ยนรูปไป จากการศึกษาถ้าจะให้เกิดการผกผันกลับทำได้โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซับเพื่อขจัดตัวถูกดูดซับให้หลุดออกไปได้

3.1.2 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนๆ ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยกว่า 50 kJ/mol การดูดซับทางกายภาพนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบชั้นเดียวที่ความดันต่ำ และเป็นแบบหลายชั้น (multimolecular layers) ที่ความดันสูง หรือตัวถูกดูดซับ อาจเกิดการดูดซับในลักษณะของการดูดซับแบบหลายชั้นซ้อนกัน (superimpose layers) บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร จะเกิดการผันกลับได้ง่าย (reversible) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางเคมี หรือถึงสภาวะสมดุลได้เร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น (activation energy) เหมือนการดูดซับทางเคมี ยกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กมากจะทำให้อัตราการดูดซับช้าลง การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจง กล่าวคือ สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้โดยง่าย เช่น อาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ ลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อยหรือคายสารที่ดูดซับออกมา (desorption) การปลดปล่อยดังกล่าวจะไม่มีผลทำให้ตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงแต่ประการใด การดูดซับจะไม่ทำให้ตำแหน่งเฉพาะที่ทำหน้าที่ดูดซับหมดไป ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดประเภทแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงดึงดูดระหว่างขั้วมากกว่าการเกิดพันธะ

3.2 ขั้นตอนของการดูดซับ

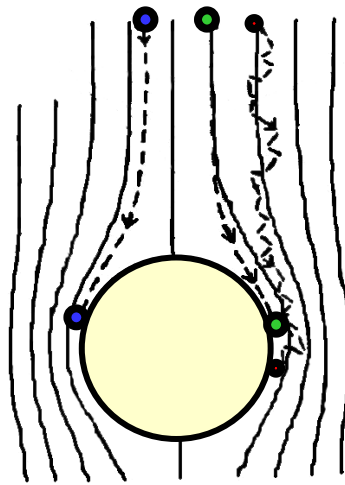
ขั้นตอนของการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอยเข้าหาด่านกัมมันต์ (ตามภาพที่ 9)

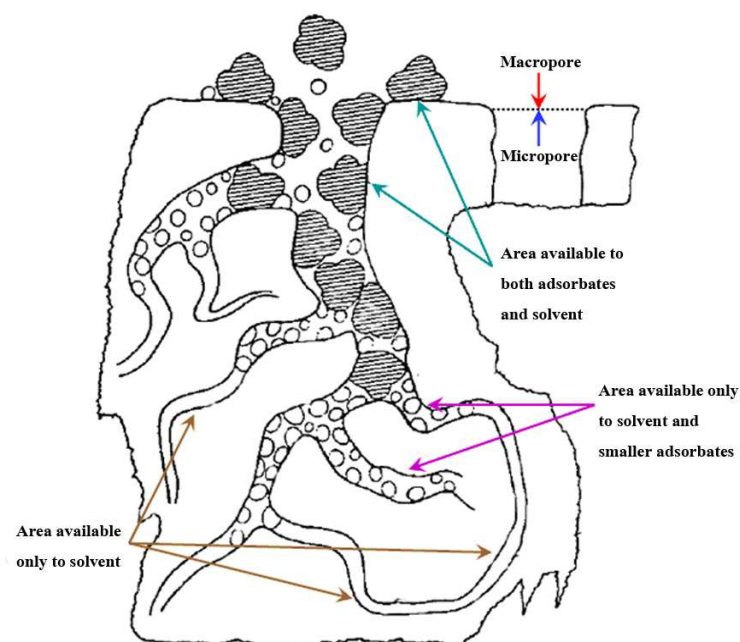
ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน film diffusion เมื่อโมเลกุลของสารแขวนลอยเข้ามาถึงด่านกัมมันต์ ซึ่งโดยปกติแล้วด่านกัมมันต์นี้จะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบ คล้ายเชือกบางๆ โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปในผิวด่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอน Pore diffusion เนื่องจากสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยูที่โพรง หรือช่องว่างภายใน (พิจารณาภาพที่ 10) โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของถ่านกัมมันต์ให้ได้ โดยขนาดของโมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องมีขนาดเล็กกว่า หรือพอดีกับขนาดของรูพรุน จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 9 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์
ที่มา: Yao (1971)



ภาพที่ 10 ภาพแสดงถึงโพรง หรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์

ที่มา: Culp G.L. and Culp R.L. (1974)

3.3 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ จะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล และหยุด ณ จุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดซับ (มันสิน, 2539) มีดังต่อไปนี้

3.3.1 การถูกรบกวนของน้ำ

อัตราเร็วของการดูดซับ อาจขึ้นกับการส่งผ่านโมเลกุลของสารดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับ หรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวน และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมี

ความปั่นป่วนสูง จนทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวถูกดูดซับเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

3.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ หมายความว่า สารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับ โมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ในการดูดซับน้อย

3.3.3 ขนาดของตัวถูกดูดซับ

ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้

3.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับ โมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากรน้ำ และไปติดอยู่บนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำหรือแตกตัวเป็นไอออนย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างหนาแน่น ยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม เหตุผลนี้ก็ไม่ได้จริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะติดผิวของตัวดูดซับ

3.3.5 อุณหภูมิของระบบ

ในการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิเนื่องจาก

ก. กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายพลังงานความร้อน (exothermic) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ข. อุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกละลาย สำหรับตัวถูกละลายบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกละลายประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ แต่มีตัวถูกละลายบางชนิด เช่น นอร์มอลบิวทานอล มีค่าการละลายในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถของตัวถูกละลายประเภทหลังนี้จะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ

3.3.6 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลาย

ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย มีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับ และโมเลกุลของตัวถูกละลายซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่างๆ มีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าที่ผิวของตัวดูดซับ ประกอบด้วยกลุ่มแตกตัวได้อย่างน้อย 2 ชนิด แสดงตามสมการที่ 9 และ 10



เมื่อ S^+ เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นกรด
 S^- เป็นตำแหน่งบนผิวตัวดูดซับที่มีความเป็นเบส

ความหนาแน่นของประจุที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันตามปริมาณ S^+ และ S^- ที่มีอยู่ โดยเมื่อค่าความเป็นกรดต่างสูงจะมีปริมาณ S^- มากกว่า S^+ ดังนั้นจึงมีประจุลบที่ผิวตัวดูดซับ ส่วนที่ค่าความเป็นกรดต่ำจะมีปริมาณ S^+ มากกว่า S^- ดังนั้นที่ผิวตัวดูดซับจึงมีประจุเป็นบวก

3.3.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

3.3.8 ตัวทำละลาย

อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นมาจาก

- ก. แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
- ข. แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ซึ่งจะเป็นแบบใด ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลาย และตัวดูดซับ
- ค. แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับผิวของตัวดูดซับ

มีการทดลองที่แสดงว่าโมเลกุลของตัวทำละลายสามารถถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับได้ ในกรณีที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ถ้าผิวของสารดูดซับและโมเลกุลของตัวทำละลายมีความเป็นขั้วมาก เดอโบร์ (De Boer) ได้แสดงลำดับความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลของกรดลอริก (lauric acid) บนผิวอะลูมินา เมื่อใช้ตัวทำละลายต่างๆ ดังนี้ เพนเทน > เบนซีน > ไดเอทิลอีเทอร์ (pentane > benzene > diethyl ether) จะเห็นว่าเมื่อความเป็นขั้วของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลของกรดลอริก บนผิวอะลูมินาลดลง เนื่องจากเกิดการดูดซับของโมเลกุลบนตัวทำละลายเหล่านี้บนผิวอะลูมินาแทน และจะเกิดการดูดซับได้ดี เมื่อความเป็นขั้วของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น

3.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกละลาย และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายกับความดัน หรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอร์ม

(isotherm)” ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดย นักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรือ อาจ เรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มี ความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับ ทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้ การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้ จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

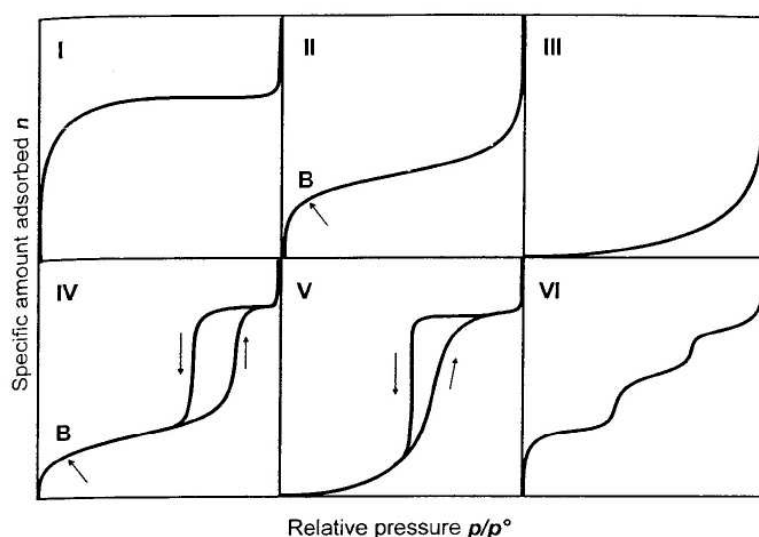
Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกแก้ว ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2 – 50 nm) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะ เหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารี สามารถนำมาคำนวณหา

การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นผิว ที่ค่อนข้างคล้ายกัน (uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ที่มา: Department of Chemistry. Surface Analysis Facility. University of Oxford. (1990)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สบนผิวของแข็งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ดูดซับ กับ ความดันของแก๊สที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ส่วนกรณีการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็ง จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณที่ถูกดูดซับ กับ ความเข้มข้นของสารละลาย ที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ โดยทั่วไปปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับในรูปของโมเลกุลบนสารดูดซับ 1 กรัม จากสารละลาย อาจคำนวณได้ จากสมการ

$$a = \frac{(C_0 - C_1)V}{m} \quad \dots (11)$$

- เมื่อ a เป็นจำนวนโมลของตัวถูกดูดซับ บนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม (mg/g)
 C_0 เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/l)
 C_1 เป็นความเข้มข้นสุดท้ายของตัวถูกดูดซับ (mg/l)
 V เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ (l)
 m เป็นมวลของตัวดูดซับ (g)

หากพิจารณาที่สภาวะสมดุล สามารถเขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad \dots (12)$$

- เมื่อ q_e เป็นจำนวนมวลของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล บนตัวถูกดูดซับหนัก 1 กรัม (mg/g)
 C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/l)

3.4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่ง (adsorption site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับ จะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{X}{m} = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots (13)$$

เมื่อ q_e เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ หนัก 1 กรัม (mg/g)

X เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ (mg)

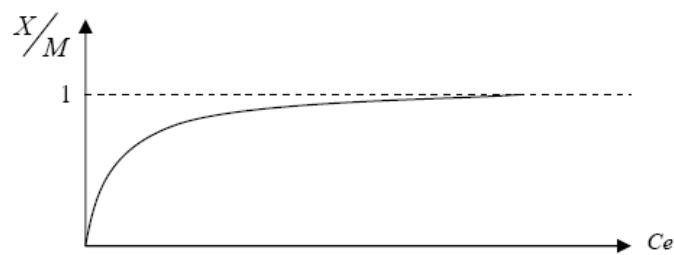
m เป็นปริมาณตัวดูดซับ (g)

C_e เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)

Q^0 เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว (mg/g)

b เป็นค่าคงตัวที่อุณหภูมิหนึ่งๆ (l/mg)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ C_e จะได้ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์

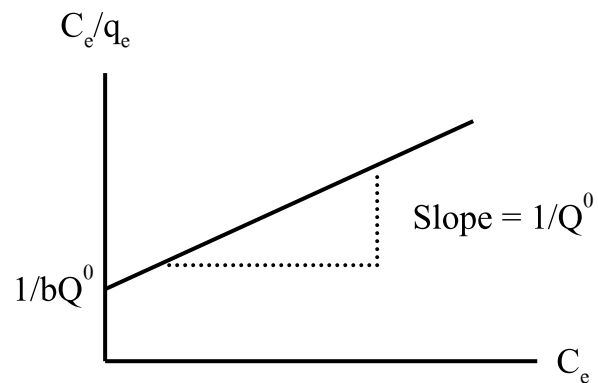
ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

หรือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad \dots (14)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนเป็น

$\frac{1}{bQ^0}$ และมีความชัน เท่ากับ $\frac{1}{Q^0}$ ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์
ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

3.4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดย ฟินเลย์ ฟรอยด์ลิช (Findlay Freundlich) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (rough surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของสมการฟรอยด์ลิช คือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการ

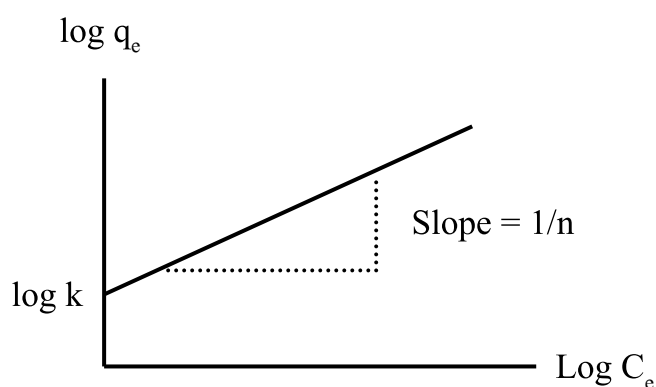
$$q_e = \frac{X}{m} = kC_e^{1/n} \quad \dots (15)$$

- เมื่อ q_e เป็นปริมาณของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม (mg/g)
 X เป็นปริมาณของตัวถูกละลาย (mg)
 m เป็นปริมาณตัวดูดซับ (g)
 C_e เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)
 k เป็นค่าคงตัวที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
 n เป็นค่าคงตัวที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการของฟรอยด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots (16)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า k ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$ ก็สามารถหาค่า n ได้ ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งเป็นตัวอย่างไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ ($\log \frac{X}{m}$) และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ

ฟรอยด์ลิช

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

4. ไม้ไผ่

ไม้ไผ่ เป็นพืชชนิดหนึ่งที่รู้จักกันดีทั่วโลก มีความเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์มาเป็นพัน ๆ ปี โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศ เอเชีย-แปซิฟิก มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเกี่ยวข้องกับความเป็นอยู่ของคนในทุก ๆ ด้าน ตั้งแต่ ที่อยู่อาศัย อาหาร เครื่องกีฬา เครื่องดนตรี เครื่องมือเกษตรกรรม ตลอดจนเป็นเครื่องศิลปกรรมของคนแต่ละชาติ และรวมถึงวัตถุดิบในการอุตสาหกรรม และการสันถนาการหรือการใช้ประโยชน์ เพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ

4.1 ความสำคัญและลักษณะเด่น

ไม้ไผ่ จัดเป็นพืชอเนกประสงค์ชนิดหนึ่ง ที่มีความสัมพันธ์กับชีวิต และความเป็นอยู่ของคนไทยมาแต่โบราณ ส่วนของไม้ไผ่ที่ให้ประโยชน์แก่มนุษย์ คือ หน่อ และลำต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชาวชนบทที่รู้จักนำเอาลำไม้ไผ่มาใช้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัย หรือใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมในครัวเรือน ตลอดจนรู้จักการนำหน่อมาบริโภคในรูปแบบต่าง ๆ นอกจากนี้ไม้ไผ่ยังเป็นวัตถุดิบที่สำคัญชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ ไม้ไผ่เป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งหน่อไผ่ บางชนิดมีการพุ่งตัวได้สูงถึง 90 – 120 cm ภายในเวลา 24 ชั่วโมง มนุษย์รู้จักไม้ไผ่และการใช้ประโยชน์จากไม้ไผ่เป็นอย่างดีในขณะที่ยังขาดมาตรการในการอนุรักษ์ อีกทั้งการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับธรรมชาติของไม้ไผ่ และการจัดการทรัพยากรไม้ไผ่ยังเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องกระทำต่อไปในอนาคต เพื่อตอบสนองความต้องการทั้งทางตรง และทางอ้อมอย่างต่อเนื่องและถาวร

4.2 ลักษณะทั่วไป

ไม้ไผ่ มีลำต้นกลมและกลวงตรงกลาง มีข้อกระจายอยู่ทั่วไปเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่ลำต้น เส้นใยของลำไม้ไผ่จะประสานกันแน่น มีความเหนียว และมีแรงหยุ่นตัว ทำให้สามารถโค้งงอหรือตัดได้ตามต้องการ เปลือกหรือผิวของลำไม้ไผ่จะแข็งและเรียบเป็นมัน โดยปราศจากการตกแต่ง ไม้ไผ่แต่ละชนิดมีลักษณะภายนอกแตกต่างกันไป บางชนิดมีลักษณะเด่นที่แตกต่างจากชนิดอื่นอย่างชัดเจน แต่บางชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ทำให้เกิดอุปสรรคในการจำแนกพันธุ์ นอกจากนี้ยังพบว่า ไม้ไผ่เป็นพืชที่สามารถตอบสนองต่อสภาพ แดด ลม และฝนแปรพันธุ์ได้ง่าย ไม้ไผ่ชนิดเดียวกันขึ้นอยู่ในที่ที่มีสภาพทางภูมิศาสตร์ และปริมาณน้ำฝน แตกต่างกัน

จะมีลักษณะแตกต่างกันไป การจำแนกพันธุ์ไม้ไฟจึงต้องอาศัยลักษณะหลายประการประกอบกัน เช่น เหง้า (rhizome) ใบ (leaf) กาบหุ้มลำ (culm sheath) การแตกกิ่ง (branching) ตาข้าง (bud) หน่อ (shoot) ช่อดอก (inflorescence) ดอก (flower) และเมล็ด (fruit) เป็นต้น

4.3 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม

ไม้ไฟ เป็นพันธุ์ไม้เบิกนำที่สามารถบุกกรุกครอบครองพื้นที่ว่างเปล่าได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะพื้นที่ว่างที่เกิดจากการแผ้วถาง หรือเกิดไฟไหม้อยู่เป็นประจำ ทำให้เกิดป่าไฟขึ้นอย่างถาวรได้ ซึ่งมักเกิดเป็นป่าไฟชนิดเดี่ยวล้วน บริเวณกว้าง โดยมีไม้พื้นล่างขึ้นปะปนเพียงเล็กน้อย เช่น ป่าไผ่รวก ในท้องที่จังหวัดกาญจนบุรี ในสภาพป่าธรรมชาติ จะพบไม้ไฟขึ้นเป็นไม้ชั้นล่าง ในป่าชนิดต่าง ๆ เช่น ป่าดิบชื้น (wet evergreen), ป่าเบญจพรรณชื้น (moist deciduous), ป่าเบญจพรรณแห้ง (dry deciduous), ป่าดิบแห้ง (dry evergreen) และป่าดิบเขา (hill evergreen) การขึ้นอยู่ของไม้ไฟแต่ละชนิดพันธุ์ในท้องที่ต่าง ๆ กันนั้น เกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะภูมิประเทศ หรือลักษณะดิน เป็นต้น

4.4 ชนิดพันธุ์ การกระจายพันธุ์ และการใช้ประโยชน์

ไม้ไฟที่พบในประเทศไทย สามารถพบกระจายพันธุ์อยู่ในทั่วไปทุกภาค โดยเฉพาะป่าเบญจพรรณ หรือป่าผสมผลัดใบ (mixed deciduous forest) และขึ้นเป็นป่าไผ่ล้วน ซึ่งสามารถจำแนกลักษณะประจำสกุล, การกระจายพันธุ์, ลักษณะทั่วไป และการใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะไม้ไฟที่ได้นำมาทำการวิจัยเท่านั้น คือ

4.4.1 ไม้ตง

วงศ์ : *Gramineae*

สกุล : *Dendrocalamus*

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Dendrocalamus asper Backer*

ชื่อสามัญ : Sweet bamboo

ชื่อพื้นเมือง : ไม้ตง (ไทย) Bukawe (ฟิลิปปินส์) Rebong (สิงคโปร์)

Manh tong (เวียดนาม)



ภาพที่ 15 : แสดงลักษณะของไม้ตง (*Dendrocalamus asper Backer*)

ที่มา : โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดย มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
(2551ก)

ถิ่นกำเนิดและการแพร่พันธุ์ : สำหรับถิ่นกำเนิดเริ่มต้น คาดว่ากำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และ แพร่ไปทั่วทุกแห่งในเอเชีย โดยเฉพาะประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น

การใช้ประโยชน์ : ลำต้นใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ตะเกียบ และไม้จิ้มฟัน บางครั้งใช้เพื่อการก่อสร้าง หน่อมีรสอร่อย นิยมรับประทานสดหรือ ทำหน่อไม้กระป๋อง เพื่อส่งออกไปจำหน่ายในต่างประเทศ

ผลผลิตและการส่งออก : หน่ออ่อน ถือเป็นผลผลิตทางการค้าที่สำคัญของ
ไทย โดยในปี 1984 ไทยส่งออกหน่อไม้อ่อนถึงประมาณ 40,000 ตัน โดยราคาราย ประมาณ 2 – 8
บาท ต่อ กิโลกรัม

คุณสมบัติ :

ขนาดของเส้นใย : ยาว 3.78 nm เส้นผ่าศูนย์กลาง 19 μm และ หนา 6 μm

สารประกอบทางเคมี : โดยประมาณ ประกอบด้วย โฮโลเซลลูโลส

(holocellulose) ร้อยละ 53 เพนโตซาน (pentosans) ร้อยละ 19 ลิกนิน (lignin) ร้อยละ 25 และ
เถ้า (ash) ร้อยละ 3

ลักษณะทั่วไป :

ลำต้น : สูงประมาณ 20 – 30 m เส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 8 – 20 cm ความ
หนา 11 – 36 cm ลำต้นอ่อนจะมีขนสีน้ำตาลละเอียดคลุมหน่อเรียบ แต่ลำต้นมีสีเขียวปล้องยาว 40 –
50 cm ขี้นูน มีรากฝอย เนื้อหนา กิ่งเล็ก มีกาบหุ้มลำ

ใบ : มีลักษณะปลายเล็กเรียวแหลม มักจะงอกลับ ขอบหยัก ยาวประมาณ 30
cm กว้างประมาณ 2.5 cm

ดอก : จะออกเป็นช่อ เมื่อออกดอกแล้วต้นก็จะตาย ซึ่งเรียกว่า ไร่
ตายขุย

การขยายพันธุ์ และ การเพาะปลูก : สามารถขยายพันธุ์ได้โดย การแตกหน่อ
การตอนกิ่ง และ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดย พื้นที่ที่เหมาะสมในการเพาะปลูก มักเป็นบริเวณเขต
ร้อน มีฝนตกชุก และ มีดินที่อุดมสมบูรณ์ ระบายน้ำได้ดี แต่ในประเทศไทย สามารถปลูกได้ในดิน
ทราย ที่มีความเป็นกรดเล็กน้อยได้

4.4.2 ไผ่หมาจู

วงศ์ : *Gramineae*

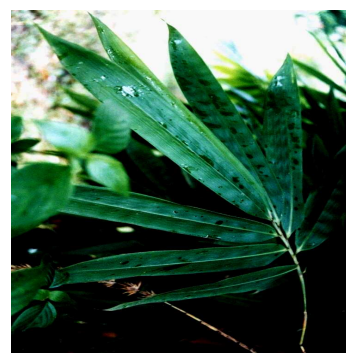
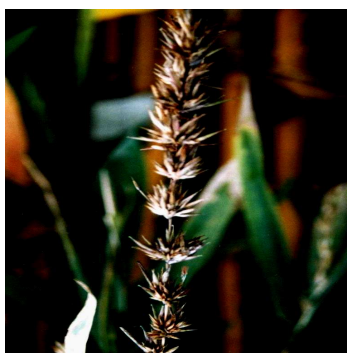
สกุล : *Dendrocalamus*

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Dendrocalamus latiflorus*

ชื่อสามัญ : Golden bamboo

ชื่อพื้นเมือง : ไผ่ซางคำ (ภาคเหนือ, ไทย) Machiku (ญี่ปุ่น) Wani (พม่า)

Botong (ฟิลิปปินส์)



ภาพที่ 16 : แสดงลักษณะของไผ่หมาจู (*Dendrocalamus latiflorus*)

ที่มา : โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดย มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
(2551ข)

ถิ่นกำเนิดและการแพร่พันธุ์ : สำหรับถิ่นกำเนิดเริ่มต้นไม่ทราบแน่ชัด พบว่ามีการแพร่พันธุ์ตั้งแต่พม่าจนถึงทางตอนใต้ของจีน รวมถึง ไต้หวัน จากนั้น เริ่มแพร่ขยายเข้าสู่ไทย อินเดีย ญี่ปุ่น และฟิลิปปินส์

การใช้ประโยชน์ : หน่อมีรสชาติดี นิยมนำมารับประทาน ลำต้นใช้ในการต่อแพ หรือทำเป็นท่อน้ำ และใช้ในการก่อสร้าง ทำเฟอร์นิเจอร์ หรืองานจักสาน ใบใช้ทำหมวกและหลังคา

ผลผลิตและการส่งออก : หน่ออ่อน ถือเป็นผลผลิตทางการค้าที่สำคัญของจีน และได้หวัน โดยในปี 1985 จีนส่งออกหน่อไม้อ่อนถึง 140,000 ตัน ส่วนได้หวัน ประมาณ 40,000 ตัน ซึ่งถูกค้ารายใหญ่ คือ ญี่ปุ่น ซึ่งมีมูลค่าการส่งออกปีละ ประมาณ 40 ล้านดอลลาร์ ส่วนหน่อไม้แห้ง และหน่อไม้กระป๋อง ถูกส่งไปขายทางยุโรป อเมริกา และแคนาดา

คุณสมบัติ :

ขนาดของเส้นใย : ยาว 3.01 nm เส้นผ่าศูนย์กลาง 18.1 μm และหนา 5.6 μm

สารประกอบทางเคมี : โดยประมาณ ประกอบด้วย โฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ร้อยละ 80.15 เพนโตซาน (pentosans) ร้อยละ 19.40 ลิกนิน (lignin) ร้อยละ 24.76 และ เถ้า (ash) ร้อยละ 2.82

ลักษณะทั่วไป :

ลำต้น : สูงประมาณ 14 - 25 m เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 – 20 cm ความหนา 0.5 – 3 cm ลำปล้องตรง และมีผิวเนียนเรียบ ลำต้นอ่อนจะมีขนสีน้ำตาลบริเวณข้อปล้อง แต่ลำต้นมีสีเขียว หรือสีเหลือง ปล้องยาว 20 – 70 cm ผิวเกลี้ยง เป็นมัน ไม่มีลาย ข้อนูนเด่นชัด ภายในข้อกลวง

ใบ : เป็นใบเดี่ยว รูปแถบปลายใบเรียวแหลม ขนาดของแผ่นใบ กว้าง 2 cm ยาว 25 cm

ดอก : ออกตามปลายกิ่ง

การขยายพันธุ์ และ การเพาะปลูก : สามารถขยายพันธุ์ได้โดย การใช้เมล็ด การแตกหน่อ และการตอนกิ่ง ซึ่งการใช้เมล็ดจะมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว แต่เมื่อนั้นหาได้ยากมาก ดังนั้น วิธีการตอนกิ่งจึงเป็นวิธีที่นิยมกันโดยทั่วไป โดยพื้นที่ที่เหมาะสมในการเพาะปลูก มักเป็นบริเวณเขตร้อน มีฝนตกชุก และดินอุดมสมบูรณ์ แต่บริเวณดินเหนียว และดินที่มีความเป็นกรดหรือด่าง มากเกินไป จะไม่เหมาะสม

5. โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชัน (oxidation number) ได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนัก จึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) ได้รูปที่เสถียรกว่าโลหะหนักอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organic compound) โดยสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านทางโซ่อาหาร ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะโลหะหนักที่ได้นำมาทำการวิจัยเท่านั้น คือ

5.1 แคดเมียม (Cadmium)

5.1.1 สมบัติของธาตุแคดเมียม

แคดเมียม (Cadmium : Cd) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 48 และเป็นธาตุหมู่ 12 ในตารางธาตุ อยู่ในหมู่เดียวกับสังกะสี และปรอท ลักษณะเป็นโลหะอ่อนสีเงิน โดยสมบัติต่างๆ ของธาตุแคดเมียม แสดงในตารางที่ 5

5.1.2 แคดเมียมในธรรมชาติ

แคดเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ (CdS) และสารประกอบคาร์บอเนต (CdCO_3)

5.1.3 การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์

แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมาย เช่น ในอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) ใช้เป็นตัวสีในสิ่งต่างๆ ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก

ตารางที่ 5 สมบัติต่างๆของธาตุแคดเมียม

สมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
เลขอะตอม	48
มวลอะตอม (g/mol)	112.411
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2 8 18 18 2
สมบัติทางกายภาพ	
ลักษณะ	ของแข็ง
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิปกติ (g/cm ³)	8.65
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว (g/cm ³)	7.996
จุดหลอมเหลว (K)	594.22
จุดเดือด (K)	1040
ความร้อนของการหลอมเหลว (kJ/mol)	6.21
ความร้อนของการกลายเป็นไอ (kJ/mol)	99.87
ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิปกติ (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	26.020
สมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนัล
สถานะออกซิเดชัน	2
สภาพไฟฟ้าลบ (Pauling scale)	1.69
พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (kJ/mol)	
ระดับที่ 1	867.8
ระดับที่ 2	1631.4
ระดับที่ 3	3616
รัศมีอะตอม (pm)	155
รัศมีโคเวเลนต์ (pm)	148
รัศมีแวนเดอร์วาลส์ (pm)	158

ที่มา : Wikipedia (2008d)

โลหะแคดเมียมยังใช้ผสมกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น ผสมกับโลหะทองแดงจะเพิ่มความเหนียว และความทนทานต่อการสึกหรอให้กับทองแดงด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทนอุณหภูมิสูงด้วย นำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ หรืออุปกรณ์เครื่องเย็นต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ ถ้านำแคดเมียมไปผสมกับโลหะเงินจะได้โลหะอัลลอยด์ที่เงางาม ใช้ในการผลิตเครื่องประดับอัญมณีต่างๆ

5.1.4 การแพร่กระจายของแคดเมียม

สามารถพบโลหะแคดเมียมปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ทั่วไป ดังนั้นมนุษย์จึงได้รับแคดเมียมเข้าไปในร่างกายได้หลายทางโดยไม่รู้ตัว เช่น คนงานที่ทำงานใช้โลหะแคดเมียมจะได้รับทางการหายใจเป็นส่วนใหญ่ คนทั่วไปจะได้รับจากอาหารที่กินเข้าไปเป็นหลัก และได้รับจากอากาศเล็กน้อย ขึ้นกับความสะอาดของอากาศ

5.1.5 ความเป็นพิษของแคดเมียม

การได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดโรคต่างๆ ได้ เช่น โรคปอดเรื้อรัง โรคไตอักเสบ โรคกระดูก โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจ เป็นต้น

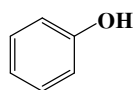
5.1.6 การรักษา

ควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสและระมัดระวังการนำสารแคดเมียม เข้าสู่ร่างกาย และรักษาโดยให้สารเอทิลีนไดเอมีน (ethylenediammine : en)

6. ฟีนอล

6.1 สมบัติของฟีนอล

สารประกอบฟีนอล เป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบอะโรมาติกที่ย่อยสลายยาก ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ C_6H_5OH และมีโครงสร้างดังภาพที่ 17 มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวหรือของเหลวสีชมพูใส และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างช้าๆ เมื่อสัมผัสกับอากาศ สมบัติต่างๆของฟีนอล แสดงดังตารางที่ 6



ภาพที่ 17 โครงสร้างของฟีนอล

ที่มา: Wikipedia (2008)

ตารางที่ 6 สมบัติต่างๆของฟีนอล

สมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
มวลโมเลกุล (g/mol)	94.11
สมบัติทางกายภาพ และเคมี	
ลักษณะ	กึ่งของแข็ง
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิปกติ (g/cm^3)	1.071
ความหนาแน่นของไอ (g/l)	3.24
ความสามารถในการละลาย ($g/100\text{ cm}^3$)	8.3
จุดหลอมเหลว (K)	313.65
จุดเดือด (K)	454.85
ค่าความเป็นกรด (pK_a)	9.95

ที่มา : Wikipedia (2008)

6.2 ฟีนอลในธรรมชาติ และการแพร่กระจายของฟีนอล

ฟีนอลอาจพบในน้ำทิ้งบ้านเรือน แหล่งน้ำดื่มทั่วไป และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมี โรงงานถ่านหิน โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานฟอกย้อม เป็นต้น แต่โดยทั่วไปพบว่าความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำเสียชุมชน (domestic wastewaters) ค่อนข้างต่ำมาก

6.3 ความเป็นพิษของฟีนอล

ฟีนอลเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ ค่าความเข้มข้นวิกฤตของฟีนอลที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตตายลงครึ่งหนึ่ง (lethal concentration, LC_{50}) จะอยู่ในช่วง 9 – 25 mg/g และบางครั้งแม้ความเข้มข้นเพียง 0.1 mg/g ก็เพียงพอที่จะฆ่าสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เช่น ปลาบางชนิดได้ เป็นต้น นอกจากนี้ฟีนอลสามารถถูกดูดซึมผ่านทางเหงือก ผิวหนัง และผ่านทางห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต (food-chain organisms) นอกจากนี้ ฟีนอลเป็นอันตรายต่อเซลล์ของมนุษย์ คือ เป็นพิษต่อหน่วยพันธุกรรม (genotoxic) และอาจเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง (carcinogenic effect)

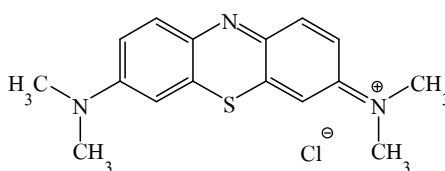
6.4 การกำจัดฟีนอล

การกำจัดน้ำเสียที่มีฟีนอลเป็นองค์ประกอบมีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ในน้ำเสีย กล่าวคือ ถ้าน้ำเสียมีความเข้มข้นของฟีนอลอยู่สูงมาก (มากกว่า 2,000 mg/l) มักเหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (recovery) หรืออาจกำจัดโดยการเผา ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นปานกลางถึงต่ำ อาจใช้วิธีบำบัดทางชีววิทยา การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ หรือการออกซิเดชันทางเคมี

7. เมทิลีนบลู (methylene blue)

7.1 สมบัติของเมทิลีนบลู

สารประกอบเมทิลีนบลู (โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 18) เป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบพวกลิโธโซโรไซคลิกอะโรมาติก (heterocyclic aromatic) ที่ย่อยสลายยาก มีสูตรทางเคมี คือ $C_{16}H_{18}N_3ClS$ มีชื่อเรียกตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ว่า 3,7-bis (dimethylamino)-phenazathionium chloride หรือ tetramethylthionine chloride เมทิลีนบลูเป็นผลึกสีเขียวเข้ม เมื่อละลายน้ำจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 7



ภาพที่ 18 โครงสร้างเมทิลีนบลู

ที่มา: Wikipedia (2008k)

ตารางที่ 7 สมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู

สมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
มวลโมเลกุล (g/mol)	319.85
สมบัติทางกายภาพ และเคมี	
ลักษณะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว (K)	463.15
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm ³)	4
ความสามารถในการละลายแอลกอฮอล์ (g/100 cm ³)	1.54

ที่มา : Molecular Research Inc. (n.d.)

7.2 การนำเมทิลลีนบลูมาใช้ประโยชน์

ในปัจจุบัน เมทิลลีนบลู ถูกใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสีต่างๆ เนื่องจากเมทิลลีนบลู เมื่อละลายน้ำแล้วให้สีน้ำเงิน และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการทดสอบความเป็นกรด่างของสารละลายได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังถูกใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในทางการแพทย์

7.3 ความเป็นพิษของเมทิลลีนบลู

ถ้ามนุษย์ได้รับเมทิลลีนบลูเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป อาจมีอาการแสบร้อนในปากหรือท้อง คลื่นไส้ อาเจียน นอกจากนี้จะมีอาการปวดศีรษะ เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว เกิดอาการวิตกกังวล บางรายจะเกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะ ทำให้ปัสสาวะขัดหรือปัสสาวะบ่อย นอกจากนี้ เมทิลลีนบลู ยังอาจทำให้ผิวหนังมีสีน้ำเงิน (bluish skin) ได้

8. ไอโอดีน

8.1 สมบัติของธาตุไอโอดีน

ไอโอดีน (iodine, I) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 53 และเป็นธาตุหมู่ 17 ในตารางธาตุ อยู่ในหมู่เดียวกับฟลูออรีน คลอรีน และโบรมีน ลักษณะมีสีเทาดำ เมื่อละลายน้ำแล้วจะได้สีน้ำตาลเข้ม โดยสมบัติต่างๆของธาตุไอโอดีน แสดงในตารางที่ 8

8.2 ไอโอดีนในธรรมชาติ

ไอโอดีนเป็นธาตุที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ โดยพบมากในน้ำทะเล สัตว์ทะเล หรือพืชทะเล

8.3 การนำไอโอดีนมาใช้ประโยชน์

ไอโอดีนถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่างมากมาย เช่น ในทางการแพทย์ ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรค หรือใช้เป็นสารอาหารป้องกันโรคคอหอยพอก เป็นต้น

8.4 ความเป็นพิษของไอโอดีน

การสัมผัสกับไอโอดีนโดยตรง อาจทำให้เกิดอาการต่างๆได้ เช่น ระคายเคืองที่ผิวหนัง จมูก และลำคอ ปวดศีรษะ คลื่นไส้อาเจียน เป็นต้น ซึ่งถ้ารับเข้าไปโดยการกินหรือกลืนอาจมีอันตรายถึงแก่ชีวิตได้

ตารางที่ 8 สมบัติต่างๆของธาตุไอโอดีน

สมบัติ	
สมบัติทั่วไป	
เลขอะตอม	53
มวลอะตอม (g/mol)	126.9045
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2 8 18 18 7
สมบัติทางกายภาพ	
ลักษณะ	ของแข็ง
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิปกติ (g/cm ³)	4.933
จุดหลอมเหลว (K)	386.85
จุดเดือด (K)	457.4
ความร้อนของการหลอมเหลว (kJ/mol)	15.52
ความร้อนของการกลายเป็นไอ (kJ/mol)	41.57
ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิปกติ (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	54.44
สมบัติของอะตอม	
โครงสร้างผลึก	ออร์โธโรมบิก
สถานะออกซิเดชัน	± 1, 5, 7
สภาพไฟฟ้าลบ (Pauling scale)	2.66
พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (kJ/mol)	
ระดับที่ 1	1008.4
ระดับที่ 2	1845.9
ระดับที่ 3	3180
รัศมีอะตอม (pm)	140
รัศมีโคเวเลนต์ (pm)	133
รัศมีแวนเดอร์วาลส์ (pm)	198

ที่มา : Wikipedia (2008g)

9. น้ำส้มควันไม้ (wood vinegar)

น้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวสีน้ำตาลโสมก้นควันไฟ ที่ได้มาจากการควบแน่น (condensation) ควันที่เกิดจากการผลิตถ่านไม้ในช่วงที่ไม้กำลังเปลี่ยนเป็นถ่าน (carbonization) อุณหภูมิในเตาอยู่ระหว่าง 300 – 450 °C สารประกอบต่าง ๆ ในไม้พินจะถูกสลายตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) เกิดเป็นสารประกอบใหม่มากมาย แต่ถ้าเก็บควันในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C แม้ว่าเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) จะสลายตัวแล้ว และเซลลูโลสกำลังเริ่มสลายตัว แต่ก็จะมีสารประกอบที่มีประโยชน์น้อยมากไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และถ้าเก็บควันในช่วงอุณหภูมิเกิน 450 °C น้ำมันดินจะสลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง ได้แก่ dibenzanthracene-mentyl cholinsrene และ benzopyrene แม้ว่าสารดังกล่าวสามารถกำจัดออกไปได้ง่ายเมื่อมากลั่นซ้ำที่อุณหภูมิ 60 – 70 °C แต่การนำมากลั่นซ้ำก็จะสูญเสียสารประกอบบางอย่างที่เป็นประโยชน์ต่อการเกษตร

สมาคมน้ำส้มควันไม้แห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นคนกลางในการซื้อขายน้ำส้มควันไม้ได้ตั้งเกณฑ์มาตรฐานของการเก็บน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาอิวาเตะ (Iwate) ไว้โดยการวัดอุณหภูมิที่ปากปล่องควันระหว่าง 80 – 150 °C ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาจะอยู่ระหว่าง 300 – 450 °C น้ำส้มควันไม้สามารถเก็บได้โดยอาศัยเครื่องมือง่าย ๆ โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากปล่องดักควันที่มีอุณหภูมิสูงสู่อากาศรอบปล่องดักควันที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความชื้นในควันก็จะควบแน่นเป็นหยดน้ำเมื่อนำมารวบรวมและทำให้บริสุทธิ์ขึ้นก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จุดสำคัญของการเก็บน้ำส้มควันไม้ก็คือ ต้องให้ปล่องดักควันอยู่ห่างจากปากปล่องควันของเตาผลิตถ่าน 20 – 30 cm หากทั้งสองส่วนเชื่อมต่อกันโดยตรงจะเท่ากับเป็นการต่อความยาวให้กับปล่องควันของเตา ซึ่งจะมีผลกระทบไปถึงการไหลเวียนของอากาศภายในเตา รวมถึงส่งผลถึงคุณภาพและผลผลิตของถ่านไม้ด้วย

9.1 การทำน้ำส้มควันไม้ให้บริสุทธิ์

น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเก็บจากเตาผลิตถ่าน ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทันที เนื่องจากการเปลี่ยนเป็นถ่านไม้ได้เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งเตาแต่จะเริ่มก่อนที่หน้าเตาด้านบนแล้วแผ่กระจายมายังหลังเตาด้านล่าง ดังนั้นควันที่ออกมาจากปล่องควันจึงเป็นควันที่ผสมกันระหว่างควันอุณหภูมิต่ำและสูง และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 310 °C ลิกนิน (lignin) ก็จะเริ่มสลายตัว ก็จะมีน้ำมันดิน (tar) และสารระเหยง่าย (volatile) ปนออกมาด้วย น้ำมันดินที่ละลายน้ำไม่ได้ (oil base) จะ

นำไปใช้ประโยชน์ในการเกษตรไม่ได้เพราะจะไปปิดปากใบของพืช และเกาะติดรากพืช ทำให้พืชเหี่ยวโทรมหรือตายได้

9.2 การทำน้ำส้มควันไม้ให้บริสุทธิ์

สามารถทำได้ 3 วิธี ได้แก่

9.2.1 ปล่อยให้ตกตะกอน

โดยนำน้ำส้มควันไม้มาเก็บในถังทรงสูง มีความสูงมากกว่าความกว้างประมาณ 3 เท่า โดยทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 90 วัน น้ำส้มควันไม้ก็จะตกตะกอนแบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นบนสุดจะเป็นน้ำมันใส (light oil) ชั้นกลางเป็นของเหลวใสสีชา คือน้ำส้มควันไม้ และชั้นล่างสุดจะเป็นของเหลวข้นสีดำหรือน้ำมันดิน หากนำผงถ่านมาผสมประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผงถ่านก็จะดูดซับทั้งน้ำมันใสและน้ำมันดิบให้ตกตะกอนลงสู่ชั้นล่างสุดในเวลาเร็วขึ้น เพียงประมาณ 45 วันเท่านั้น

ระหว่างการปล่อยให้ตกตะกอน สารประกอบในน้ำส้มควันไม้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน เปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ที่มีโมเลกุลยาวขึ้น (polymerization) เช่น ฟอรัมาลดีไฮด์ (formaldehyde) ทำปฏิกิริยากับฟีนอล (phenol) เปลี่ยนเป็นน้ำมันดิน (tar) แล้ว ตกตะกอนหรือจับตัวติดแน่นกับผนังของถังเก็บ ดังนั้นหากนำน้ำส้มควันไม้มากรองโดยไม่ตกตะกอนเสียก่อนก็จะเกิดน้ำมันดินใหม่ได้ทั้ง ๆ ที่ได้ผ่านการกรองแล้ว

ถังเก็บควรมีวาล์ว 3 ระดับ คือ ระดับบนมีไว้แยกน้ำมันใส (light oil) ระดับกลางมีไว้สำหรับเก็บน้ำส้มควันไม้ และก้นถังสำหรับถายน้ำมันดิน

9.2.2 การกรอง

โดยใช้ผ้ากรองหรือถังกรองที่ใช้ผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะได้คุณสมบัติแตกต่างกันไป เพราะถ่านกัมมันต์จะลดความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้ และจะใช้วิธีนี้เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบในการอุตสาหกรรม

9.2.3 การกลั่น

โดยกลั่นได้ทั้งใต้อากาศและกลั่นแบบลดความดันรวมทั้งกลั่นแบบลำดับส่วนเพื่อแยกเฉพาะสารหนึ่งสารใดในน้ำส้มควันไม้มาใช้ประโยชน์ โดยมักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยา

9.3 คุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้

น้ำส้มควันไม้แตกต่างจากน้ำส้มสายชูหรือน้ำส้มอื่นๆที่ได้จากการหมัก คือมีสารประกอบหลากหลายชนิดมากกว่า โดยเฉพาะฟีนอลซึ่งได้จากการสลายตัวของลิกนิน

น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากไม้ต่างชนิดก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันด้วย เช่น น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส จะมีความเป็นกรดต่ำ และมีสีใส แต่มีเมทานอลสูงกว่า ไม้กระถินยักษ์ หรือ ไม้สะเดา

น้ำส้มควันไม้มีสารประกอบต่างๆ มากกว่า 200 ชนิด ซึ่งได้จากการสลายตัวของไม้ด้วยความร้อน เกิดเป็นสารประกอบใหม่หลายชนิด เช่น กรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้จากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ส่วนฟีนอลได้จากการสลายตัวของลิกนิน

น้ำส้มควันไม้มีสารประกอบที่สำคัญ ได้แก่ น้ำ ประมาณร้อยละ 85 กรดอินทรีย์ประมาณร้อยละ 3 และ สารอินทรีย์อื่นๆอีกประมาณร้อยละ 12 มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ประมาณ 3 และ ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.012 – 1.024 แตกต่างกันไปตามชนิดของไม้ โดยสารอินทรีย์ต่างๆ ที่สามารถพบได้ในน้ำส้มควันไม้ แสดงในตารางที่ 9

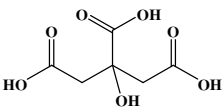
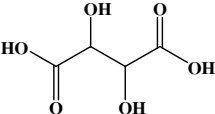
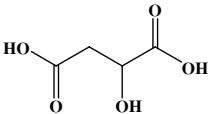
ตารางที่ 9 แสดงสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ในน้ำส้มควันไม้

ชนิดของสารอินทรีย์	สารประกอบ
Organic acid	formic acid, acetic acid, propionic acid, butyric acid, isobutyric acid, valeric acid, isovalenic acid, etc.
Phenol	phenol, o-cresol, m-cresol, p-cresol, 2,4-xyleneol, 3,5-xyleneol, 4-ethylphenol, 4-propylphenol, catechol, etc.
Carbonyl compound	formaldehyde, acetaldehyde, isobutyraldehyde, butylaldehyde, glyoxal, acrolein, acetone, methylethylketone, etc.
Alcohol	methanol, ethanol, propanol, isopropanol, allyl alcohol, etc.
Neutral ingredients	acetol, maltol, 4-methyl veratrole, 4-ethyl veratrole, 4-propyl veratrole, 3,4-benzopyrene, etc.
Basic ingredients	ammonia, methylamine, dimethylamine, pyridine, etc.

ที่มา: พุฒินันท์ (2546)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่พบในน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จาก การเผาไม้ไผ่แดง และ ไม้พม่าจู้ โดยทำการหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ 9 ชนิด ได้แก่ กรดซิตริก (citric acid), กรดทาทาริก (tartaric acid), กรดมาลิก (malic acid), กรดแลกติก (lactic acid), กรดฟอร์มิก (formic acid), กรดอะซิติก (acetic acid), กรดโพรพิโอนิก (propionic acid), กรดบิวทิริก (butyric acid) และ กรดไอโซบิวทิริก (isobutyric acid) โดยสมบัติต่างๆของกรดอินทรีย์แสดงในตารางที่ 10 และ ประโยชน์ของกรดอินทรีย์แสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 10 แสดงสมบัติของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ

สมบัติต่างๆ	ชนิดของกรดอินทรีย์		
	กรดซิตริก (citric acid **)	กรดทาเทาริก (tartaric acid ***)	กรดมาลิก (malic acid ****)
สมบัติทั่วไป			
สูตรโมเลกุล	$C_6H_8O_7$	$C_4H_6O_6$	$C_4H_6O_5$
สูตรโครงสร้าง			
ชื่อตามระบบ IUPAC*	2-hydroxypropane- 1,2,3-tricarboxylic acid	3-dihydroxy butanedioic acid	hydroxybutanedioic acid
มวลโมเลกุล (g/mol)	192.123	150.087	134.09
สมบัติทางกายภาพ และ เคมี			
ลักษณะ	ผลึกสีขาว	ผงสีขาว	ผลึกสีขาว
จุดหลอมเหลว (K)	426.15	441.15 – 443.15	401.15
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm ³)	133	133	ละลายได้ดีมาก
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)	1.542	1.8	1.609

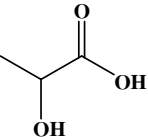
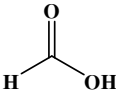
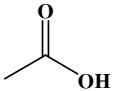
* IUPAC : International Union Pure and Applied Chemistry

** ที่มา: Wikipedia (2008e)

*** ที่มา: Wikipedia (2008n)

**** ที่มา: Wikipedia (2008j)

ตารางที่ 10 (ต่อ)

สมบัติต่างๆ	ชนิดของกรดอินทรีย์		
	กรดแลกติก (lactic acid **)	กรดฟอร์มิก (formic acid ***)	กรดอะซิติก (acetic acid ****)
สมบัติทั่วไป			
สูตรโมเลกุล	$C_3H_6O_3$	CH_2O_2	$C_2H_4O_2$
สูตรโครงสร้าง			
ชื่อตามระบบ IUPAC *	2-hydroxypropanoic acid	methanoic acid	ethanoic acid
มวลโมเลกุล (g/mol)	90.08	46.025	60.05
สมบัติทางกายภาพ และ เคมี			
ลักษณะ	ผลึกสีเหลืองอ่อน	ของเหลวใส	ของเหลวใส
จุดหลอมเหลว (K)	395.15	281.55	289.6
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm ³)	ละลายได้ดี	ละลายได้	ละลายได้ดีมาก
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)	1.2	1.22	1.049

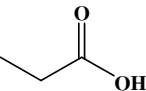
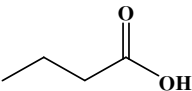
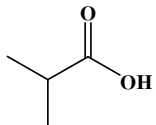
* IUPAC : International Union Pure and Applied Chemistry

** ที่มา: Wikipedia (2008i)

*** ที่มา: Wikipedia (2008f)

**** ที่มา: Wikipedia (2008a)

ตารางที่ 10 (ต่อ)

สมบัติต่างๆ	ชนิดของกรดอินทรีย์		
	กรดโพรพิโอนิก (propionic acid **)	กรดบิวทริก (butyric acid ***)	กรดไอโซบิวทริก (isobutyric acid ****)
สมบัติทั่วไป			
สูตรโมเลกุล	$C_3H_6O_2$	$C_4H_8O_2$	$C_4H_8O_2$
สูตรโครงสร้าง			
ชื่อตามระบบ IUPAC *	propanoic acid	butyric acid	2-methylpropanoic acid
มวลโมเลกุล (g/mol)	74.08	88.10	88.10
สมบัติทางกายภาพ และ เคมี			
ลักษณะ	ของเหลวใส	ของเหลวใส	ของเหลวใส
จุดหลอมเหลว (K)	252	265.1	226.15
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm ³)	ละลายได้ดี	ละลายได้	ละลายได้
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)	0.99	0.95	0.97

* IUPAC : International Union Pure and Applied Chemistry

** ที่มา: Wikipedia (2008m)

*** ที่มา: Wikipedia (2008c)

**** ที่มา: Wikipedia (2008h)

ตารางที่ 11 ประโยชน์ของกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ

ชนิดของกรดอินทรีย์	ประโยชน์
กรดซิตริก	ในปัจจุบัน กรดซิตริกถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆมากมาย เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารและเครื่องดื่ม ยา เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด
กรดทาเทาริก	ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง ยา และใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก
กรดมาลิก	ใช้เป็นสารเพิ่มกรดในอาหาร และใช้เป็นสารควบคุมความเป็นกรด
กรดแลกติก	ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง และใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ
กรดฟอร์มิก	ใช้เป็นส่วนผสมของยากำจัดแมลง และยากำจัดเชื้อรา เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมยาง
กรดอะซิติก	ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสีย้อมผ้า
กรดโพรพิโอนิก	ใช้เป็นส่วนเติมแต่งอาหาร และใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ
กรดบิวทิริก	อนุพันธ์ของกรดบิวทิริก เช่น 4-(2,4-dichlorophenoxy)-butyric acid สามารถนำไปผลิตเป็นยากำจัดวัชพืช
กรดไอโซบิวทิริก	ใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการแยกสกัดแยกสารให้บริสุทธิ์

10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์ และ การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ สามารถทำได้ดังนี้

เกศรา (2531) ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากพีท (peat) ที่ได้จากจังหวัดนครราชสีมา โดยใช้วิธีกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) ในครุชีเบิลแกรไฟต์ที่ให้ความร้อนด้วยเตาเผา (muffle furnace) และวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวแบบยิ่งยวด การกระตุ้นด้วย ZnCl_2 ทำได้โดยแช่พีทที่บดละเอียด และผ่านร่อน (sieve) 60 เมช (mesh) แล้ว ในสารละลาย ZnCl_2 เข้มข้นร้อยละ 60 อัตราส่วนของพีทต่อสารละลาย ZnCl_2 คือ 1:2.5 และ 4.0 ที่อุณหภูมิ 400°C และ 600°C แปรเวลาดังแต่ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 ชั่วโมง แล้วนำไปคาร์บอนไนเซชันในเตาเผา ผลการทดลองพบว่า การใช้ ZnCl_2 อัตราส่วน 1:4 กระตุ้นที่ 600°C เวลามากกว่า 0.5 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ในทางการค้า คือ ค่าเลขไอโอดีน 1,200 ถึง 1,300 mg/g ค่าการดูดซับเมทิลลิโนบลู 200 ถึง 300 mg/g พื้นที่ผิวอนุภาค $1,200 - 1,500 \text{ m}^2/\text{g}$ และสำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดยังทำได้โดยนำพีทผ่านร่อนขนาด 60 เมช ผสมกับน้ำแข็งมันสำปะหลังสุกเข้มข้น 0.04 g/ml ปริมาณที่ใช้ คือ ร้อยละ 5 ของน้ำหนัก อัดให้เป็นเม็ดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 mm หนา 2 mm อบให้แห้งที่ 110°C แล้วนำไปคาร์บอนไนเซชันที่ 500°C จากนั้นนำไปกระตุ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900°C แปรเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ความดันไอน้ำ 20 PSI ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 4 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด คือ ค่าการดูดซับไอโอดีนประมาณ 1,200 mg/g ค่าการดูดซับ เมทิลลิโนบลู ประมาณ 295 mg/g พื้นที่ผิวของอนุภาค $881 \text{ m}^2/\text{g}$

บุญชัย และคณะ (2534) ได้ทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากพีทไทยที่บดผ่านตะแกรงขนาด 8 mm และพีทญี่ปุ่นที่บดผ่านร่อนขนาด 5 และ 8 มิลลิเมตร แล้วนำไปเผา ที่อุณหภูมิ 460°C อัตราการผ่านอากาศ 100 l/min และ ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นด้วยไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 850 และ 950°C แปรเวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่า ถ่านกัมมันต์จากพีทไทยมีพื้นที่ผิว $383.4 - 623.5 \text{ m}^2/\text{g}$, ค่าการดูดซับเมทิลลิโนบลู 58.2 – 227.0 mg/g และค่าเลขไอโอดีน 662.9 – 1,003.8 mg/g ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากพีทญี่ปุ่น มีพื้นที่ผิว $243.2 - 510.4 \text{ m}^2/\text{g}$, ค่าการดูดซับเมทิลลิโนบลู 64.1 – 191.0 mg/g และค่าเลขไอโอดีน 442.0 – 832.3 mg/g

ประกฤต (2539) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยการใช้น้ำขี้เถ้า ฟางข้าว และขุยมะพร้าว ผลการทดลองพบว่า ขุยมะพร้าวที่ความเข้มข้น 50 mg/l ปริมาณ 0.20 กรัม ความสามารถกำจัดไอออนของตะกั่ว และปรอท ในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ถึงร้อยละ 80 และ 78 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขี้เถ้าและฟางข้าว พบว่า ขุยมะพร้าวมีความสามารถในการกำจัดไอออนของโลหะได้ดีกว่าขี้เถ้าและฟางข้าว สำหรับน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 0.3 – 0.7 mg/l พบว่า ขี้เถ้า ฟางข้าว และขุยมะพร้าว สามารถกำจัดไอออนของตะกั่วได้ทั้งหมด

ปิยะพร (2542) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ซึ่งมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนเซชัน และการกระตุ้น จากผลการทดลองได้สภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการคาร์บอนเซชันยาง คือ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที และขั้นตอนการกระตุ้น โดยการนำยางที่ผ่านการคาร์บอนเซชันแล้ว มาแช่ในสารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นร้อยละ 70 พร้อมทั้งเขย่าเป็นเวลา 3 วัน นำไปอบแห้งและเผาที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวรูพรุน $237.17\text{ m}^2/\text{g}$ และค่าเลขไอโอไดน 351.52 mg/g

Solum *et al.* (1995) ได้ศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจาก ดินไธสซาล โดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นตัวกระตุ้น โดยได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่าน แปรอุณหภูมิที่ $150, 250, 350$ และ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นจึงนำไปหาปริมาณของรูพรุน และศึกษาหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้ $^{13}\text{C-NMR}$ และ FTIR ซึ่งพบว่า ถ่านจะมีความเป็นอะโรมาติกเพิ่มมากขึ้น และหมู่ฟังก์ชันของอะลิฟาติก คาร์บอกซิล และคาร์บอนิล จะลดน้อยลง และปริมาณของรูพรุนจะมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้

Toles *et al.* (1996) ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกไนต์ โดยใช้กรด H_3PO_4 เป็นตัวกระตุ้น และศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา โดยแปรอุณหภูมิระหว่าง $250 - 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อนำถ่านที่ได้ไปหาหมู่ฟังก์ชัน และศึกษาหาพื้นที่ผิว พบว่า การกระตุ้นทำให้โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นอะโรมาติกมากขึ้น และทำให้หมู่คาร์บอนิลมีความเสถียร โดยที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถ่านที่ได้มีค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุด คือ $1466\text{ m}^2/\text{g}$

Usamani *et al.* (1996) ได้ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลิกไนต์ ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ จากนั้น ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ต่างๆ โดยนำไปหาค่าเลขไอโอไดน และค่า

การดูดซับเมทิลลีนบลู รวมถึงการหาพื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุน ซึ่งพบว่า สภาพะที่ดีที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ เมื่อเผาถ่านที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างถ่านกับ ZnCl_2 เป็น 1 ต่อ 2 ซึ่งจะทำให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทิลลีนบลู เท่ากับ 990 และ 205 mg/g ตามลำดับ ส่วนค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนได้ 942 m^2/g และ 0.46 cm^3/g ตามลำดับ

Hu and Srinivasan (1999) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ กับ KOH เวลา และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการกระตุ้น โดยพบว่า การเผาถ่านที่อุณหภูมิ 600 °C จะทำให้ได้ถ่านที่มีค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุน สูงสุด คือ 2451 m^2/g และ 1.21 cm^3/g ตามลำดับ

Hsu and Teng (2000) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัส โดยใช้ตัวกระตุ้นต่างๆกัน ได้แก่ ZnCl_2 , H_3PO_4 และ KOH โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 °C จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าพื้นที่ผิวที่ดีที่สุด คือ 960 770 และ 3300 m^2/g ตามลำดับ

Rengaraj *et al.* (2000) ได้ศึกษาถึงการดูดซับอโรครีซอล (O-cresol) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกะลาปาล์ม พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกะลาปาล์มสามารถลดปริมาณ O-cresol ได้ร้อยละ 95 และให้ค่าการดูดซับของฟรอยด์ลิช เท่ากับ 19.58 mg/g

Yang and Lua (2003) ได้ทำการศึกษาคูสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกถั่วพิชิโอ ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย KOH โดยทำการศึกษาผลของเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้ค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน สูงที่สุด คือ 2259.4 m^2/g และ 1.10 cm^3/g ตามลำดับ

Kutahyalı and Meral (2004) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับยูเรเนียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 โดย ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่าน อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์กับ ZnCl_2 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของยูเรเนียม แล้วทำการหาค่าพลังงานเอนทัลปี (ΔH) เอนโทรปี (ΔS) และ พลังงานเสรีกิ๊บส์ (ΔG) ของถ่านที่ได้ ซึ่งพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วน เป็น 1 ต่อ 1 แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 °C จากนั้นนำมาดูดซับ

ยูเรเนียม ที่ความเข้มข้น 50 mg/l ที่ pH เท่ากับ 5 อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะทำให้ได้พลังงานสูงสุด คือ 33.49 kJ mol⁻¹, 0.17 kJ mol⁻¹ K⁻¹ และ -18.02 49 kJ mol⁻¹ ตามลำดับ

Namasivayam and Sangeetha (2004) ได้ทำการศึกษาศมมูลของการดูดซับฟอสเฟต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากบวมะพร้าว ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ โดยได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณของถ่าน เวลา อุณหภูมิ และ ปริมาตรของฟอสเฟตที่ใช้ โดยอาศัยการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3 ปริมาณของถ่านที่ใช้ 300 มิลลิกรัม ปริมาตรของฟอสเฟตที่ใช้ 50 ml อุณหภูมิ 65 °C และ เวลา 3 ชั่วโมง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับของแลงเมียร์สูงสุด คือ 5.1 mg/g

Monhanty *et al.* (2005a) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากขี้เลื่อยของต้นเทคโทนาแกรนดิซ ซึ่งใช้ ZnCl₂ เป็นตัวกระตุ้น โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนในเซชัน ปริมาณตัวดูดซับ และความเป็นกรดต่างของสารละลาย โดยอาศัยโมเดลการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิซ ซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับฟีนอล เท่ากับ 2.82 mg/l ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.5 จากนั้นนำไปหาพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรของรูพรุน ซึ่งพบว่า เท่ากับ 585 m²/g และ 0.442 cm³/g ตามลำดับ

Monhanty *et al.* (2005b) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะโครเมียมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากดินเทอมินาเลียอาจูนา ซึ่งใช้ ZnCl₂ เป็นตัวกระตุ้น โดยทำการศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณของตัวดูดซับ เวลา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของโครเมียมที่ใช้ จากนั้นศึกษาหาค่าพื้นที่ผิว พบว่า ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 1 ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์กับ ZnCl₂ เท่ากับ 1 ต่อ 3 อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิว สูงสุด คือ 1260 m²/g

Namane *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาหาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเตรียมได้จากกากของเมล็ดกาแฟ โดยใช้ ZnCl₂ ผสมกับ H₃PO₄ เป็นตัวกระตุ้น และทำการดูดซับฟีนอล และอนุพันธ์ พร้อมทั้ง สีชนิดต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากเมล็ดกาแฟมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

Stavropoulos and Zabaniotou (2005) ได้ทำการศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกเมล็ดมะกอก ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย KOH และได้ทำการศึกษาผลของเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น โดยนำถ่านไปหาค่าพื้นที่ผิว และ ความสามารถในการดูดซับ โดยอาศัยการดูดซับของ แล่งเมียร์ พบว่า การเผาถ่านที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะให้ค่าพื้นที่ผิว สูงสุด คือ 3,049 m²/g แต่จะให้ค่าการดูดซับของแล่งเมียร์เพียง 16.2 dm³/mg

Qada *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านปิทูนัส ซึ่งทำการศึกษาผลของความเป็นกรดต่าง และขนาดของตัวถูกดูดซับ โดยอาศัยโมเดลการดูดซับของแล่งเมียร์ ฟรอยด์ลิช และ เล็คลิชปีเตอร์สัน ซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลู เท่ากับ 580 mg/g ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 11

Hameed *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เลื่อยไม้หวาย โดยอาศัยทฤษฎีการดูดซับของแล่งเมียร์ และฟรอยด์ลิช ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการดูดซับเป็นไปตามทฤษฎีของแล่งเมียร์ และความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 294.14 mg/g

Singh *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีระหว่าง ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรด โดยอาศัยความสามารถในการดูดซับฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ในการเปรียบเทียบ ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ซึ่งถูกกระตุ้นแล้ว จะสามารถดูดซับได้ 0.53 mmol/g และ 0.31 mmol/g ตามลำดับ ซึ่งจะดีกว่า ถ่านจากกะลามะพร้าว ซึ่งดูดซับได้ 0.36 mmol/g และ 0.20 mmol/g ตามลำดับ

Kula *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะแคดเมียมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากหินมะกอกซึ่งถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวกระตุ้น ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส และความเป็นกรดต่างของสารละลาย ซึ่งจากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก ZnCl₂ เข้มข้นร้อยละ 20 ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ต่อ 50 ml เวลาสัมผัส เท่ากับ 60 นาที และ ความเป็นกรดต่าง มากกว่า 6 และ จากการนำไปหาพื้นที่ผิวจำเพาะ พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่า เท่ากับ 790.25 m²/g

อุปกรณ์ และ วิธีการ

อุปกรณ์

1. เตาเผา (Maywa, MES-20MC)
2. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Lenton Thermal)
3. ตู้อบ (Precision, 16EG)
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Binder, ED 53)
5. เครื่องเขย่า (Clifton, NE5-2BD CE)
6. เครื่องชั่ง (Mettler Toledo, AL 204)
7. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (Inolab level 1, 8F93)
8. เครื่องลดความดันด้วยน้ำ (Jeio Teck, VE-11)
9. เครื่องยูวีวิซิบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Perkin Elmer, Lambda 35)
10. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Perkin Elmer, System 2000 FT-IR)
11. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Perkin Elmer, AAnalyst 800)
12. เครื่องไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโทกราฟี (Varian, Prostar 210 & 320)
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO, 1450VP)
14. เครื่องอัลตราโซนิคส์ (Branson 1210)
15. คอลัมน์ชนิดวัฏภาคย้อนกลับ (Supelco C-610H : sulfonated polystyrene / divinylbenzene)
16. แผ่นกรอง ขนาด 0.45 μm
17. เครื่องอัดสุญญากาศ
18. โกร่งบดสาร
19. ชุดกรองพร้อมแผ่นกรองเซลลูโลส
20. เครื่องแก้วต่างๆที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

สารเคมี

1. กรดฟอสฟอริก เข้มข้น (H_3PO_4 , AR grade, Ajax Finechem, Auckland, New Zealand)
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, AR grade, Ajax Finechem, Auckland, New Zealand)
3. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น (HCl, AR grade, Carlo Erba, Rodano, Milan, Italy)
4. ไอโอดีน (I_2 , AR grade, Univar, Seven Hills, Australia)
5. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI, AR grade, VWR international, England)
6. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
7. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3 , AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
8. โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3 , AR grade, Univar, United State of America)
9. Starch ($(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
10. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4 , AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
11. ฟีนอล ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$, AR grade, Carlo Erba, Rodano, Milan, Italy)
12. โพแทสเซียมโบรเมต (KBrO_3 , AR grade, BDH, Poole, United Kingdom)
13. โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr, AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
14. โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr, IR grade, Carlo Erba, Rodano, Milan, Italy)
15. กรดอะซิติกเข้มข้น (CH_3COOH , AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
16. โซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa , AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
17. สารละลายมาตรฐานแคลเซียม ความเข้มข้น 1,000 mg/l ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ in diluted hydrochloric acid, AA. Grade, Carlo Erba, Rodano, Milan, Italy)
18. กรดบอริก (B(OH)_3 , AR grade, Fisher, Leicestershire, United Kingdom)
19. กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, AR grade, Univar, Seven Hills, Australia)
20. เมทิลลีนบลู ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{ClS}$, AR grade, Fluka, Steinheim, Switzerland)
21. เฮกเซน (C_6H_{12} , AR Grade, Mallinckrodt, United State of America)
22. ไดเอทิลอีเธอร์ ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$, AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
23. ถ่านกัมมันต์ (C, AR grade, Fluka, Steinheim, Switzerland)
24. ถ่านไม้ไผ่บด (C, Lab. Grade, Thai Agard Dee, Bangkok, Thailand)
25. กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, AR grade, Ajax Finechem, Auckland, New Zealand)
26. กรดทาทาริก ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, AR grade, Fluka, Steinheim, Switzerland)

27. กรดมาลิก ($C_4H_6O_5$, AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
28. กรดแลกติก ($C_3H_6O_3$, AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
29. กรดฟอร์มิก (CH_2O_2 , AR grade, Fluka, Steinheim, Switzerland)
30. กรดอะซิติก ($C_2H_4O_2$, AR grade, Merck, Darmstadt, Germany)
31. กรดโพรพิโอนิก ($C_3H_6O_2$, AR grade, Sigma-Aldrich,)
32. กรดบิวทิริก ($C_4H_8O_2$, AR grade, BDH, Poole, United Kingdom)
33. กรดไอโซบิวทิริก ($C_4H_8O_2$, AR grade, Fluka, Steinheim, Switzerland)
34. น้ำที่ปราศจากไอออน

วิธีการ

1. การเตรียมถ่านจากไม้ไผ่

1.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา

นำลำไม้ไผ่ตง อายุ 1, 2 และ 3 ปี มาบดให้มีขนาดเล็ก และทำการเผาที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นนำถ่านที่เผาแล้วมาบดละเอียดจนสามารถร่อนผ่านร่อนขนาด $150\text{ }\mu\text{m}$ ได้ และทำการวิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน (ASTM D 4607-94) เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเผา และใช้อุณหภูมินั้นในการเผาไม้ตง และไม้หมากู้งครั้งต่อไป

2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำถ่านไม้ไผ่ที่ร่อนผ่านร่อนขนาด $150\text{ }\mu\text{m}$ แล้ว มาทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นต่างๆ ดังนี้

2.1 กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

2.1.1 การหาเวลาในการกระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 ที่เหมาะสมที่สุด

นำถ่านไม้ไฟ ผสมกับกรด H_3PO_4 ความเข้มข้นร้อยละ 85 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อปริมาตรของกรด เท่ากับ 1:4 จากนั้น ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จน pH ของน้ำที่ล้าง มีค่าประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง และเก็บในเดซิเคเตอร์ จากนั้นทำซ้ำเดิม แต่เปลี่ยนเวลาการไหลกลับเป็น 4, 6, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ

นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 และเลือกเวลานั้นมาใช้เป็นเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

2.1.2 การหาความเข้มข้นในการกระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 ที่เหมาะสมที่สุด

เตรียมกรด H_3PO_4 ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยนำกรด H_3PO_4 เข้มข้นร้อยละ 85 มาเจือจางด้วยน้ำกลั่น ในอัตราส่วนน้ำต่อกรดเข้มข้น เป็น 1:3, 1:1 และ 3:1 ตามลำดับ

นำถ่านไม้ไฟ ผสมกับกรด H_3PO_4 ที่ความเข้มข้นต่างๆที่เตรียมไว้ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อปริมาตรของกรด เท่ากับ 1:4 จากนั้น ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) เป็นเวลาเท่ากับเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลองในข้อ 2.2.1) เมื่อครบเวลา ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จน pH ของน้ำที่ล้าง มีค่าประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง และเก็บในเดซิเคเตอร์

นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน เพื่อหาความเข้มข้นของกรด H_3PO_4 ที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้น และเลือกความเข้มข้นนั้นมาใช้เป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

2.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

2.2.1 การหาความเข้มข้นในการกระตุ้นด้วยกรด KOH ที่เหมาะสมที่สุด

นำถ่านไม้ไฟ ผสมกับกรด KOH ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 ตามลำดับ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อปริมาตรของ KOH เท่ากับ 1:4 จากนั้น ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) เป็นเวลาเท่ากับ 4 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จน pH ของน้ำที่ล้าง มีค่าประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง และเก็บในเดซิเคเตอร์

นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน เพื่อหาความเข้มข้นของกรด KOH ที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้น และเลือกความเข้มข้นนั้นมาใช้เป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

2.2.2 การหาเวลาในการกระตุ้นด้วยกรด KOH ที่เหมาะสมที่สุด

นำถ่านไม้ไฟ ผสมกับ KOH ความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นที่เหมาะสม (จากการทดลองในข้อ 2.2.1) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อปริมาตรของ KOH เท่ากับ 1:4 จากนั้น ให้ความร้อนโดยการกลั่นไหลกลับ (reflux) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จน pH ของน้ำที่ล้าง มีค่าประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง และเก็บในเดซิเคเตอร์ จากนั้นทำซ้ำเดิม แต่เปลี่ยนเวลาการไหลกลับเป็น 8 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ

นำถ่านกัมมันต์ทั้งหมด ที่ได้ผ่านการกระตุ้นแล้ว ไปวิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นด้วย KOH และเลือกเวลานั้นมาใช้เป็นเวลาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

2.2.3 กรดไนตริก (HNO_3)

นำถ่านไม้ไฟ ผสมกับกรด HNO_3 เข้มข้น ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่าน ต่อปริมาตรของกรด เท่ากับ 1:4 จากนั้น ให้ความร้อนโดยการกลั่น ไหลกลับ (reflux) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำหลายๆครั้ง จน pH ของน้ำที่ล้าง มี ค่าประมาณ 7 และในครั้งสุดท้ายให้ล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบถ่านกัมมันต์ให้แห้ง และเก็บใน เฉลิกเคเตอร์

3. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านไม้ไฟ และถ่านกัมมันต์

ในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านไม้ไฟ และถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น

3.1 วิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน (Iodine number) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4607-94

โดยการนำถ่านไปดูดซับสารละลายไอโอดีนปริมาณที่มากเกินไป และทำการไทเทรตกลับไอโอดีนที่เหลือด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เพื่อหาปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลืออยู่กับปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่าน และทำการหาค่าเลขไอโอดีน ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.02 นอร์เมล

3.2 วิเคราะห์ค่าฟีนอล (Phenol value) ตามวิธีมาตรฐาน AWWA B600-96

โดยการนำถ่านไปดูดซับสารละลายฟีนอล ที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 จากนั้นทำการหาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ด้วยเครื่องยูวีวิชิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 270 nm แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างร้อยละของสารละลายฟีนอลที่เหลือกับปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่าน และนำค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เหลืออยู่เท่ากับร้อยละ 10 ไปคำนวณหาค่าฟีนอล

3.3 วิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (proximate analysis) โดยวิเคราะห์

3.3.1 ปริมาณความชื้น (moisture) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2867-04

โดยการนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ แล้วหาค่ามวลที่หายไป เพื่อคำนวณหาร้อยละของความชื้น

3.3.2 ปริมาณเถ้า (ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2866-94

โดยการนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 นาที แล้วหาค่ามวลที่หายไป เพื่อคำนวณหาร้อยละของเถ้า

3.3.3 ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5832-98

โดยการนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 650 °C จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ แล้วหาค่ามวลที่หายไป เพื่อคำนวณหาร้อยละของสารระเหย

3.3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) โดยอาศัยผลต่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$

4. การวิเคราะห์โครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชัน ของถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์

4.1 การศึกษาโครงสร้างโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

โดยการนำถ่านไปโรยลงบนแท่งอะลูมิเนียมที่ใช้ติดตัวอย่าง (stub) แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยโลหะทองเพื่อให้ถ่านมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น จากนั้นจึงนำไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrometry: FTIR)

โดยการนำถ่านไปผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วนำไปอัดเป็นแผ่น จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ที่ช่วงเลขคลื่น $4000 - 370 \text{ cm}^{-1}$

5. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์

5.1 การหาปริมาณถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับ

5.1.1 นำถ่านอบที่อุณหภูมิ $110 - 120^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.1.2 ชั่งถ่านกัมมันต์หนัก 0.1 g ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 3 ขวด

5.1.3 ปิเปตต์สารละลายแคดเมียม(II) ความเข้มข้น 10 mg/l ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.0 ปริมาตร 10 ml ลงในขวด

5.1.4 เขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที

5.1.5 กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

5.1.6 นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ฟชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 228.8 nm

5.1.7 นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัด แคดเมียม(II)

5.1.8 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 5.1.1 ถึง 5.1.7 โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.1 g จนกระทั่งความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับคงที่

5.1.9 สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (g/l) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด แคดเมียม(II) เพื่อหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

5.2 การหาความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

5.2.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 5.1.1 ถึง 5.1.7 โดยใช้ น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 5.1) และเปลี่ยนความเป็นกรดด่างของสารละลายแคดเมียม(II) เป็น 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 ตามลำดับ

5.2.2 สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดด่าง และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด แคดเมียม(II) เพื่อหาความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม

5.3 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

5.3.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 5.1.1 ถึง 5.1.7 โดยใช้ น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 5.1) ความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม (จากการทดลอง 5.2) และ เปลี่ยนเวลาสัมผัส เป็น 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 และ 300 นาที ตามลำดับ

5.3.2 สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด แคดเมียม(II) เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

5.4 การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับแคดเมียม(II)

5.4.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 5.1.1 ถึง 5.1.7 โดยใช้ น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 5.1) ความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม (จากการทดลอง 5.2) และ เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 5.3) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม(II) เป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 mg/l ตามลำดับ

5.4.2 สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับแคดเมียม(II)

6. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

6.1 การหาปริมาณค่าที่เหมาะสมในการดูดซับ

6.1.1 นำถ่านอบที่อุณหภูมิ $110 - 120^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

6.1.2 ชั่งถ่านกัมมันต์หนัก 0.025 g ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 4 ขวด

6.1.3 ปิเปตต์สารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 25 mg/l ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ปริมาตร 25 ml ลงในขวด 3 ใบแรก

6.1.4 ปิเปตต์สารละลายบัฟเฟอร์ ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ลงในขวดที่ 4 เพื่อเป็นสารไว้ตัวอย่าง

6.1.5 นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที

6.1.6 กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่ง กระจายกรองอิมัตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

6.1.7 นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิชิเบิล-สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 665.0 nm

6.1.8 นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัด เมทิลลิโนบลู

6.1.9 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6.1.1 ถึง 6.1.7 โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.025 g จนกระทั่ง ความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับคงที่

6.1.10 สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (g/l) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด เมทิลลิโนบลู เพื่อหาปริมาณค่าที่เหมาะสม

6.2 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

6.2.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 6.1.1 ถึง 6.1.8 โดยใช้ น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการ ทดลองข้อ 6.1) และเปลี่ยนเวลาสัมผัส เป็น 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ

6.2.2 สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด เมทิลลิโนบลู เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

6.3 การหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

6.3.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 6.1.1 ถึง 6.1.8 โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 6.1) เวลาในการสัมผัส เท่ากับเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 6.2) และเปลี่ยนความเป็นกรดต่างของสารละลายเมทิลีนบลู เป็น 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ

6.3.2 สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดต่าง และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลีนบลู เพื่อหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

6.4 การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู

6.4.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 6.1.1 ถึง 6.1.8 โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 6.1) ความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม (จากการทดลอง 6.2) และ เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 6.3) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 25, 50, 75, 100 และ 125 mg/l ตามลำดับ

6.4.2 สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู

7. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล

7.1 การหาปริมาณถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับ

7.1.1 นำถ่านอบที่อุณหภูมิ 110 – 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

7.1.2 ชั่งถ่าน หนัก 0.05 g ใส่ขวดรูปกรวยจำนวน 4 ขวด

7.1.3 ปิเปตต์สารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 mg/l ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ปริมาตร 25 ml ลงในขวด 3 ขวดแรก

7.1.4 ปิเปตต์สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.073 โมลาร์ ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.5 ปริมาตร 25 ml ลงในขวดที่ 4 เพื่อเป็นสารไว้วัดอย่าง

7.1.5 นำมาเขย่าที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

7.1.6 กรองสารละลายผ่านกรวยกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยหลอดทดลองขนาดเล็ก

7.1.7 นำสิ่งกรองไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ โดยใช้เครื่องยูวีวิซิบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 270 nm

7.1.8 นำความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพของการกำจัด ฟีนอล

7.1.9 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 7.1.1 ถึง 7.1.8 โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.05 g จนกระทั่ง ความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับคงที่

7.1.10 สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (g/l) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล เพื่อหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

7.2 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

7.2.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 7.1.1 ถึง 7.1.8 โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 6.1) และเปลี่ยนเวลาสัมผัส เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ

7.2.2 สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

7.3 การหาความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

7.3.1 ทำเช่นเดียวกับ ข้อ 7.1.1 ถึง 7.1.8 โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 7.1) เวลาในการสัมผัส เท่ากับเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 7.2) และเปลี่ยนความเป็นกรดด่างของสารละลายฟีนอล เป็น 2.5, 4.5, 6.5, 8.5 และ 10.5 ตามลำดับ

7.3.2 สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดด่าง และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล เพื่อหาความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม

7.4 การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล

7.4.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 7.1.1 ถึง 7.1.8 โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 7.1) ความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม (จากการทดลอง 7.2) และ เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 6.3) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 mg/l ตามลำดับ

7.4.2 สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิตซ์ เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล

8. การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีน

8.1 การหาปริมาณถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับ

8.1.1 นำถ่านอบที่อุณหภูมิ 110 – 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

8.1.2 ชั่งถ่านหนัก 0.1250 g ใส่ขวดรูปกรวย จำนวน 3 ขวด

8.1.3 เติมน้ำละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5.0 ml แก้วขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟอร์ ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

8.1.4 เติมน้ำละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์แมล ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7.0 ปริมาตร 25.0 ml ปิดฝาและเขย่าเป็นเวลา 15 นาที

8.1.5 กรองและแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยขวดรูปกรวย ขนาด 50 ml

8.1.6 ปิเปตต์สารละลาย 10.0 ml ใส่ลงในขวดรูปกรวย ขนาด 50.0 ml

8.1.7ไทเทรตด้วยสารละลาย โซเดียมไทโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 นอร์แมล จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลือง

8.1.8 เติมน้ำแข็ง 2 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงิน

8.1.9 ไทเทรตต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี

8.1.10 บันทึกปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

8.1.11 คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลืออยู่ จาก

$$X \text{ (mg)} = A - (DF \times B \times S)$$

$$\text{เมื่อ } A = 12693N_2$$

$$B = 126.93N_1$$

$$DF = \text{ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (dilution factor)}$$

$$= \frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนเริ่มต้น} + \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรไอโอดีนที่ปีปेटต์}}$$

$$S = \text{ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต}$$

8.1.12 ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 8.1.1 ถึง 8.1.11 โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านครั้งละ 0.1250 g จนกระทั่งปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่คงที่

8.1.13 สร้างกราฟระหว่างปริมาณถ่าน (g/l) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด ไอโอดีน เพื่อหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

8.2 การหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

8.2.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 8.1.1 ถึง 8.1.11 โดยใช้ น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 8.1) และโดยเปลี่ยนเวลาในการสัมผัสเป็น 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที

8.2.2 สร้างกราฟระหว่างเวลาสัมผัส (นาที) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด ไอโอดีน เพื่อหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

8.3 การหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

8.3.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 8.1.1 ถึง 8.1.11 โดยใช้ น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 8.1) เวลาในการสัมผัส เท่ากับเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 8.2) และเปลี่ยนความเป็นกรดต่างของสารละลายไอโอดีน เป็น 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ

8.3.2 สร้างกราฟระหว่างความเป็นกรดต่าง และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด ไอโอดีน เพื่อหาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

8.4 การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับไอโอดีน

8.4.1 ทำเช่นเดียวกับข้อ 8.1.1 ถึง 8.1.11 โดยใช้น้ำหนักถ่านที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 8.1) ความเป็นกรด่างที่เหมาะสม (จากการทดลอง 8.2) และ เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (จากการทดลองข้อ 8.3) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนเป็น 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 และ 0.025 นอร์แมล ตามลำดับ

8.4.2 สร้างกราฟตามทฤษฎี ของ แลงเมียร์ และ ฟรอยด์ลิช เพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับไอโอดีน

9. การคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของการดูดซับ (specific surface area)

สามารถคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของการดูดซับได้จากสมการ

$$S = \frac{Q^0}{MW} \times N \times a$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{\AA}^2/\text{g}$)

Q^0 = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

MW = มวลโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ (g/mol)

N = เลขอะโวกาโดร (6.02×10^{23} molecule/mol)

a = พื้นที่หน้าตัดของสารที่ถูกดูดซับ ($\text{\AA}^2$)

10. การศึกษาหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้ตอง และ ไม้พม่า

10.1 การเตรียมสารละลายวัฏภาคเคลื่อนที่ฟอสเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 0.1

10.1.1 บีบอัดกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ปริมาตร 1.2 ml ลงในขวดเชิงปริมาตร ขนาด 1 l

10.1.2 เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

10.1.3 นำสารละลายที่เตรียมได้ ไปกรอง ผ่านแผ่นกรองเซลลูโลส

10.1.4 นำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว ไปทำการไล่แก๊ส โดยใช้เครื่องอัลตรา-โซนิคส์เป็นเวลา 30 นาที

10.1.5 เก็บสารละลายใส่ขวด

10.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำส้มควันไม้

10.2.1 เตรียมตัวทำละลายผสมระหว่างเฮกเซนและไดเอทิลอีเธอร์ (ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1)

10.2.2 นำน้ำส้มควันไม้มากรอง เพื่อกำจัดตะกอนออก

10.2.3 นำน้ำส้มควันไม้ที่กรองตะกอนแล้ว มาสกัดโดยใช้กรวยแยก ด้วยตัวทำละลายผสมที่เตรียมไว้ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1

10.2.4 แยกสารละลายชั้นบน (ชั้นน้ำ) ออกมา แล้วทำการกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ $90 - 95^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 – 20 นาที

10.2.5 นำสารละลายที่กลั่นแล้วมากรอง ผ่านแผ่นกรอง ขนาด $0.45\ \mu\text{m}$

10.2.6 ปิเปตต์สารละลายที่กรองแล้ว ปริมาตร 1 ml ลงในขวดเชิงปริมาตรขนาด 100 ml และ ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน

10.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์น้ำส้มควันไม้ด้วยเครื่องไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ ลิควิดโครมาโทกราฟี

10.3.1 ตั้งสภาวะของเครื่องมือ เพื่อทำการวิเคราะห์ ดังนี้

- ก. คอลัมน์แบบวักภาคย้อนกลับ (sulfonate polystyrene / divinylbenzene)
- ข. สารละลายวักภาคเคลื่อนที่ฟอสเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 0.1
- ค. อัตราการไหล $0.5\ \text{ml/min}$
- ง. ความยาวคลื่น $210\ \text{nm}$
- จ. อุณหภูมิของคอลัมน์ 25°C

10.3.2 นำสารละลายมาตรฐานกรดอินทรีย์มาวิเคราะห์ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน ระหว่าง ความเข้มข้น กับ พื้นที่ใต้กราฟ

10.3.3 นำสารละลายตัวอย่างน้ำส้มควันไม้มาวิเคราะห์ จากนั้นเทียบหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น

ผลการทดลอง และ วิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเตรียมน้ำมันจากไม้ไผ่ ด้วยวิธีทางกระตุ้นทางเคมี โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาให้เป็นถ่าน ชนิดของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น ซึ่งทำการหาความเข้มข้นและเวลา ที่เหมาะสมในการกระตุ้น รวมถึงพันธุ์และอายุไม้ไผ่ที่นำมาเตรียมน้ำมันด้วย โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1. การเตรียมน้ำมันจากไม้ไผ่

1.1 สภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เป็นถ่าน

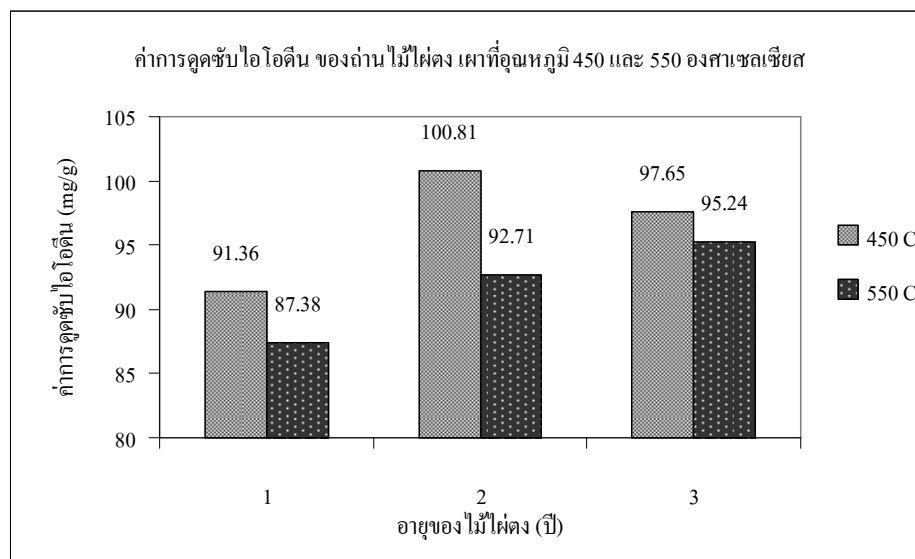
จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาไม้ไผ่ให้เป็นถ่าน ที่อุณหภูมิ 450 °C และ 550 °C พบว่า ถ่านที่ได้จะมีสีดำ แข็ง แต่เปราะ เมื่อหักดูพบว่าบริเวณที่หักมีความมันวาว และเมื่อนำถ่านที่ได้มาชั่งน้ำหนักที่สูญเสียไปในการเผา ได้ผลแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 น้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างการเผาให้เป็นถ่าน

ชนิดของไม้ไผ่		น้ำหนักที่สูญเสียไประหว่างการเผา (ร้อยละ)	
พันธุ์ไผ่	อายุ (ปี)	450 °C	550 °C
ตง	1	42.62	46.83
	2	51.16	55.13
	3	41.64	45.81
หมาจู	1	41.87	-
	2	46.86	-
	3	44.03	-

จากตารางที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเผาไม้ไผ่ตงที่อุณหภูมิ 450 °C และ 550 °C พบว่า ถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 550 °C มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C เล็กน้อย แสดงว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้สารอินทรีย์ที่สามารถเผาไหม้ได้ในไม้ไผ่ถูกเผาไหม้ได้มากขึ้น

จากการวิเคราะห์หาค่าเลขไอโอดีน (iodine number) ของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1, 2 และ 3 ปี ให้ผลดังแสดงภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีน ของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 2 และ 3 ปี ระหว่างที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C และ 550 °C

จากภาพเห็นได้ว่าถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C มีค่าเลขไอโอดีนได้ดีกว่าถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 550 °C ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิ 450 °C ในการเผาถ่านเพื่อนำไปใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ต่อไป และได้ใช้อุณหภูมินี้ในการเผาไม้ไผ่หมาจูด้วย และ อีกเหตุผลหนึ่งที่เลือกเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เนื่องจากในการเผาไม้ให้เป็นถ่านนี้ จะทำการเก็บน้ำส้มควันไม้ (wood vinegar) ที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งน้ำส้มควันไม้จะมีสภาพที่ดีที่สุด เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ ประมาณ 425 °C (พุดินันท์, 2546)

1.2 สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น

นำถ่านที่ผ่านกระบวนการเผา มาบดและคัดให้ได้ขนาด $150\ \mu\text{m}$ ล้างด้วยน้ำสะอาด และอบให้แห้ง และ ทำการกระตุ้น โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก และ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น และระยะเวลา ต่างกัน ในอัตราส่วนของสารละลายต่อถ่านเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก และกระตุ้นโดยการกลั่นไพล่กลับ จากนั้นจึงล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำประปา จนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด่าง ใกล้เคียง 7 และล้างครั้งสุดท้ายด้วยน้ำปราศจากไอออน และทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น โดยวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากค่าเลขไอโอดีน

1.2.1 ค่าเลขไอโอดีน

สำหรับถ่านที่ผลิตจากไม้ไผ่ พบว่าถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น มีค่าเลขไอโอดีนต่ำกว่า เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงว่าการกระตุ้นทำให้เกิดรูพรุนซึ่งจำเป็นต่อการดูดซับสารได้มากขึ้น โดยในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะทำการหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นก่อน และนำเวลาที่เหมาะสมนั้นมาใช้ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้นต่อไป ส่วนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมก่อน และใช้ความเข้มข้นนั้นมาใช้เวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น

ก. การหาค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

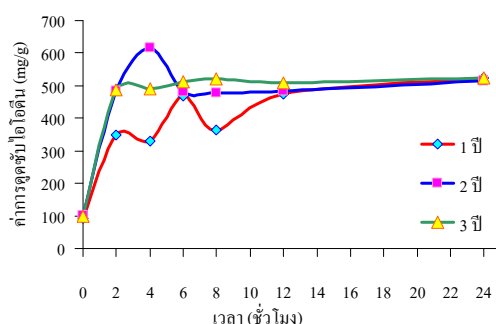
1) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่แดง

จากผลการทดลอง ในการหาเวลาที่เหมาะสมโดยทำการเปรียบเทียบเวลาที่ 2, 4, 6, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 (กรดเข้มข้น) พบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไผ่แดง มีค่ามากที่สุด ที่อายุไผ่ 2 ปี คือ $615.84\ \text{mg/g}$ เมื่อใช้เวลา 4 ชั่วโมง จึงเลือกเวลานี้ มาเป็นเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้เวลานี้กับถ่านไม้ไผ่แดงทุกอายุปี และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบที่ความเข้มข้น

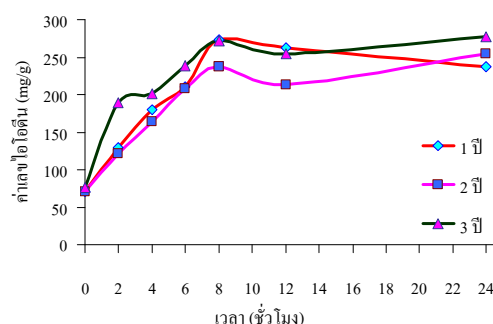
ของกรดฟอสฟอริก (กรดเข้มข้น ต่อ น้ำ) เท่ากับ 1:3, 2:2, 3:1 และ 4:0 โดยอาศัยเวลาที่เหมาะสม (4 ชั่วโมง) พบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไผ่ตงในทุกลายปี มีค่ามากที่สุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก เท่ากับ 4:0 (คือ กรดเข้มข้น) จึงเลือกใช้กรดเข้มข้นมาเป็นความเข้มข้นที่ใช้กระตุ้น เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองต่อไป

2) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หมาจู

จากผลการทดลอง ในการหาเวลาที่เหมาะสมโดยทำการทดลอง เช่นเดียวกับไผ่ตง พบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไผ่หมาจู มีค่ามากที่สุด ที่อายุไผ่ 3 ปี คือ 277.24 mg/g เมื่อใช้เวลา 24 ชั่วโมง แต่มีค่าไม่แตกต่างจากการใช้เวลา 8 ชั่วโมงมากนัก คือ 271.38 mg/g ดังนั้น จึงเลือกเวลา 8 ชั่วโมง มาเป็นเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสม และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ มีค่ามากที่สุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก เท่ากับ 4:0 (คือ กรดเข้มข้น) เช่นเดียวกับถ่านไม้ไผ่ตง

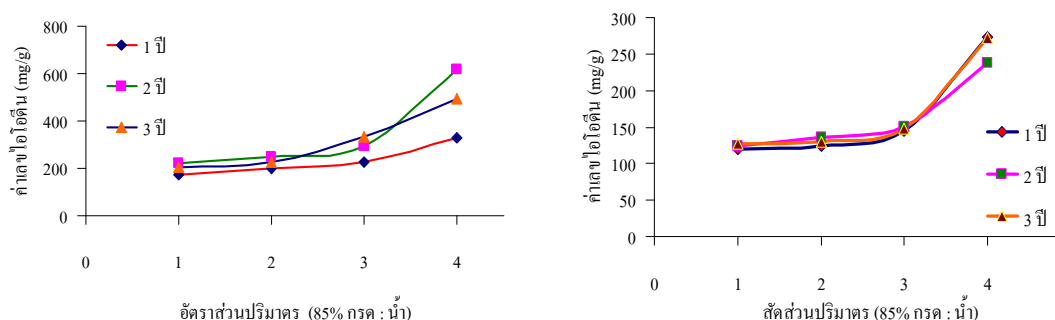


(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 ที่เวลาต่างกัน (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หมาจู



ภาพที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หมาจู เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ข. การหาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

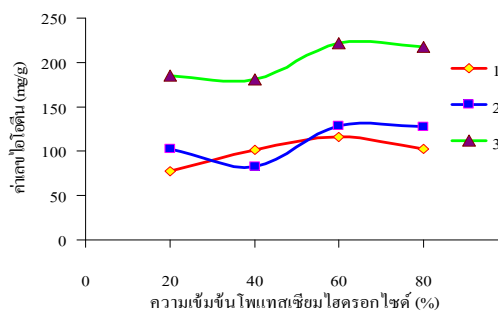
1) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตง

จากผลการทดลอง ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมนั้น ทำโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 ซึ่งพบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี จะมีค่ามากที่สุด คือ 221.86 mg/g เมื่อใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 60 จึงเลือกความเข้มข้นนี้มาใช้ในการกระตุ้นถ่าน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้เวลานี้กับถ่านไม้ไผ่ตงทุกอายุปี และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น ซึ่งเปรียบเทียบเวลาที่ 4, 8 และ 12 ชั่วโมง โดยอาศัยความเข้มข้นที่เหมาะสม (ร้อยละ 60) พบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี มีค่ามากที่สุด คือ 214.17 mg/g เมื่อใช้เวลากระตุ้น 4 ชั่วโมง จึงเลือกใช้เวลานี้เป็นเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองต่อไป

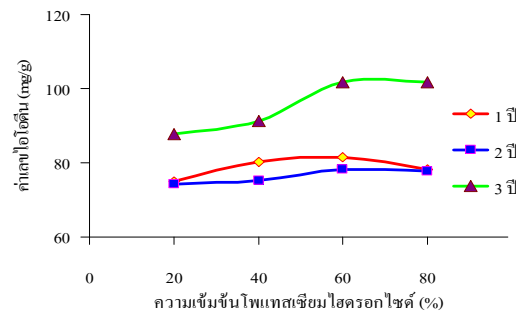
2) ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หมาจู

จากผลการทดลอง ในการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ไผ่ตง พบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่หมาจู มีค่ามากที่สุด ที่อายุไม้ 3 ปี คือ

101.76 mg/g เมื่อใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 60 จึงเลือกความเข้มข้นนี้มาใช้ในการกระตุ้นถ่าน เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้เวลานี้กับถ่านไม้ไผ่หามาจุ่มทุกอายุปี และเมื่อทำการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น เช่นเดียวกับไม้ไผ่ตง พบว่าค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี มีค่ามากที่สุด คือ 113.94 mg/g เมื่อใช้เวลากระตุ้น 12 ชั่วโมง จึงเลือกเวลานี้มาเป็นเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองต่อไป

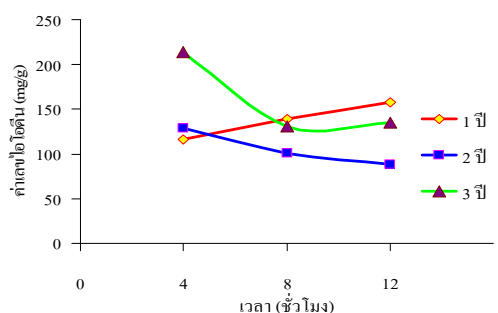


(ก)

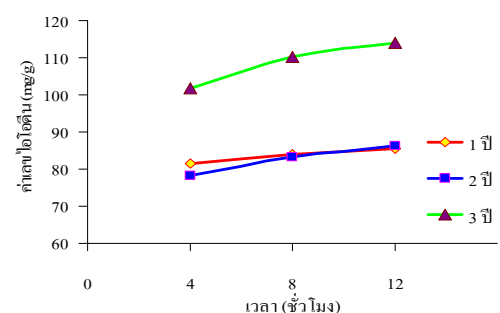


(ข)

ภาพที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หามาจุ่ม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เวลาต่างๆกัน (ก) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง ความเข้มข้นร้อยละ 60 และ (ข) ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หามาจุ่ม ความเข้มข้นร้อยละ 60

1.2.2 ค่าการดูดซับฟีนอล

สำหรับถ่านที่ผลิตจากไม้ไผ่ พบว่าถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้นมีค่าฟีนอลต่ำกว่า (ค่าฟีนอลต่ำกว่า หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงกว่า) ถ่านที่ถูกกระตุ้น แสดงว่าการกระตุ้นไม่ได้ช่วยทำให้การดูดซับดีขึ้น และในการหาค่าฟีนอลนั้นใช้วิธีมาตรฐานของ AWWA B600-96 ซึ่งค่าฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ได้แสดงในตารางที่ 12

จากการทดลองเมื่อพิจารณาค่าฟีนอล พบว่า ถ่านไม้ไผ่ที่ยังไม่ได้รับการกระตุ้น ทุกชนิด ยกเว้น ไผ่ตงอายุ 3 ปี มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านไม้ไผ่ที่ได้รับการกระตุ้น โดย กรดฟอสฟอริก หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แล้ว

โดยในการกระตุ้นนั้นจะทำให้หมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ผิวของถ่านกัมมันต์ กลายเป็นหมู่ซึ่งมีสภาพความเป็นลบเพิ่มขึ้น และ ฟีนอลอาจเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้ ฟีนอเลตแอนไอออน (phenolate anion) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลฟีนอลเสถียร จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างฟีนอล และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อย เพราะฉะนั้น ถ่านกัมมันต์จึงมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ต่ำกว่าถ่านไม้ไผ่ (Mohanty *et al.*, 2005a)

ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ค่าฟีนอล (g/l)
ถ่าน Fluka *	-	-	6.96
ถ่าน Bunton **	-	-	7.71
ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.55
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	11.20
		กระตุ้นโดย KOH	9.45
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.37
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	11.43
		กระตุ้นโดย KOH	8.97
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	11.43
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	16.08
		กระตุ้นโดย KOH	9.12
ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.88
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.58
		กระตุ้นโดย KOH	9.10
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.74
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	9.75
		กระตุ้นโดย KOH	7.52
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.07
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	9.30
		กระตุ้นโดย KOH	8.48

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

2. สมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่

2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ร้อยละความชื้น	องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
				เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
ถ่าน Fluka *	-	-	6.05	2.12	26.59	71.29
ถ่าน Bunton **	-	-	7.29	8.69	38.21	53.10
ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	3.89	9.52	61.33	29.15
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.31	15.12	38.76	46.12
		กระตุ้นโดย KOH	6.04	9.78	51.97	38.25
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	2.22	10.00	57.35	32.65
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	9.01	6.39	38.97	54.64
		กระตุ้นโดย KOH	6.86	14.43	43.26	42.31
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	3.61	6.92	52.41	40.67
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.75	5.20	35.98	58.85
		กระตุ้นโดย KOH	9.80	9.66	46.88	43.46
ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.27	9.15	54.73	36.12
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	8.24	5.34	41.26	53.40
		กระตุ้นโดย KOH	8.61	13.24	45.24	41.52
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.65	7.02	40.70	52.28
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.75	12.13	27.54	60.33
		กระตุ้นโดย KOH	8.48	18.71	41.23	40.06
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.20	9.36	48.98	41.66
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	4.98	9.01	33.96	57.03
		กระตุ้นโดย KOH	5.83	14.35	45.09	40.56

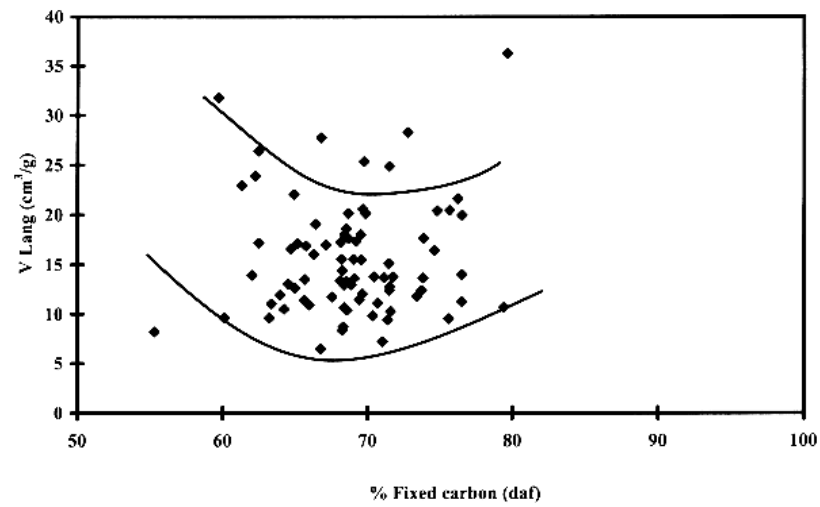
* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกัมมันต์ แสดงในตารางที่ 13 พบว่า ถ่านที่ได้จากการเผาไม้ไผ่ มีองค์ประกอบแบบประมาณ (ไม่รวมความชื้น) ดังนี้ คือ ปริมาณ เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ไม่สูงมาก เมื่อทำให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้การกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น จากประมาณร้อยละ 30 ถึง 50 เป็นประมาณร้อยละ 40 ถึง 60 เนื่องจากการเตรียมถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างซึ่งหลุดออกไปในรูปสารระเหย หรืออาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างสาร กระตุ้นกับโครงสร้างของถ่าน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ซึ่งการสลายตัวของโครงสร้างถ่านนั้นอาจเกิดขึ้นได้จากการแตกหักของพันธะในโครงสร้างของถ่าน เนื่องมาจาก ความร้อน และอาจเกิดจากการที่สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาดึงน้ำออกจากถ่าน (dehydration) กับ อะตอมของไฮโดรเจน และออกซิเจน ในโครงสร้างของถ่าน

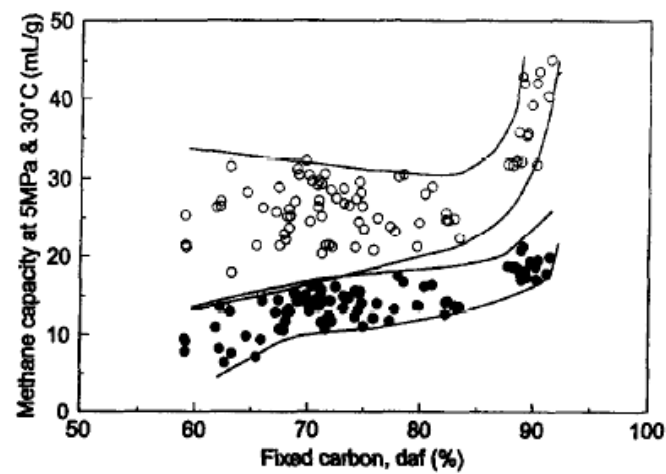
เมื่อเปรียบเทียบค่าต่างๆที่ได้จากตาราง พบว่า ถ่านกัมมันต์ Fluka มีเถ้า (ash) และ สารระเหย (volatile matter) เพียงร้อยละ 2.12 และ 26.59 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการมีสาร อนินทรีย์ที่คงเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ และสารที่มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิสูงอยู่น้อยมาก เมื่อเทียบกับถ่านชนิดอื่น คาดว่าถ่านกัมมันต์ Fluka ได้จากการเผาและกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้ สามารถกำจัดสารอนินทรีย์และสารระเหย ที่อยู่ในถ่านออกได้มาก และเมื่อเปรียบเทียบถ่านที่ เตรียมจากไม้ไผ่คอง และ ไม้หมากู พบว่าถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก มีเถ้าและสารระเหยต่ำ ที่สุด แสดงให้เห็นว่า กรดฟอสฟอริก มีส่วนช่วยในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารระเหยที่ หลงเหลืออยู่ในถ่านได้ดี

ส่วนคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) นั้น เป็นค่าที่แสดงถึงส่วนที่เหลือหลังจากที่กำจัด ความชื้น เถ้า และสารระเหย ออกแล้ว โดยปริมาณของคาร์บอนคงตัวนั้นไม่สามารถใช้เป็นตัวชี้วัด ความสามารถในการดูดซับได้ในทุกกรณี เช่น Gürdal and Yalcin (2000) ได้ทำการทดลอง แล้ว พิจารณาปริมาณคาร์บอนคงตัวเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เมื่อปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ ร้อยละ 69 เมื่อปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นสูงกว่านี้ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 24) ส่วนในการทดลองของ Levy *et al.* (1997) พบว่า ความสามารถในการดูดซับแก๊สมีเทน จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 25) เป็นต้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากขนาดของรูพรุน ที่สัมพันธ์กับขนาดของตัวถูกดูดซับด้วย เช่น ถ้าตัวดูดซับมีขนาดใหญ่มีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดของ รูพรุน การดูดซับก็เกิดขึ้นได้น้อย ถึงแม้ถ่านกัมมันต์ชนิดนั้น จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงก็ตาม



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัวและความสามารถในการดูดซับของ
แลงเมียร์ ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Gürdal and Yalcın (2000)



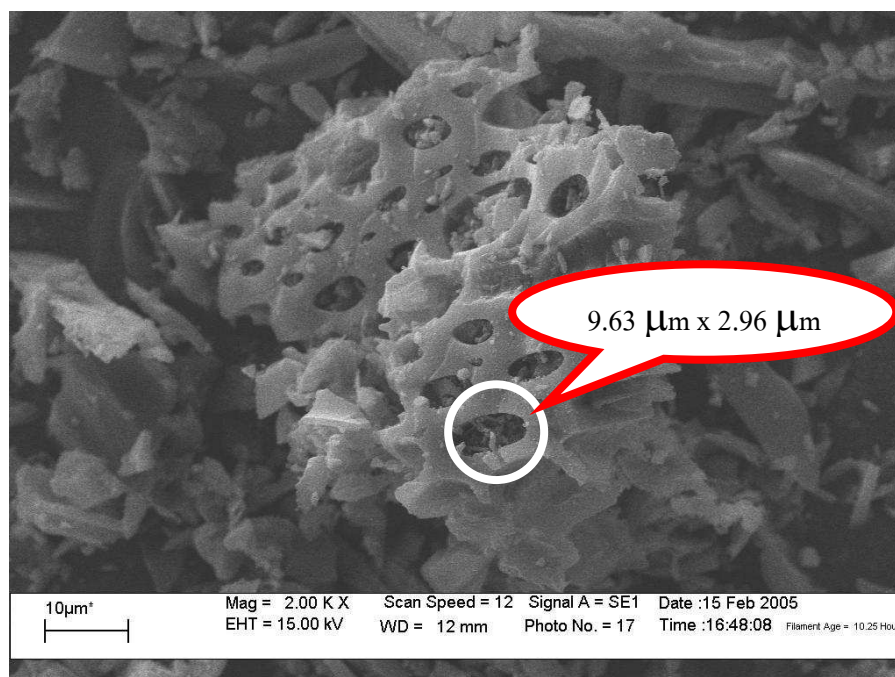
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคาร์บอนคงตัวและความสามารถในการดูดซับของ
แลงเมียร์ ในการดูดซับแก๊สมีเทน โดย ● และ ○ คือ ความสามารถในการดูดซับแก๊ส
มีเทน ของถ่านที่มีความชื้น และ ไม่มีความชื้น ตามลำดับ

ที่มา: Levy *et al.* (1997)

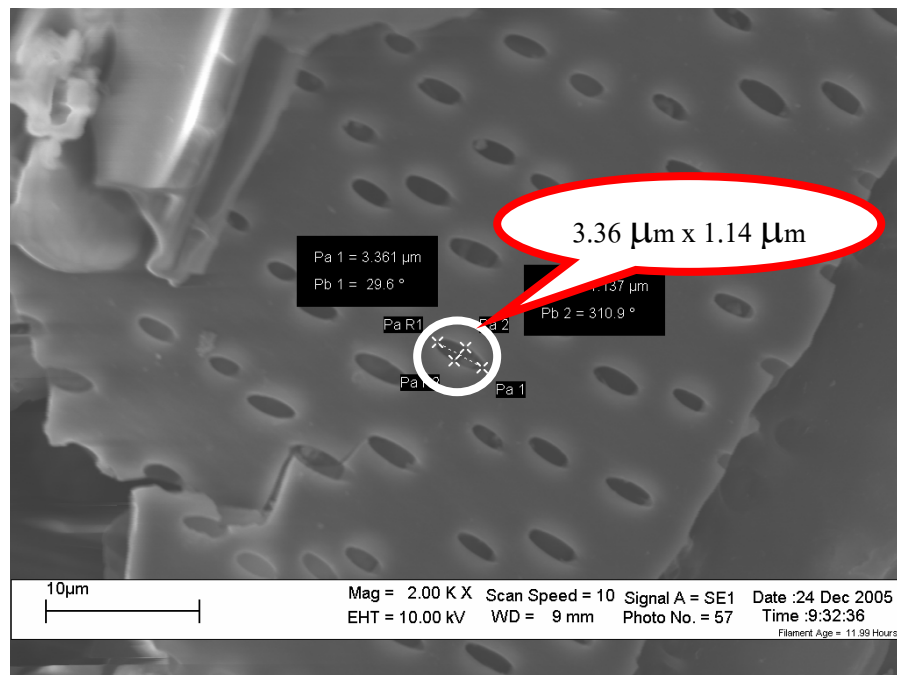
3. ผลการศึกษาโครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชัน ของถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์

3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

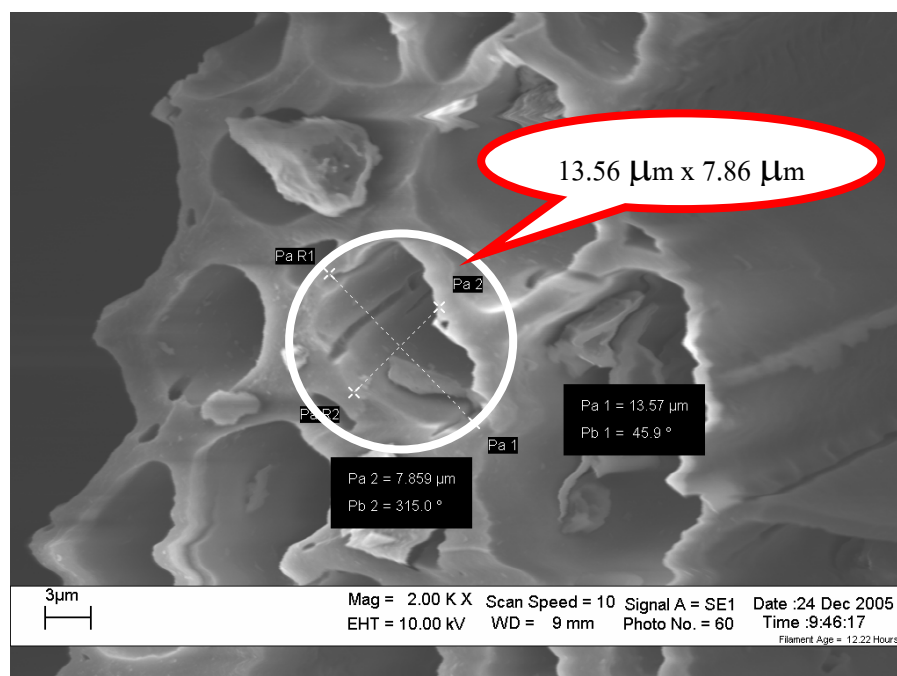
จากการศึกษาโครงสร้างและการกระจายตัวของรูพรุน โดยศึกษาถ่านกัมมันต์ Fluka และ ถ่านจากไม้ไผ่ ทั้งที่ไม่ได้รับการกระตุ้น และกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่า เมื่อถ่านได้รับการกระตุ้นจะมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น (ในถ่านไม้ไผ่จากประมาณ $1 - 8 \mu\text{m}$ เป็น $3 - 13 \mu\text{m}$ และในถ่านไม้ไผ่จากประมาณ $0.5 - 3 \mu\text{m}$ เป็น $2 - 13 \mu\text{m}$) รวมทั้งมีการกระจายตัวของรูพรุนมากขึ้น ซึ่งขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนนั้น มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับด้วย เช่น ความเหมาะสมของขนาดรูพรุนกับขนาดของตัวดูดซับ คือ ถ้าว่านมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าขนาดของตัวถูกดูดซับ จะทำให้ตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนได้ ความสามารถในการดูดซับจึงต่ำ เป็นต้น และเมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ Fluka กับถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่า ถ่านกัมมันต์ Fluka มีการกระจายรูพรุนที่มากกว่า ซึ่งอาจจะทำให้ ถ่านกัมมันต์ Fluka มีความสามารถในการดูดซับสารได้ดีกว่า



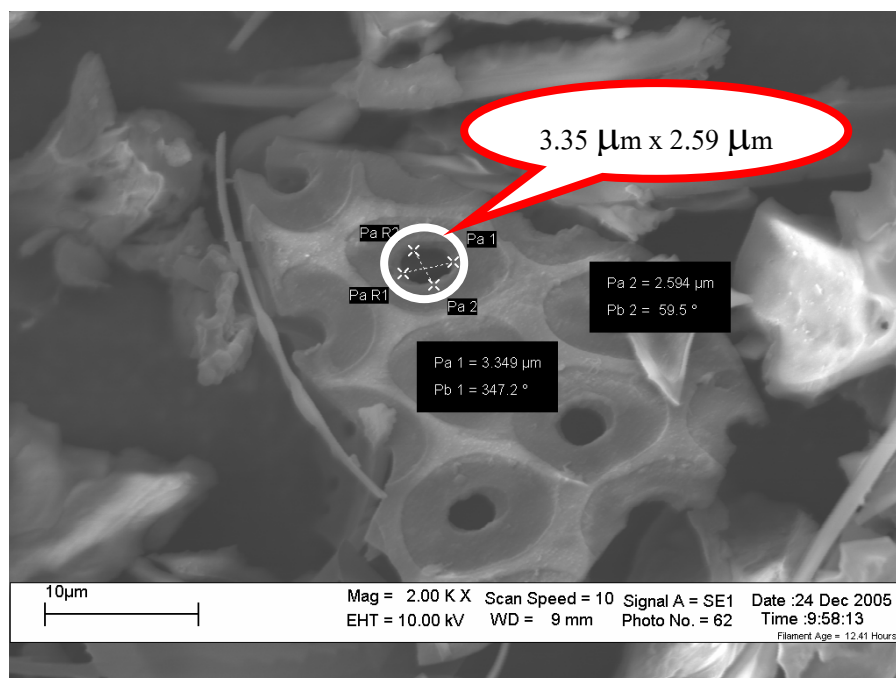
ภาพที่ 26 สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ Fluka ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระบุปรากฏในภาพ $10 \mu\text{m}$



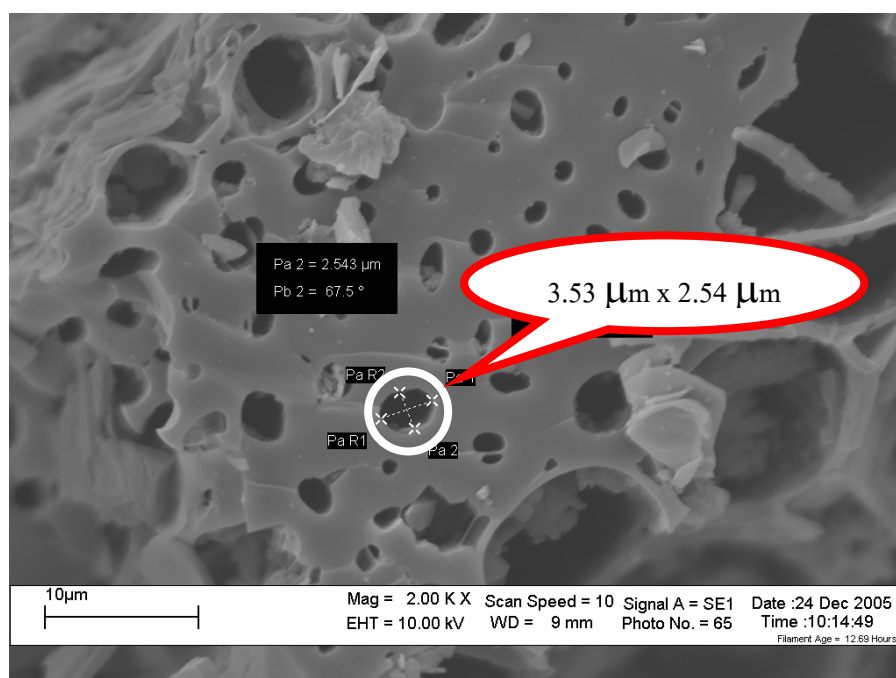
ภาพที่ 27 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
ระยะปรากฏในภาพ 10 μm



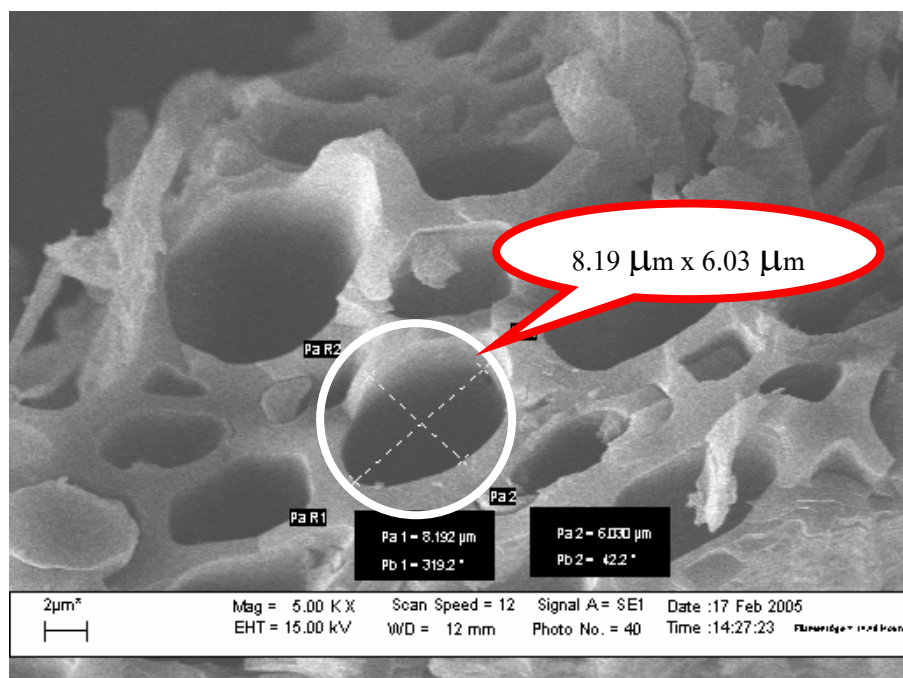
ภาพที่ 28 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 3 μm



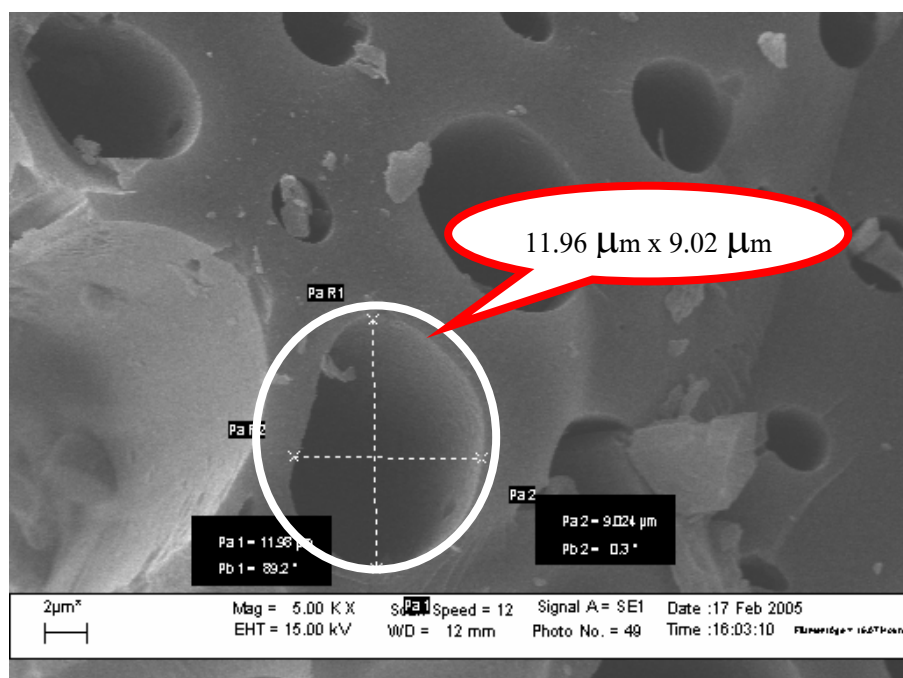
ภาพที่ 29 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
ระยะปรากฏในภาพ 10 μm



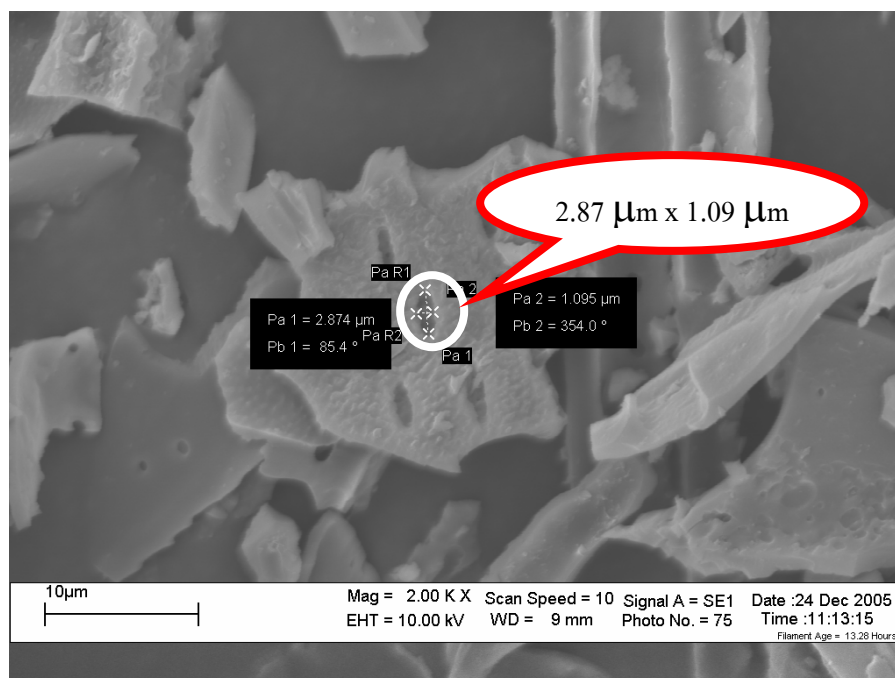
ภาพที่ 30 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 μm



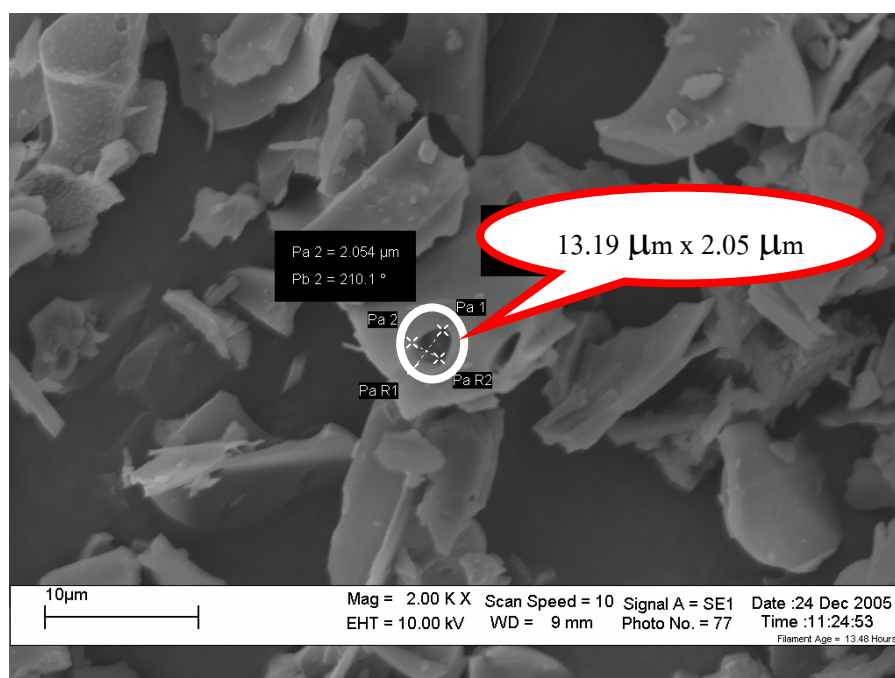
ภาพที่ 31 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า
ระยะปรากฏในภาพ 2 μm



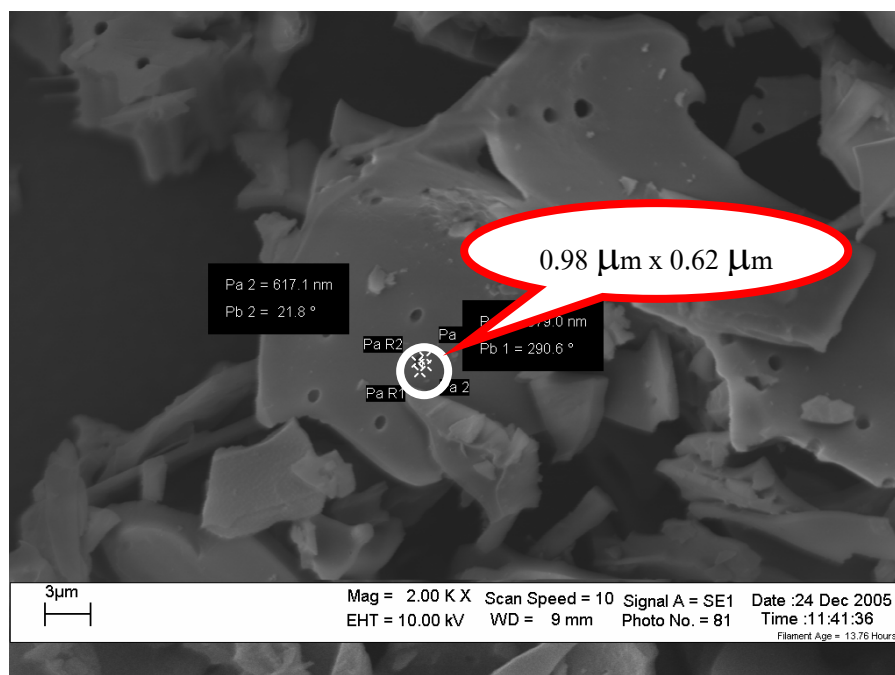
ภาพที่ 32 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจุ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น
ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 μm



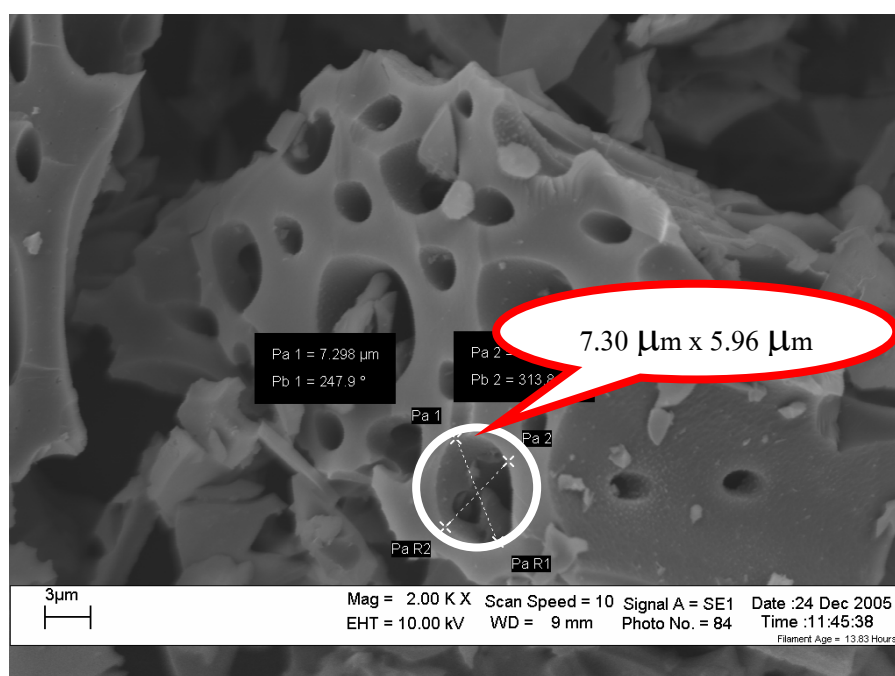
ภาพที่ 33 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจุ อายุ 1 ปี ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
ระยะปรากฏในภาพ 10 μm



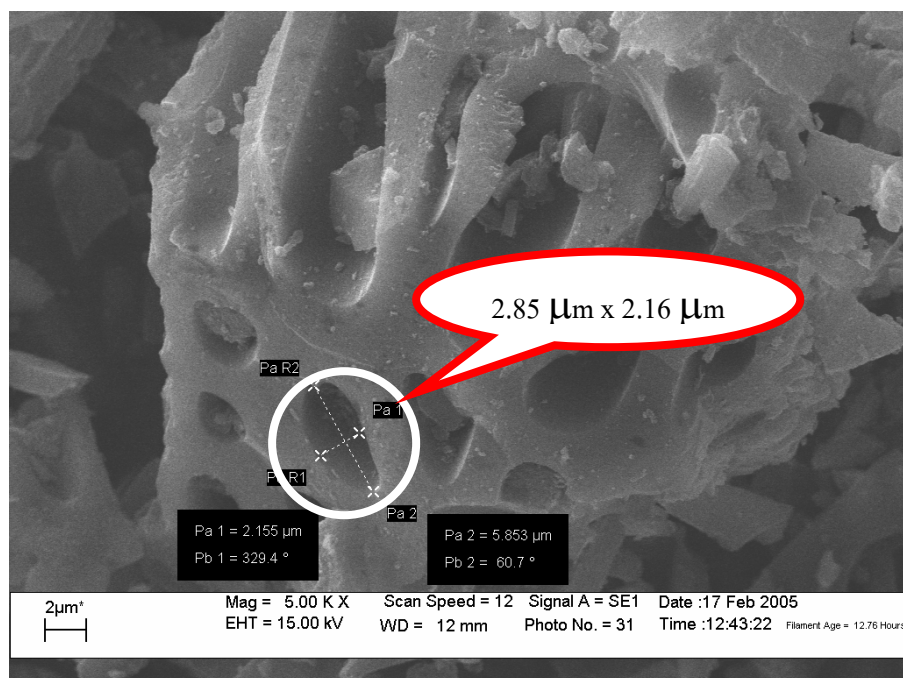
ภาพที่ 34 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจุ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 μm



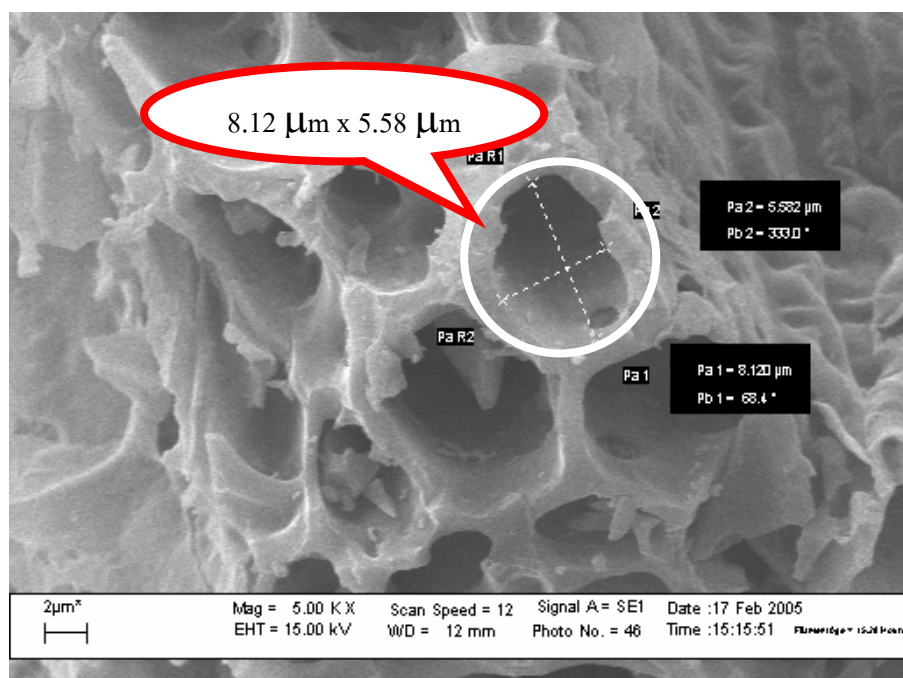
ภาพที่ 35 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า
ระยะปรากฏในภาพ 10 μm



ภาพที่ 36 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 10 μm



ภาพที่ 37 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า
ระยะปรากฏในภาพ 2 μm



ภาพที่ 38 สภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น
ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ระยะปรากฏในภาพ 2 μm

3.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์ โดยเทคนิคฟลูอริเออร์ ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรเมทรี

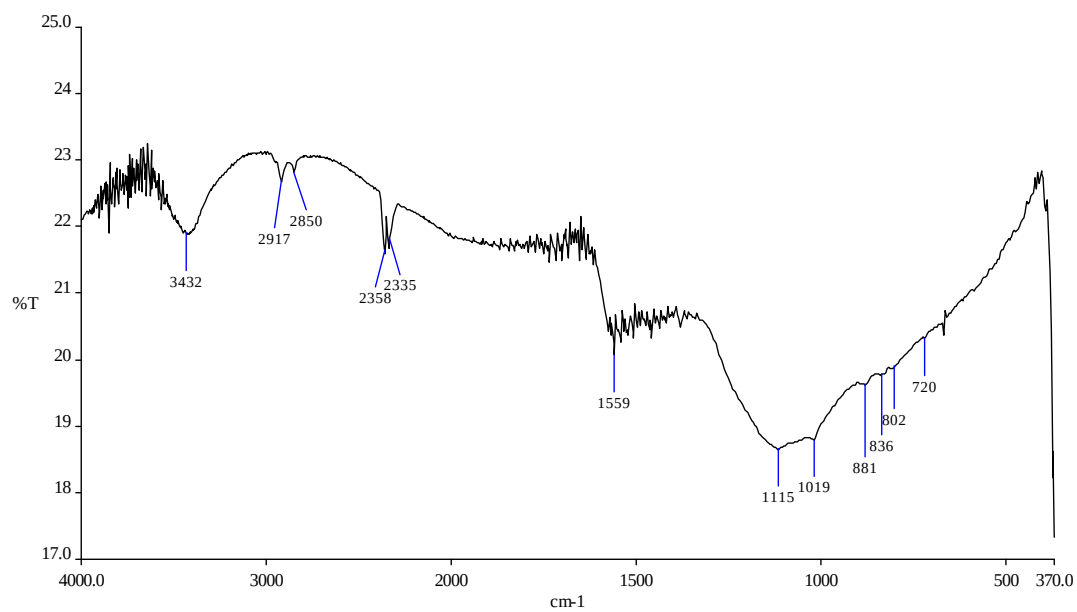
เนื่องจากการที่ถ่านกัมมันต์หรือถ่านไม้ไผ่ มีความสามารถในการดูดซับต่างกัน อาจเกิดจากการที่หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์หรือถ่านไม้ไผ่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟลูอริเออร์ ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรเมทรี โดยเลือกทำการทดลองกับถ่านกัมมันต์ Fluka และ ถ่านไม้ไผ่ผงและไผ่หมาจู้ ทั้งที่ไม่ได้รับการกระตุ้น และกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลแสดงในภาพที่ 39 ถึง 58

การเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในถ่านไม้ไผ่เมื่อทำการกระตุ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากแถบการสั่นในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังตารางที่ 15

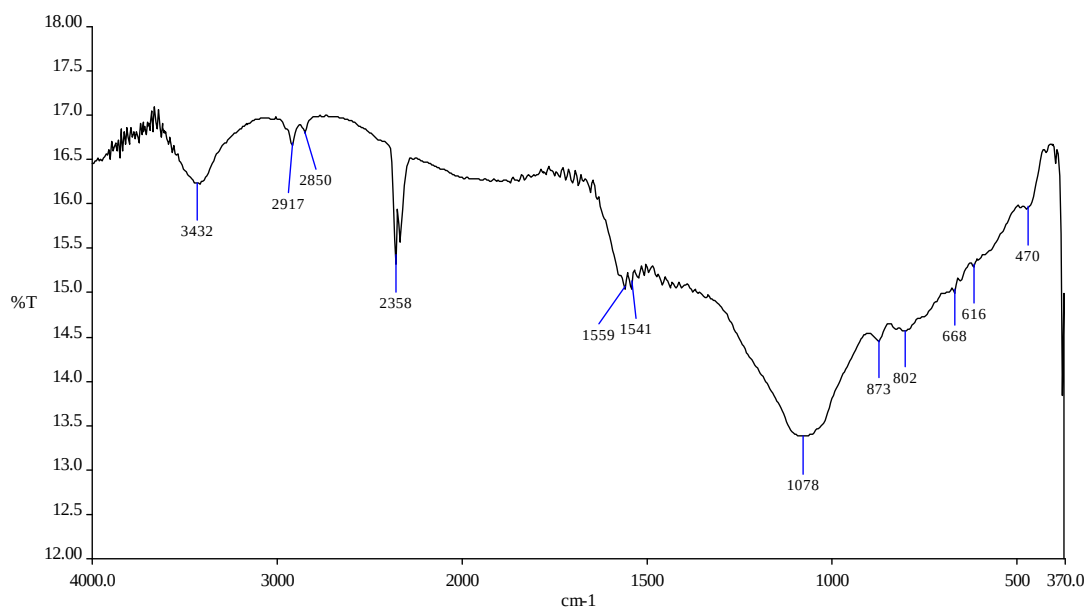
ตารางที่ 15 แสดงค่าเลขคลื่นของแถบต่างๆที่เกิดขึ้นในอินฟราเรดสเปกตรัม พร้อมการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm ⁻¹)
Hydroxyl group (O-H Stretching, ROH)	3,450 – 3,350
Alkane (C-H Stretching)	2,950 - 2800
Ester (ROOR')	1,750 – 1,650
Aromatic (C-C Stretching)	
Asymmetric and symmetric carboxylate ((C-O) ₂ Streching)	1,580 – 1,540
และ Alkane (C-H Bending)	
Alcoholic (C-O Stretching)	
Ether (ROR)	1,050 – 1,200
Cyclic group	880 - 650

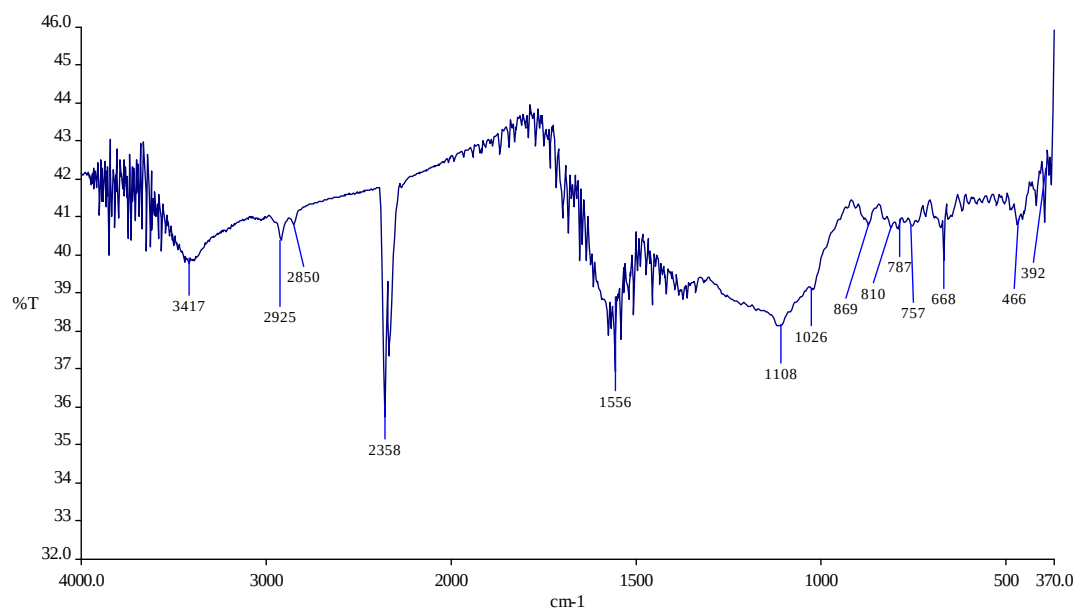
ที่มา: Pavia *et al.* (2001)



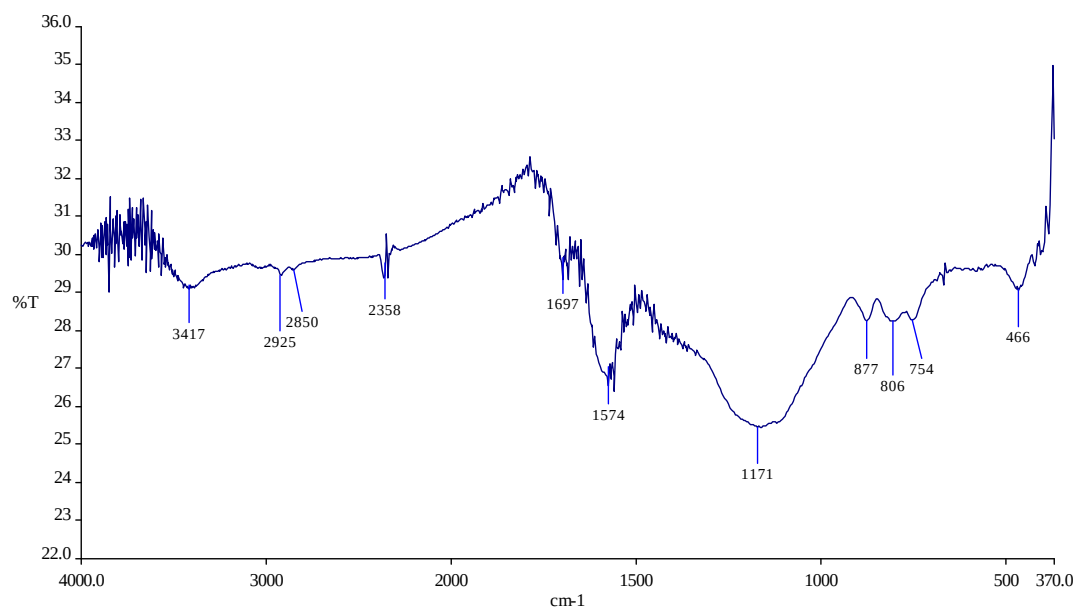
ภาพที่ 39 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ Fluka



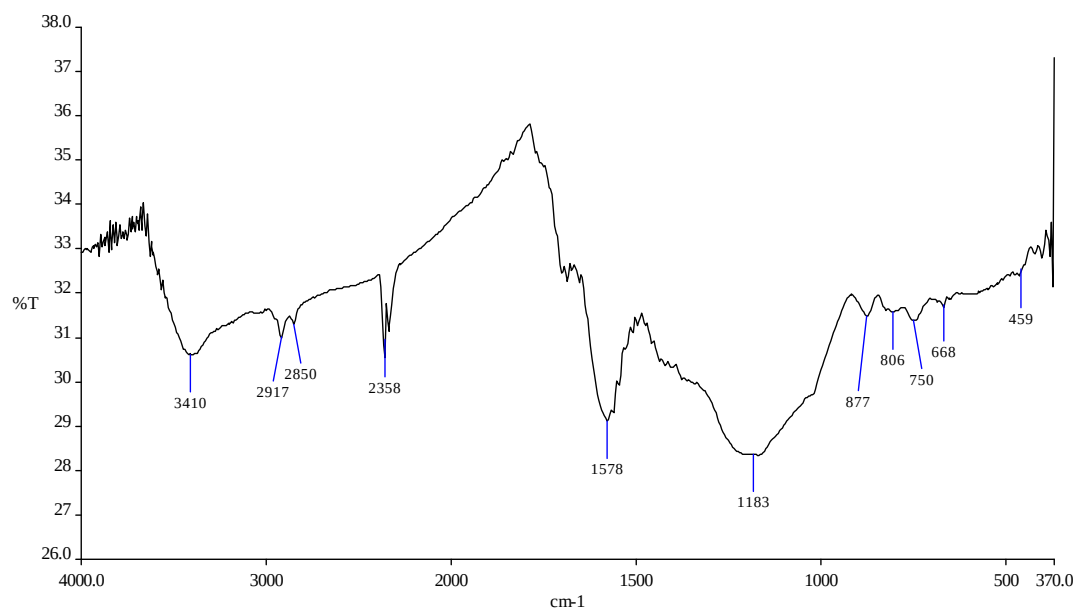
ภาพที่ 40 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ Bunton



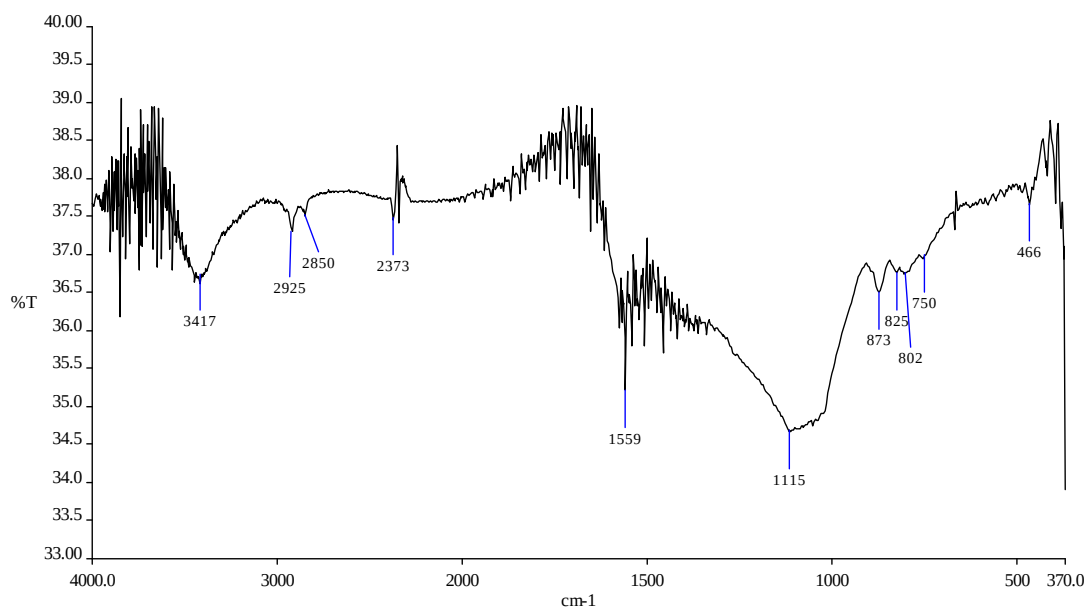
ภาพที่ 41 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



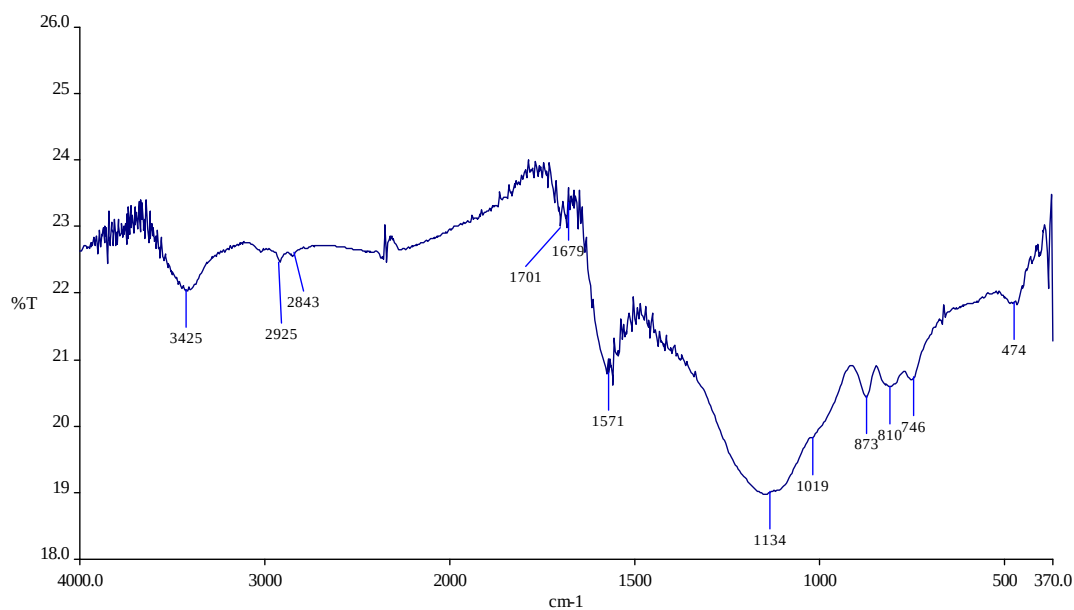
ภาพที่ 42 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



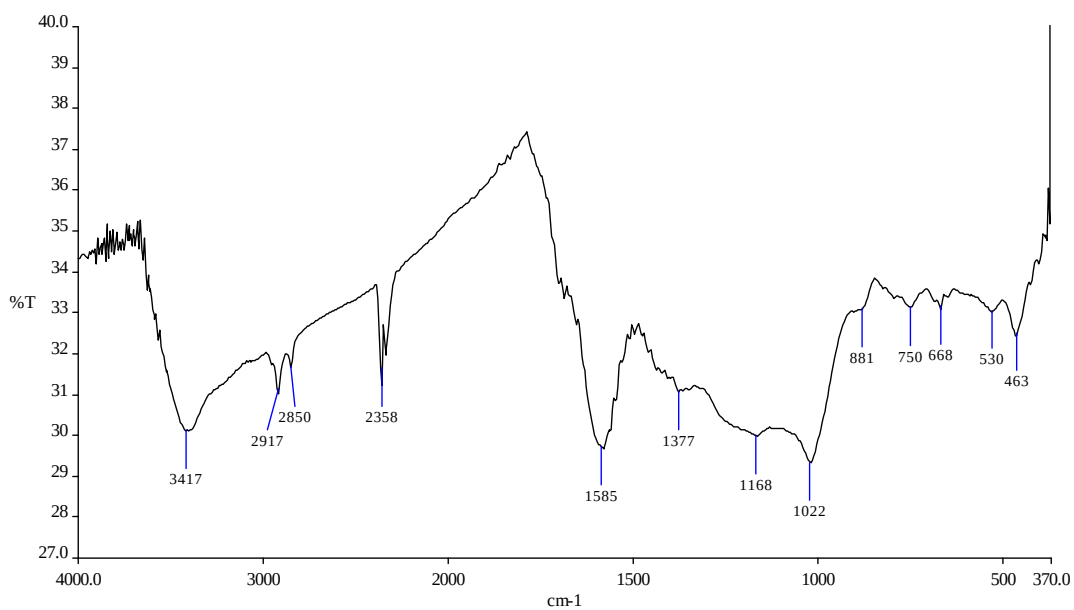
ภาพที่ 43 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์



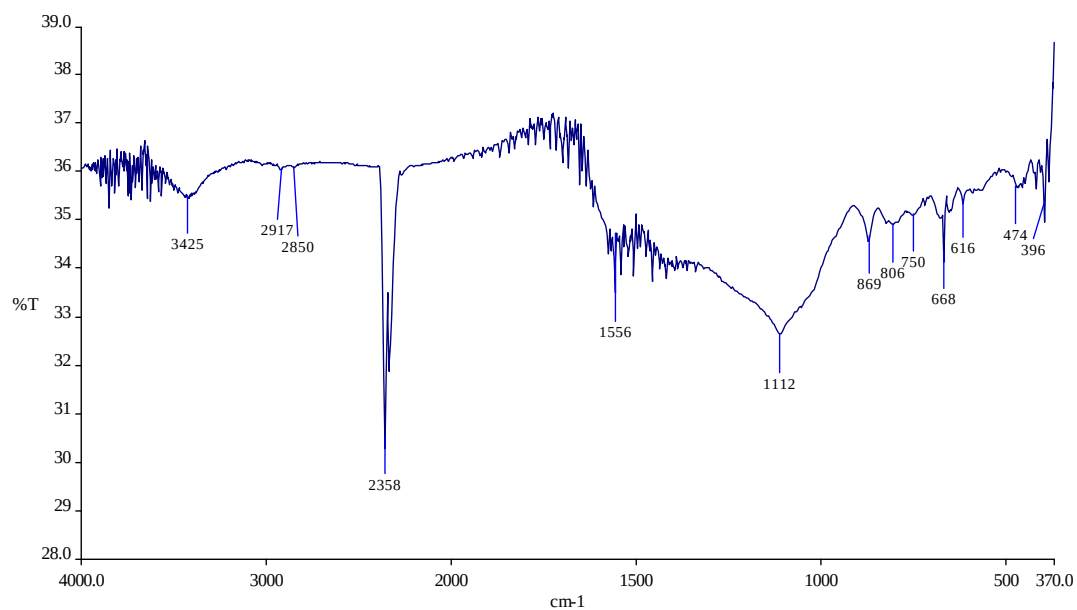
ภาพที่ 44 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



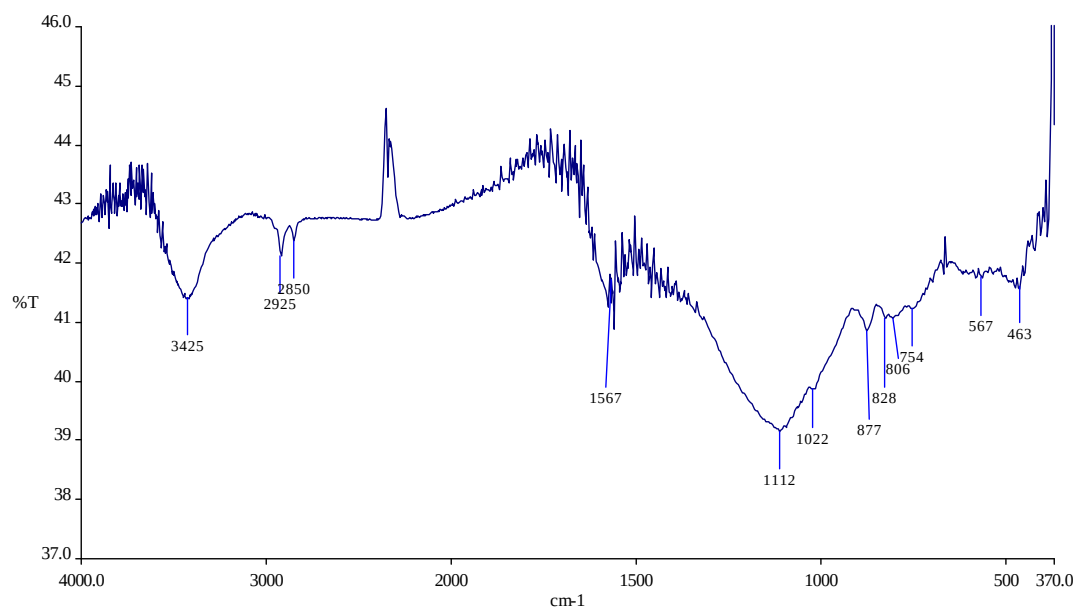
ภาพที่ 45 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



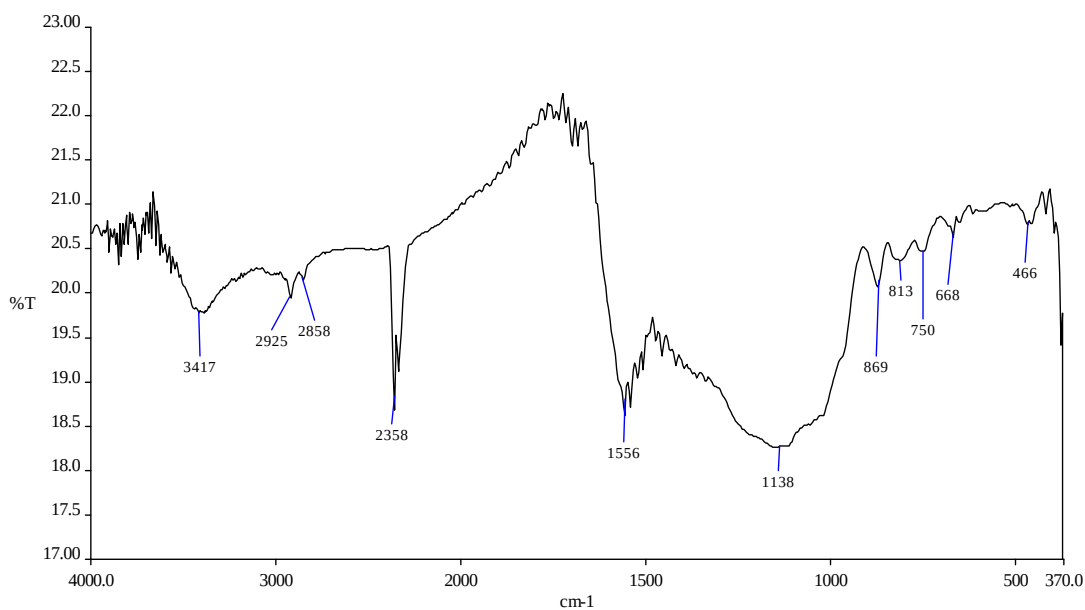
ภาพที่ 46 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์



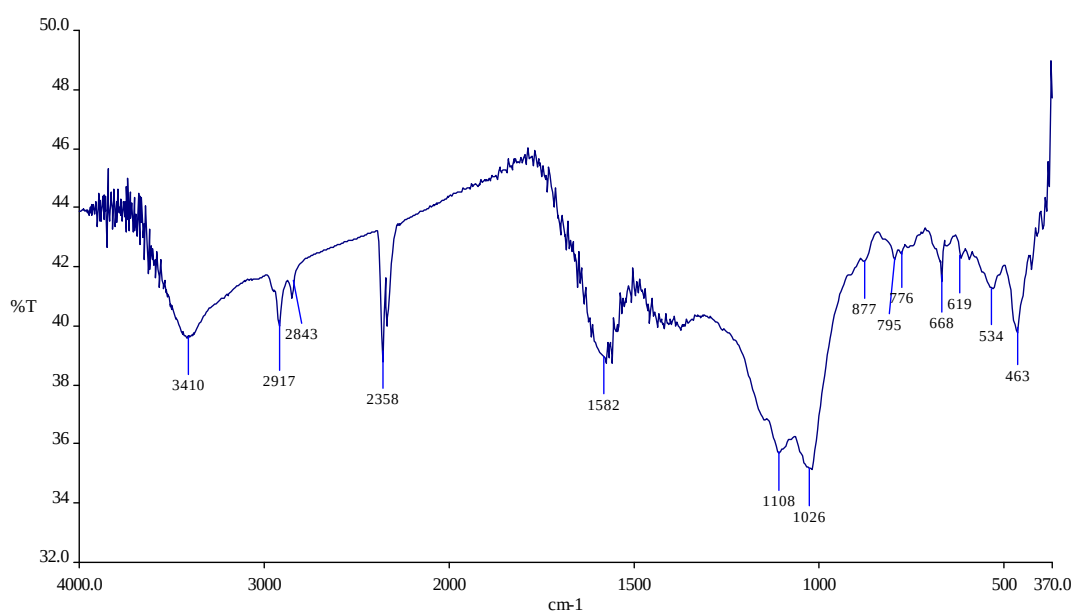
ภาพที่ 47 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



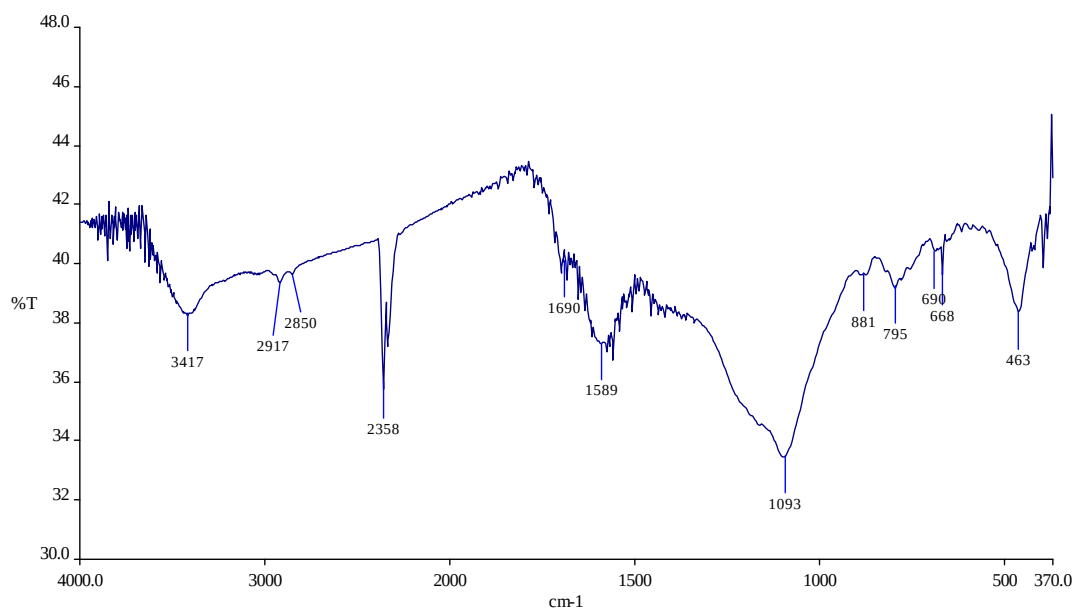
ภาพที่ 48 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



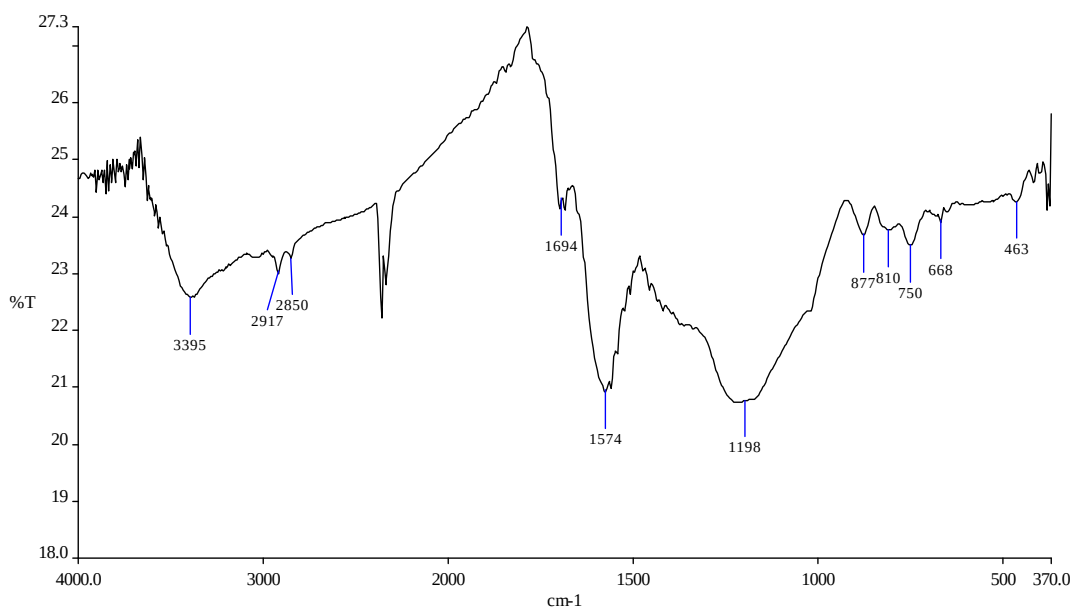
ภาพที่ 49 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



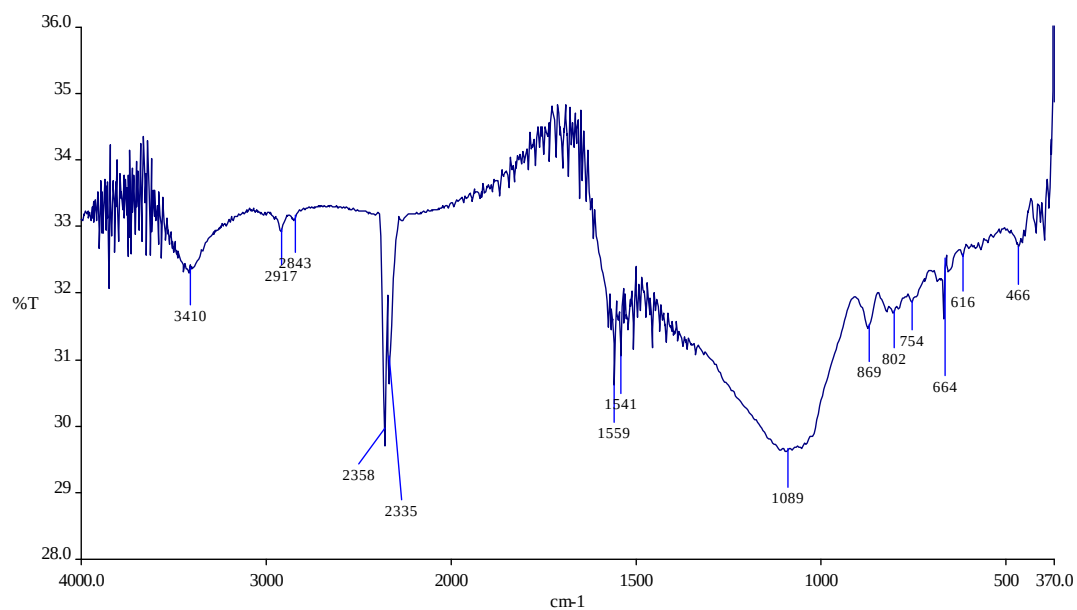
ภาพที่ 50 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



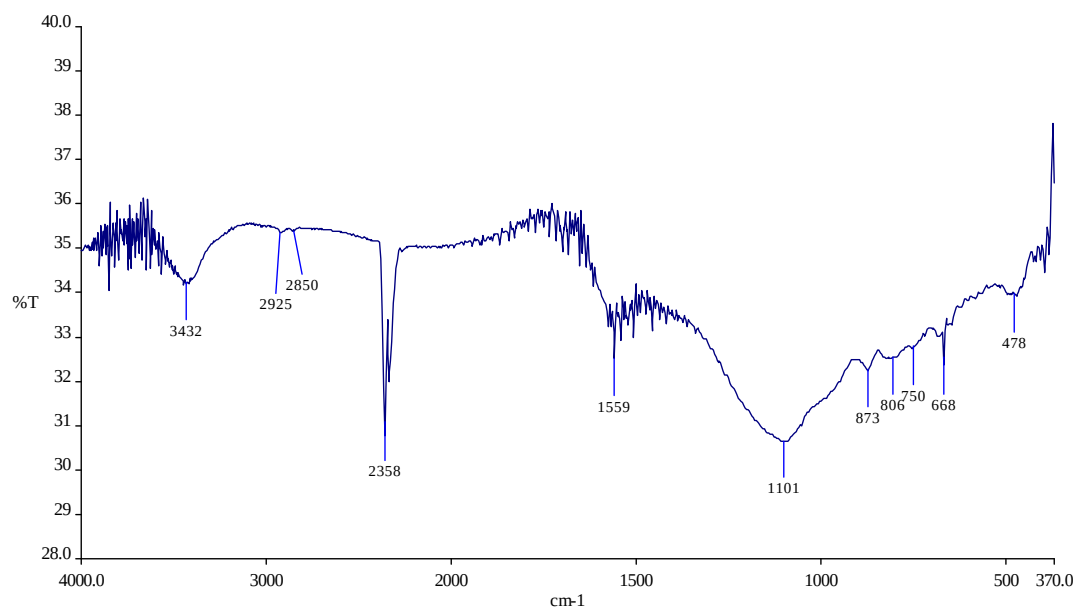
ภาพที่ 51 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



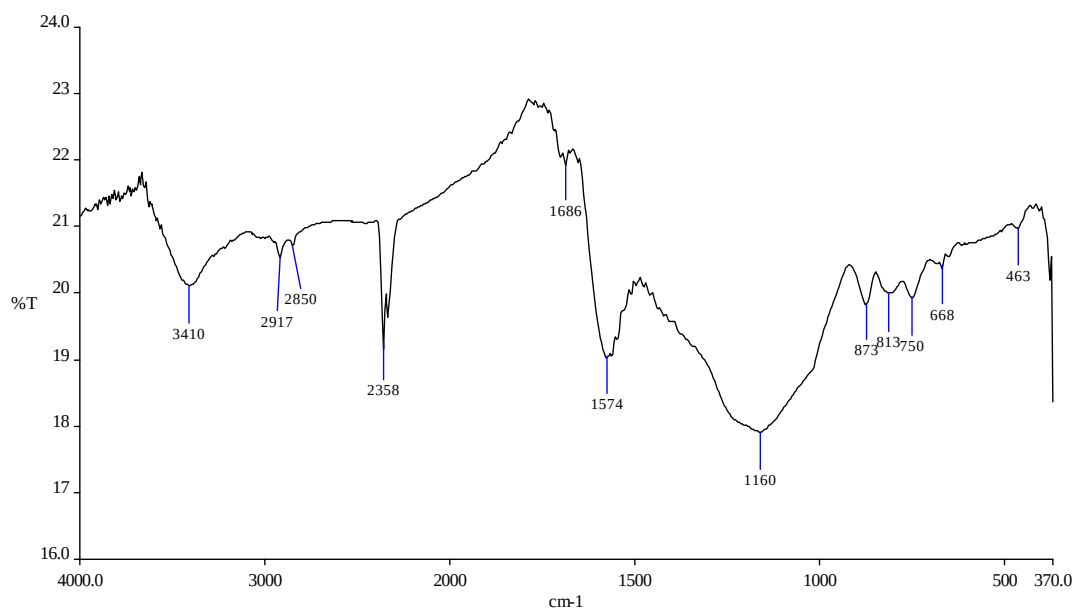
ภาพที่ 52 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์



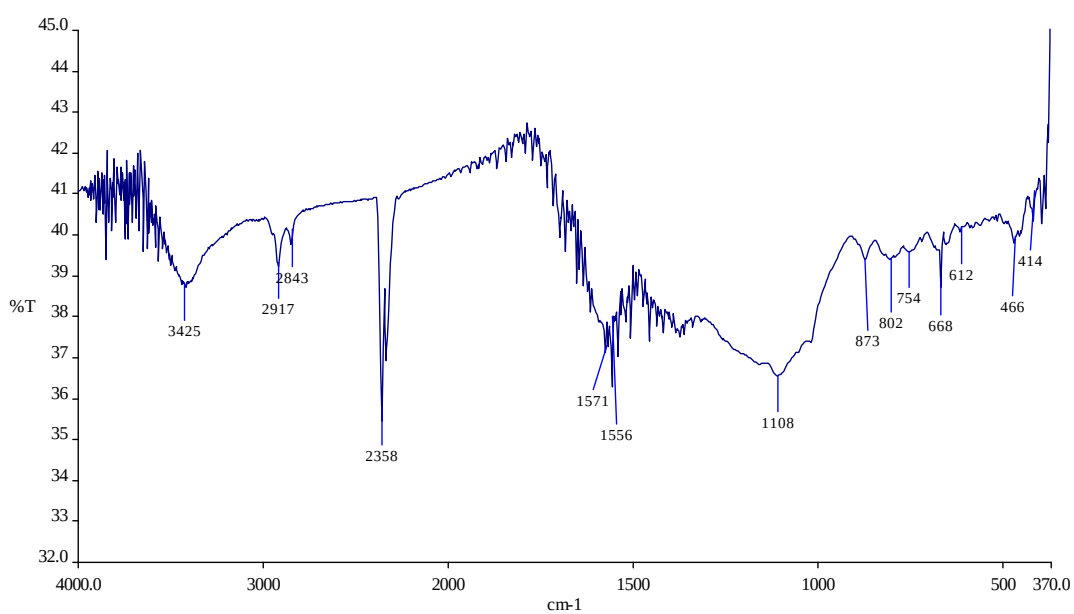
ภาพที่ 53 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



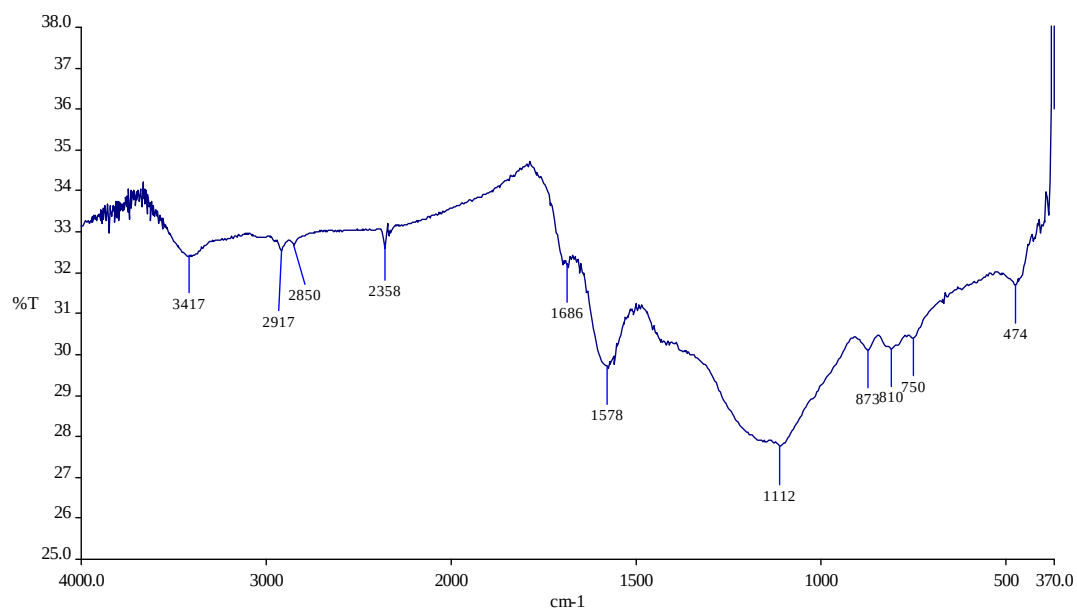
ภาพที่ 54 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



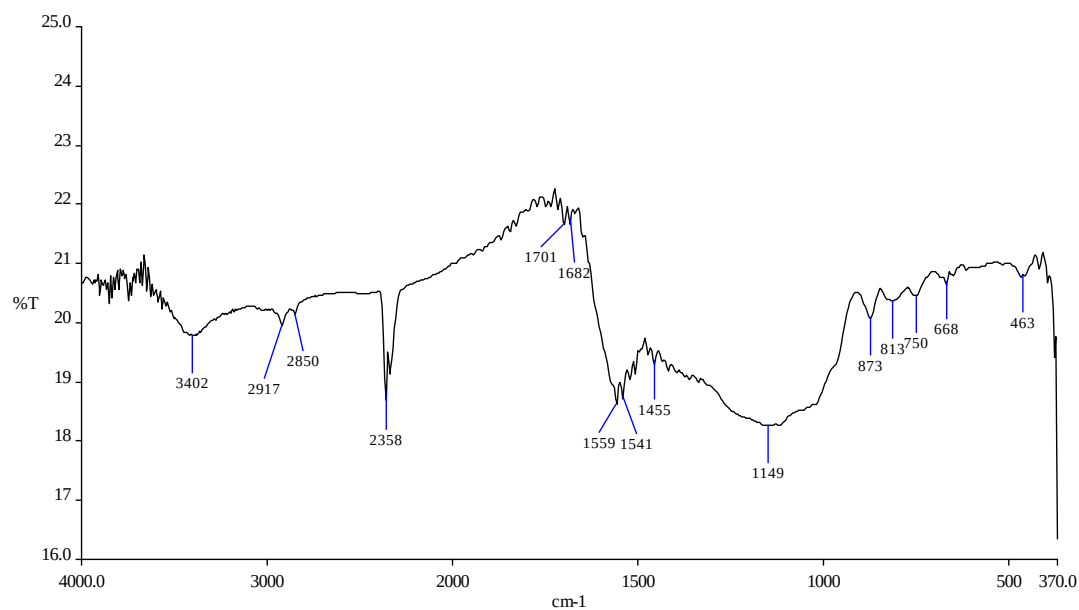
ภาพที่ 55 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 56 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี ที่ไม่ถูกกระตุ้น



ภาพที่ 57 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก



ภาพที่ 58 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 16 ลักษณะสเปกตรัมจากเทคนิคฟลูอริเยอร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่

ชนิดถ่าน	เลขคลื่น (cm ⁻¹)					
	3,450 – 3,350	2,950 - 2800	1,750 – 1,650	1,580 – 1,540	1,000 – 1,200	880 - 650
Fluka*	board, medium	very weak	(-)	very weak	board, strong	very weak
	3,432	2,917 2,850		1,559	1,115 1,019	881 836 802 720
Bunton**	board, medium	very weak	(-)	weak	board, medium	weak
	3,432	2,917 2,850		1,559 1,541	1,078	873 802 668 616
ไผ่ตง อายุ 1 ปี	board, medium	medium	(-)	medium	board, weak	board
	3,417	2,925 2,850		1,556	1,108 1,026	869 810 787 668
ไผ่ตง อายุ 1 ปี กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄	board, weak	weak	weak	strong	board, medium	sharp
	3,417	2,925 2,850	1,697	1,574	1,171	877 806 754
ไผ่ตง อายุ 1 ปี กระตุ้นด้วย KOH	board, weak	medium	weak	strong	board, medium	sharp
	3,410	2,917 2,850	~1,700	1,578	1,183	877 806 750 668
ไผ่ตง อายุ 2 ปี	board, medium	medium	(-)	strong	board, strong	board
	3,417	2,925 2,850		1,559	1,115	873 835 802 750
ไผ่ตง อายุ 2 ปี กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄	board, weak	weak	weak	strong	board, medium	sharp
	3,425	2,925 2,843	1,701 1,679	1,571	1,134 1,019	873 810 746
ไผ่ตง อายุ 2 ปี กระตุ้นด้วย KOH	sharp, strong	medium	weak	strong	board, medium	sharp
	3,417	2,917 2,850	~1,700	1,585	1,168 1,022	881 750 668

ตารางที่ 16 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	เลขคลื่น (cm ⁻¹)					
	3,450 – 3,350	2,950 - 2800	1,750 – 1,650	1,580 – 1,540	1,050 – 1,200	880 - 650
ไผ่ตง อายุ 3 ปี	board, weak	very weak	(-)	weak	board, medium	sharp
	3,425	2,917 2,850		1,556	1,112	869 806 750 668
ไผ่ตง อายุ 3 ปี กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄	board, medium	weak	(-)	medium	board, strong	sharp
	3,425	2,925 2,850		1,567	1,112 1,022	877 828 806 754
ไผ่ตง อายุ 3 ปี กระตุ้นด้วย KOH	board, medium	weak	very weak	medium	board, strong	sharp
	3,417	2,925 2,858	~1,700	1,556	1,138	869 813 750 668
ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี	board, medium	weak	(-)	medium	board, medium	sharp
	3,410	2,917 2,843		1,582	1,108 1,026	877 795 776 668
ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄	board, medium	very weak	very weak	medium	board, medium	sharp
	3,417	2,917 2,850	1,690	1,589	1,093	881 795 690 668
ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี กระตุ้นด้วย KOH	board, medium	weak	very weak	strong	board, medium	sharp
	3,395	2,917 2,850	1,694	1,574	1,198	877 810 750 668

ตารางที่ 16 (ต่อ)

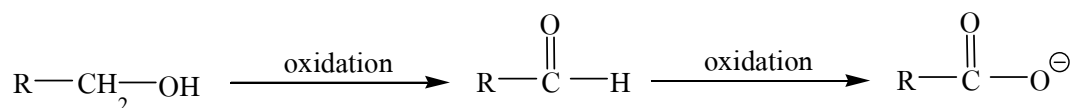
ชนิดถ่าน	เลขคลื่น (cm ⁻¹)					
	3,450 – 3,350	2,950 - 2800	1,750 – 1,650	1,580 – 1,540	1,050 – 1,200	880 - 650
ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี	board, medium	weak	(-)	weak	board, medium	sharp
	3,410	2,917 2,843		1,559 1,541	1,089	869 802 754 664
ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄	board, medium	very weak	(-)	very weak	board, medium	sharp
	3,432	2,925 2,850		1,559	1,101	873 806 750 668
ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี กระตุ้นด้วย KOH	board, medium	weak	weak	medium	board, strong	sharp
	3,410	2,917 2,850	1,686	1,574	1,160	873 813 750 668
ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี	board, medium	medium	(-)	medium	board, medium	sharp
	3,425	2,917 2,843		1,571 1,556	1,108	873 802 754 668
ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี กระตุ้นด้วย H ₃ PO ₄	board, medium	very weak	weak	medium	board, strong	sharp
	3,417	2,917 2,843	1,686	1,578	1,112	873 810 750
ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี กระตุ้นด้วย KOH	board, medium	weak	weak	medium	board, medium	sharp
	3,402	2,917 2,843	1,701 1,682	1,559 1,541	1,149	873 813 750 668

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

จากสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไฟ Bunton พบว่า แถบการสั่น ในช่วง $1,750 - 1,540 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C=O หรือ COO^- มีความเข้มข้นมาก ซึ่งคาดว่า ผู้ผลิตได้ทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ปริมาณสารระเหยถูกกำจัดออกไปมาก ทำให้ถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไฟ Bunton มีความเข้มข้นของแถบล่างกล่าวน้อย แสดงให้เห็นถึงการเกิดการสลาย พันธะต่างๆ จนเหลือแต่ปริมาณคาร์บอนมากขึ้น แต่จะพบแถบการสั่นที่ประมาณ $3,432 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นแถบการสั่นของ O-H ซึ่งจริงๆ แล้วไม่ควรที่จะพบแถบการสั่นที่บริเวณนี้ แต่เนื่องจากอาจมีความชื้นในถ่านกัมมันต์

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของถ่านไม้ไฟ จะพบว่า ในถ่านไม้ไฟที่ไม่ได้รับการ กระตุ้น จะมีแถบของหมู่ -OH เกิดขึ้น แต่จะมีแถบของหมู่ C=O หรือ COO^- ในความเข้มที่ต่ำมาก หรืออาจไม่มีเลย แต่เมื่อทำการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะพบว่า แถบหมู่ -OH มีความเข้มต่ำลง และ ความเข้มของแถบ C=O หรือ COO^- เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเปลี่ยนจากหมู่ -OH ไปเป็นหมู่ C=O หรือ COO^- ตามสมการ



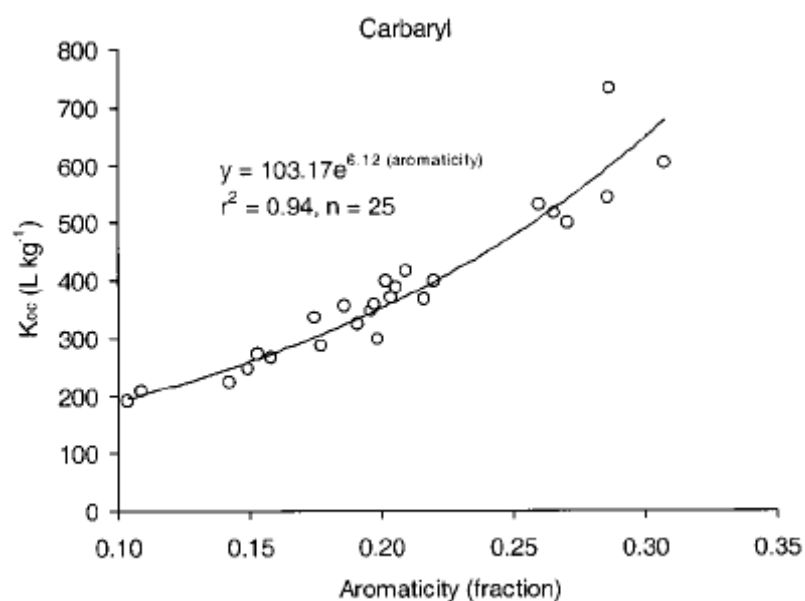
ภาพที่ 59 แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ที่มา : Wade (2003)

เช่น เมื่อเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านไม้ไฟตอง อายุ 1 ปี ที่ไม่ได้รับการ กระตุ้นกับ ถ่านไม้ไฟตอง อายุ 1 ปี ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะพบว่ามีแถบของการสั่นเพิ่มขึ้นในช่วงเลขคลื่นประมาณ $1,600 - 1,700 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงของแถบ C=O หรือ COO^- แต่ในถ่านที่ไม่ได้รับการกระตุ้น จะไม่มีแถบลักษณะนี้ เพราะฉะนั้น จึงแสดงว่าการกระตุ้นมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้หมู่ฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงไป

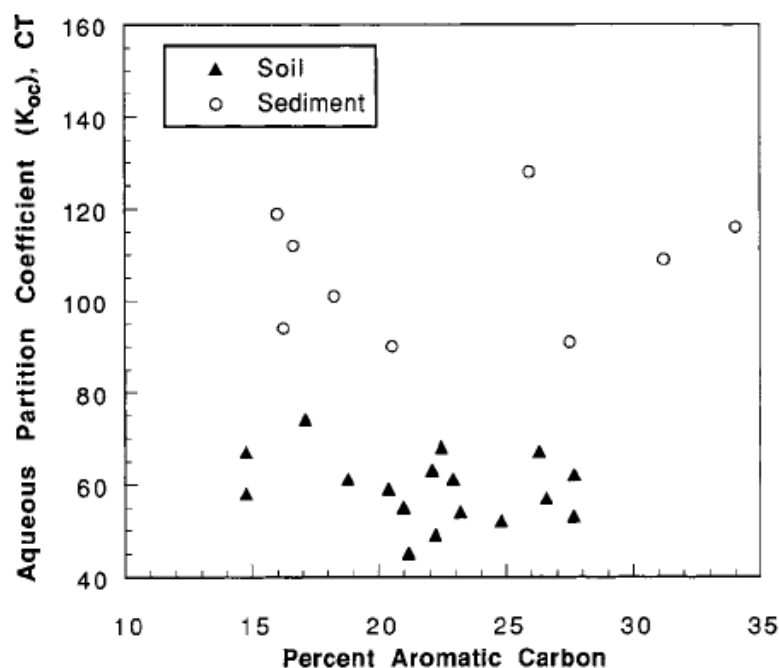
การที่มีหมู่ฟังก์ชัน C=O หรือ COO^- ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ต่างกันออกไป เช่น เมื่อนำไปดูดซับไอออนของโลหะ การดูดซับ น่าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากหมู่ C=O หรือ COO^- มีความเป็นลบสูง ก็สามารถที่จะดึงดูดไอออนของโลหะ ซึ่งมีสมบัติเป็นบวกได้มากขึ้น เป็นต้น

เมื่อพิจารณาแถบการสั่นในช่วงเลขคลื่น $880 - 650 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่อะโรมาติก พบว่า ถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไผ่ Buntan มีความเข้มของแถบต่ำกว่า ถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ นั่นคือ ถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไผ่ Buntan มีความเป็นอะโรมาติกต่ำกว่า โดยความเป็นอะโรมาติกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และเมื่อพิจารณาพร้อมกับความสามารถในการดูดซับ พบว่าความเป็นอะโรมาติกนั้น ไม่สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการดูดซับได้ในทุกกรณี เช่น Ahmad *et al.* (2001) ได้ทำการทดลองโดยใช้ดินในการดูดซับคาร์บาริล แล้วพิจารณาความเป็นอะโรมาติกเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับ ซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับนั้น เพิ่มขึ้นตามปริมาณของความเป็นอะโรมาติก (ภาพที่ 60) แต่ในการทดลองของ Kile *et al.* (1999) ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ดินในการดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ พบว่าความสามารถในการดูดซับ จะไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของความเป็นอะโรมาติก (ภาพที่ 61) เป็นต้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น ขนาดของรูพรุนที่สัมพันธ์กับขนาดของตัวถูกดูดซับ หรือประจุผิวของถ่านด้วย เป็นต้น



ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของความเป็นอะโรมาติกและความสามารถในการดูดซับคาร์บาริล

ที่มา: Ahmad *et al.* (2001)



ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของความเป็นอะโรมาติกและความสามารถในการดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์

ที่มา: Kile *et al.* (1999)

4. การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

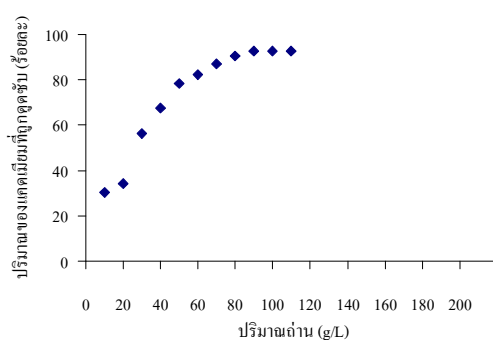
ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ผลิตได้ โดยทำการศึกษาดูดซับ สารละลายแคดเมียม(II) สารละลายเมทิลลีนบลู สารละลายฟีนอล และ สารละลายไอโอดีน ซึ่งจากการทำการหาค่าเลขไอโอดีน (Iodine number) จะเห็นว่า ค่าที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นโดยกรดฟอสฟอริกมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น จึงเลือกถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นโดยกรดฟอสฟอริกมาศึกษาสภาวะที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่ น้ำหนักถ่าน ค่าความเป็นกรดด่าง และ เวลาสัมผัส และได้ทำการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไฟทางการค้า ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะใช้สภาวะที่เหมาะสมจากถ่านที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมาใช้ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ และได้ทำการเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายแคดเมียม(II) กับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดไนตริก

4.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียม(II)

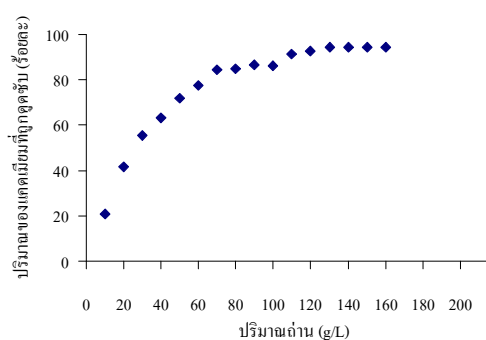
4.1.1 การศึกษาปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทำการทดลองดูดซับแคดเมียม(II) ด้วยถ่าน ใช้สารละลาย แคดเมียม(II) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 10 mg/l ปริมาตร 10 ml และมีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที โดยเติมน้ำหนักของ ถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.10 g จนกว่า ค่าร้อยละของความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่ สมดุล โดยถ่านแต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกปริมาณของ ถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance : ANOVA) ในการเลือกปริมาณถ่านที่เหมาะสม

ภาพที่ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับปริมาณ ของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 17 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

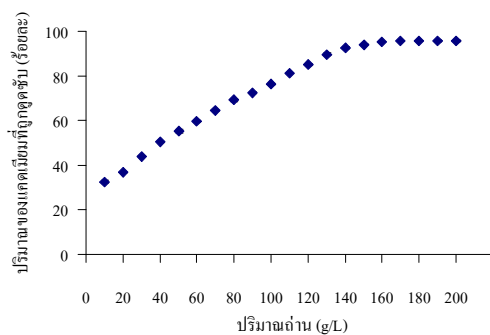


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

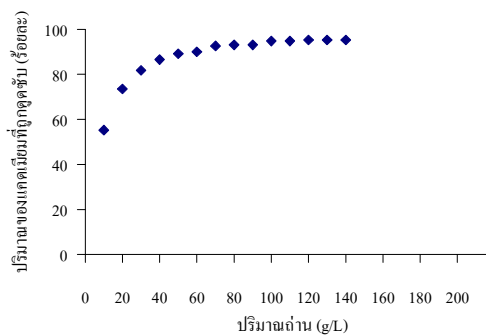


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

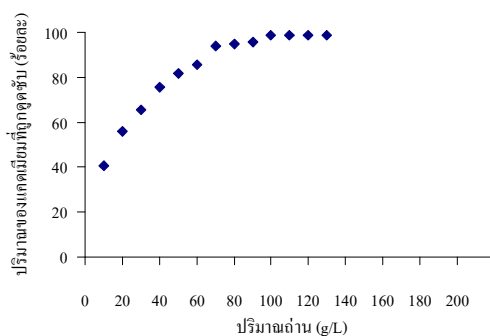
ภาพที่ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับปริมาณของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



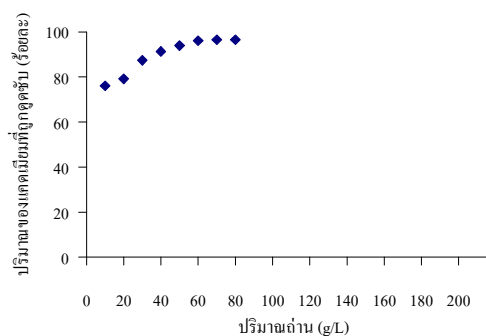
(ค) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



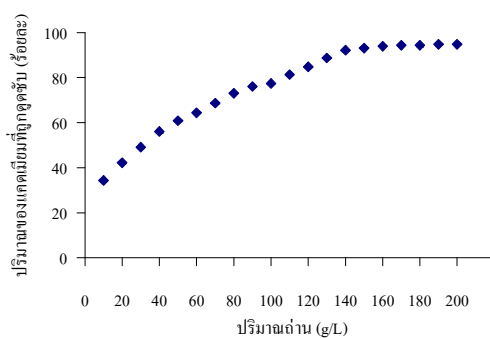
(ง) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



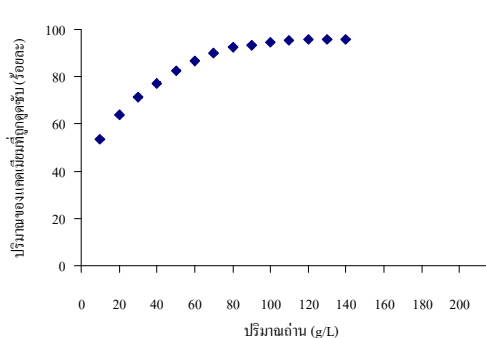
(จ) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



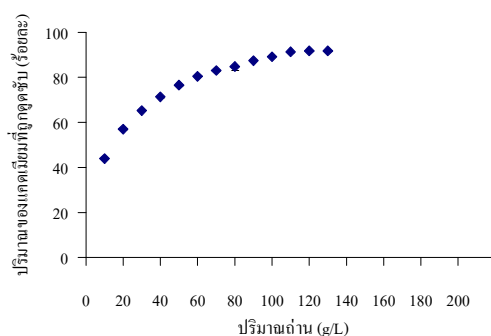
(ฉ) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



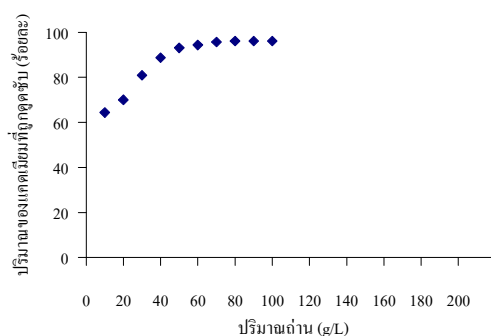
(ช) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



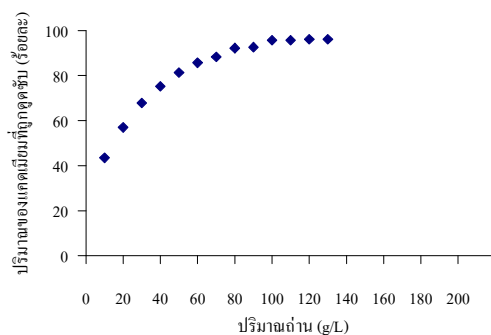
(ซ) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



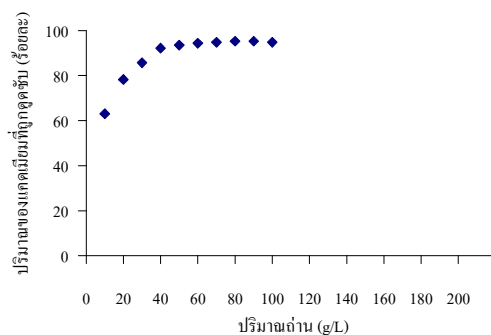
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



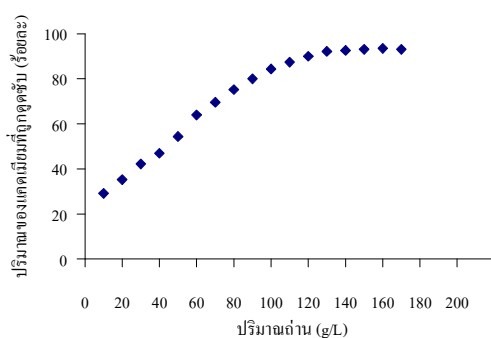
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



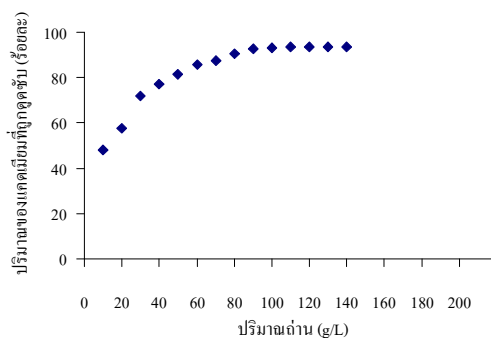
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ตารางที่ 17 แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิดที่เหมาะสมในการดูดซับ
แคดเมียม(II)

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ปริมาณถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง (g)	ปริมาณถ่าน ที่เหมาะสม (g/l)	ปริมาณแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	0.90	90.0	92.43 ± 0.09
ถ่าน Bantan**	-	-	1.30	130.0	94.46 ± 0.21
ไม้ไผ่ผดง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.60	160.0	95.20 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	1.20	120.0	95.05 ± 0.08
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.00	100.0	98.54 ± 0.27
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.60	60.0	96.29 ± 0.14
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.70	170.0	94.31 ± 0.11
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	1.10	110.0	95.27 ± 0.17
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.10	110.0	91.36 ± 0.39
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.70	70.0	95.79 ± 0.14
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.00	100.0	95.53 ± 0.17
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.60	60.0	94.40 ± 0.19
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.50	150.0	93.12 ± 0.13
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	1.10	110.0	93.37 ± 0.32

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ไม่ได้ถูกกระตุ้น จะใช้ปริมาณถ่านที่สูงกว่า
ในการดูดซับแคดเมียม(II) เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกเข้มข้น ร้อยละ
85 ที่พันธุ์และอายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้น ทำให้ถ่านสามารถดูดซับแคดเมียม(II) ได้
มากขึ้น

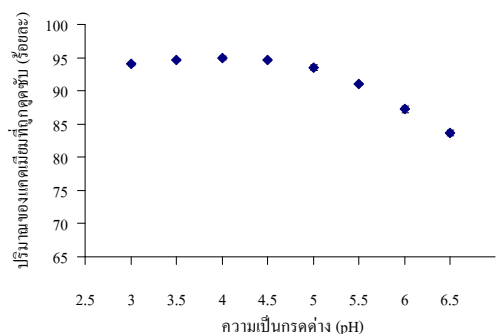
4.1.2 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายแคดเมียม(II) ความเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 10 ml ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 3.0 ถึง 6.5 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่างด้วยสารละลายกรดอะซิติก และสารละลายโซเดียมอะซิเตท และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที และเลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของ แคดเมียม(II) ถูกดูดซับสูงที่สุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการพิจารณา

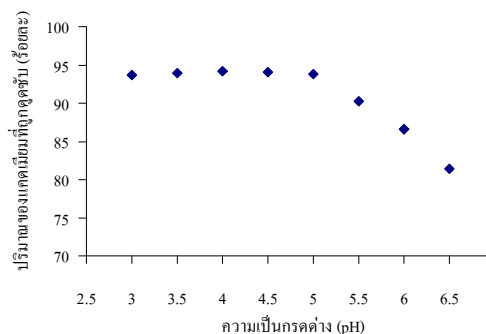
ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่าง กับปริมาณของ แคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 18 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และ ปริมาณของแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก ช่วง 3.0 ถึง 5.0 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม(II) จะใกล้เคียงกัน แต่จะลดลงอย่างมากเมื่อค่า ความเป็นกรดต่าง มากกว่า 5.0 ขึ้นไป ซึ่งอาจเป็นเพราะเมื่อความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นทำให้เกิดสาร เชนจ์ซ้อนไฮดรอกซิลของแคดเมียม(II) ที่มีสภาพความเป็นลบมากขึ้น เช่น $\text{Cd}(\text{OH})_2$ เป็นต้น จึงเกิด การผลักกับประจุลบที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ รวมถึงขนาดของสาร เชนจ์ซ้อนแคดเมียม(II) ดังกล่าว มีขนาดใหญ่ จึงเข้าถึงผิวถ่านกัมมันต์ได้น้อยลง ซึ่งทำให้การดูดซับ ลดลงเช่นกัน

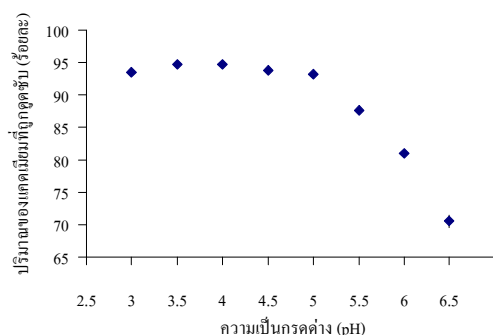
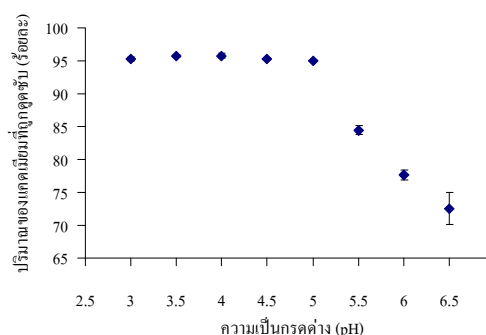
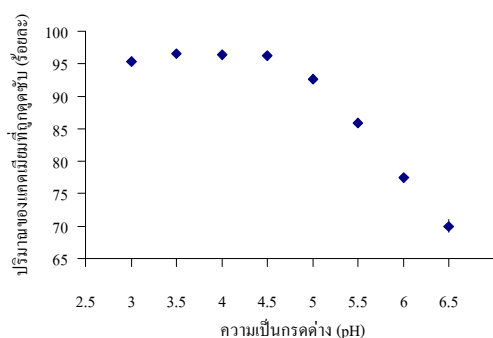
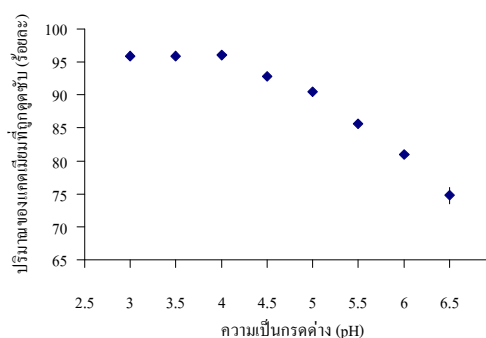
และค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียม(II) ขึ้นอยู่กับ ชนิดถ่าน เนื่องจากถ่านแต่ละชนิดใช้วัตถุดิบต่างกัน หรือนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นที่ต่างกัน จึง ได้ถ่านที่มีสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่าน ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างที่ เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านแต่ละชนิดแตกต่างกัน



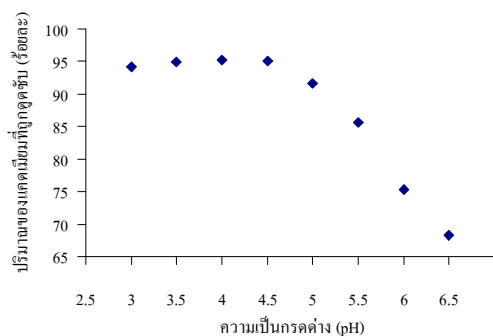
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



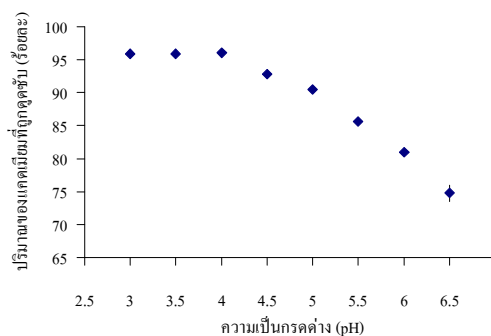
(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

(ค) ถ่านไม้ไผ่ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ง) ถ่านไม้ไผ่ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 (จ) ถ่านไม้ไผ่ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

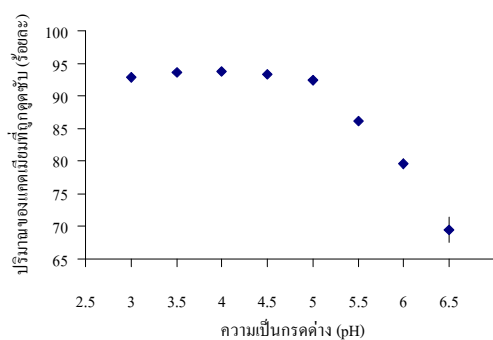
ภาพที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ กับปริมาณของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



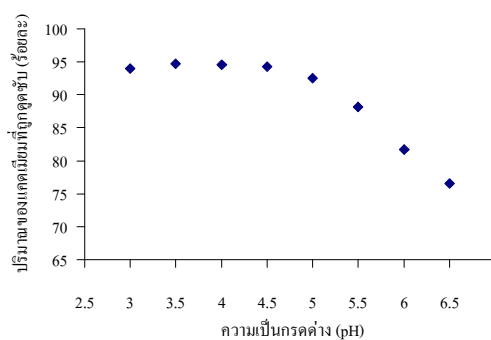
(ข) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



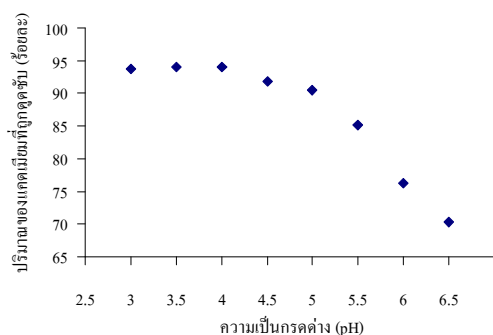
(ซ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



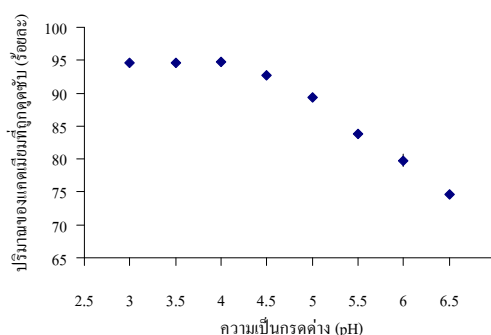
(ฅ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



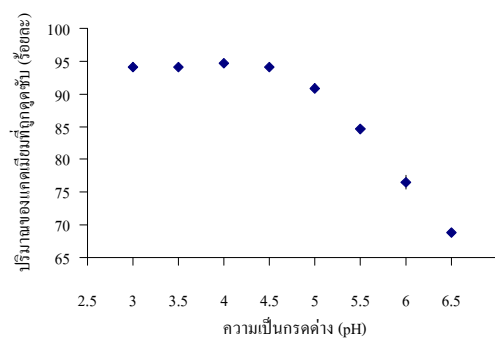
(ญ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



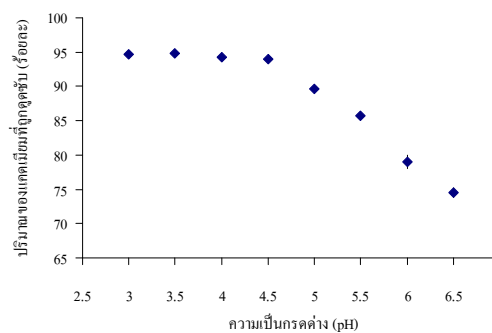
(ฎ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฏ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(จ) ถ่านไม้ไฟหมาจู อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไฟหมาจู อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ภาพที่ 63 (ต่อ)

ตารางที่ 18 แสดงความเป็นกรดต่างของสารละลายที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียม(II) ของ ถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ความเป็นกรดต่างที่ เหมาะสม (pH)	ปริมาณแคดเมียม ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	4.50	94.71 ± 0.14
ถ่าน Bantan**	-	-	5.00	93.80 ± 0.18
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.00	94.75 ± 0.24
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	4.50	95.30 ± 0.18
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	96.23 ± 0.33
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	4.00	96.01 ± 0.09
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	95.02 ± 0.15
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	5.00	95.03 ± 0.23
	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	93.34 ± 0.23
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	4.50	94.36 ± 0.20
ไม้ไผ่หมาจู	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.00	94.02 ± 0.21
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	4.00	94.77 ± 0.15
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	4.50	94.15 ± 0.18
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	4.00	94.28 ± 0.12

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

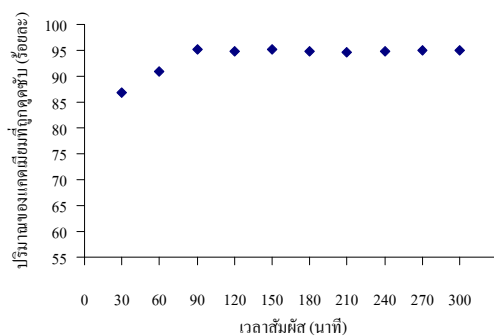
** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.1.3 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

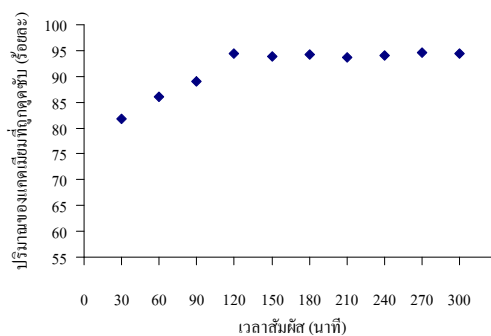
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลาย แคดเมียม(II) ความเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 10 ml ปรับค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสม (จากผลการทดลองข้อ 4.1.2) และใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด (จากผลการทดลองข้อ 4.1.1) และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่าครั้งละ 30 นาที จนกว่าค่าร้อยละของความเข้มข้นของแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านแต่ละชนิดจะมีเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่าร้อยละของความเข้มข้นของแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 64 แสดงเวลา กับ ปริมาณของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 19 แสดงเวลาที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับของแต่ละชนิด

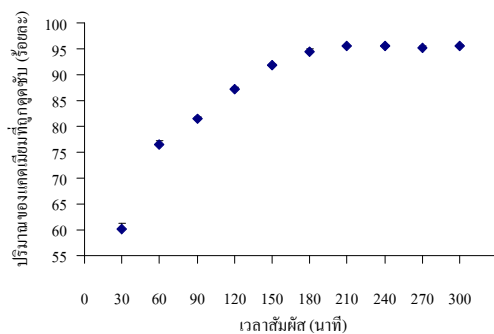
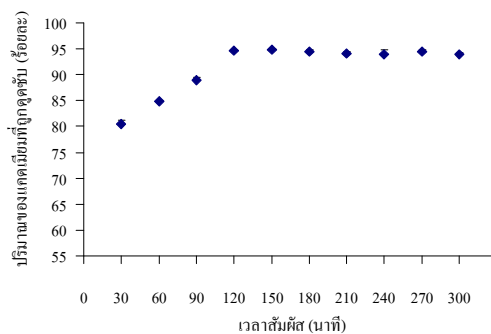
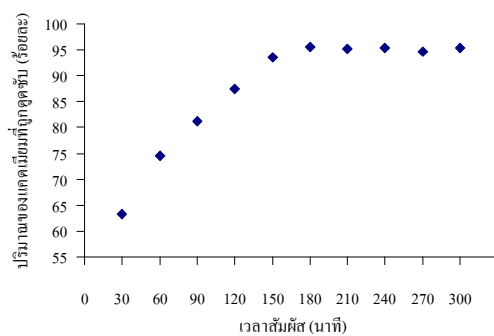
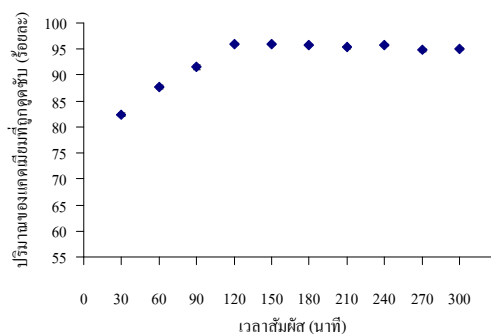
จากการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดย บริษัท Fluka พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที และเริ่มเข้าสู่สมดุลหลังจาก 90 นาที ส่วนถ่านกัมมันต์ Bunton และ ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 120 ถึง 150 นาที หลังจากนั้นจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ไผ่ที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น จะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 180 ถึง 210 นาที ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ถ่านได้รับการกระตุ้น จะเวลาที่ใช้ในการดูดซับแคดเมียม(II) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ได้รับการกระตุ้น



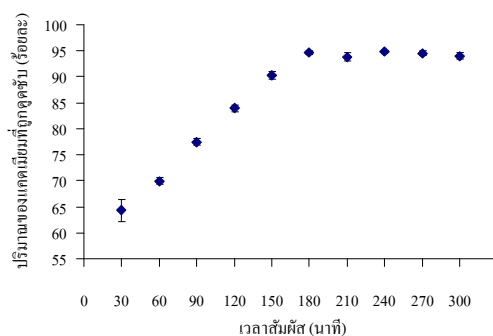
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



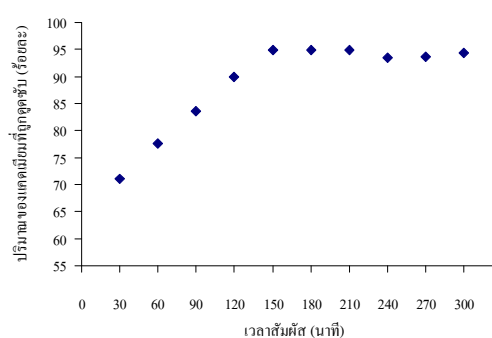
(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 (จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

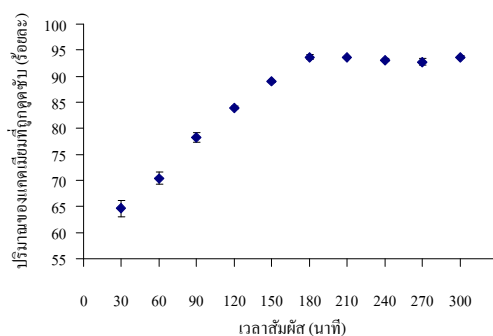
ภาพที่ 64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมพัทธ์ กับปริมาณของแคดเมียม(II) (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



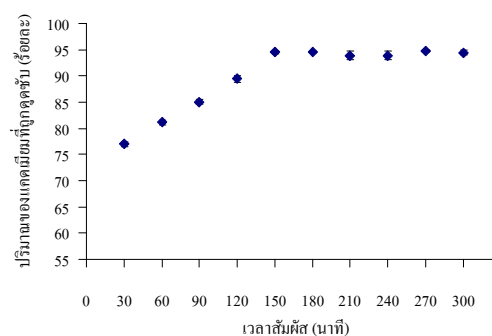
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกรด



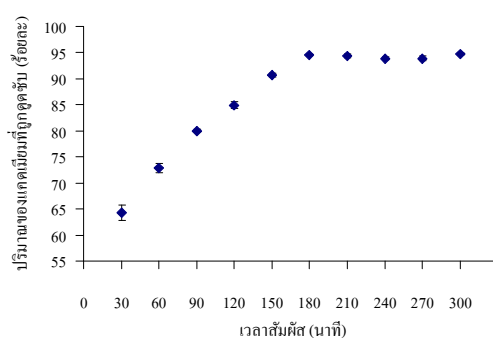
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกรดด้วย 85% H_3PO_4



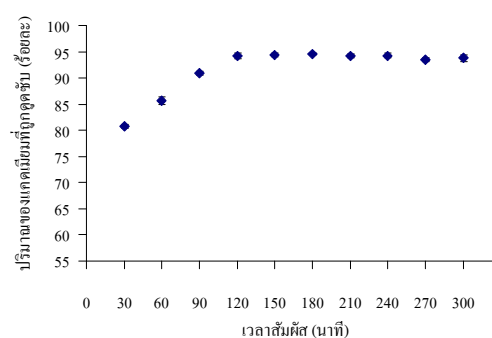
(ฅ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกรด



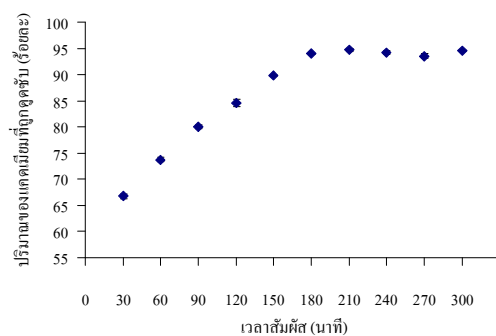
(ฌ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกรดด้วย 85% H_3PO_4



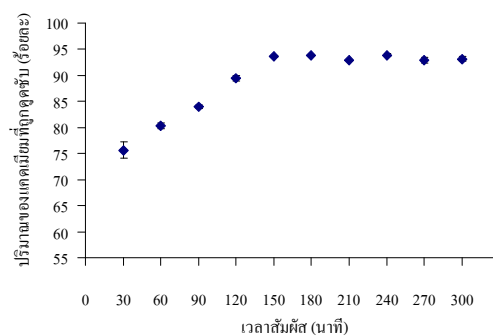
(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกรด



(ฏ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกรดด้วย 85% H_3PO_4



(จ) ถ่านไม้ไฟไหม้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(จ) ถ่านไม้ไฟไหม้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ภาพที่ 64 (ต่อ)

ตารางที่ 19 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

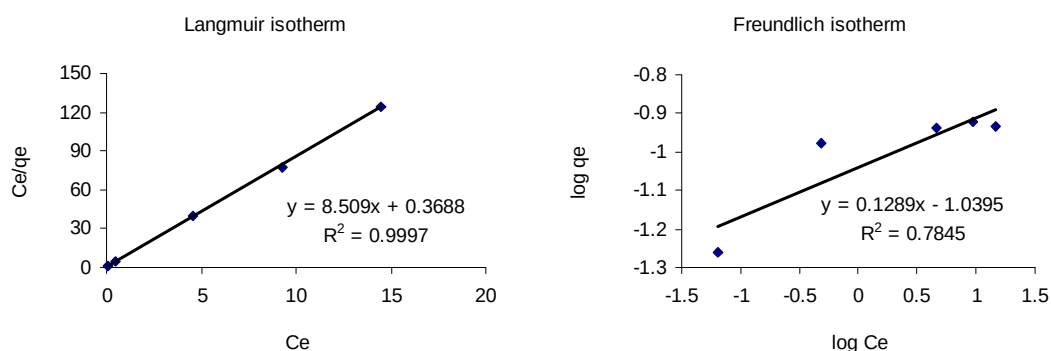
ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (นาท)	ปริมาณแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	90	95.10 ± 0.13
ถ่าน Bunton **	-	-	120	94.34 ± 0.36
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	210	95.47 ± 0.12
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	94.64 ± 0.17
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	95.57 ± 0.18
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	95.92 ± 0.22
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	94.62 ± 0.33
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	150	94.40 ± 0.30
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	93.69 ± 0.41
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	150	94.52 ± 0.27
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	180	94.57 ± 0.23
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	95.92 ± 0.22
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	210	94.65 ± 0.36
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	150	93.81 ± 0.26

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

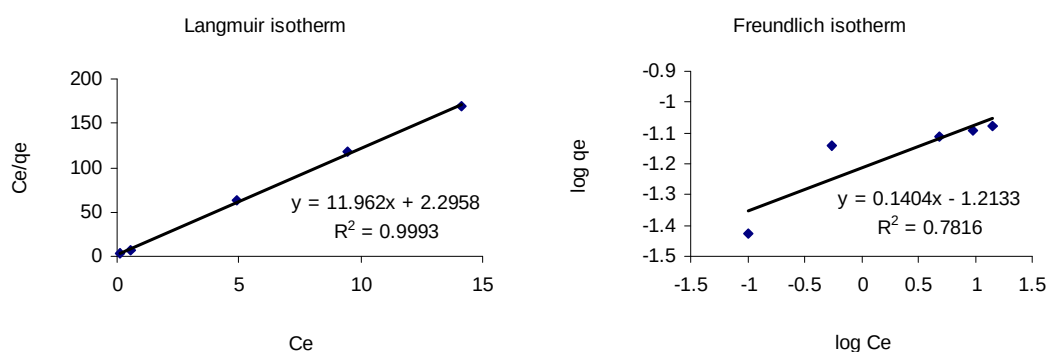
** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.1.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับแคดเมียม(II) ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 mg/l ปริมาตร 10 ml โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเป็นกรดต่าง และเวลาสัมผัส ที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ซึ่งได้จากผลการทดลองในข้อ 4.1.1, 4.1.2 และ 4.1.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านกัมมันต์ออก และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาความเข้มข้นของแคดเมียม(II) ที่เหลืออยู่ และสามารถนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 65 ถึง 71 ซึ่งในการทดลองนี้ ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ กระตุ้นด้วยกรดไนตริก มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแคดเมียม(II)

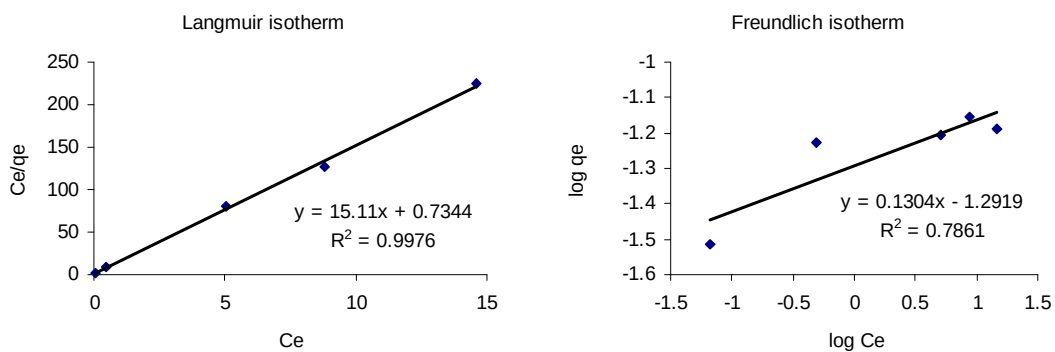


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

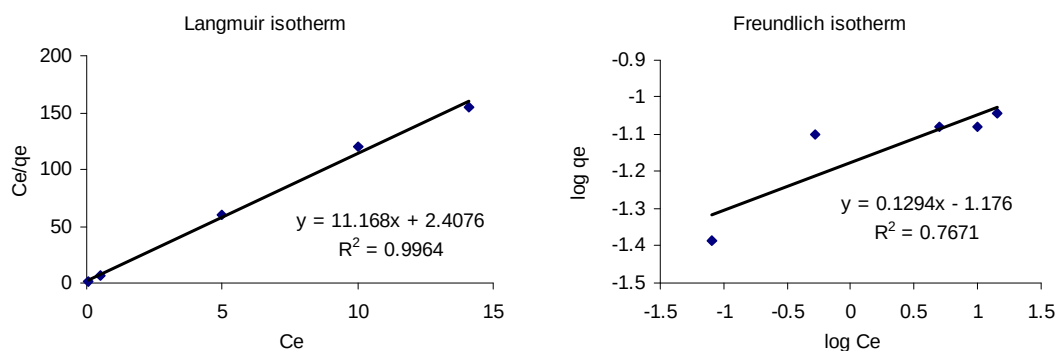
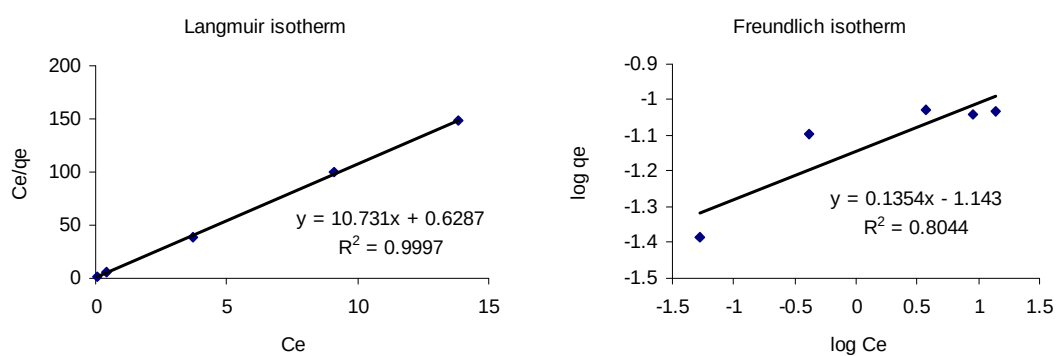


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

ภาพที่ 65 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า

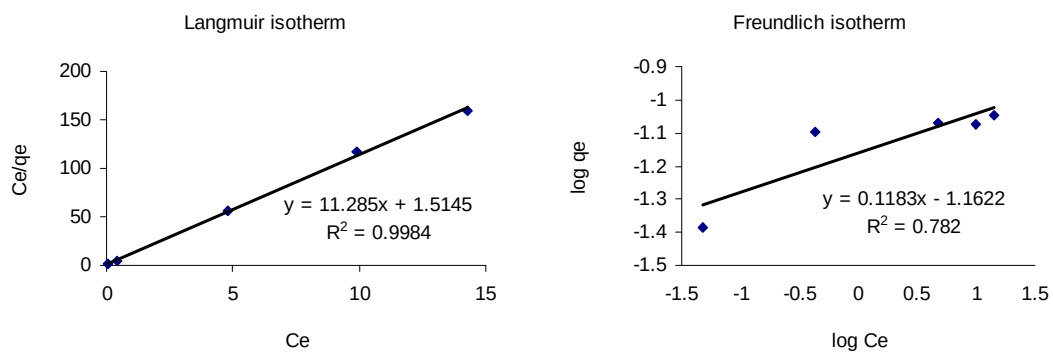


(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

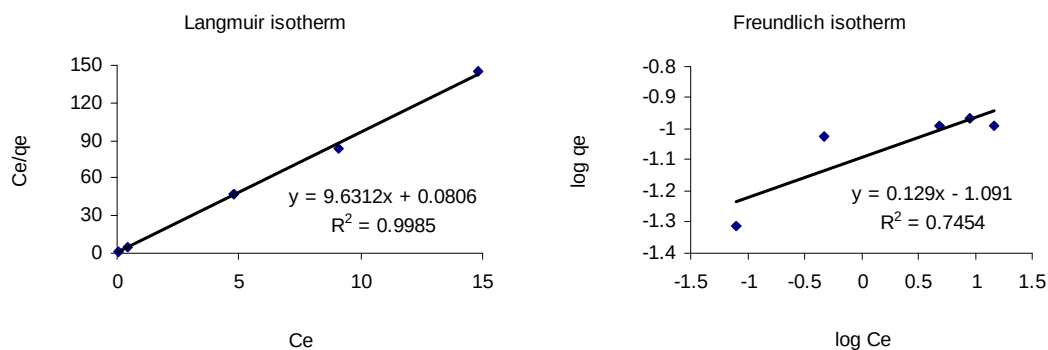
ภาพที่ 66 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี



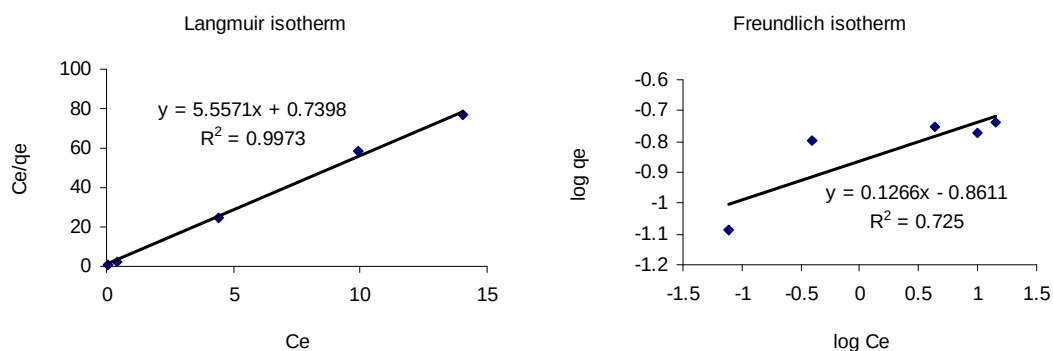
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย HNO_3 เข้มข้น

ภาพที่ 66 (ต่อ)

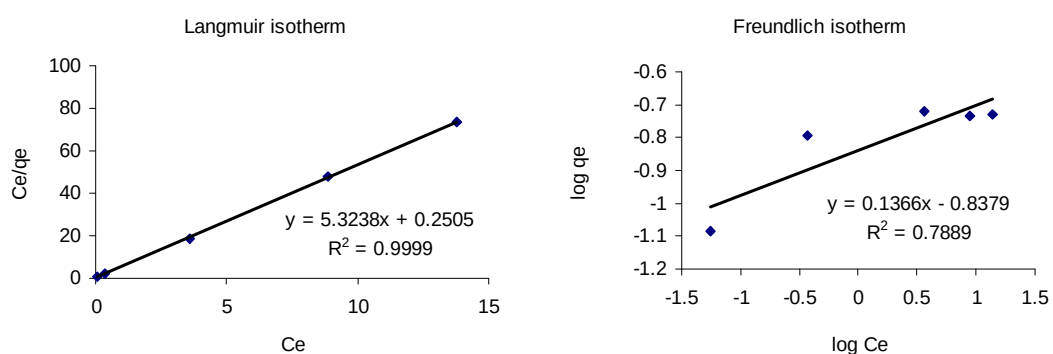
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

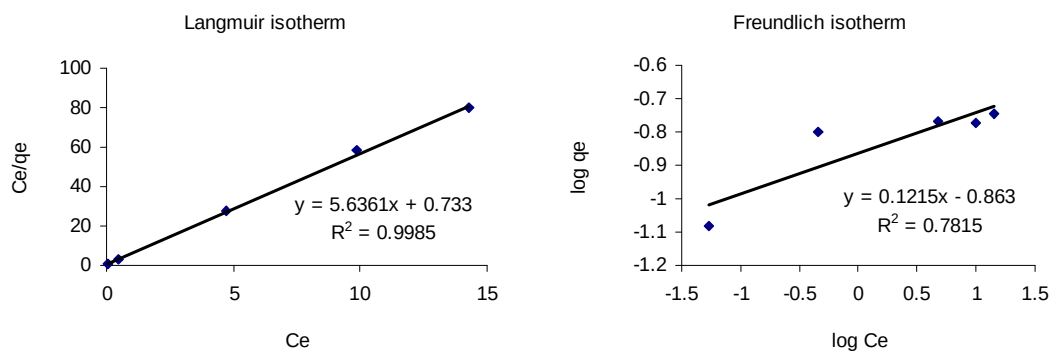


(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

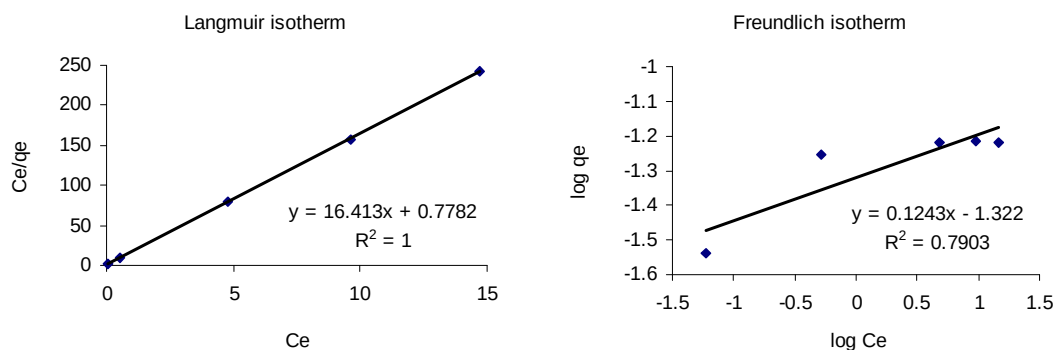
ภาพที่ 67 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี



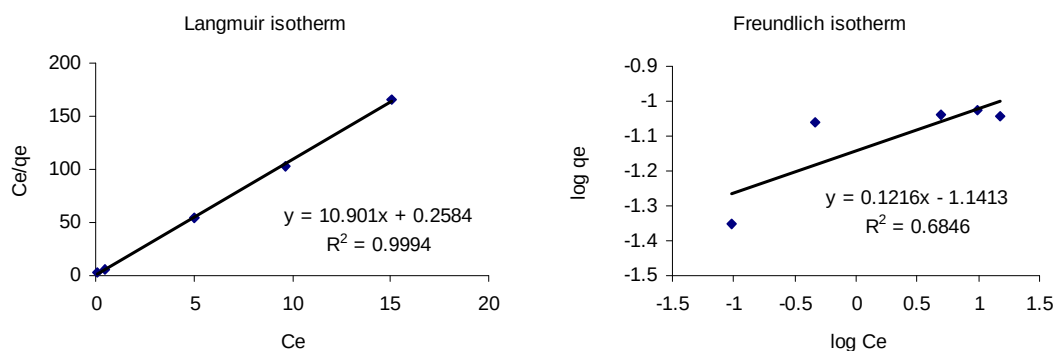
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย HNO_3 เข้มข้น

ภาพที่ 67 (ต่อ)

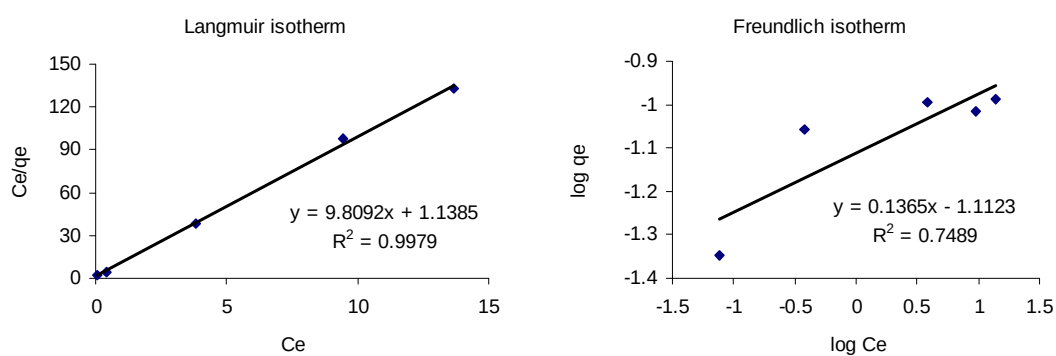
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

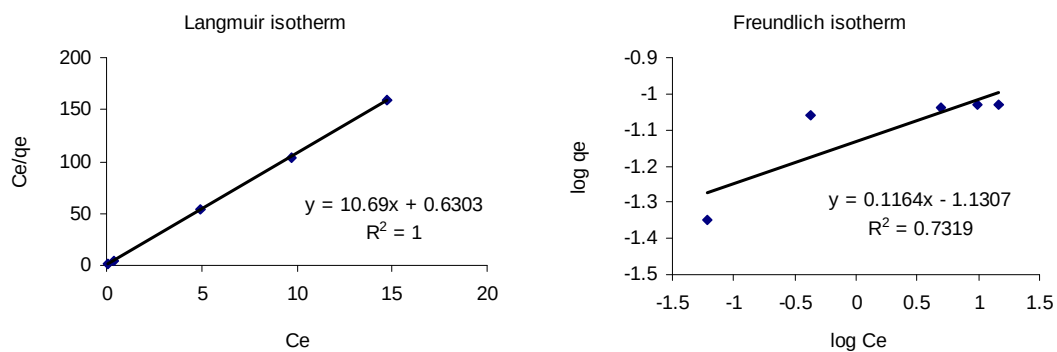


(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

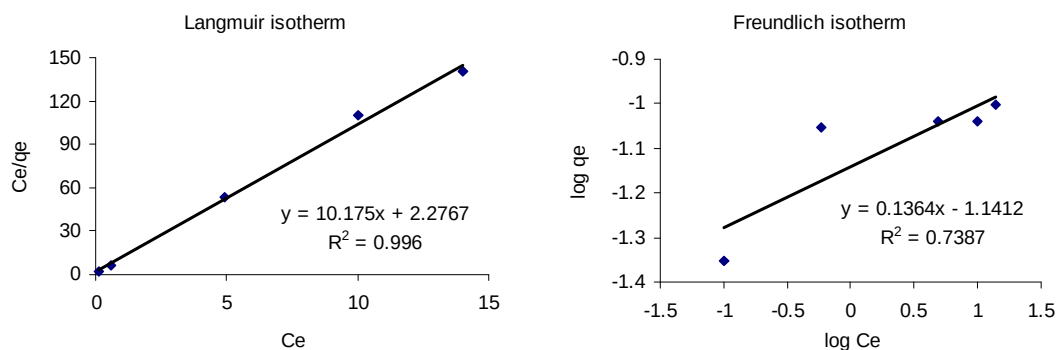
ภาพที่ 68 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี



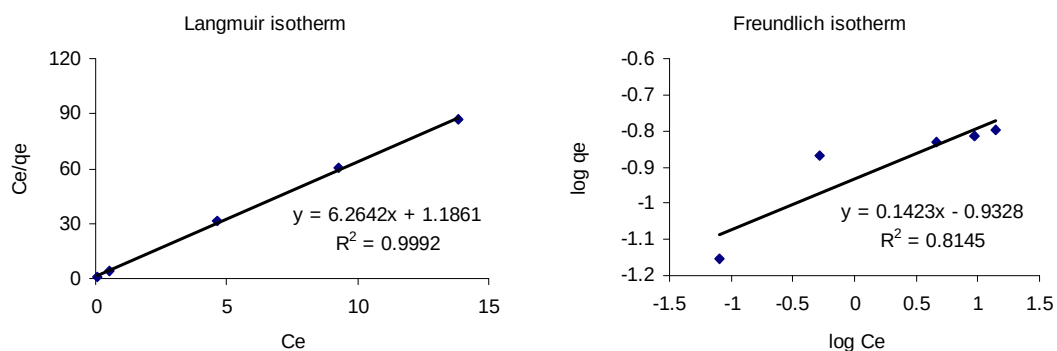
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย HNO_3 เข้มข้น

ภาพที่ 68 (ต่อ)

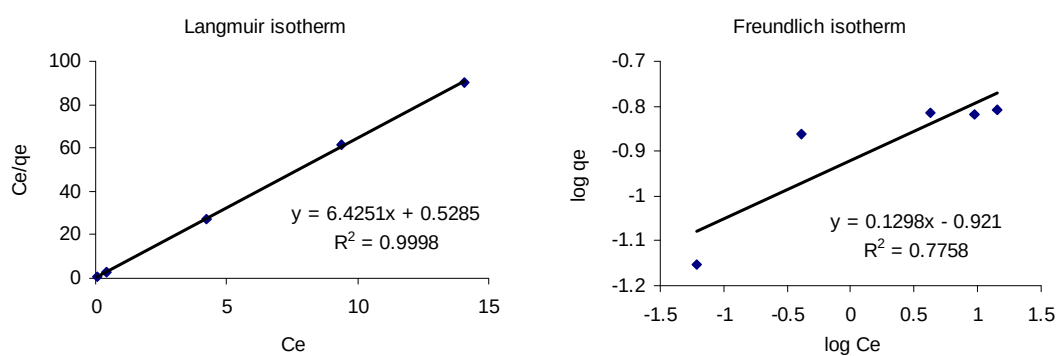
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมำจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

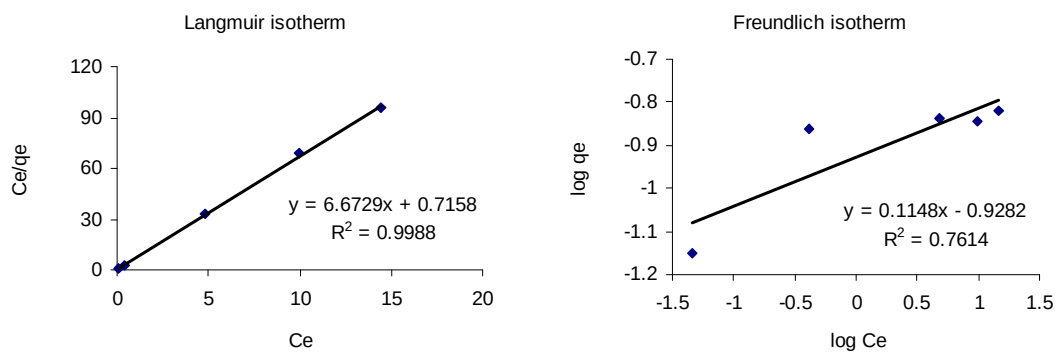


(ข) ถ่านไม้ไผ่หมำจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ค) ถ่านไม้ไผ่หมำจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

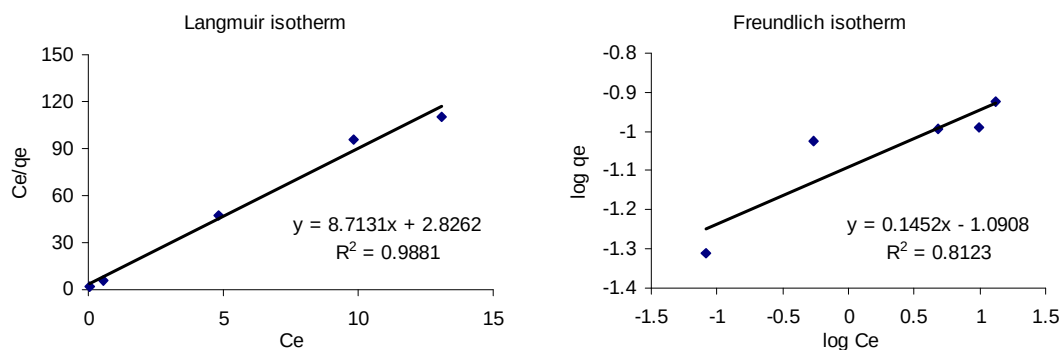
ภาพที่ 69 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมำจู้ อายุ 1 ปี



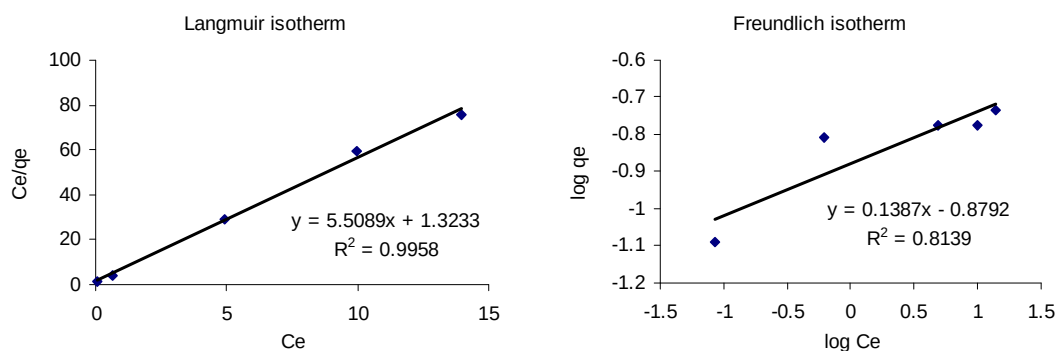
(ง) ถ่านไม้ไผ่ไผ่หมางู อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย HNO_3 เข้มข้น

ภาพที่ 69 (ต่อ)

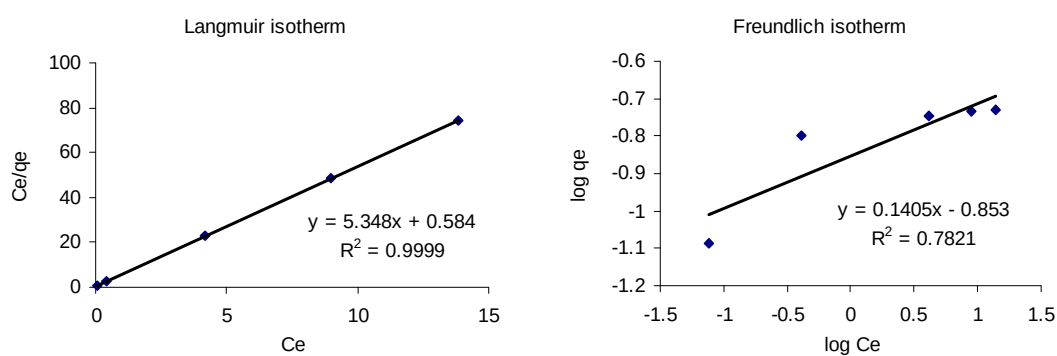
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

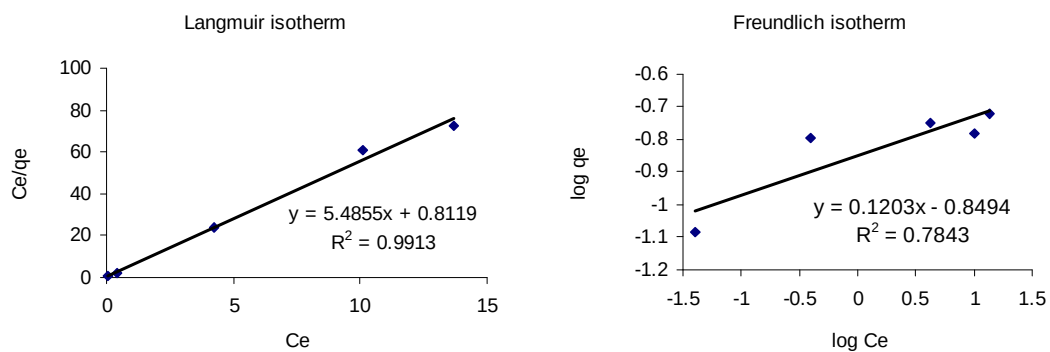


(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

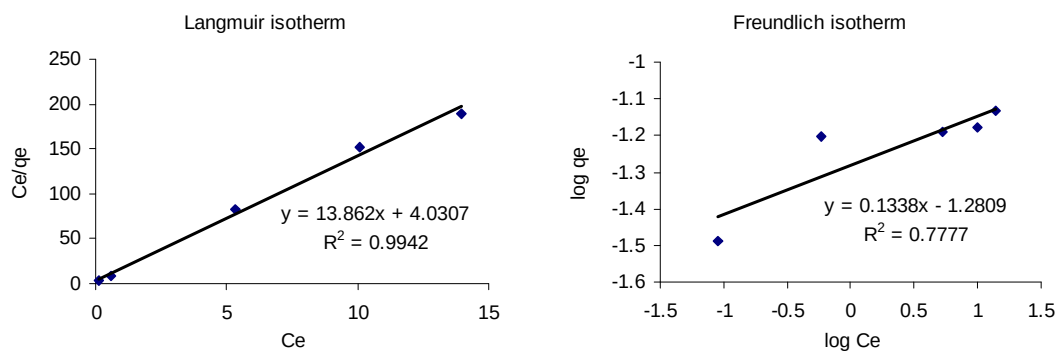
ภาพที่ 70 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 2 ปี



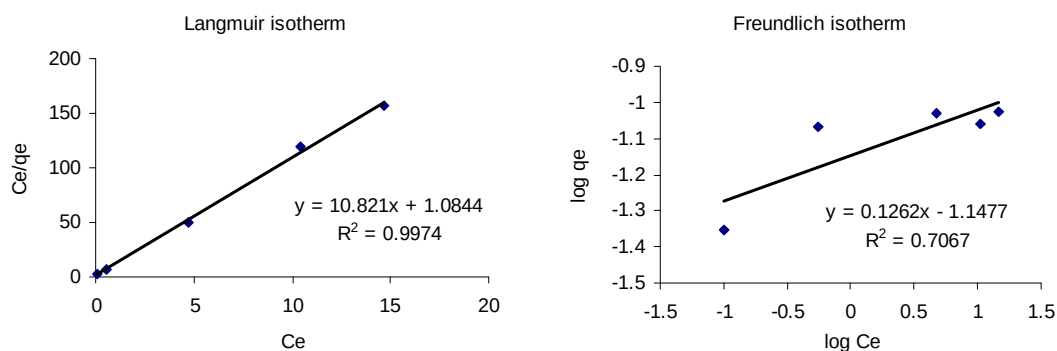
(ง) ถ่านไม้ไผ่ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย HNO_3 เข้มข้น

ภาพที่ 70 (ต่อ)

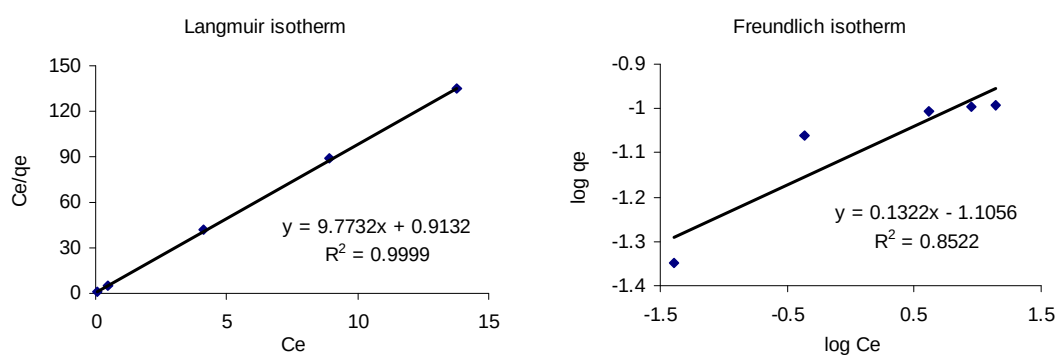
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

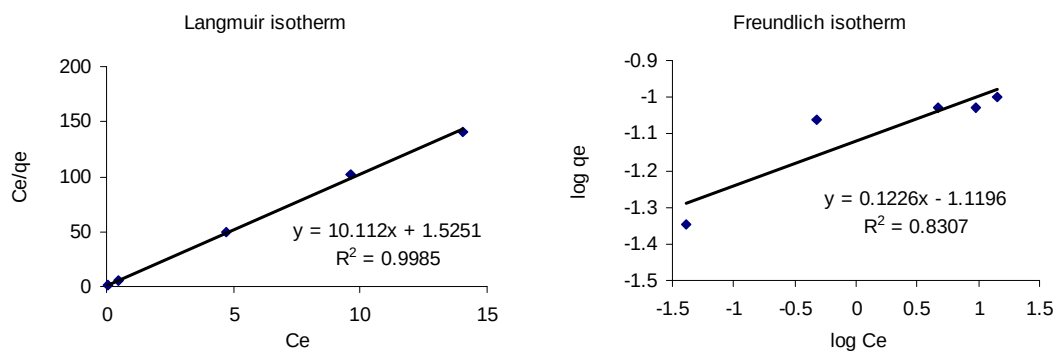


(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 71 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู้ อายุ 3 ปี



(ง) ถ่านไม้ไผ่ไผ่หมางู อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย HNO_3 เข้มข้น

ภาพที่ 71 (ต่อ)

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 20 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม(II) แบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q^0} + \frac{1}{bQ^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ถ่าน Fluka *	-	-	$y = 8.509x + 0.3688$	0.9997	$y = 0.1289x - 1.0395$	0.7845
ถ่าน Bunton **	-	-	$y = 11.962x + 2.2958$	0.9993	$y = 0.1404x - 1.2133$	0.7816
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 15.11x + 0.7344$	0.9976	$y = 0.1304x - 1.2919$	0.7861
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 11.168x + 2.4076$	0.9964	$y = 0.1294x - 1.1760$	0.7671
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 10.731x + 0.6287$	0.9997	$y = 0.1354x - 1.1430$	0.8044
		กระตุ้นโดย HNO_3	$y = 11.285x + 1.5145$	0.9984	$y = 0.1183x - 1.1622$	0.7820
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 9.6312x + 0.0806$	0.9985	$y = 0.1290x - 1.0910$	0.7454
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 5.5571x + 0.7398$	0.9973	$y = 0.1266x - 0.8611$	0.7250
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 5.3238x + 0.2505$	0.9999	$y = 0.1366x - 0.8379$	0.7889
		กระตุ้นโดย HNO_3	$y = 5.6361x + 0.7330$	0.9985	$y = 0.1215x - 0.8630$	0.7815
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 16.413x + 0.7782$	1.0000	$y = 0.1243x - 1.3220$	0.7903
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 10.901x + 0.2584$	0.9994	$y = 0.1216x - 1.1413$	0.6846
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 9.8092x + 1.1385$	0.9979	$y = 0.1365x - 1.1123$	0.7489
		กระตุ้นโดย HNO_3	$y = 10.6900x + 0.6303$	1.0000	$y = 0.1164x - 1.1307$	0.7319

ตารางที่ 20 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 10.175x + 2.2767$	0.9960	$y = 0.1364x - 1.1412$	0.7387
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 6.2642x + 1.1861$	0.9992	$y = 0.1423x - 0.9328$	0.8145
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 6.4251x + 0.5285$	0.9998	$y = 0.1298x - 0.921$	0.7758
		กระตุ้นโดย HNO_3	$y = 6.6729x + 0.7158$	0.9988	$y = 0.1148 - 0.9282$	0.7614
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 8.7131x + 2.8262$	0.9881	$y = 0.1452x - 1.0908$	0.8123
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 5.5089 + 1.3233$	0.9958	$y = 0.1387x - 0.8792$	0.8139
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 5.348x + 0.584$	0.9999	$y = 0.1405x - 0.853$	0.7821
		กระตุ้นโดย HNO_3	$y = 5.4855x + 0.8119$	0.9913	$y = 0.1203x - 0.8494$	0.7843
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 13.862x + 4.0307$	0.9942	$y = 0.1338x - 1.2809$	0.7777
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 10.821x + 1.0844$	0.9974	$y = 0.1262x - 1.1477$	0.7067
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 9.7732x + 0.9132$	0.9999	$y = 0.1322x - 1.1056$	0.8522
		กระตุ้นโดย HNO_3	$y = 10.112x + 1.5251$	0.9985	$y = 0.1226x - 1.1196$	0.8307

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

จากตารางที่ 20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ที่นำมาเขียนเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมมากกว่า จึงสามารถพิจารณาค่าคงที่ที่ปรากฏในสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในตารางที่ 21

ซึ่งค่า Q^0 แสดงถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวถูกดูดซับ หรือแสดงถึงความสามารถในการดูดซับไอออนแคดเมียม(II) ในสารละลาย ถ้าถ่านกัมมันต์ใดมีค่า Q^0 สูง แสดงว่าถ่านกัมมันต์ชนิดนั้น สามารถดูดซับไอออนแคดเมียม(II) ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่า Q^0 ต่ำ

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่า Q^0 ที่ได้จากถ่านไม้ไผ่ชนิดและอายุเดียวกัน พบว่า การกระตุ้นถ่านด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้ค่า Q^0 สูงกว่าการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และกรดไนตริก เนื่องจาก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัวให้เป็นโลหะโพแทสเซียม ซึ่งจะแทรกตัวเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า Q^0 ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า ถ่านไม้ไผ่แดงที่ให้ค่า Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่แดง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (0.19 mg/g) และถ่านไม้ไผ่หมาจูที่ให้ Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (0.19 mg/g) และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า คือ ถ่านไม้ไผ่ Buntan ซึ่งมีค่า Q^0 เท่ากับ 0.08 mg/g และถ่านกัมมันต์ Fluka มีค่า Q^0 เท่ากับ 0.12 mg/g แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม(II) ดีกว่าถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ทางการค้า โดยคาดว่า การกระตุ้นนั้นทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน C=O หรือ COO⁻ ซึ่งมีความเป็นลบเพิ่มขึ้น (พิจารณาจากอินฟราเรดสเปกตรัม) จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม(II) ซึ่งเป็นความเป็นบวก ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 21 ค่าคงที่การดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการ
ไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	Q^0 (mg/g) ***	b (l/mg) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	0.1175	23.0721
ถ่าน Bunton **	-	-	0.0836	5.2104
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.0662	20.5746
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.0895	4.6386
		กระตุ้นโดย KOH	0.0932	17.0686
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.0886	7.4513
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1038	119.4938
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1799	7.5116
		กระตุ้นโดย KOH	0.1878	21.2527
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.1774	7.6891
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.0609	21.0910
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.0917	42.1865
		กระตุ้นโดย KOH	0.1019	8.6159
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.0935	16.9602
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.0983	4.4692
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1596	5.2813
		กระตุ้นโดย KOH	0.1556	12.1572
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.1499	9.3223
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1148	3.0830
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1815	4.1630
		กระตุ้นโดย KOH	0.1870	9.1575
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.1823	6.7564
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.0721	3.4391
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.0924	9.9788
		กระตุ้นโดย KOH	0.1023	10.7021
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.0989	6.6304

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

*** Q^0 และ b คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (l/mg) ตามลำดับ

จากการที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับแคดเมียม(II) เป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงว่าการดูดซับแคดเมียม(II) นั้น เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จึงสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ได้จากสมการ

$$S = \frac{Q^0}{MW} \times N \times a$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{\AA}^2/\text{g}$)
 Q^0 = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 MW = มวลโมเลกุลของแคดเมียม(II) ที่ถูกดูดซับ (112.41 g/mol)
 N = เลขอะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/mol}$)
 a = พื้นที่หน้าตัดของแคดเมียม(II) ($61 \text{ \AA}^2$)

ที่มา: Krishnan and Anirudhan (2003)

จากการแทนค่า Q^0 ของถ่านชนิดต่างๆ จะสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดการดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านชนิดต่างๆ ได้ (แสดงในตารางที่ 22) โดยพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่าแปรผันตรงกับความสามารถในการดูดซับ ซึ่งจากการทดลองนี้จะพบว่า ถ่านไม้ไผ่ตง ที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ($0.61 \text{ \AA}^2/\text{g}$) และถ่านไม้ไผ่หมาจู ที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ($0.61 \text{ \AA}^2/\text{g}$)

ตารางที่ 22 พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับแคดเมียม(II) ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไฟแต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	S ($\text{\AA}^2/\text{g}$) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	0.3838
ถ่าน Bunton **	-	-	0.2731
ไม้ไฟต่ง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.2163
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.2924
		กระตุ้นโดย KOH	0.3045
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.2894
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.3391
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.5877
		กระตุ้นโดย KOH	0.6135
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.5795
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1989
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.2996
		กระตุ้นโดย KOH	0.3329
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.3054
ไม้ไฟหมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.3211
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.5214
		กระตุ้นโดย KOH	0.5083
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.4897
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.3750
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.5929
		กระตุ้นโดย KOH	0.6109
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.5955
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.2355
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.3019
		กระตุ้นโดย KOH	0.3342
		กระตุ้นโดย HNO_3	0.3231

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไฟ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

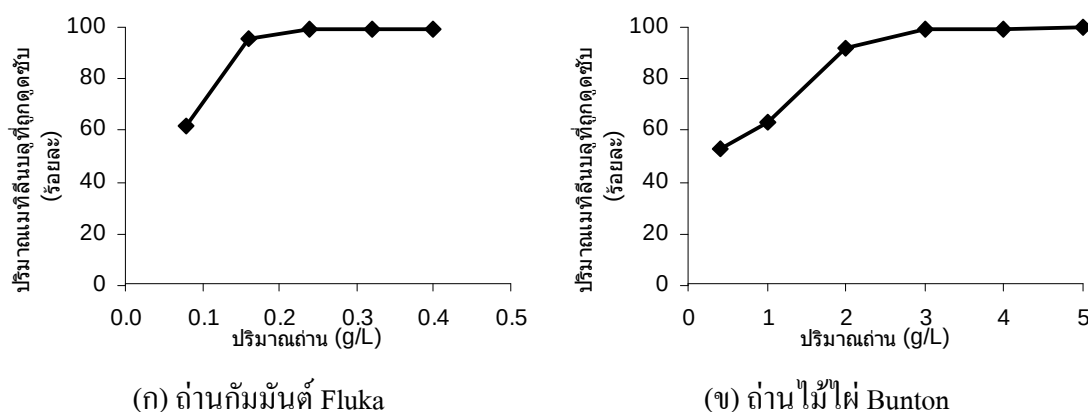
*** S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับแคดเมียม(II)

4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

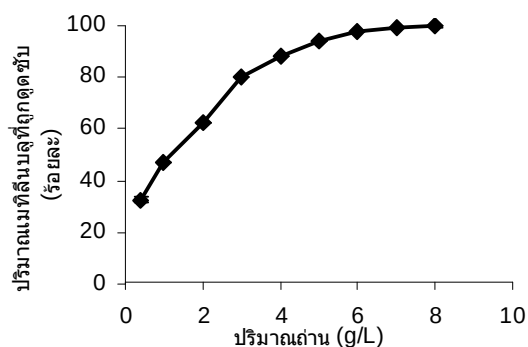
4.2.1 การศึกษาปริมาณของถ่านที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลีนบลู

ในการทำการทดลองดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ ใช้สารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 25 mg/l ปริมาตร 25 ml และมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.0 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเติมน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.025 g จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกปริมาณของถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

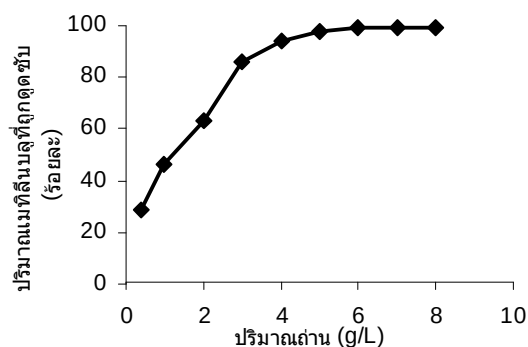
ภาพที่ 72 แสดงปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของเมทิลีนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 23 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด



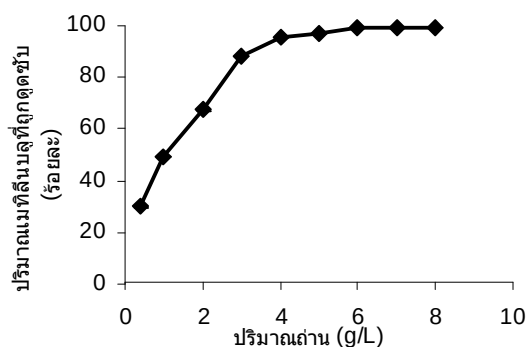
ภาพที่ 72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของเมทิลีนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



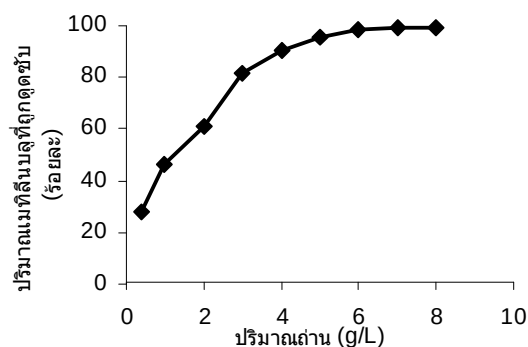
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



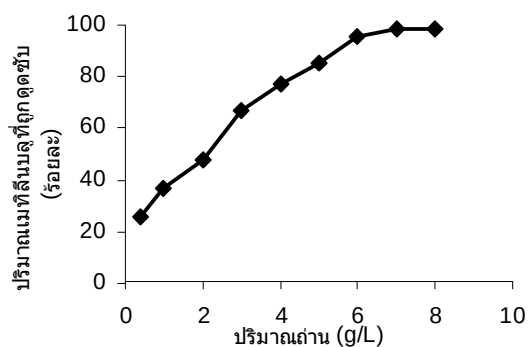
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



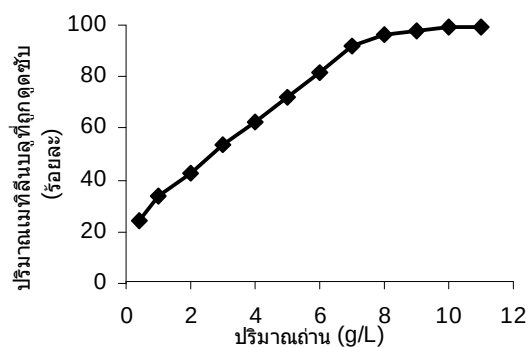
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



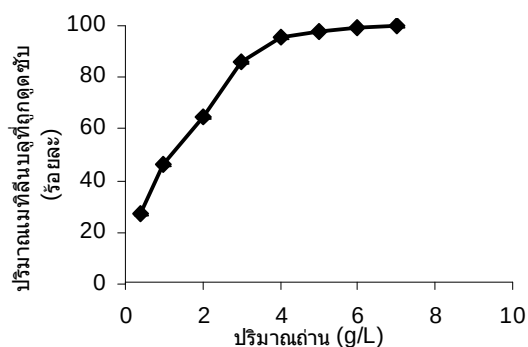
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



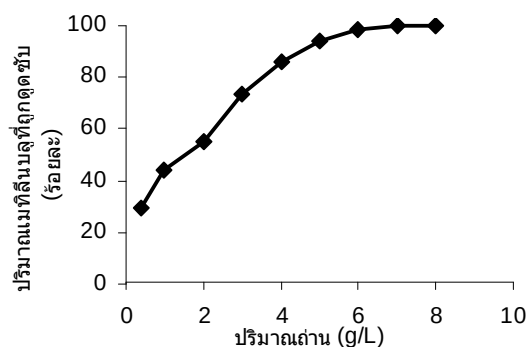
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



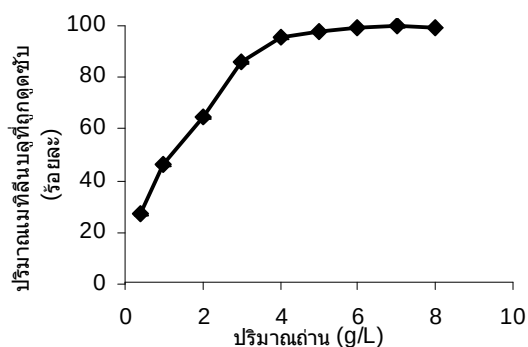
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



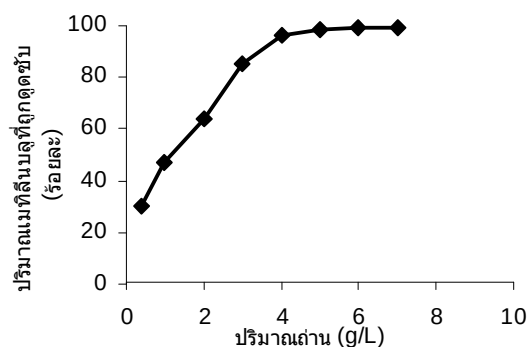
(ง) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



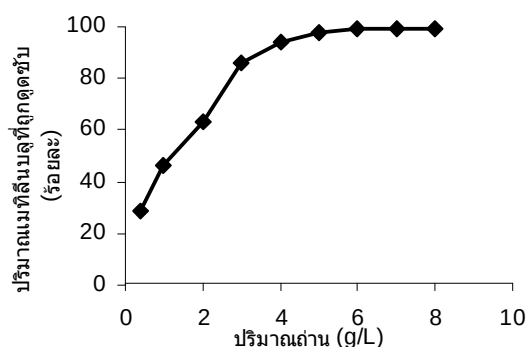
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



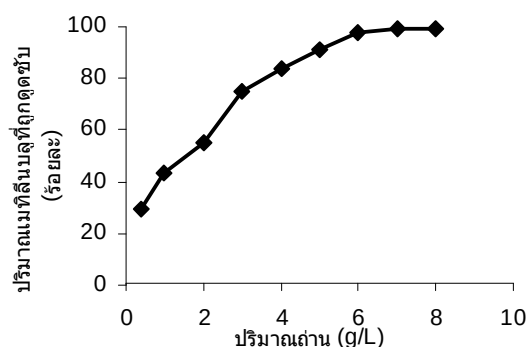
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



(ส) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ซ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄

ตารางที่ 23 แสดงปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่
แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ปริมาณถ่านที่ใช้ในการ ทดลอง (g)	ปริมาณถ่านที่เหมาะสม (g/l)	ปริมาณ เมทิลลิโนบลู ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	0.0060	0.24	99.22 ± 1.07
ถ่าน Bantan**	-	-	0.0750	3.00	99.06 ± 0.62
ไม้ไผ่ผดง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1750	7.00	99.33 ± 0.14
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1500	6.00	99.24 ± 0.20
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1500	6.00	99.34 ± 0.16
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1750	7.00	99.05 ± 0.05
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1750	7.00	98.27 ± 0.09
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.2500	10.00	99.26 ± 0.03
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1500	6.00	99.36 ± 0.14
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1750	7.00	99.65 ± 0.09
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1250	5.00	99.36 ± 0.11
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1500	6.00	99.47 ± 0.01
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.1500	6.00	99.42 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.1750	7.00	99.55 ± 0.06

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

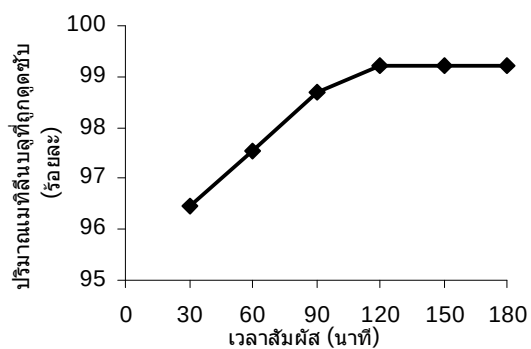
จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะใช้ปริมาณถ่านที่สูงกว่าในการดูดซับเมทิลลิโนบลู เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้น ที่พันธุ์และอายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้น ทำให้ความสามารถของถ่านในการดูดซับเมทิลลิโนบลูลดลง

4.2.2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

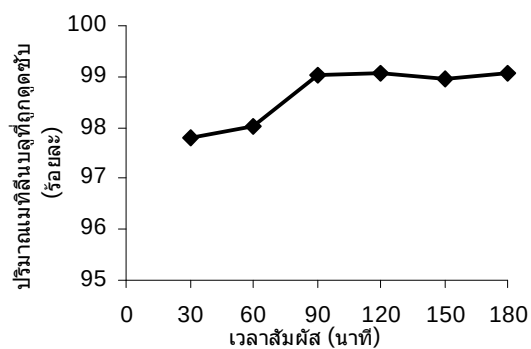
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 25 mg/l ปริมาตร 25 ml ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.0 ที่เหมาะสม และปริมาณถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด (จากผลการทดลองข้อ 4.2.1) และนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่า ครั้งละ 30 นาที จนกว่าค่าร้อยละของปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 73 แสดงเวลา กับ ปริมาณของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 24 แสดงเวลาที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

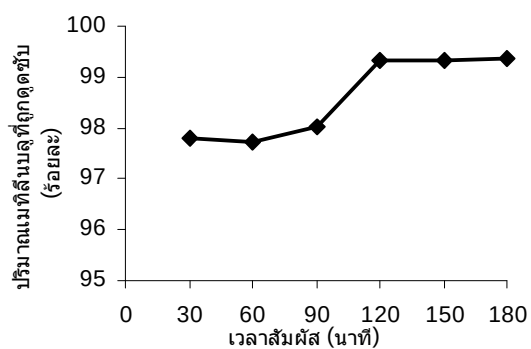
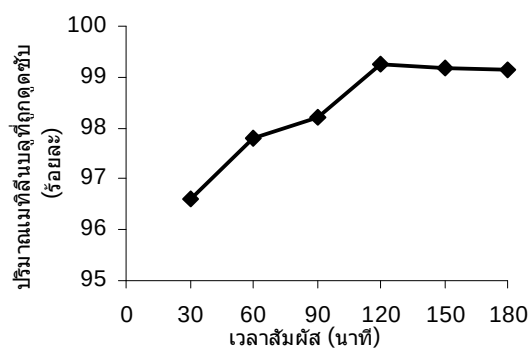
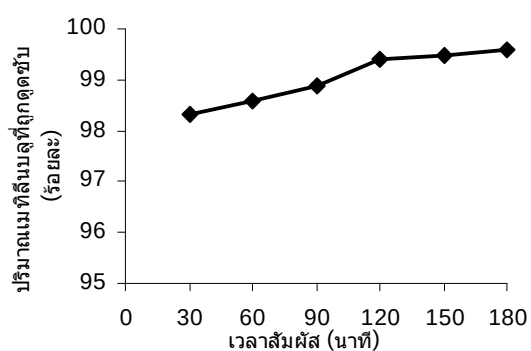
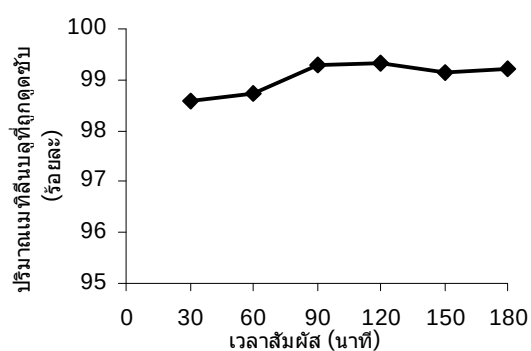
จากการทดลองพบว่า ในถ่านไม้ไผ่ผงทุกอายุปี เวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 120 นาที ทั้งถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นและถ่านที่ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์แล้ว ยกเว้น ถ่านไม้ไผ่ผงอายุ 2 ปีที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เวลาที่เหมาะสม คือ 90 นาที แสดงว่า การกระตุ้นไม่ได้ช่วยให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับเมทิลลิโนบลูเปลี่ยนแปลง ส่วนในถ่านไม้ไผ่ผงหยาบนั้น ถ่านที่ไม่ได้ถูกกระตุ้น มีเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 60 นาที แต่ในถ่านที่ถูกกระตุ้นแล้ว เวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 120 นาที แสดงว่า ในไม้ไผ่ผงหยาบนั้น การกระตุ้นทำให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับเมทิลลิโนบลูเพิ่มขึ้น หรือ การกระตุ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลูลดลง



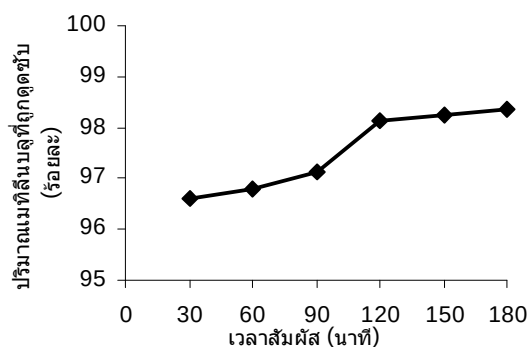
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



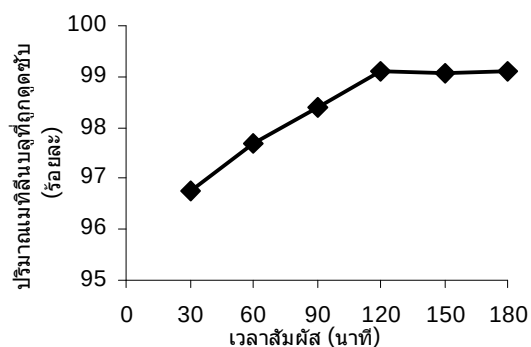
(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton

(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ง) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 (จ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ฉ) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

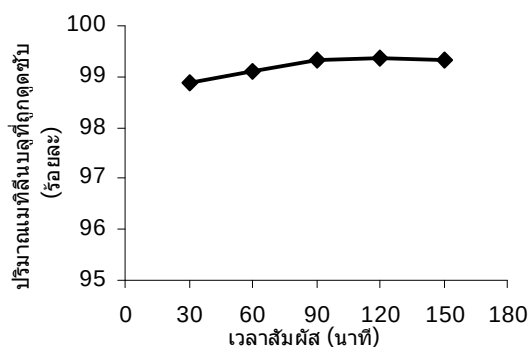
ภาพที่ 73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับปริมาณของเมทิลลิบลิ (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



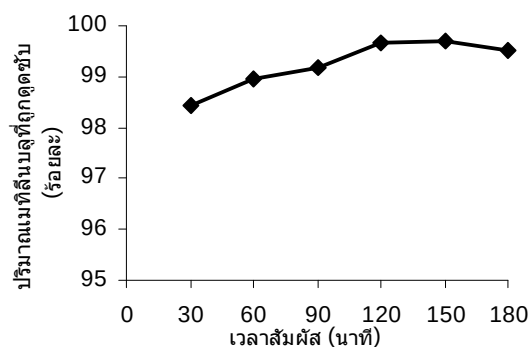
(ข) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



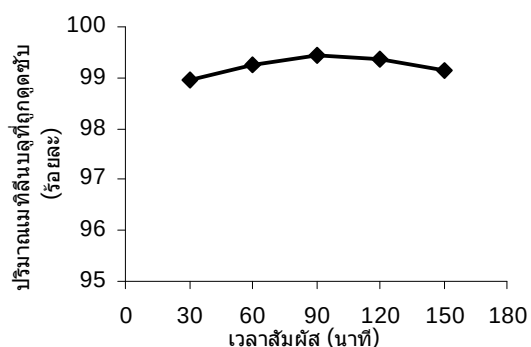
(ช) ถ่านไม้ไฟต่ง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



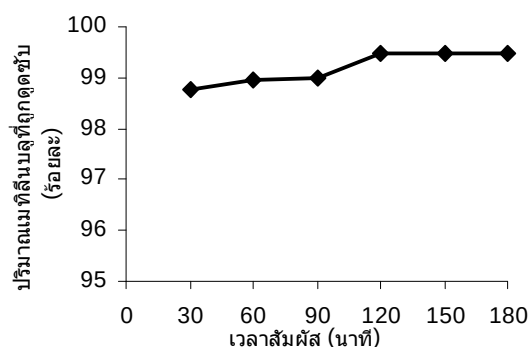
(ฅ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



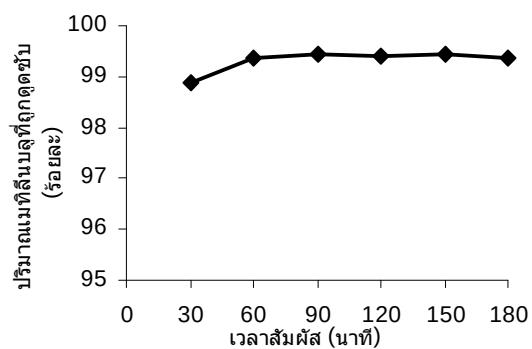
(ญ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



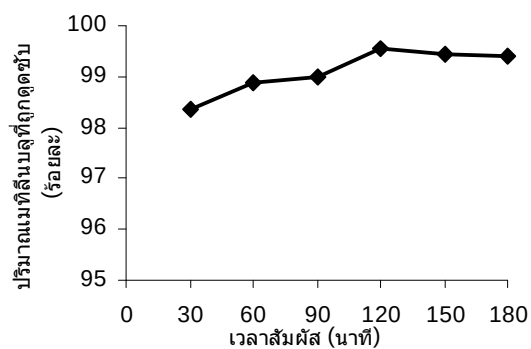
(ฎ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฏ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ภาพที่ 73 (ต่อ)

ตารางที่ 24 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (นาท)	ปริมาณเมทิลลีนบลูที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	90	98.68 ± 1.09
ถ่าน Bunton **	-	-	90	99.04 ± 0.28
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	120	99.33 ± 0.14
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	99.24 ± 0.20
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	120	99.37 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	90	99.34 ± 0.02
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	120	98.14 ± 0.11
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	99.11 ± 0.04
	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	60	99.12 ± 0.27
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	99.65 ± 0.09
ไม้ไผ่หมาจู	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	60	99.24 ± 0.17
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	99.48 ± 0.05
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	60	99.36 ± 0.29
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	120	99.55 ± 0.06

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

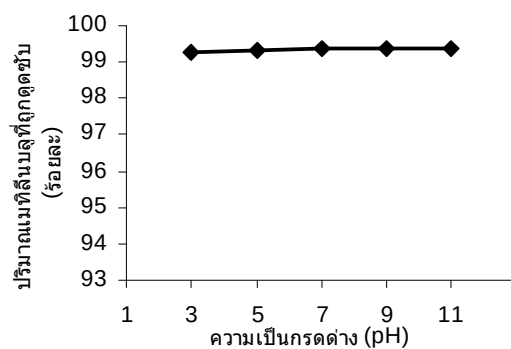
** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.2.3 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

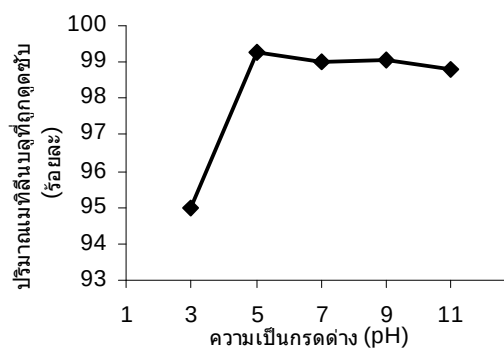
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายเมทิลลิโนบลู ความเข้มข้น 25 mg/l ปริมาตร 25 ml ค่าความเป็นกรดต่าง มีค่าเท่ากับ 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสม (จากผลทดลองข้อ 4.2.1) และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านแต่ละชนิด (จากผลทดลองข้อ 4.2.2) และเลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของเมทิลลิโนบลูถูกดูดซับสูงที่สุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 74 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง กับ ความเข้มข้นของเมทิลลิโนบลู (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 25 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และความเข้มข้นของเมทิลลิโนบลูที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

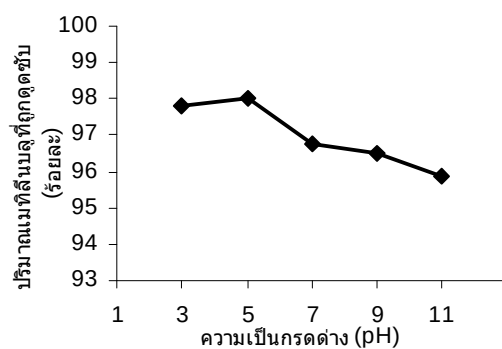
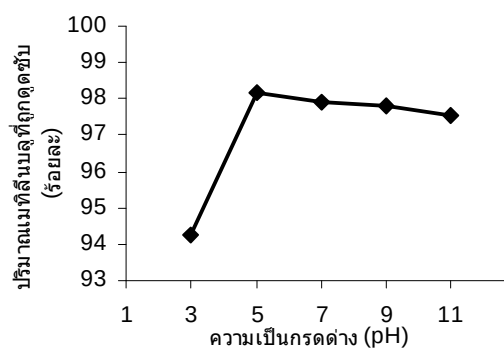
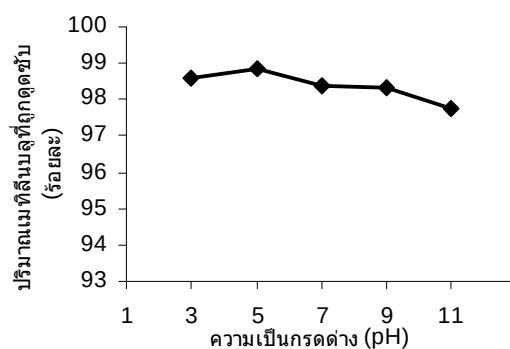
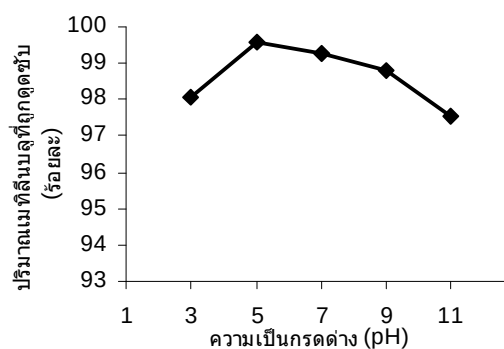
จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือ ในสถานะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และเนื่องจากโครงสร้างของเมทิลลิโนบลู มีความเป็นอะโรมาติก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของเมทิลลิโนบลูเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างเมทิลลิโนบลู และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี (Qada, 2006)



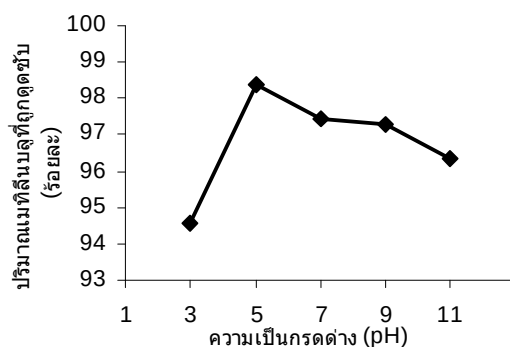
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



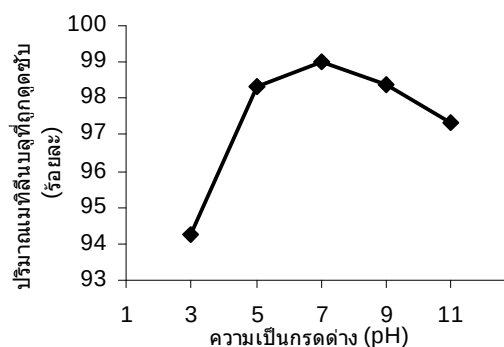
(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 (จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

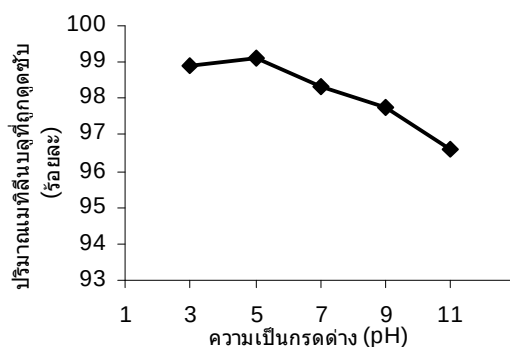
ภาพที่ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับปริมาณของเมทิลลิโนล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



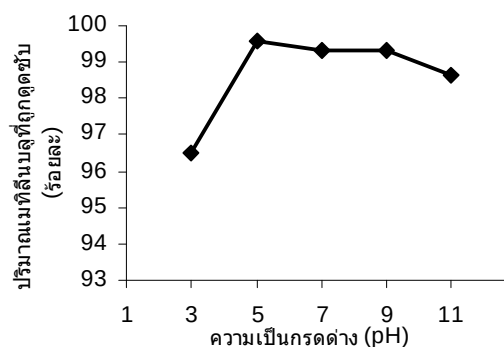
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



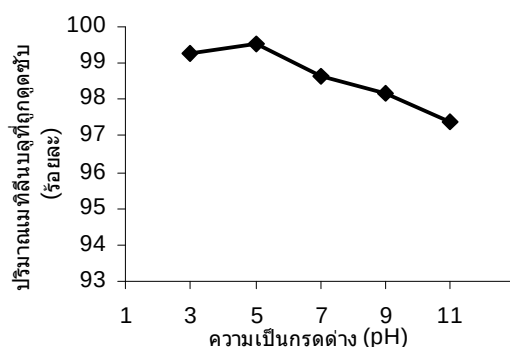
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



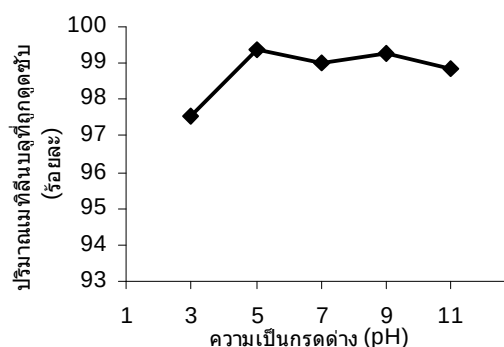
(ง) ถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



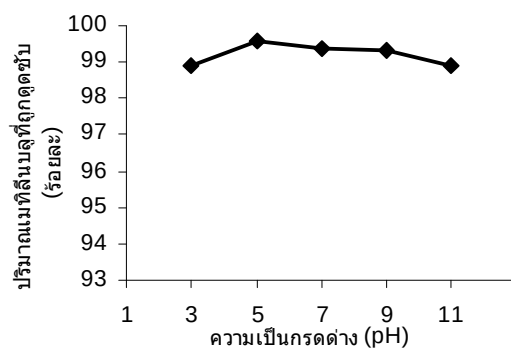
(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



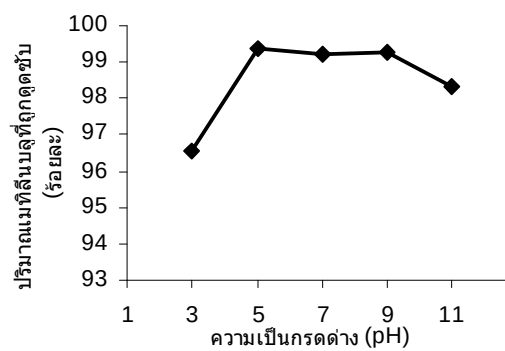
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(จ) ถ่านไม้ไฟไหม้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไฟไหม้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ภาพที่ 74 (ต่อ)

ตารางที่ 25 แสดงความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์
และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด

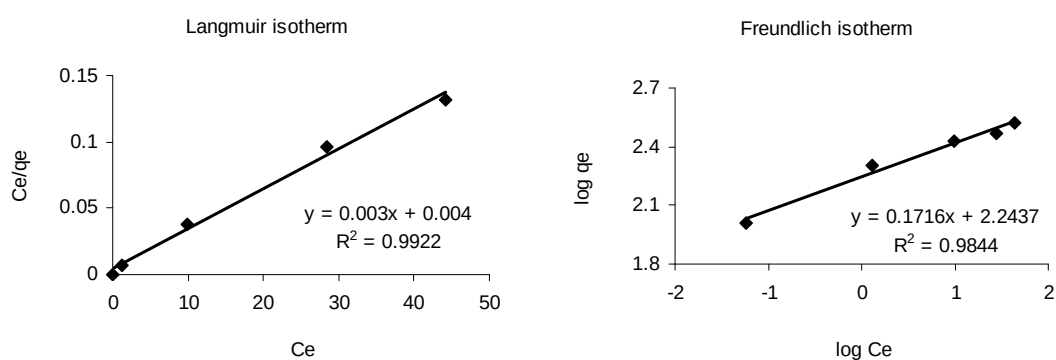
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ความเป็นกรดค่า ที่เหมาะสม (pH)	ปริมาณเมทิลลีนบลู ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	7.0	99.37 ± 1.05
ถ่าน Bunton **	-	-	7.0	98.99 ± 0.11
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	98.00 ± 0.07
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	97.93 ± 0.17
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	98.84 ± 0.18
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	99.25 ± 0.24
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	98.38 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	99.01 ± 0.08
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	99.12 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	99.34 ± 0.21
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	5.0	99.54 ± 0.11
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	99.00 ± 0.17
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	99.37 ± 0.21
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	99.21 ± 0.04

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

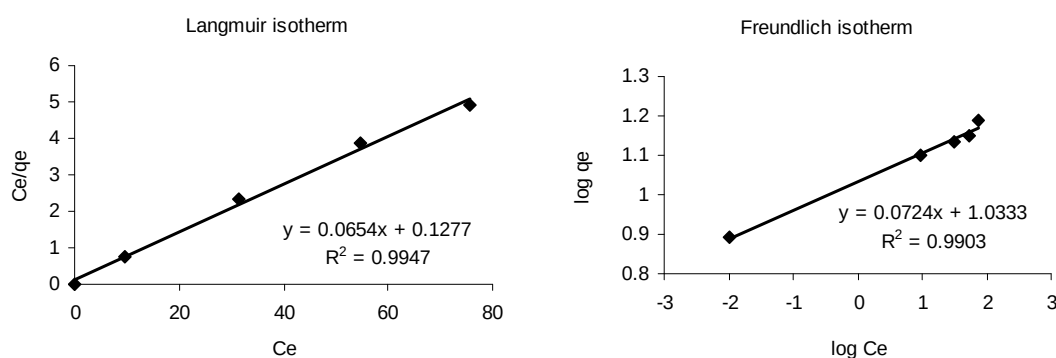
** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.2.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลลีนบลู

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับเมทิลลีนบลูความเข้มข้น 25, 50, 75, 100 และ 125 mg/l ปริมาตร 25 ml โดยใช้ปริมาณถ่าน เวลาสัมผัส และความเป็นกรดต่าง ที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1, 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านออก และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาความเข้มข้นของเมทิลลีนบลูที่เหลืออยู่ และสามารถนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 75 ถึง 81 ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลู

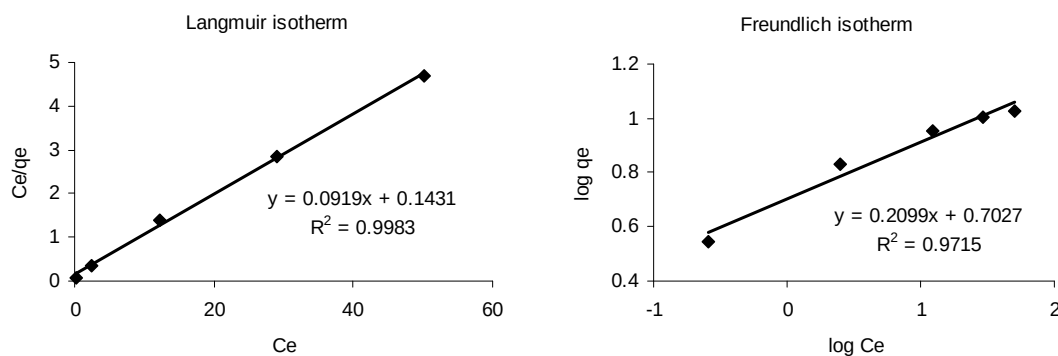


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

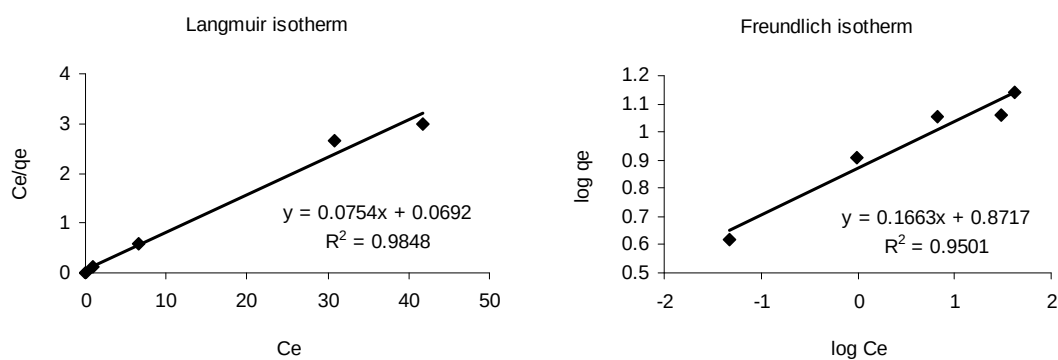


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

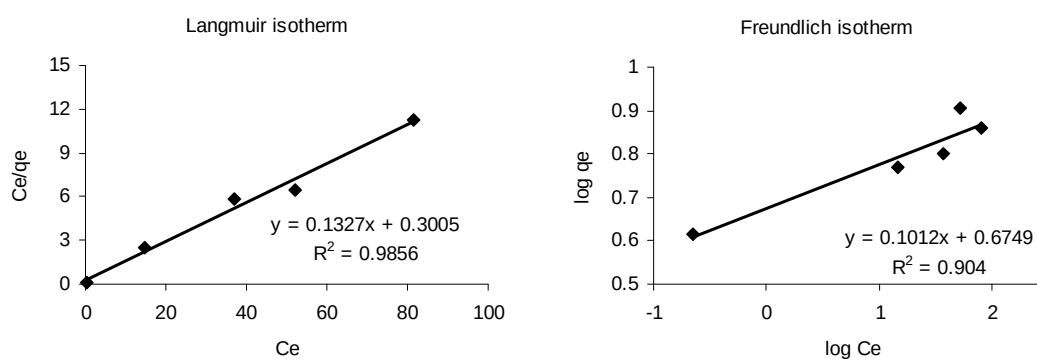
ภาพที่ 75 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิจ
ของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

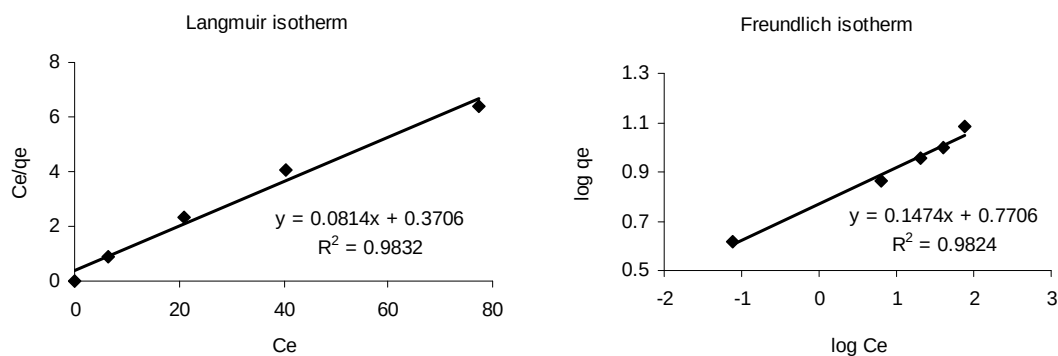


(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

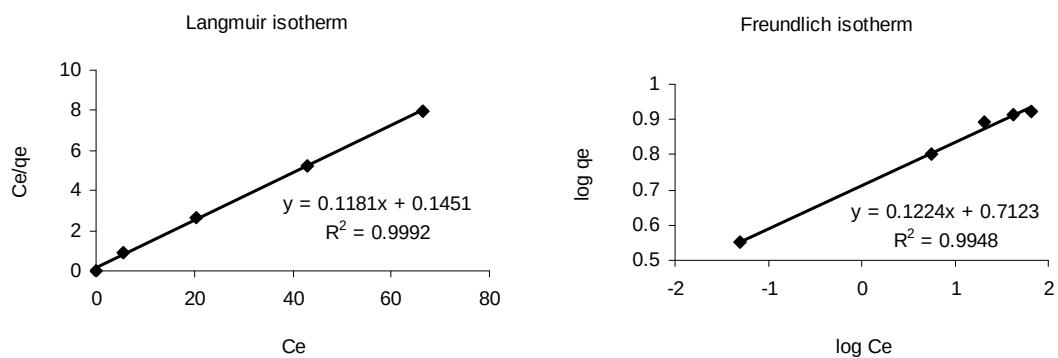
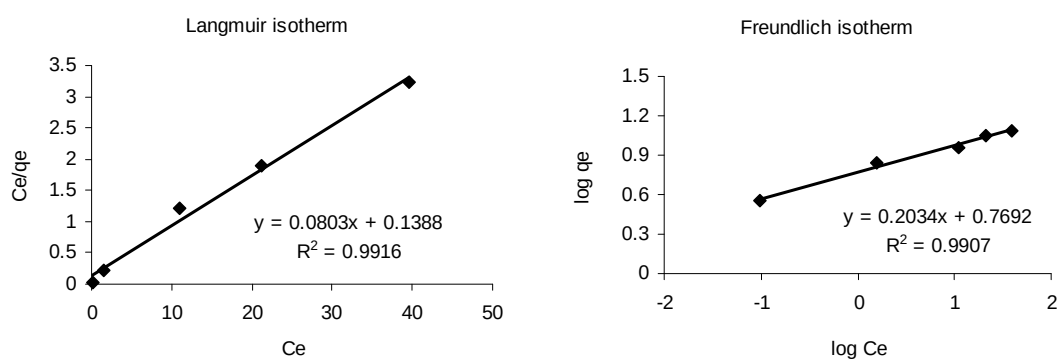
ภาพที่ 76 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

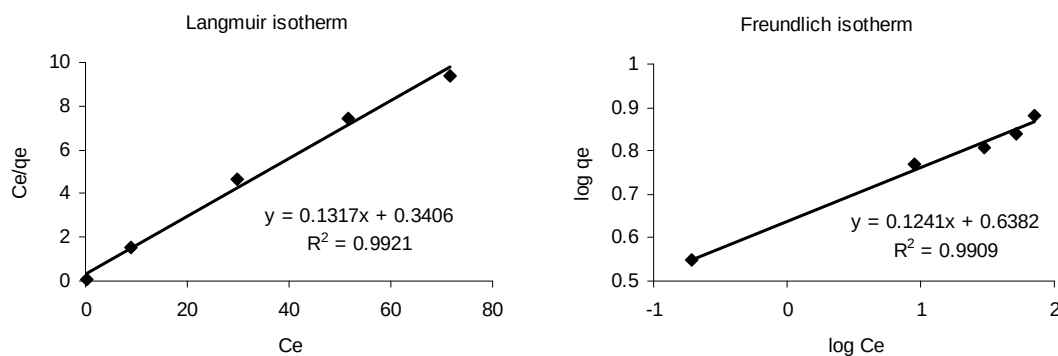
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

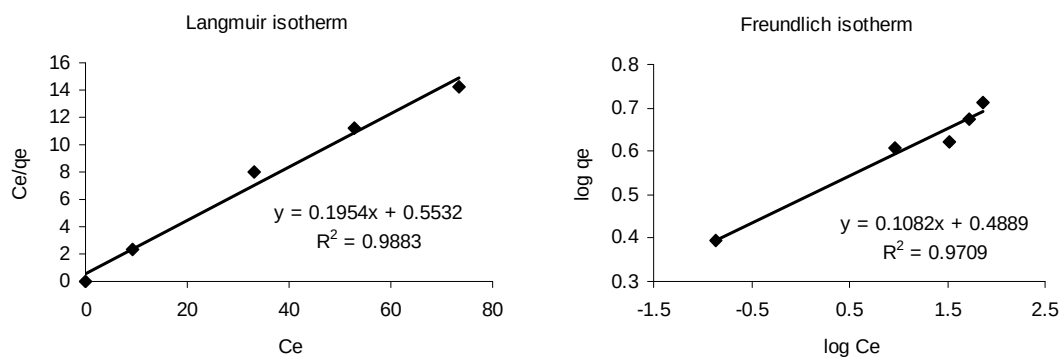
ภาพที่ 77 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

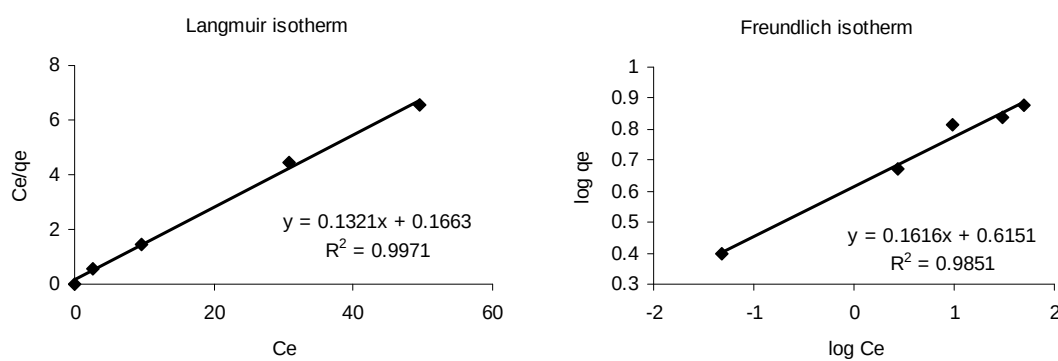
q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

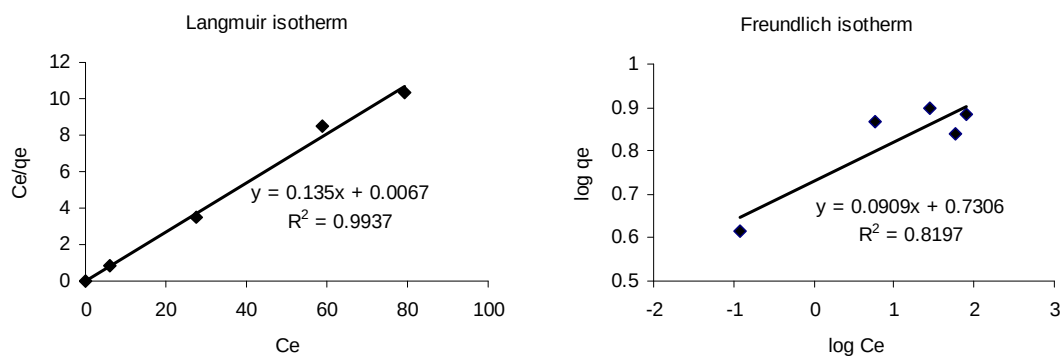


(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

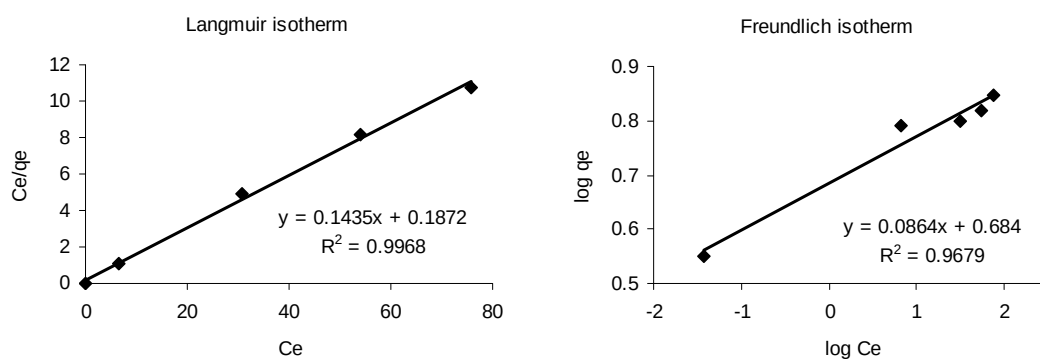
ภาพที่ 78 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

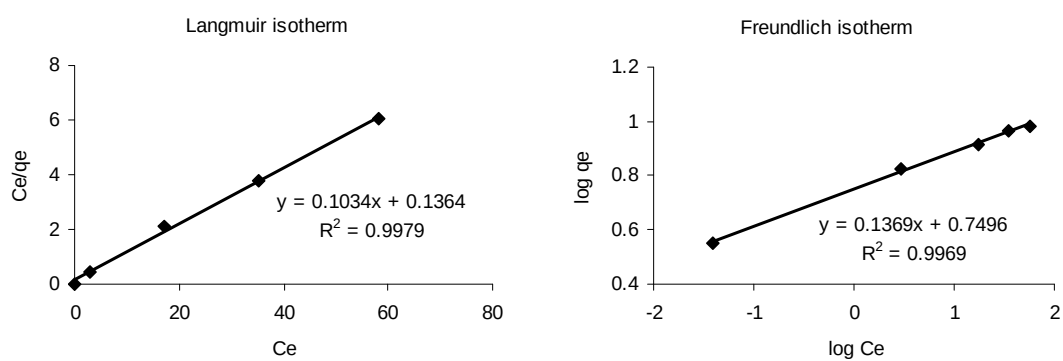
q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

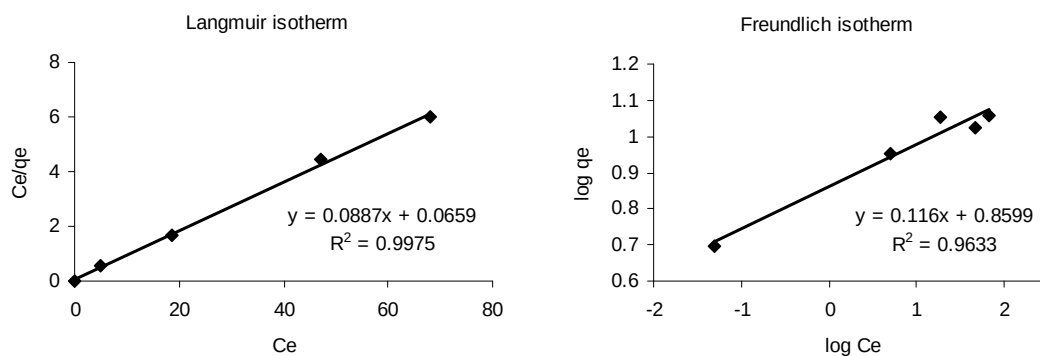


(ค) ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

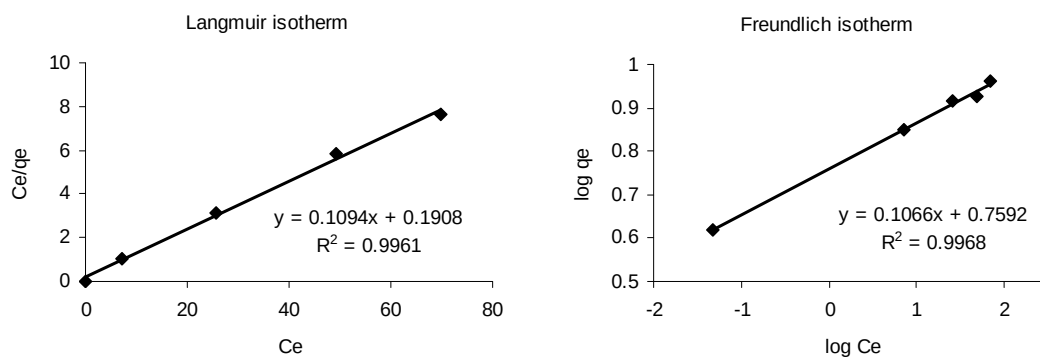
ภาพที่ 79 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุล

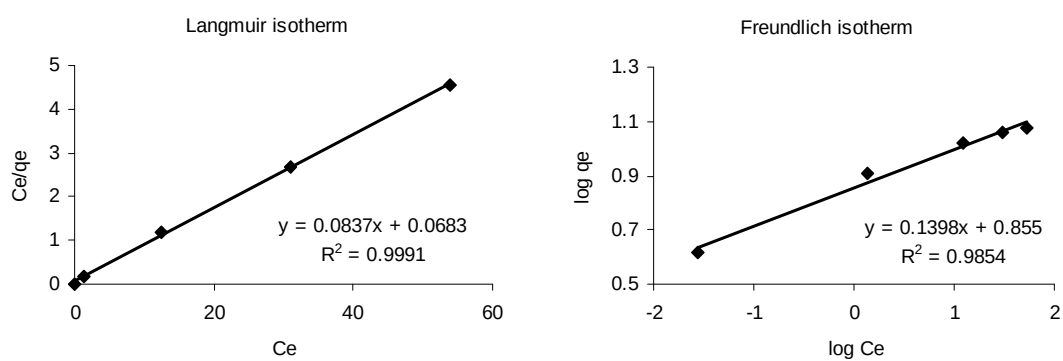
q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

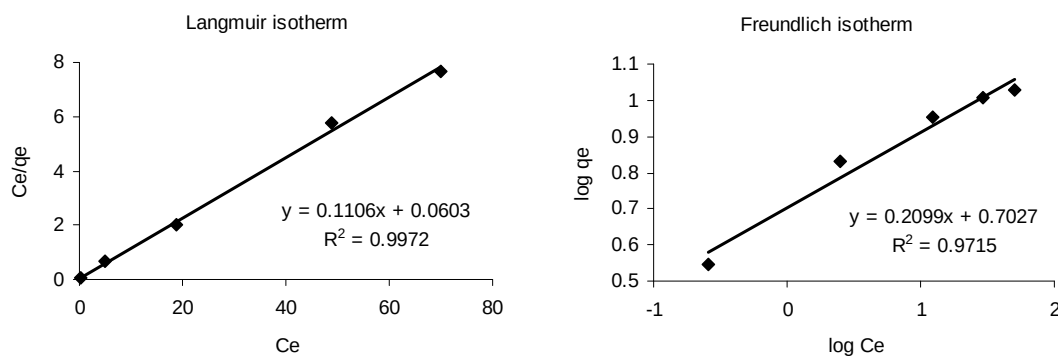


(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

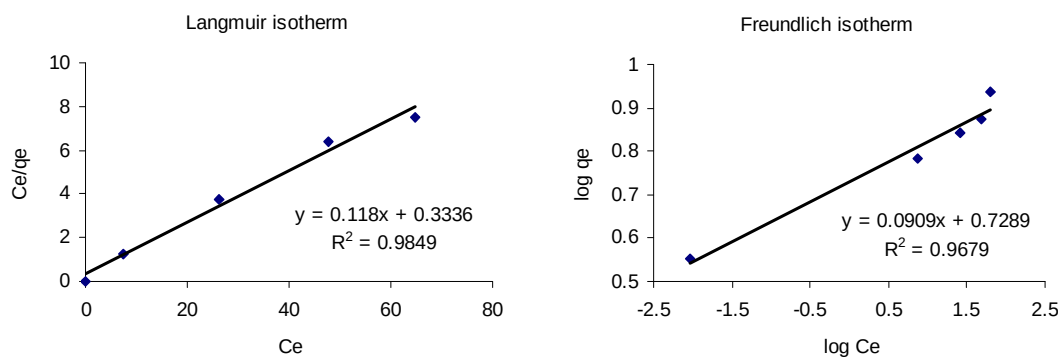
ภาพที่ 80 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

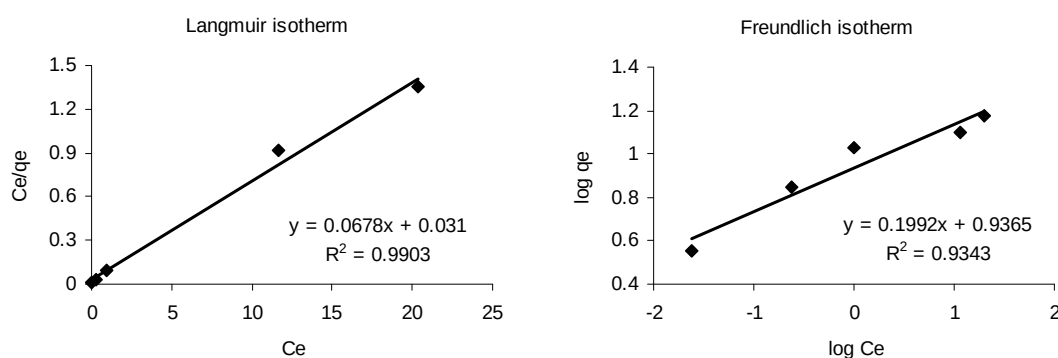
q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 81 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 26 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลลีนบลู แบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช ของถ่านชนิดต่างๆ

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q^0} + \frac{1}{bQ^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ถ่าน Fluka *	-	-	$y = 0.0030x + 0.0040$	0.9922	$y = 0.1716x + 2.2437$	0.9844
ถ่าน Bunton **	-	-	$y = 0.0654x + 0.1277$	0.9947	$y = 0.0724 + 1.0333$	0.9903
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.0919x + 0.1431$	0.9983	$y = 0.2099x + 0.7027$	0.9715
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.0754x + 0.0692$	0.9843	$y = 0.1663x + 0.8717$	0.9501
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.1327x + 0.3005$	0.9856	$y = 0.1012x + 0.6749$	0.9040
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.0814x + 0.3706$	0.9832	$y = 0.1474 + 0.7706$	0.9824
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.1181x + 0.1451$	0.9992	$y = 0.1224x + 0.7123$	0.9948
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.0803x + 0.1388$	0.9916	$y = 0.2034x + 0.7692$	0.9907
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.1317x + 0.3406$	0.9921	$y = 0.1241x + 0.6382$	0.9909
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.1954x + 0.5532$	0.9883	$y = 0.1082x + 0.4889$	0.9709
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.1321x + 0.1663$	0.9971	$y = 0.1616x + 0.6151$	0.9851

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ตารางที่ 26 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.1350x + 0.0067$	0.9937	$y = 0.0909x + 0.7306$	0.8197
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.1435x + 0.1872$	0.9968	$y = 0.0864x + 0.6840$	0.9679
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.1034x + 0.1364$	0.9979	$y = 0.1369x + 0.7496$	0.9969
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.0887x + 0.0659$	0.9975	$y = 0.1160x + 0.8699$	0.9633
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.1094x + 0.1908$	0.9961	$y = 0.1066x + 0.7592$	0.9968
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.0837x + 0.0683$	0.9991	$y = 0.1398x + 0.8550$	0.9854
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.1106x + 0.0603$	0.9972	$y = 0.2099x + 0.7207$	0.9715
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.1180x + 0.3336$	0.9849	$y = 0.0909x + 0.7289$	0.9679
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.0678x + 0.0310$	0.9903	$y = 0.1992x + 0.9365$	0.9343

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

จากตารางที่ 26 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มทั้งสอง มีค่าเข้าใกล้ 1 ทั้งคู่ ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษา โดยใช้ฝุ่นไม้ไผ่ เปลือกมะพร้าว เปลือกถั่วลิสง เปลือกข้าว และ ฟางข้าว ทำการดูดซับเมทิลลิโนบลู ซึ่งพบว่ากลไกการดูดซับอาจเกิดได้ทั้งสองแบบ (Kannan and Sundaram, 2001) เมื่อนำไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มาพิจารณาค่าคงที่ สามารถหาความสามารถในการดูดซับได้ ดังแสดงในตารางที่ 27

ซึ่งค่า Q^0 แสดงถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวถูกดูดซับ หรือ แสดงถึงความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลูในสารละลาย ถ้าถ่านใดมีค่า Q^0 สูง แสดงว่าถ่านชนิดนั้นสามารถดูดซับเมทิลลิโนบลูได้ดีกว่าถ่านที่มีค่า Q^0 ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่า Q^0 ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า ถ่านไม้ไผ่ตง ที่ให้ค่า Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (13.26 mg/g) และถ่านไม้ไผ่หมาจู้ ที่ให้ Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (14.75 mg/g) และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า คือ ถ่านไม้ไผ่ Bunton ซึ่งมีค่า Q^0 เท่ากับ 15.29 mg/g แสดงว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลู ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ Fluka ซึ่งมีค่า Q^0 เท่ากับ 333.33 mg/g ยังถือว่าความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลูยังต่ำกว่ามาก โดยคาดว่าจะการกระตุ้นไม่สามารถทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่พอที่เมทิลลิโนบลูจะสามารถเข้าไปในช่องว่างของรูพรุนได้ การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้น้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Fluka ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลูสูงมาก เนื่องจาก ถ่านกัมมันต์ Fluka มีขนาดของรูพรุนใหญ่ พอที่เมทิลลิโนบลูจะเข้าไปในช่องว่างได้ รวมถึงการกระตุ้นทำให้ผิวมีความเป็นลบเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น การดูดซับเมทิลลิโนบลูซึ่งมีความเป็นลบเช่นกัน เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี

ตารางที่ 27 ค่าคงที่การดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	Q^0 (mg/g) ***	b (l/mg) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	333.3333	0.7500
ถ่าน Bunton **	-	-	15.2905	0.5121
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	10.8814	0.6422
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	13.2626	1.0896
		กระตุ้นโดย KOH	7.5358	0.4416
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	12.2850	0.2196
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	8.4674	0.8139
		กระตุ้นโดย KOH	12.4533	0.5785
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.5930	0.3867
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	5.1177	0.3532
		กระตุ้นโดย KOH	7.5700	0.7943
ไม้ไผ่หมางู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.4074	20.1493
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.9686	0.7666
		กระตุ้นโดย KOH	9.6712	0.7581
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	11.2740	1.3460
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	9.1408	0.5734
		กระตุ้นโดย KOH	11.9474	1.2255
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	9.0416	1.8342
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	8.4746	0.3537
		กระตุ้นโดย KOH	14.7493	2.1871

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

*** Q^0 และ b คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (l/mg) ตามลำดับ

จากการที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู เป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงว่าการดูดซับเมทิลีนบลูนั้น เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จึงสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ได้จากสมการ

$$S = \frac{Q^0}{MW} \times N \times a$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{\AA}^2/\text{g}$)
 Q^0 = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 MW = มวลโมเลกุลของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ (319.85 g/mol)
 N = เลขอะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/mol}$)
 a = พื้นที่หน้าตัดของเมทิลีนบลู ($120 \text{ \AA}^2$)

ที่มา: Grubbs (n.d.)

จากการแทนค่า Q^0 ของถ่านชนิดต่างๆ จะสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชนิดต่างๆ ได้ (แสดงในตารางที่ 28) โดยพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่าแปรผันตรงกับความสามารถในการดูดซับ ซึ่งจากการทดลองนี้จะพบว่า ถ่านไม้ไผ่ตง ที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ($29.95 \text{ \AA}^2/\text{g}$) และถ่านไม้ไผ่หมาจู้ ที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ($33.31 \text{ \AA}^2/\text{g}$)

ตารางที่ 28 พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	S ($\text{\AA}^2/\text{g}$) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	752.85
ถ่าน Bunton **	-	-	34.53
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	24.58
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	29.95
		กระตุ้นโดย KOH	17.02
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	27.75
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	19.12
		กระตุ้นโดย KOH	28.13
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	17.15
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	11.56
		กระตุ้นโดย KOH	17.10
ไม้ไผ่พม่า	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	16.73
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	15.74
		กระตุ้นโดย KOH	21.84
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	25.46
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	20.65
		กระตุ้นโดย KOH	26.98
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	20.42
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	19.14
		กระตุ้นโดย KOH	33.31

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

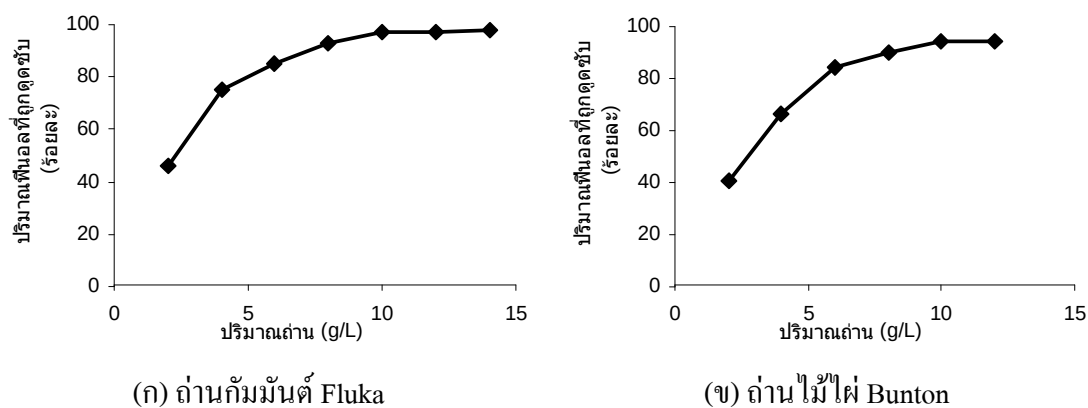
*** S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับเมทิลีนบลู

4.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอล

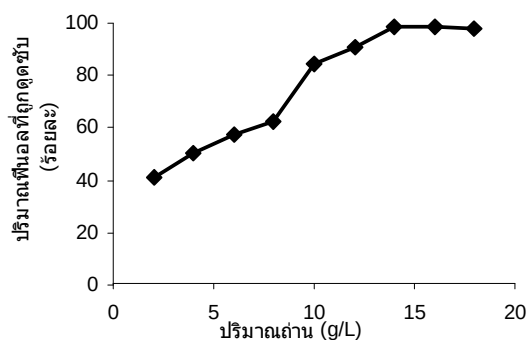
4.3.1 การศึกษาปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทำการทดลองดูดซับฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ ใช้สารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 10 mg/l ปริมาตร 25 ml และมีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดยเพิ่มน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.050 g จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกปริมาณของถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะ เข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

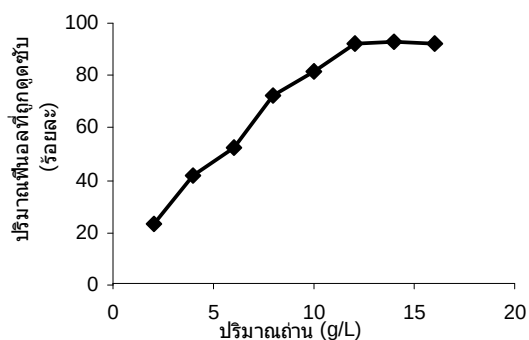
ภาพที่ 82 แสดงปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 29 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด



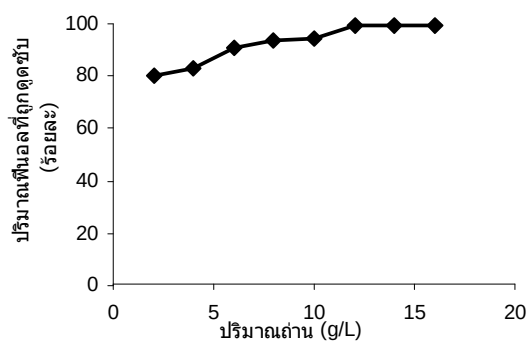
ภาพที่ 82 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



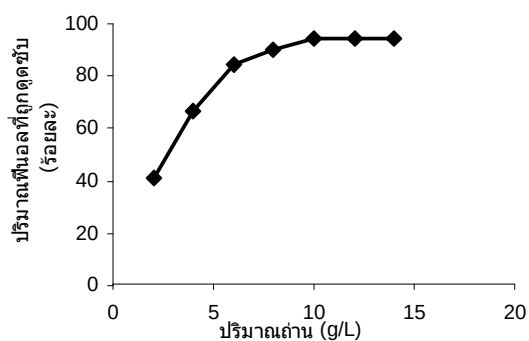
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



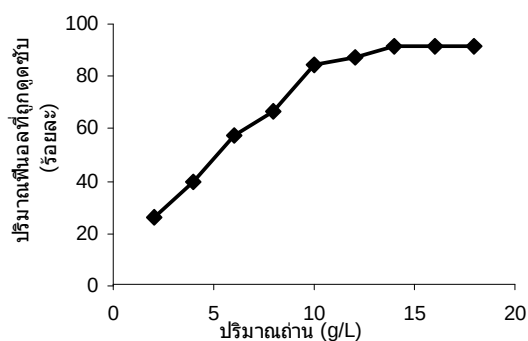
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



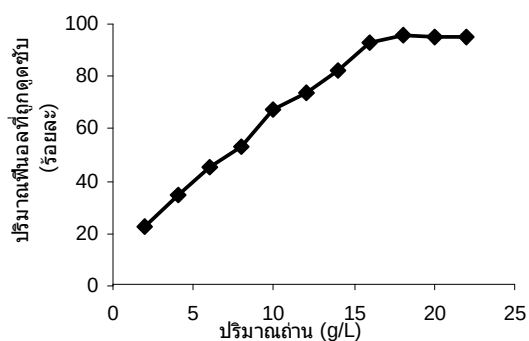
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



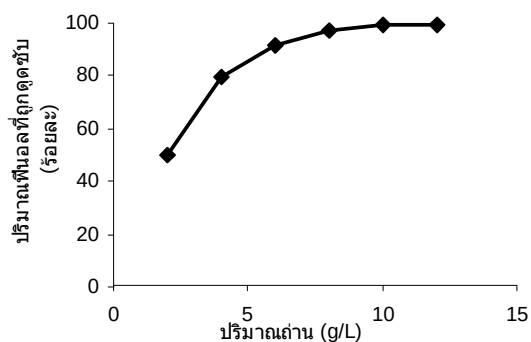
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



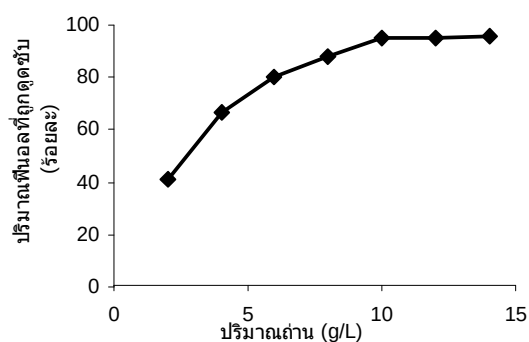
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



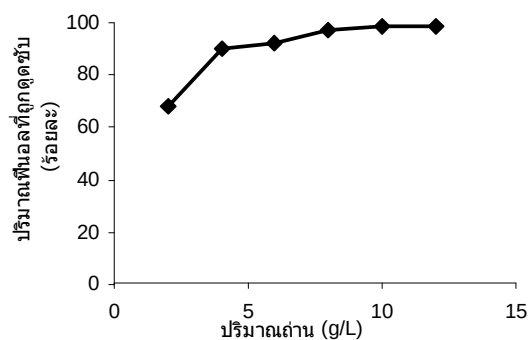
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



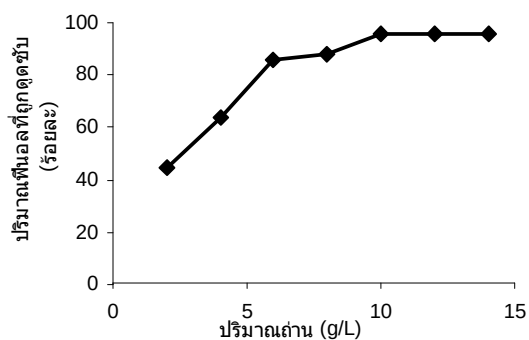
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



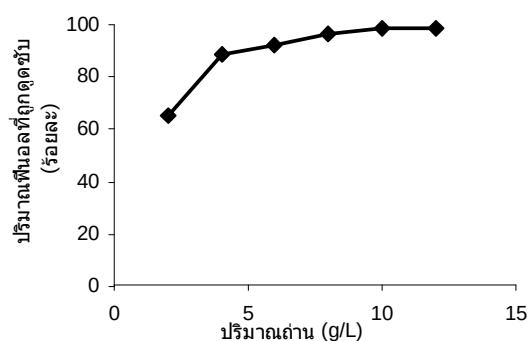
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



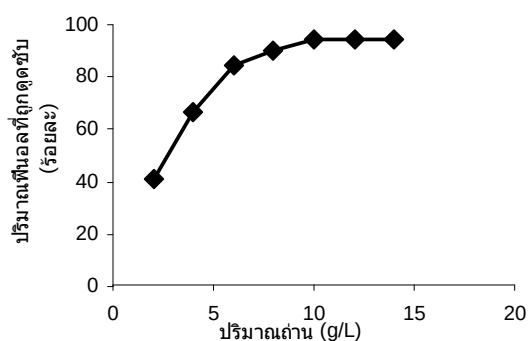
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄

ตารางที่ 29 แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิดที่เหมาะสม ในการดูดซับ ฟีนอล

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ปริมาณถ่านที่ใช้ในการ ทดลอง (g)	ปริมาณถ่านที่เหมาะสม (g/l)	ปริมาณฟีนอล ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	0.25	10.0	97.50 ± 0.52
ถ่าน Bantan**	-	-	0.25	10.0	94.59 ± 0.49
ไม้ไผ่ผง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.35	14.0	98.67 ± 0.97
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.30	12.0	92.49 ± 0.44
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.30	12.0	99.28 ± 0.66
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.30	12.0	92.36 ± 0.50
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.35	12.0	91.46 ± 1.92
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.45	18.0	95.41 ± 0.52
ไม้ไผ่หยาบ	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.25	10.0	99.36 ± 0.42
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.25	10.0	95.25 ± 1.34
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.25	10.0	98.89 ± 0.50
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.25	10.0	95.77 ± 0.28
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.25	10.0	98.31 ± 1.26
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	0.30	12.0	96.30 ± 0.69

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

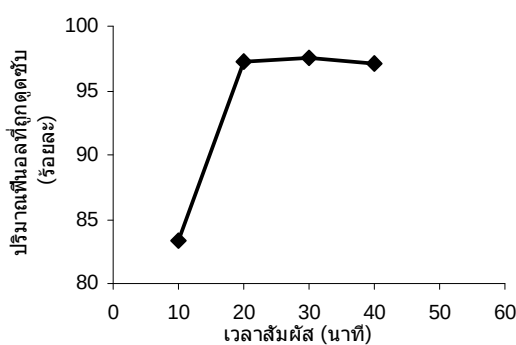
จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะใช้ปริมาณ ถ่านที่สูงกว่าในการดูดซับฟีนอล หรือจะทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลงเมื่อปริมาณ ถ่านเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นที่พันธุ์และอายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง

4.3.2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล

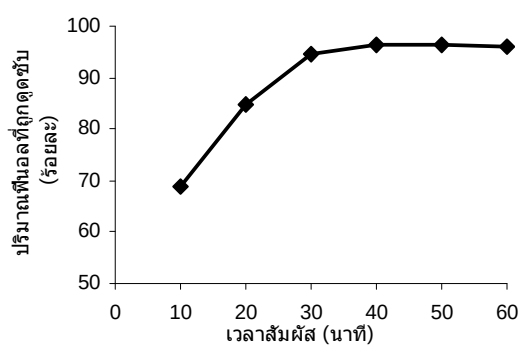
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 25 ml ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 และปริมาณถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด (จากผลการทดลองข้อ 4.3.1) และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่า ครั้งละ 10 นาที จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านแต่ละชนิดจะมีเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่า ร้อยละของปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 83 แสดงเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 30 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่า ในถ่านไม้ไผ่ทั้งไฟแดงและไฟเหลือง ทุกอายุปี ถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นจะใช้เวลาสัมผัสน้อยกว่าถ่านที่ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์แล้ว และ ความสามารถในการดูดซับฟีนอลของถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นมีค่าสูงกว่า แสดงว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลลดลง

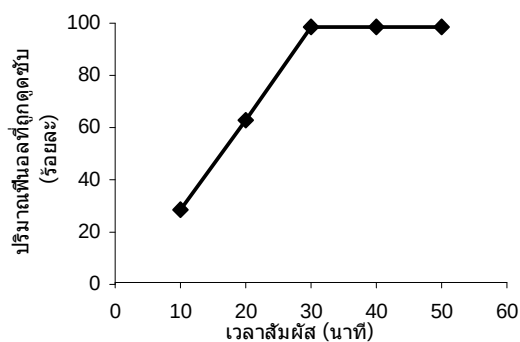


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

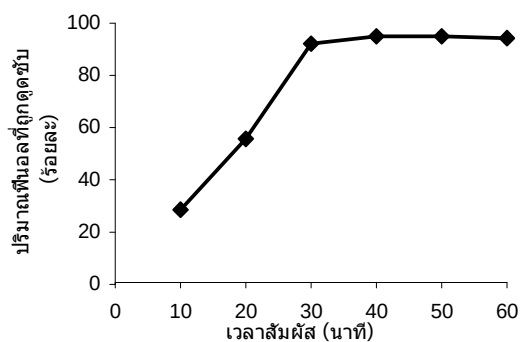


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Buntan

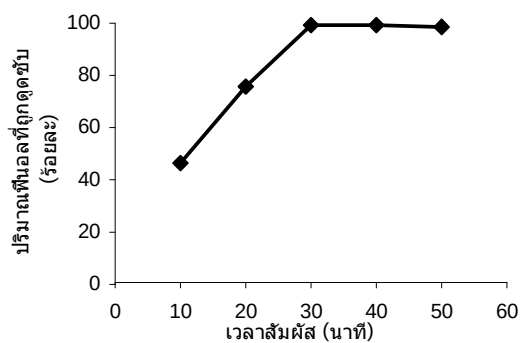
ภาพที่ 83 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



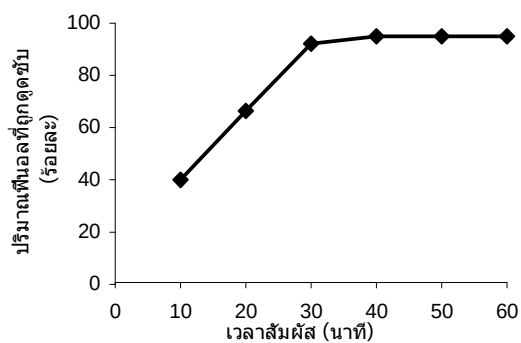
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



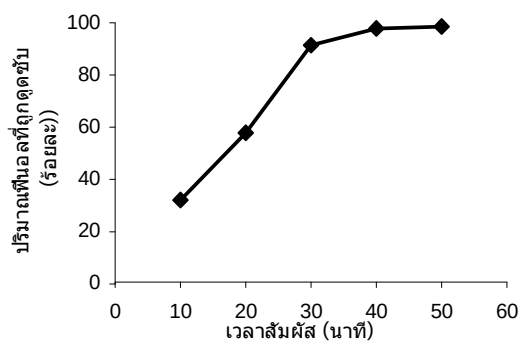
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



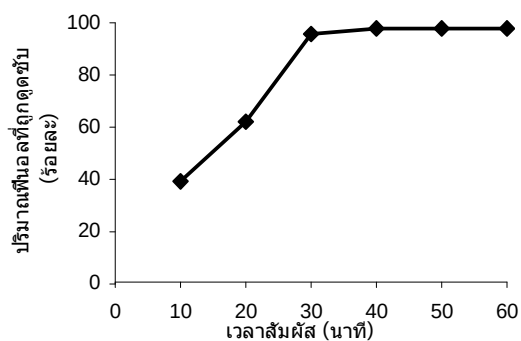
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



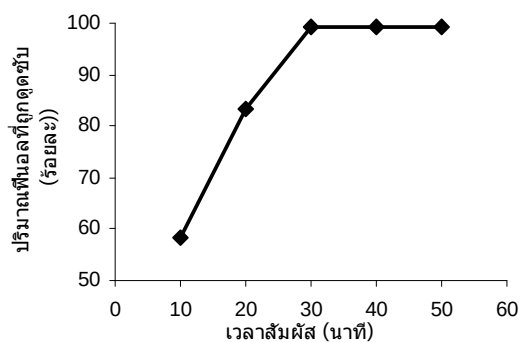
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



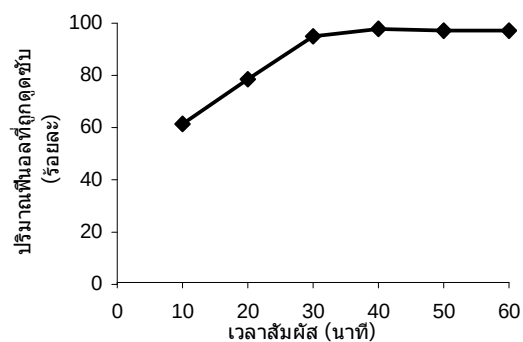
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



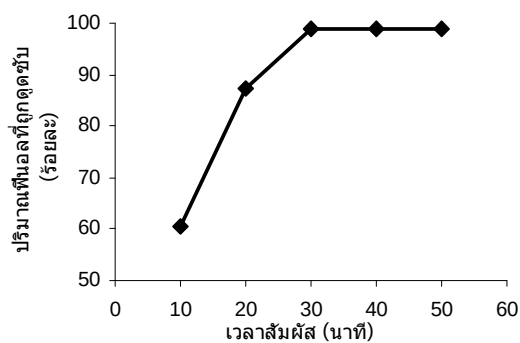
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



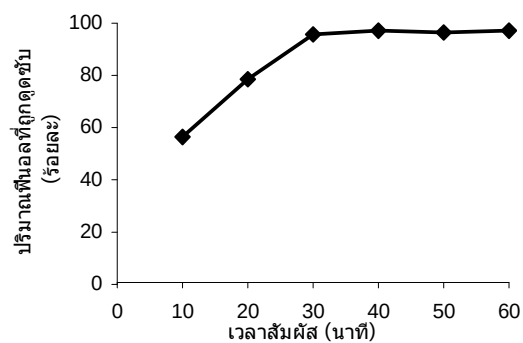
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



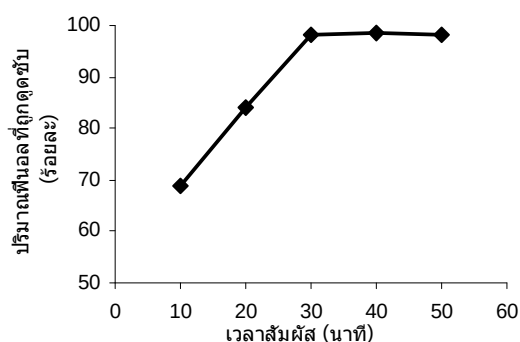
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



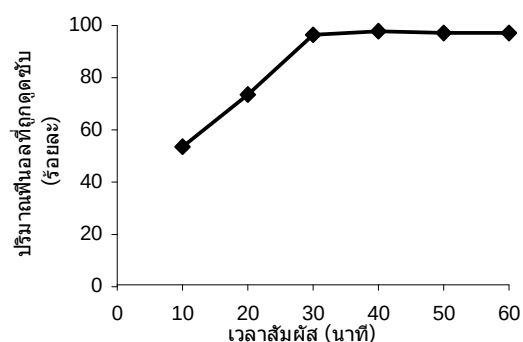
(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฏ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ตารางที่ 30 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (นาท)	ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	20	97.28 ± 0.30
ถ่าน Bunton **	-	-	40	96.51 ± 0.49
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	98.67 ± 0.97
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	40	94.89 ± 1.00
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	99.28 ± 0.66
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	40	95.29 ± 0.34
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	40	98.19 ± 0.54
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	40	97.68 ± 0.45
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	99.36 ± 0.42
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	40	97.51 ± 0.36
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	98.89 ± 0.50
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	40	96.87 ± 0.37
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	30	98.31 ± 1.26
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	40	97.61 ± 0.62

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

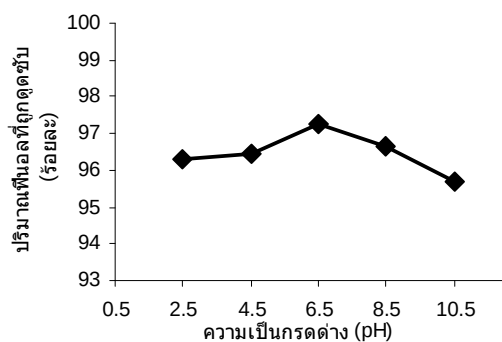
** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.3.3 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอล

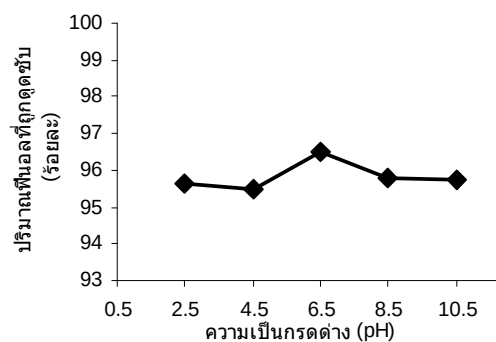
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 10 mg/l ปริมาตร 25 ml ค่าความเป็นกรดต่าง มีค่าเท่ากับ 2.5, 4.5, 6.5, 8.5 และ 10.5 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสมซึ่งได้(จากผลทดลองในข้อ 4.3.1) และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านแต่ละชนิด (จากผลการทดลองข้อ 4.3.2) และเลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ปริมาณของฟีนอลถูกดูดซับสูงสุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 84 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 31 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

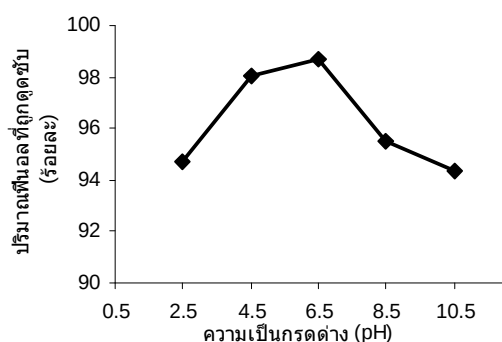
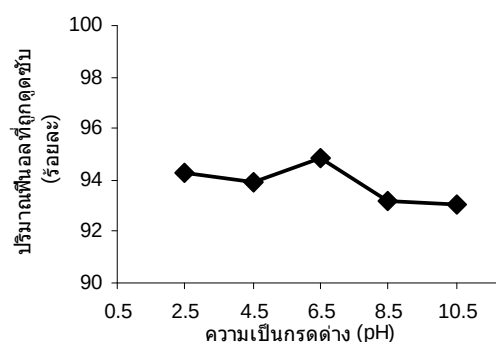
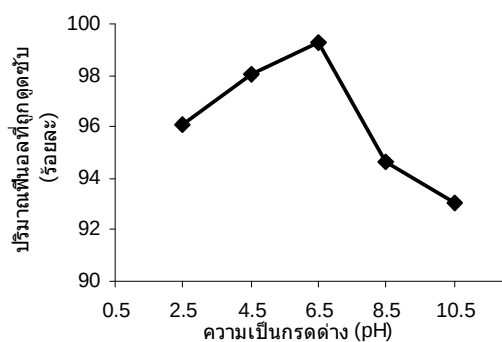
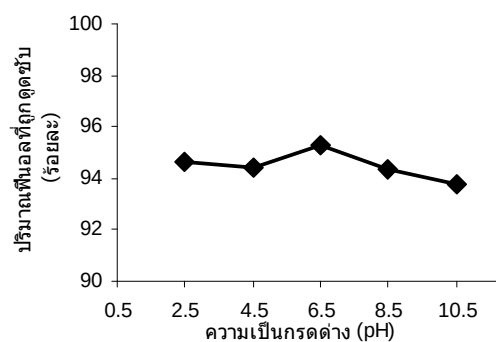
จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือในสถานะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และในสถานะที่เป็นด่าง ฟีนอลจะอยู่ในโครงสร้างของ ฟีนอเลตแอนไอออน (phenolate anion) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของฟีนอลเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างฟีนอล และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด (Mohanty และคณะ, 2005)



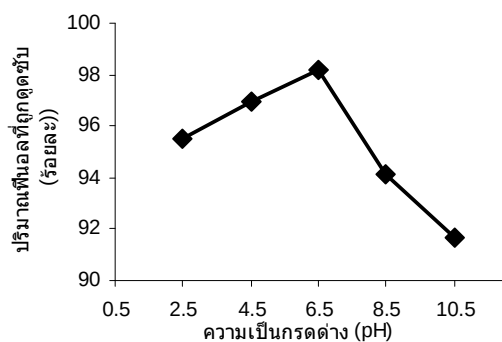
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



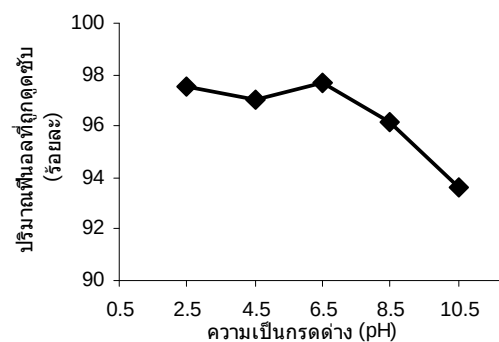
(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄

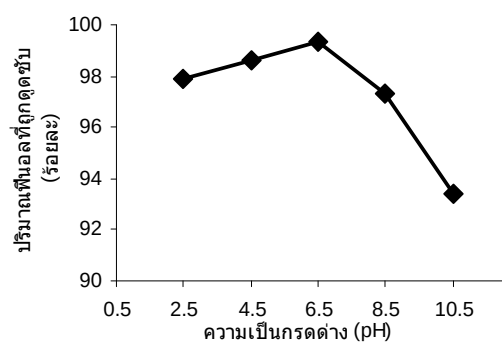
ภาพที่ 84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



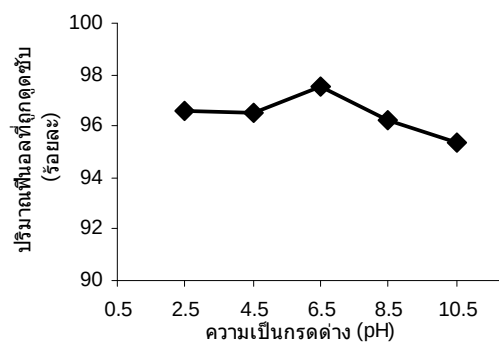
(ข) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



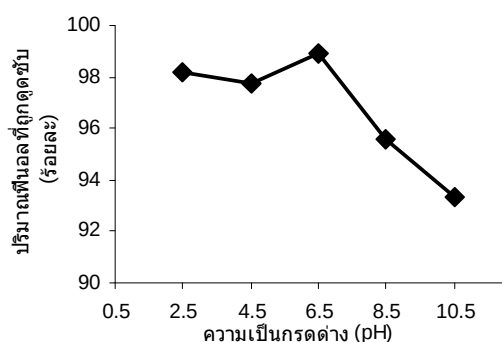
(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



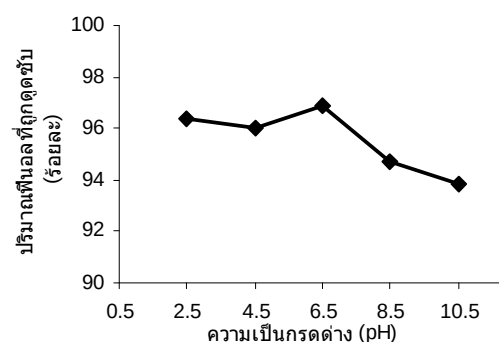
(ณ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



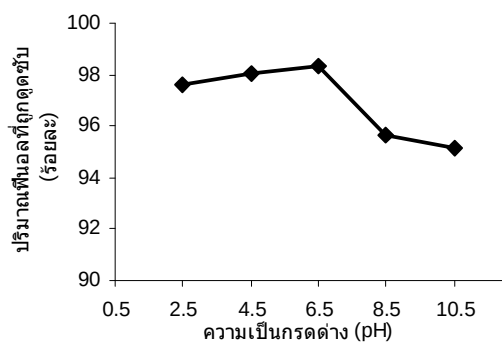
(จ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



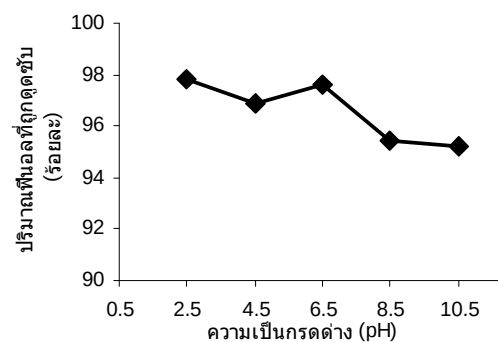
(ฉ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ก) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ภาพที่ 84 (ต่อ)

ตารางที่ 31 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด

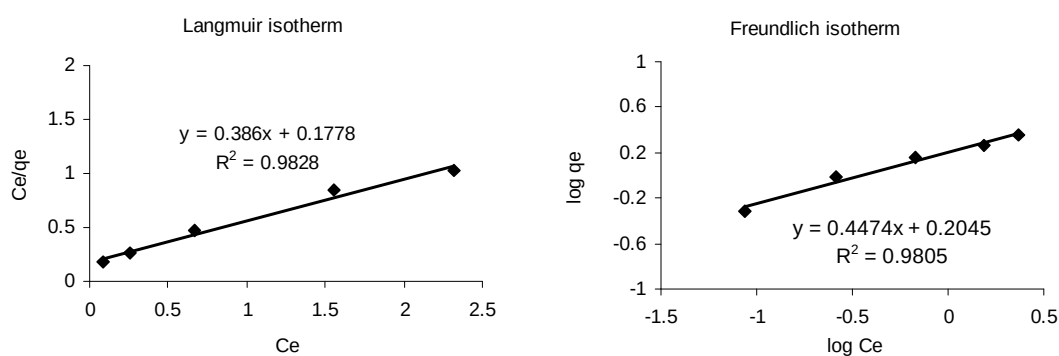
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ความเป็นกรดต่าง ที่เหมาะสม (pH)	ปริมาณฟีนอล ที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	6.5	97.28 ± 0.30
ถ่าน Bunton **	-	-	6.5	96.51 ± 0.39
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.67 ± 0.97
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.5	94.89 ± 1.00
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	99.28 ± 0.66
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.5	95.29 ± 0.34
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.19 ± 0.54
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.5	97.68 ± 0.45
	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	99.36 ± 0.42
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.5	97.51 ± 0.36
ไม้ไผ่หมาจู	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.89 ± 0.50
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.5	96.87 ± 0.37
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	6.5	98.31 ± 1.26
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	6.5	97.61 ± 0.62

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

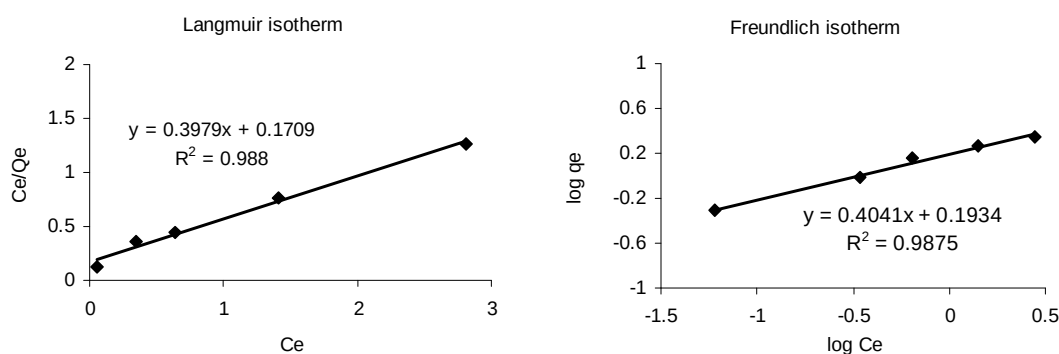
** ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.3.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับฟีนอลความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 mg/l ปริมาตร 25 ml โดยใช้ปริมาณถ่าน เวลาสัมผัส และความเป็นกรดต่าง ที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด ซึ่งได้จากผลการทดลองในข้อ 4.3.1, 4.3.2 และ 4.3.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านออก และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดหาความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลืออยู่ และสามารถนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 85 ถึง 91 ซึ่งในการทดลองนี้ ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอล

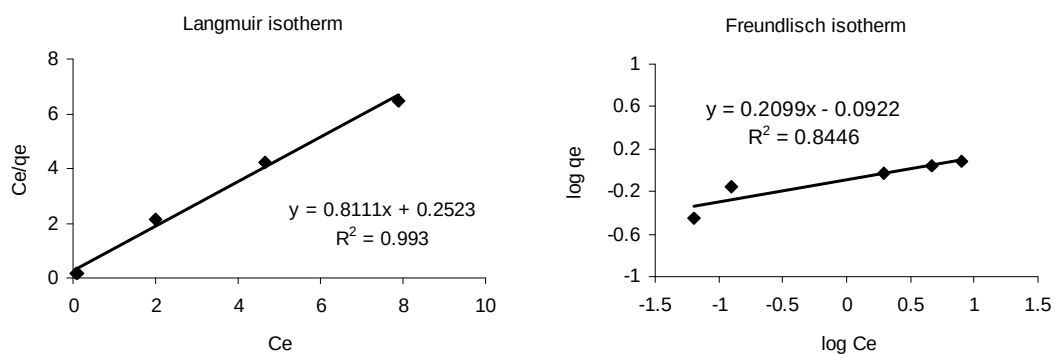


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

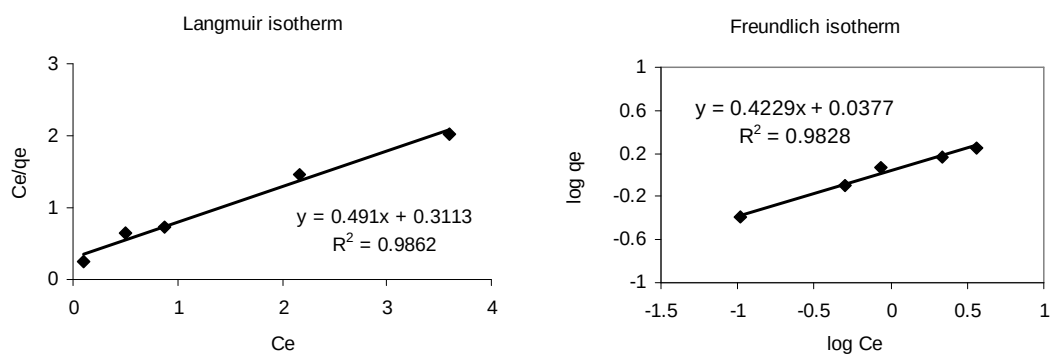
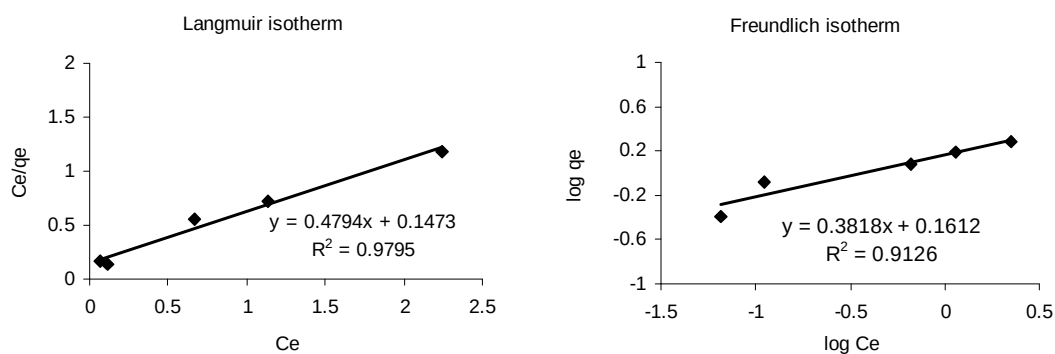


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

ภาพที่ 85 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิจ
ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

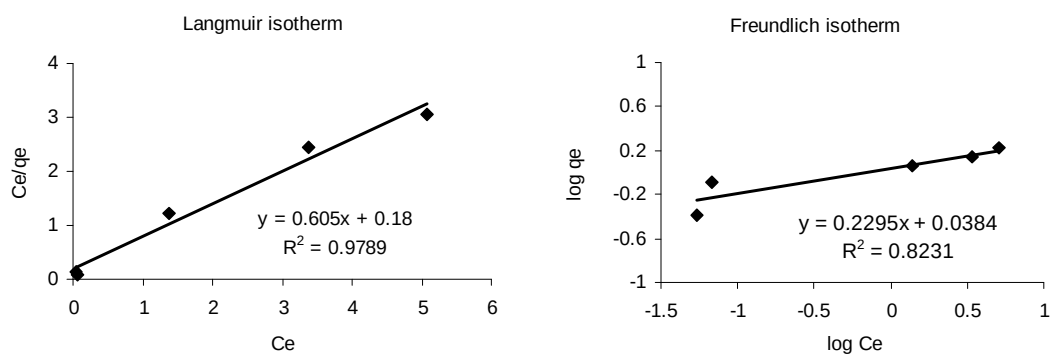
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

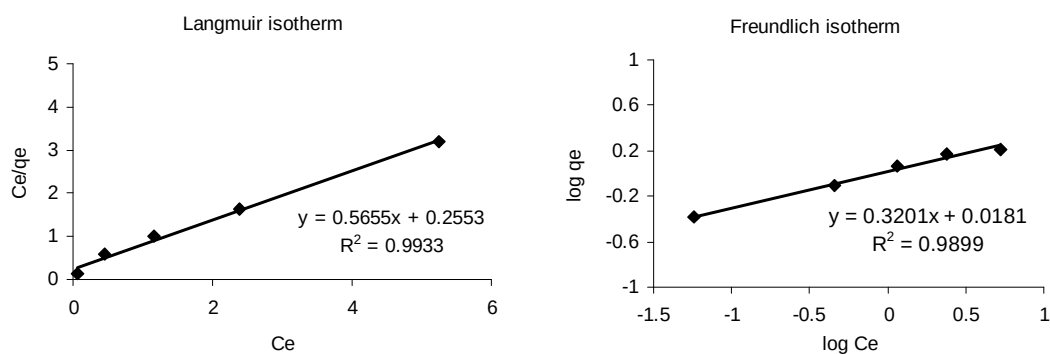
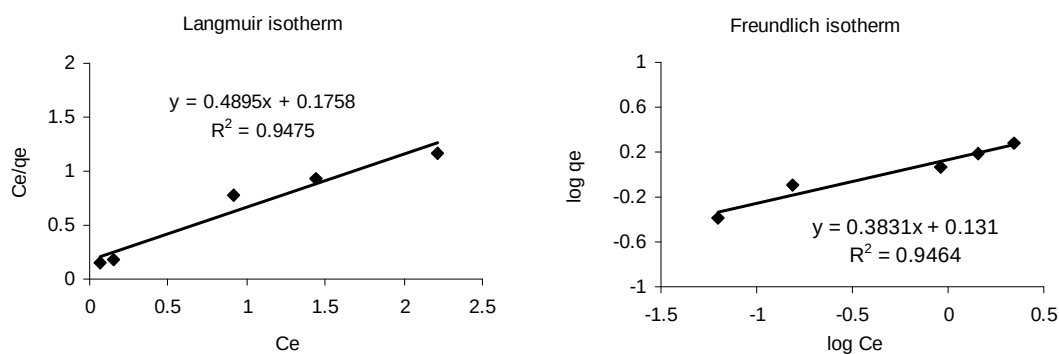
ภาพที่ 86 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 1 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

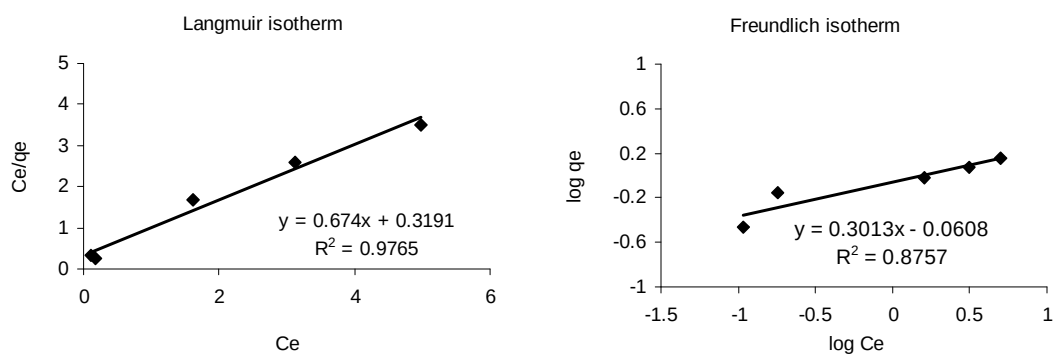
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

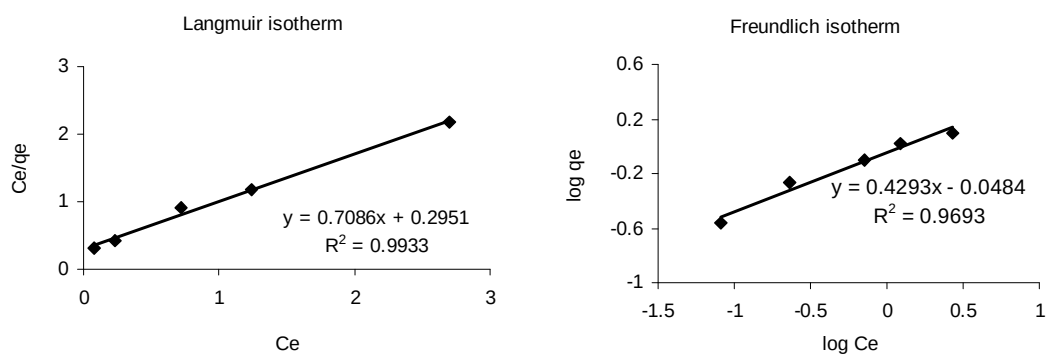
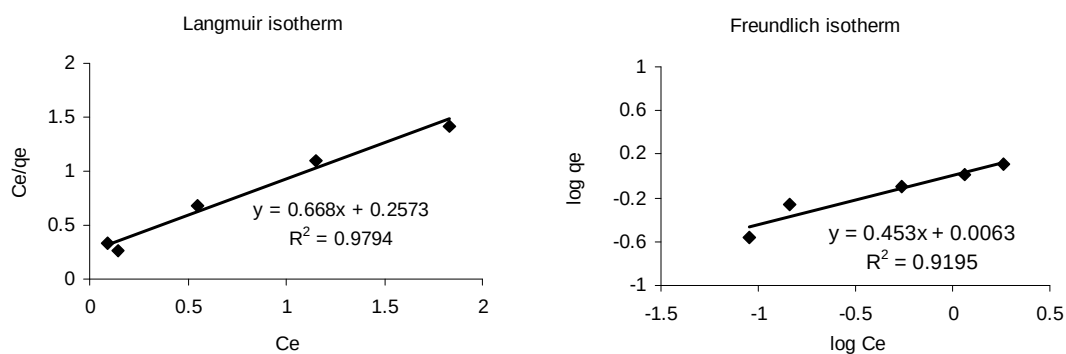
ภาพที่ 87 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

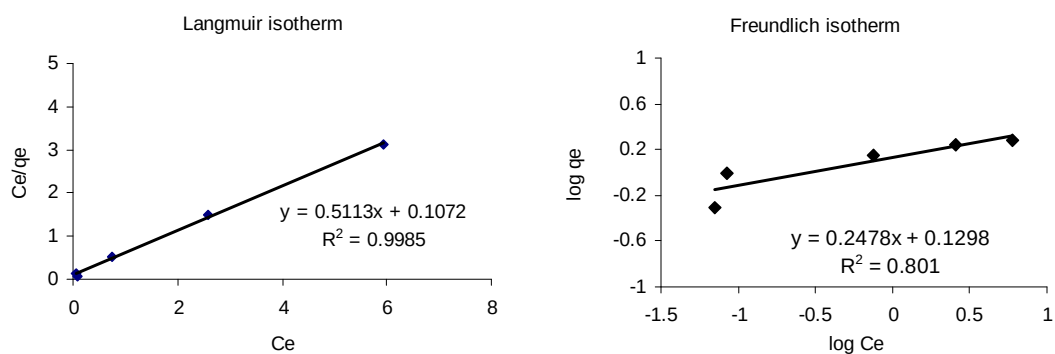
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

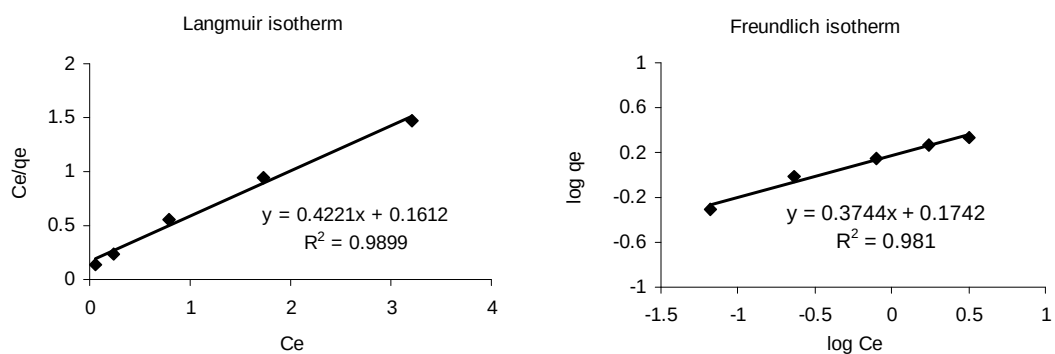
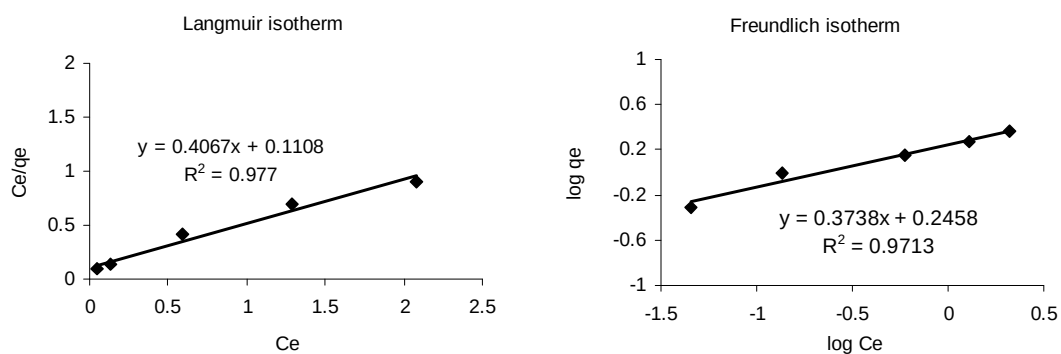
ภาพที่ 88 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 3 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

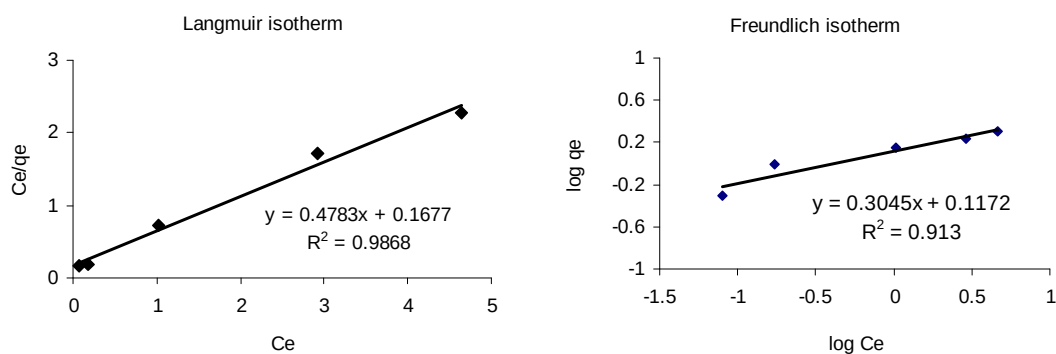
(ข) ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

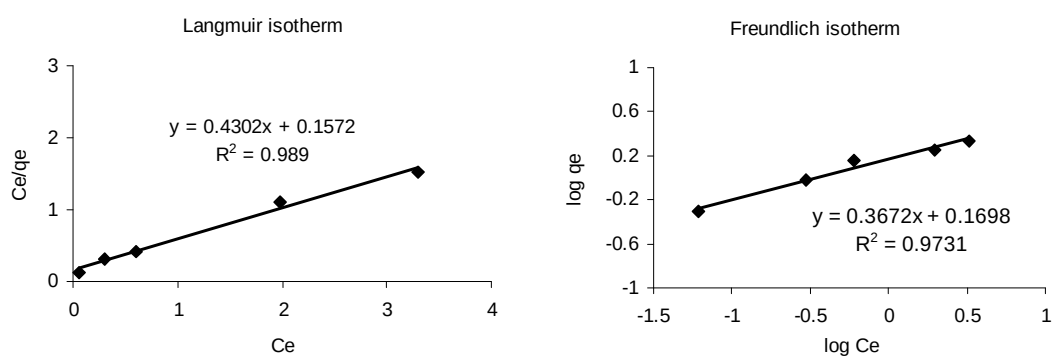
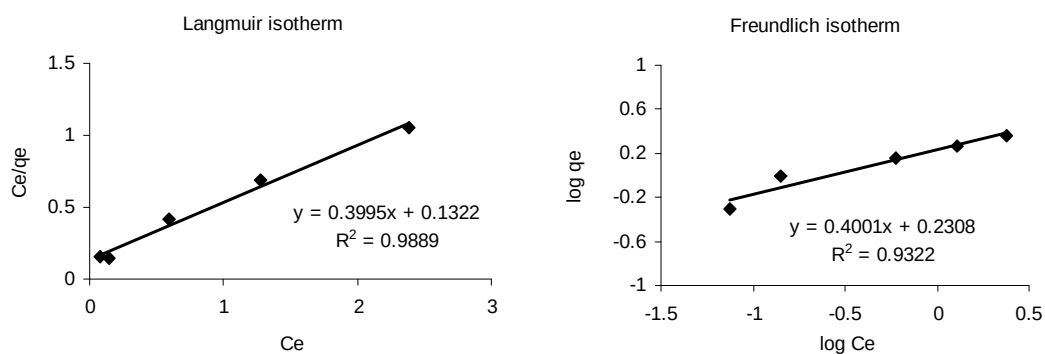
ภาพที่ 89 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมักอายุ 1 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

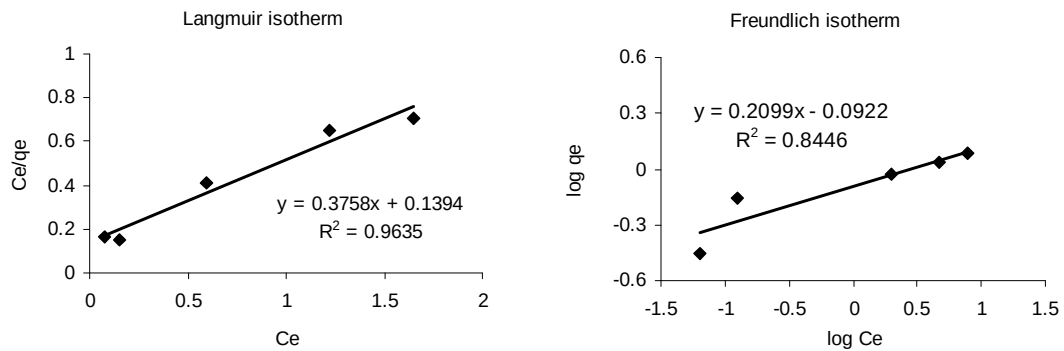
(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

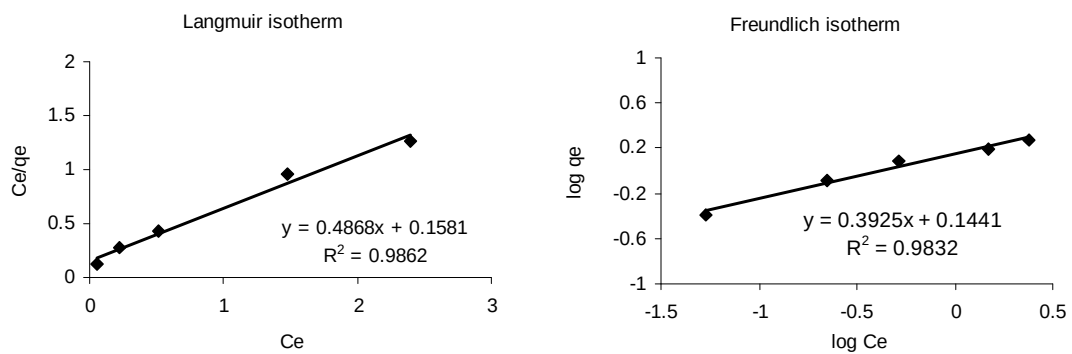
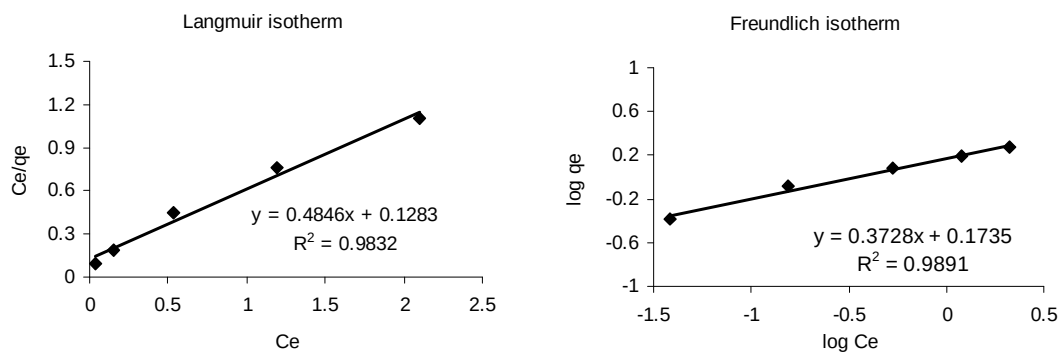
ภาพที่ 90 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 2 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ซึ่งถูกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 91 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 32 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอล แบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช ของถ่านชนิดต่างๆ

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q^0} + \frac{1}{bQ^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ถ่าน Fluka *	-	-	$y = 0.3860x + 0.1778$	0.9828	$y = 0.4474x + 0.2045$	0.9805
ถ่าน Bunton **	-	-	$y = 0.3979x + 0.1709$	0.9880	$y = 0.4041x + 0.1934$	0.9875
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.8111x + 0.2523$	0.9930	$y = 0.2099x - 0.0922$	0.8446
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.4910x + 0.3313$	0.9862	$y = 0.4229x + 0.0377$	0.9828
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.4794x + 0.1473$	0.9795	$y = 0.3818x + 0.1612$	0.9126
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.6050x + 0.1800$	0.9789	$y = 0.2295x + 0.0384$	0.8231
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.5855x + 0.2553$	0.9933	$y = 0.3201x + 0.0181$	0.9899
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.4895x + 0.1758$	0.9475	$y = 0.3831x + 0.1310$	0.9464
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.6740x + 0.3191$	0.9765	$y = 0.3013x - 0.0608$	0.8757
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.7086x + 0.2951$	0.9933	$y = 0.4293x - 0.0484$	0.9693
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.6680x + 0.2573$	0.9794	$y = 4530x + 0.0063$	0.9195

ตารางที่ 32 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.5113x + 0.1702$	0.9985	$y = 0.2478x + 0.1298$	0.8010
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.4221x + 0.1612$	0.9889	$y = 0.3744x + 0.1742$	0.9810
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.4067x + 0.1108$	0.9770	$y = 0.3788x + 0.2458$	0.9713
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.4783x + 0.1677$	0.9868	$y = 0.3045x + 0.1172$	0.9130
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.4302x + 0.1572$	0.9890	$y = 0.3672x + 0.1698$	0.9731
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.3995x + 0.1322$	0.9889	$y = 0.4001x + 0.2308$	0.9322
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.3758x + 0.1394$	0.9635	$y = 0.2099x - 0.0922$	0.8446
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.4868x + 0.1581$	0.9862	$y = 0.3925x + 0.1441$	0.9832
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.4846x + 0.1283$	0.9832	$y = 0.3728x + 0.1735$	0.9891

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

จากตารางที่ 32 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มทั้งสอง มีค่าเข้าใกล้ 1 ทั้งคู่ ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษาแล้วพบว่ากลไกการดูดซับอาจเกิดได้ทั้งสองแบบ เมื่อนำ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มาพิจารณาค่าคงที่ สามารถหาความสามารถในการดูดซับได้ ดังแสดงในตารางที่ 33

ซึ่งค่า Q^0 แสดงถึงปริมาณของตัวถูกละลายบนผิวตัวถูกละลาย หรือ แสดงถึง ความสามารถในการดูดซับฟินอลในสารละลาย ถ้าว่านใดมีค่า Q^0 สูง แสดงว่าถ่านชนิดนั้น สามารถดูดซับฟินอลได้ดีกว่าถ่านที่มีค่า Q^0 ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่า Q^0 ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า ถ่านไม้ไผ่แดง ที่ให้ค่า Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่แดง อายุ 3 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (2.09 mg/g) และถ่านไม้ไผ่หมาจู้ ที่ให้ Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ที่ไม่ได้รับการกระตุ้น (2.66 mg/g) และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า คือ ถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไผ่ Bunton ซึ่งมีค่า Q^0 เท่ากับ 2.59 และ 2.51 mg/g ตามลำดับ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับฟินอล ของถ่านที่เตรียมได้มี ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยในการกระตุ้นนั้น จะทำให้ผิวของถ่านมีความเป็นลบมากขึ้น เนื่องจากมีหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับฟินอล ควรจะลดลง เนื่องจากฟินอลก็มีความเป็นลบเช่นกัน แต่จากผลการทดลอง คาดว่าการกระตุ้นทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งรูพรุนนั้นมีขนาดเหมาะสมกับขนาดของฟินอล จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 33 ค่าคงที่การดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิด จากสมการ
ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	Q^0 (mg/g) ***	B (l/mg) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	2.5907	2.1710
ถ่าน Bunton **	-	-	2.5132	2.3283
ไม้ไฟต่ง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.2329	3.2148
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	2.0367	1.4820
		กระตุ้นโดย KOH	2.0859	3.2546
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.6529	3.3611
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	1.7079	1.9841
		กระตุ้นโดย KOH	2.0429	1.9174
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.4837	2.1122
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	1.4112	2.4012
		กระตุ้นโดย KOH	1.4970	2.5962
ไม้ไฟหมางู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.9558	3.0041
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	2.3691	2.6185
		กระตุ้นโดย KOH	2.4588	3.6706
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	2.0907	2.8521
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	2.3245	2.7366
		กระตุ้นโดย KOH	2.5031	3.0219
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	2.6610	2.6958
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	2.0542	0.4936
		กระตุ้นโดย KOH	2.0636	3.7771

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

*** Q^0 และ b คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (l/mg) ตามลำดับ

จากการที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล เป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงว่าการดูดซับฟีนอลนั้น เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จึงสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ได้จากสมการ

$$S = \frac{Q^0}{MW} \times N \times a$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{\AA}^2/\text{g}$)
 Q^0 = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 MW = มวลโมเลกุลของฟีนอลที่ถูกดูดซับ (94.11 g/mol)
 N = เลขอะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/mol}$)
 a = พื้นที่หน้าตัดของฟีนอล ($52.2 \text{ \AA}^2$)

ที่มา: Nevskaja *et al.* (1999)

จากการแทนค่า Q^0 ของถ่านชนิดต่างๆ จะสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดการดูดซับฟีนอลของถ่านชนิดต่างๆ ได้ (แสดงในตารางที่ 34) โดยพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่าแปรผันตรงกับความสามารถในการดูดซับ ซึ่งจากการทดลองนี้จะพบว่า ถ่านไม้ไผ่ดองที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่ดอง อายุ 1 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ($6.97 \text{ \AA}^2/\text{g}$) และถ่านไม้ไผ่หมางู ที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมางู อายุ 3 ปี ที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ($8.89 \text{ \AA}^2/\text{g}$)

ตารางที่ 34 พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับฟีนอลของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	S ($\text{\AA}^2/\text{g}$) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	752.85
ถ่าน Bunton **	-	-	34.53
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	24.58
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	29.95
		กระตุ้นโดย KOH	17.02
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	27.75
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	19.12
		กระตุ้นโดย KOH	28.13
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	17.15
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	11.56
		กระตุ้นโดย KOH	17.10
ไม้ไผ่พม่า	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	16.73
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	15.74
		กระตุ้นโดย KOH	21.84
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	25.46
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	20.65
		กระตุ้นโดย KOH	26.98
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	20.42
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	19.14
		กระตุ้นโดย KOH	33.31

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

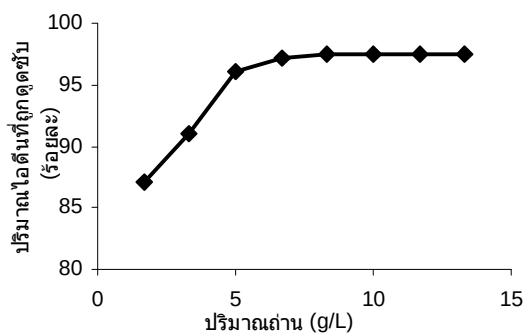
*** S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับฟีนอล

4.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

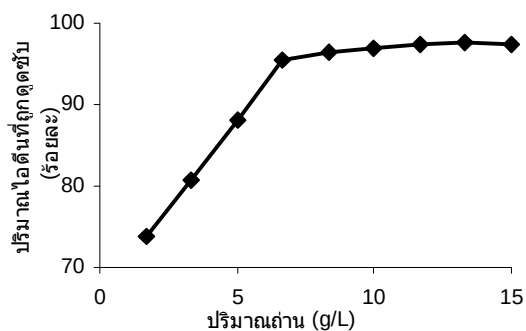
4.4.1 การศึกษาปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทำการทดลองดูดซับไอโอดีนด้วยถ่านกัมมันต์ ใช้สารละลายไอโอดีน ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 0.01 นอร์แมล ปริมาตร 25 ml และมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 และนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที โดยเพิ่มน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ครั้งละ 0.1250 g จนกว่า ค่าร้อยละของปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจะเลือกปริมาณของถ่านที่เหมาะสม โดยเลือกจากปริมาณถ่านที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ภาพที่ 92 แสดงปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 35 แสดงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด กับปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

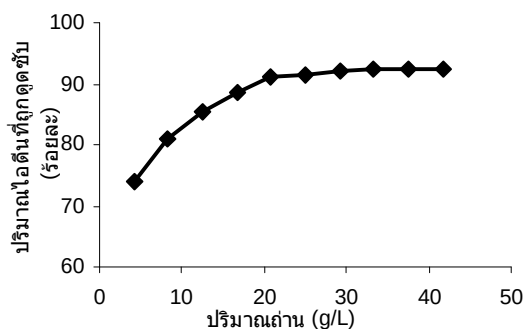


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

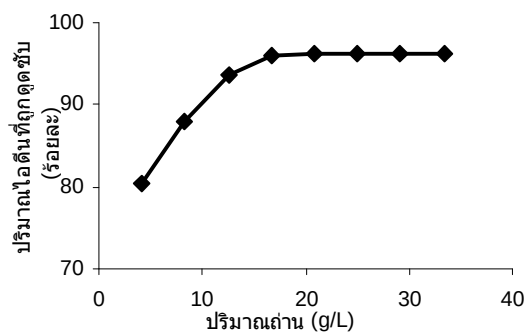


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

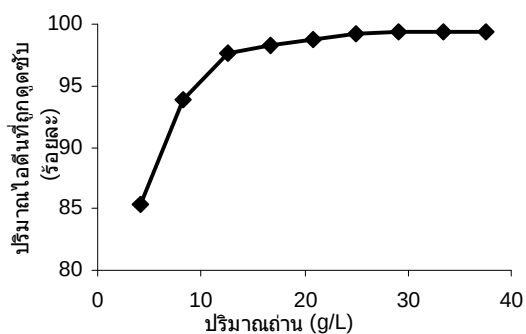
ภาพที่ 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านที่ใช้ดูดซับ กับ ปริมาณของฟีนอล (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



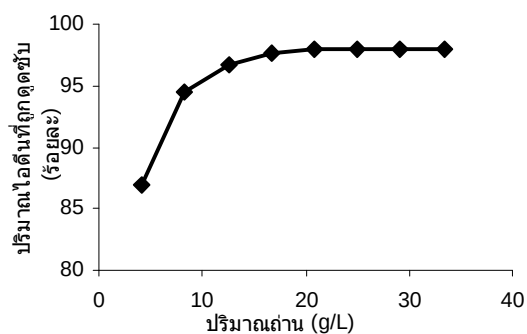
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



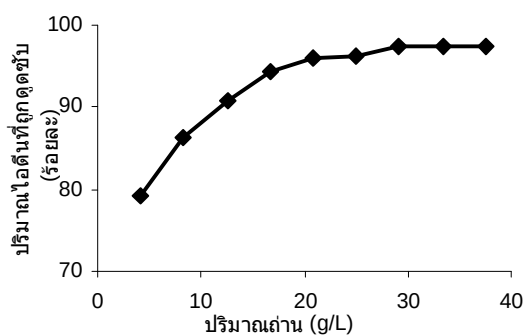
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้น โดย 85% H_3PO_4



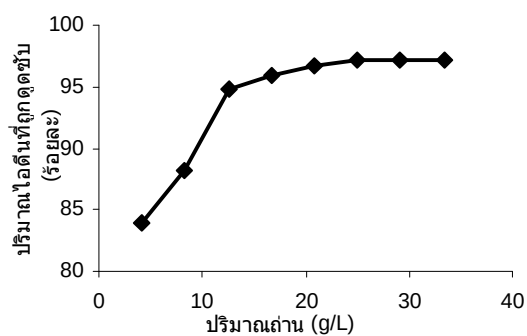
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



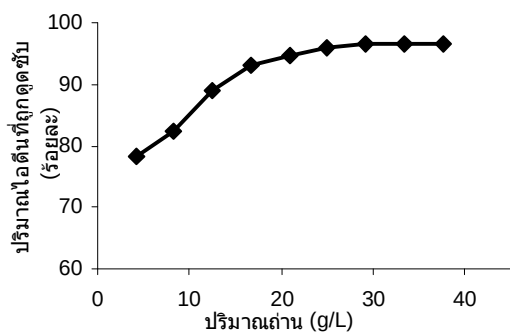
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้น โดย 85% H_3PO_4



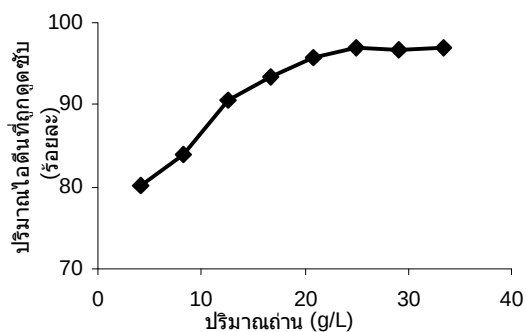
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



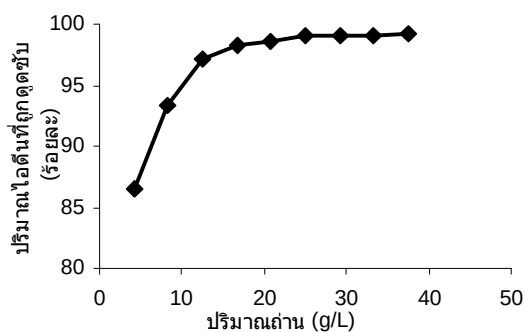
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้น โดย 85% H_3PO_4



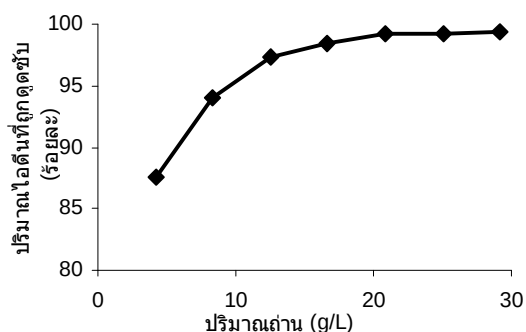
(ง) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



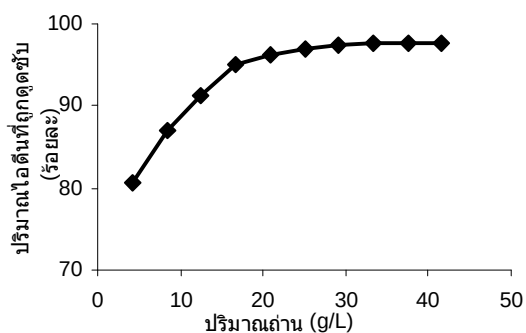
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



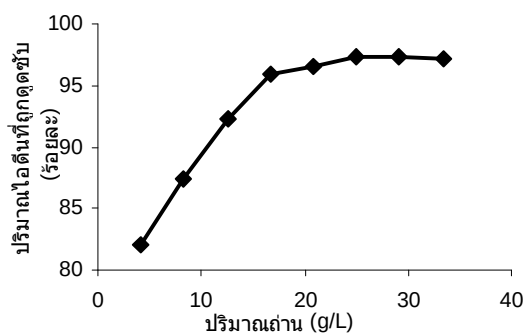
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄



(ฐ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฑ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H₃PO₄

ตารางที่ 35 แสดงปริมาณของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิดที่เหมาะสม ในการดูดซับ ไอโอดีน

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ปริมาณถ่านที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณถ่านที่เหมาะสม (g/l)	ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka*	-	-	0.2500	8.33	97.50 ± 0.05
ถ่าน Bantan**	-	-	0.3500	11.67	97.42 ± 0.07
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	1.0000	33.33	92.29 ± 0.07
		กระตุ้นโดย H ₃ PO ₄	0.6250	20.83	96.29 ± 0.12
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.7500	25.00	99.27 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H ₃ PO ₄	0.6250	20.83	97.88 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.8750	29.17	97.29 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H ₃ PO ₄	0.7500	25.00	97.15 ± 0.08
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.8750	29.17	96.55 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H ₃ PO ₄	0.7500	25.00	96.89 ± 0.08
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.7500	25.00	99.03 ± 0.09
		กระตุ้นโดย H ₃ PO ₄	0.6250	20.83	99.26 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	0.8750	29.17	97.48 ± 0.07
		กระตุ้นโดย H ₃ PO ₄	0.7500	25.00	97.30 ± 0.09

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

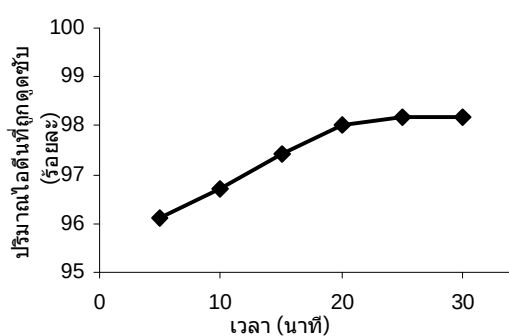
จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จะใช้ปริมาณ ถ่านที่ต่ำกว่าในการดูดซับไอโอดีน หรือจะทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณถ่านเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ถูกกระตุ้นที่พันธุ์และอายุเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น

4.4.2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน

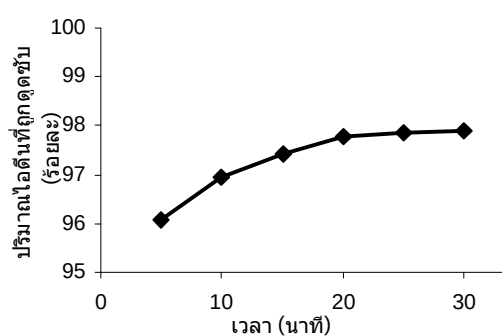
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลาย ไอโอดีน ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล ปริมาตร 25 ml ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7.0 และปริมาณ ถ่านที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด (จากผลการทดลองข้อ 4.4.1) และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และเพิ่มเวลาในการเขย่า ครั้งละ 5 นาที จนกว่าค่าร้อยละของปริมาณ ของไอโอดีนที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุล โดยถ่านแต่ละชนิดจะมีเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแตกต่างกัน ออกไป ดังนั้นจะเลือกเวลาที่เหมาะสม โดยเลือกจากเวลาที่ทำให้ค่าร้อยละของปริมาณของไอโอดีน ที่ถูกดูดซับจะเข้าสู่สมดุลมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นเวลาที่เหมาะสม จะ ใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการพิจารณา

ภาพที่ 93 แสดงเวลา กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และ ตารางที่ 36 แสดงเวลาที่เหมาะสมที่สุด กับ ปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านแต่ละชนิด

จากการทดลองพบว่า ในถ่านไม้ไฟทั้งไฟตงและไฟหมาจู ทุกอายุปี ถ่าน ที่ไม่ถูกกระตุ้นจะใช้เวลาสัมผัสไม่แตกต่างจากถ่านที่ถูกกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์แล้ว

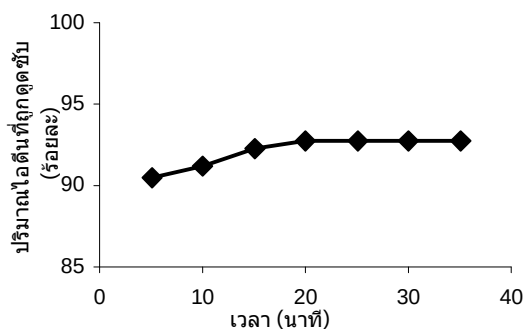


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

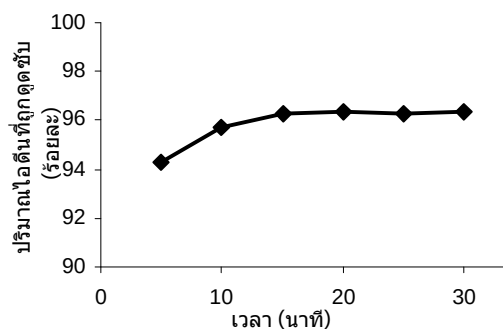


(ข) ถ่านไม้ไฟ Bunton

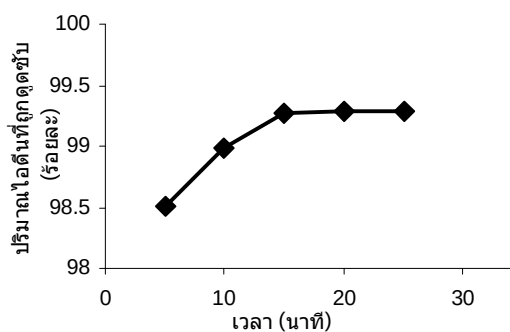
ภาพที่ 93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัส กับปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



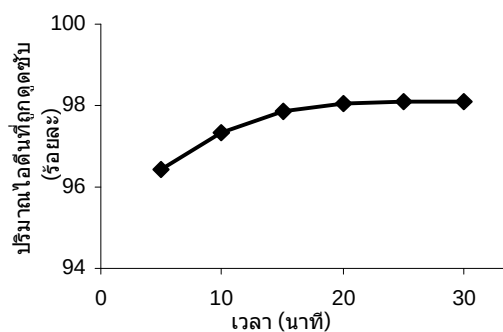
(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



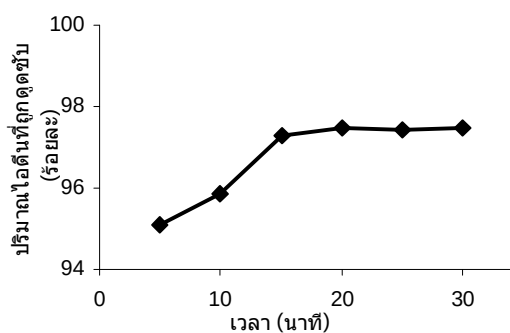
(ง) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



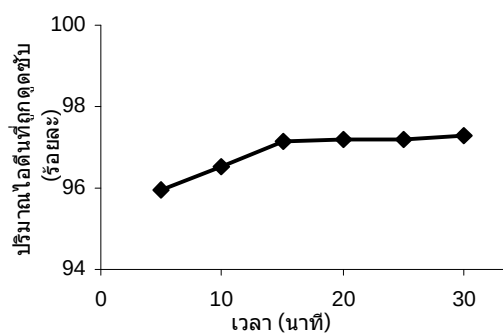
(จ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



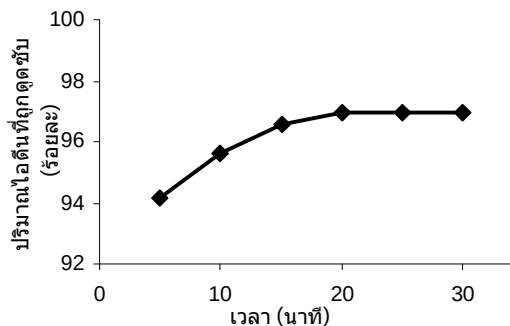
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



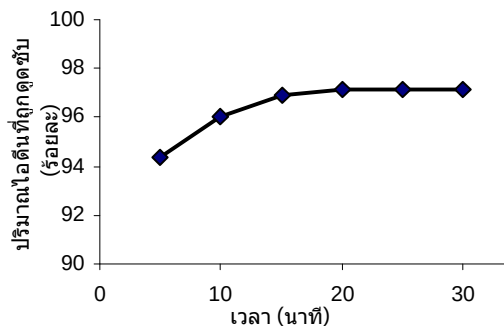
(ช) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



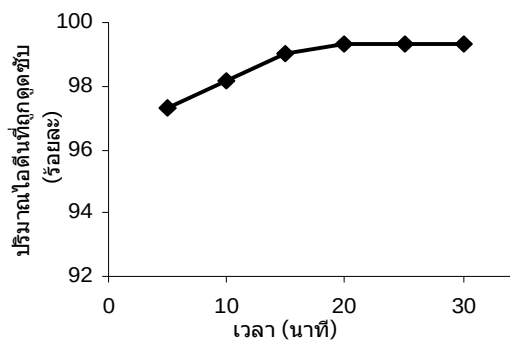
(ซ) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



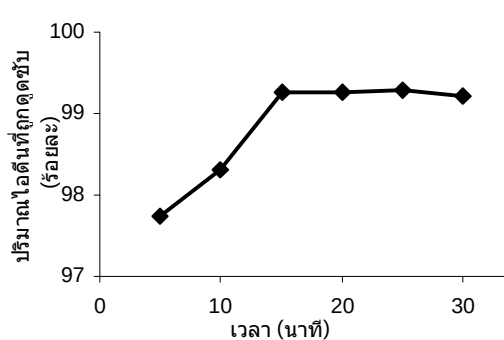
(ง) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



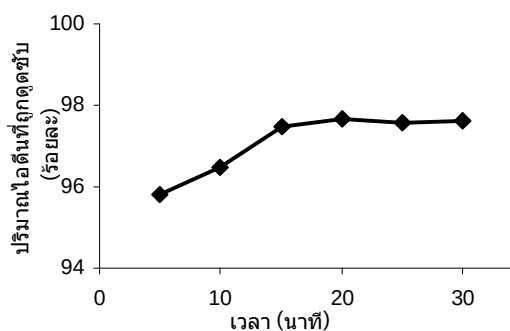
(ญ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



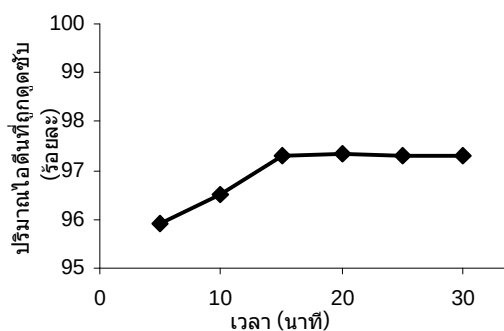
(ฉ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ฎ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ตารางที่ 36 แสดงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (นาท)	ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	20	98.02 ± 0.12
ถ่าน Bunton **	-	-	20	97.98 ± 0.08
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	15	92.62 ± 0.72
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	15	96.29 ± 0.12
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	15	99.27 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	20	98.03 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	15	97.29 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	15	97.15 ± 0.08
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	20	96.99 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	20	97.14 ± 0.09
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	20	99.32 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	15	99.26 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	15	97.48 ± 0.07
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	15	97.30 ± 0.09

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

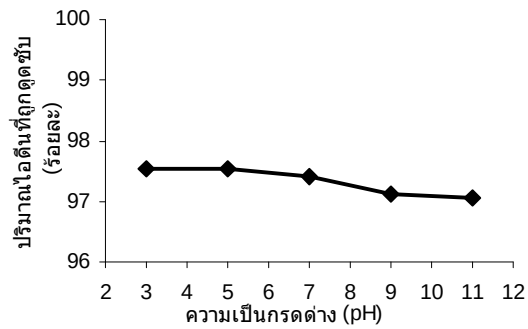
** ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.4.3 การศึกษาหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีน

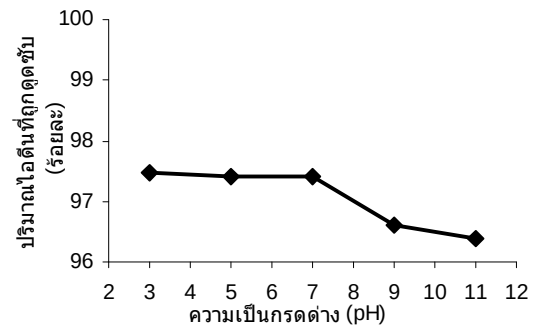
ในการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.1 นอร์แมล ปริมาตร 25 ml ค่าความเป็นกรดต่าง มีค่าเท่ากับ 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่าง ด้วยสารละลายผสม ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งเตรียมจาก กรดบอริก ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ และ กรดซิตริก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และ โซเดียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเลือกใช้ปริมาณถ่านที่เหมาะสม (จากผลการทดลองในข้อ 4.4.1) และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมของถ่านแต่ละชนิด (จากผลการทดลองในข้อ 4.4.2) และเลือกค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้ปริมาณของไอโอดีนถูกดูดซับสูงที่สุด มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยการเลือกความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณา

ภาพที่ 94 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ และตารางที่ 37 แสดงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด และ ปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิด

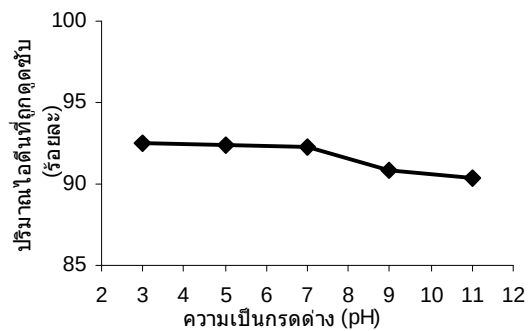
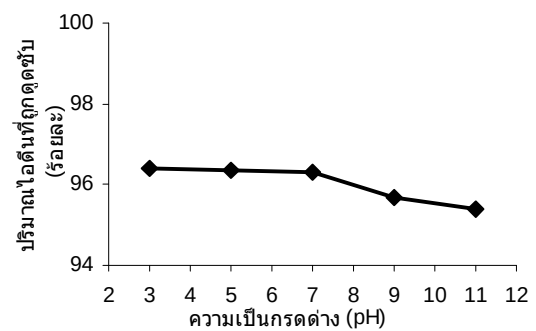
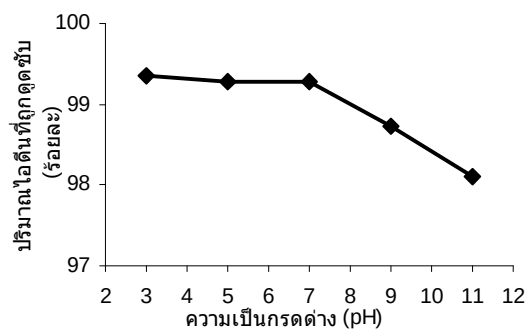
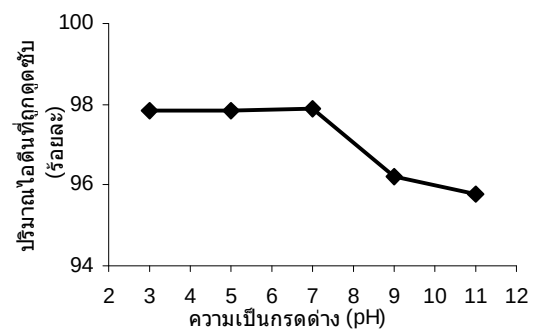
จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือในสถานะที่สารละลายเป็นเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และ ไอโอไดด์แอนไอออน (iodide anion) มีสถานะที่เป็นลบ ดังนั้น การเกิดแรงดึงดูด ระหว่างกับ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์กับ ไอโอไดด์แอนไอออน จึงเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด



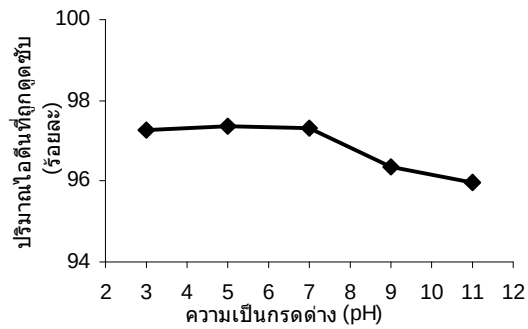
(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka



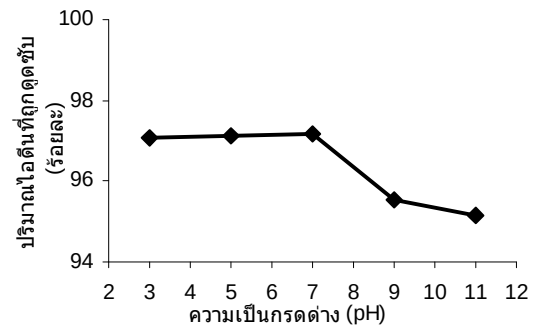
(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

(ค) ถ่านไม้ไผ่ผึ่ง อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ง) ถ่านไม้ไผ่ผึ่ง อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 (จ) ถ่านไม้ไผ่ผึ่ง อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น(ฉ) ถ่านไม้ไผ่ผึ่ง อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

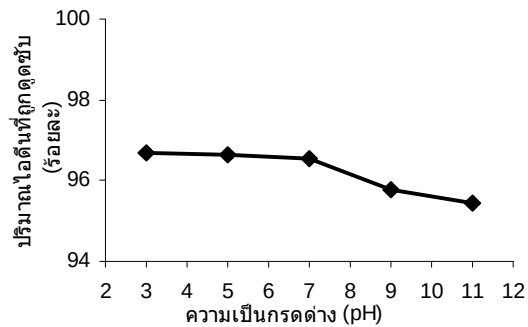
ภาพที่ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดต่าง กับ ปริมาณของไอโอดีน (ร้อยละ) ที่ถูกดูดซับ



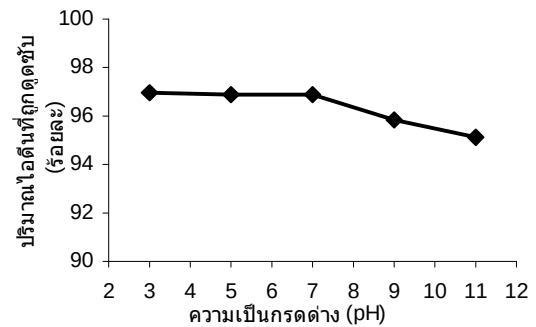
(ข) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



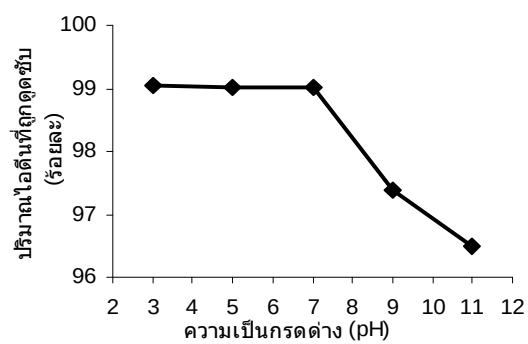
(ค) ถ่านไม้ไฟตง อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



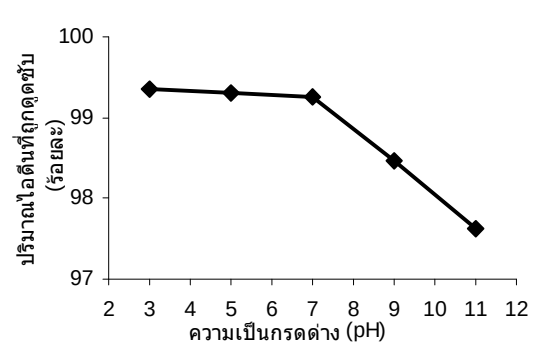
(ง) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



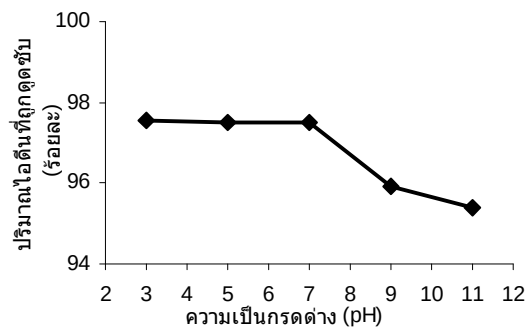
(จ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 1 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



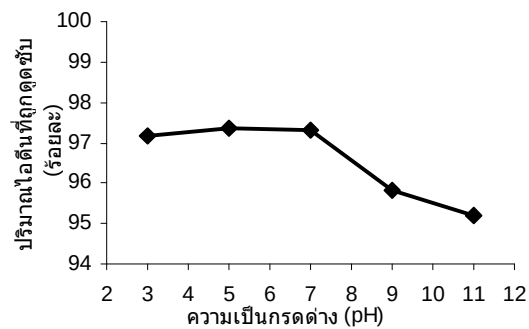
(ฉ) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ช) ถ่านไม้ไฟหมาจู้ อายุ 2 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4



(จ) ถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี
ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี
ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

ภาพที่ 94 (ต่อ)

ตารางที่ 37 แสดงความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไฟ แต่ละชนิด

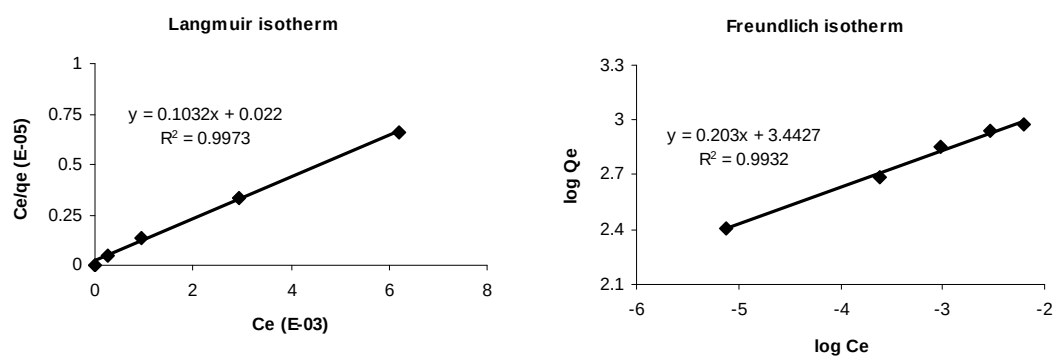
ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	ความเป็นกรดค่าที่เหมาะสม (pH)	ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (%)
ถ่าน Fluka *	-	-	7.0	98.02 ± 0.12
ถ่าน Bunton **	-	-	7.0	97.98 ± 0.08
ไม้ไฟตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	92.62 ± 0.72
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	96.29 ± 0.12
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	99.27 ± 0.10
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	98.03 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	97.29 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	97.15 ± 0.08
ไม้ไฟหมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	96.99 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	97.14 ± 0.09
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	99.32 ± 0.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	99.26 ± 0.07
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.0	97.48 ± 0.07
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	7.0	97.30 ± 0.09

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

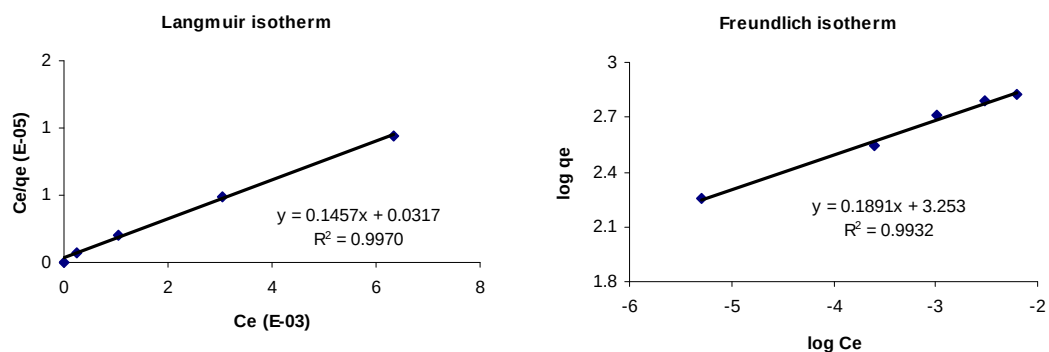
** ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

4.4.4 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับไอโอดีน

ในการทดลองนี้จะทำการดูดซับไอโอดีนความเข้มข้น 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 และ 250 นอร์เมล ปริมาตร 25 ml โดยใช้ปริมาณถ่าน เวลาสัมผัส และ ความเป็นกรดค่าที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 4.4.1, 4.4.2 และ 4.4.3 ตามลำดับ หลังจากนั้นกรองถ่านออก และนำสารละลายที่กรองได้ไทเทรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟต เพื่อหาปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่ และนำมาคำนวณปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ จากนั้นนำข้อมูลเขียนเส้นไอโซเทอร์มการดูดซับได้ ดังภาพที่ 95 ถึง 101 ซึ่งในการทดลองนี้ ได้นำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมต่างๆ จากการทดลองของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

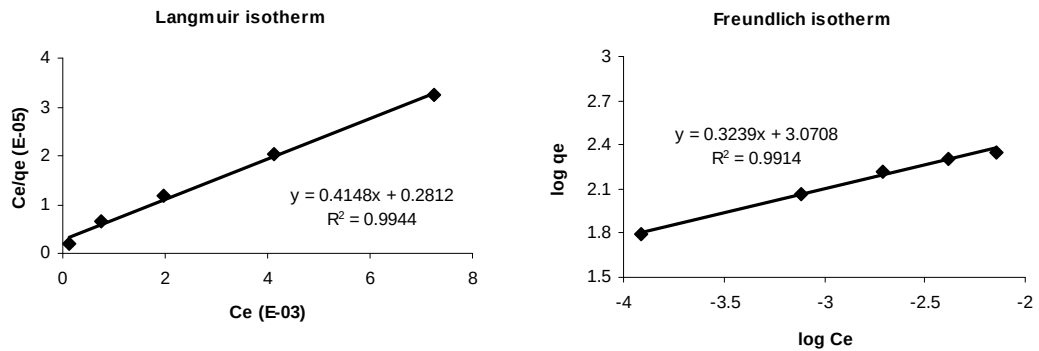


(ก) ถ่านกัมมันต์ Fluka

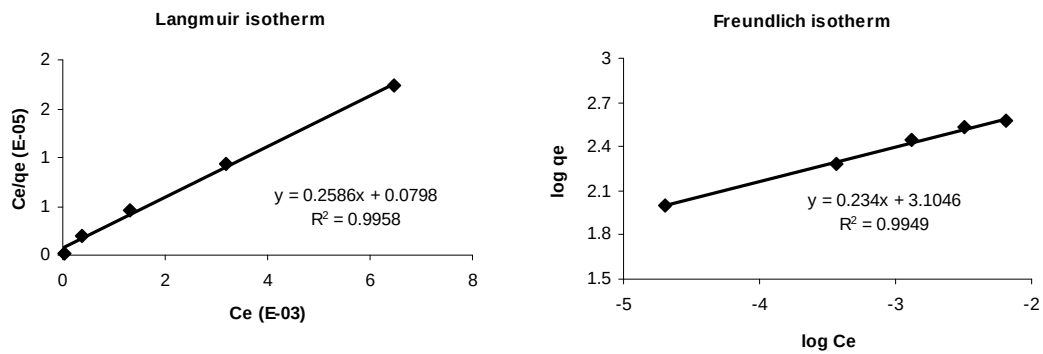
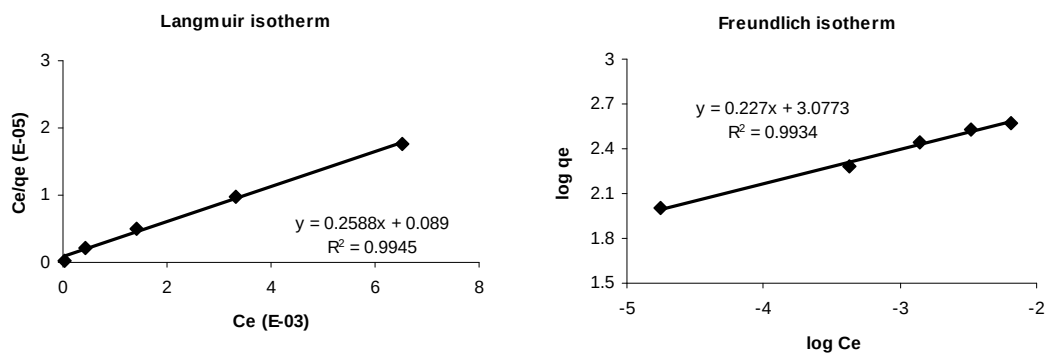


(ข) ถ่านไม้ไผ่ Bunton

ภาพที่ 95 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิจ
ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ ทางการค้า



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

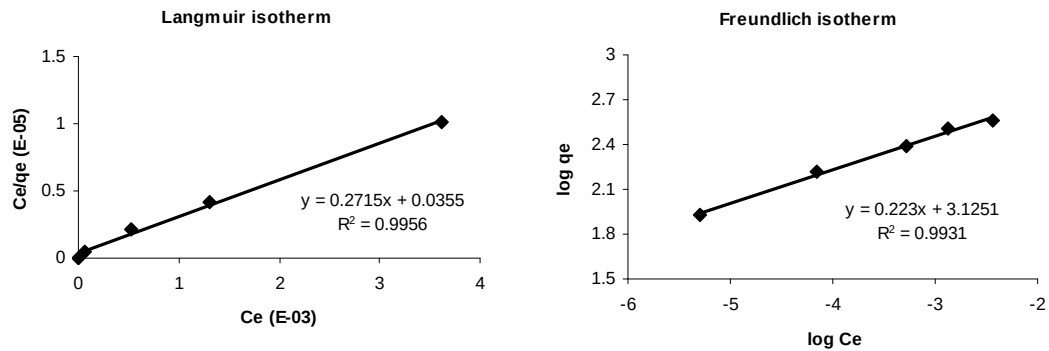
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

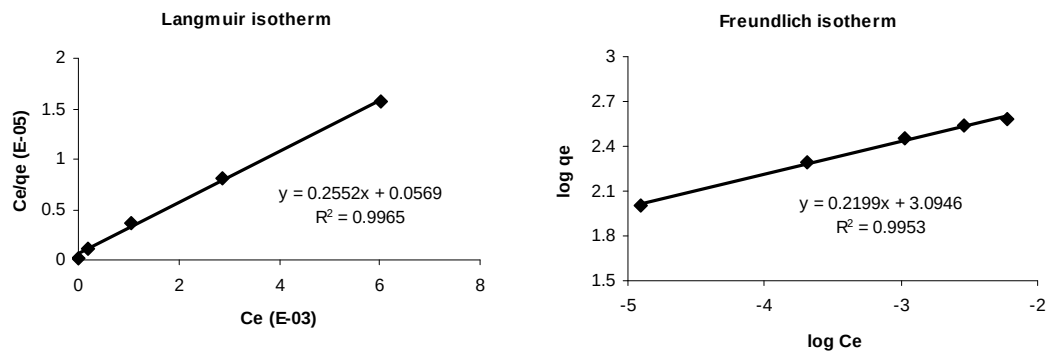
ภาพที่ 96 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 1 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

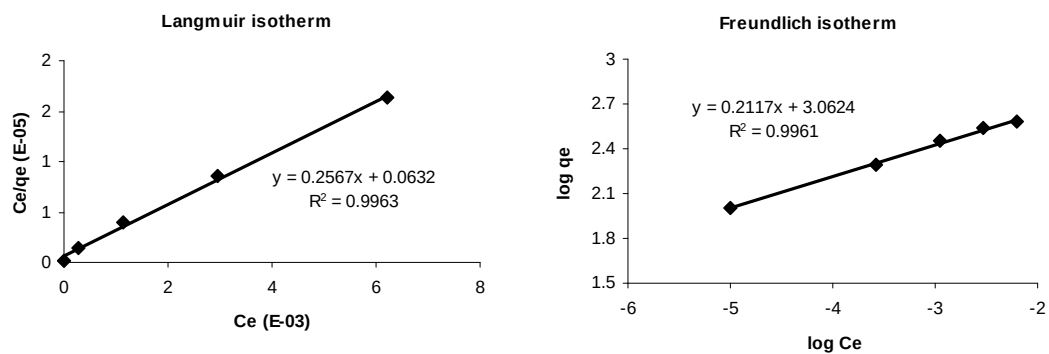
q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

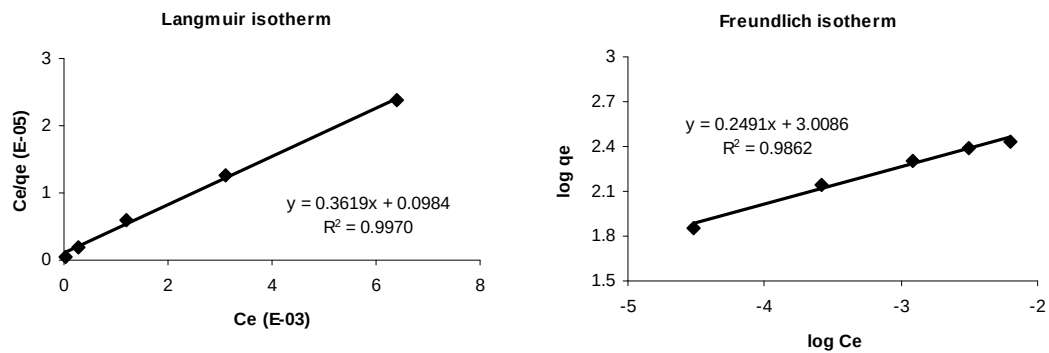


(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

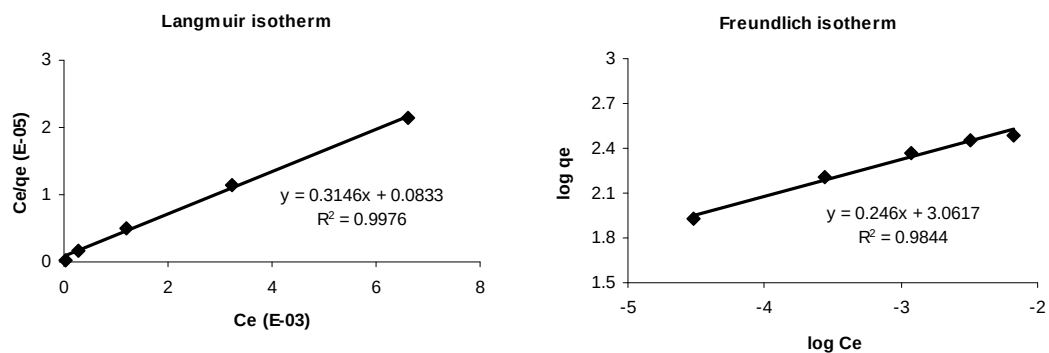
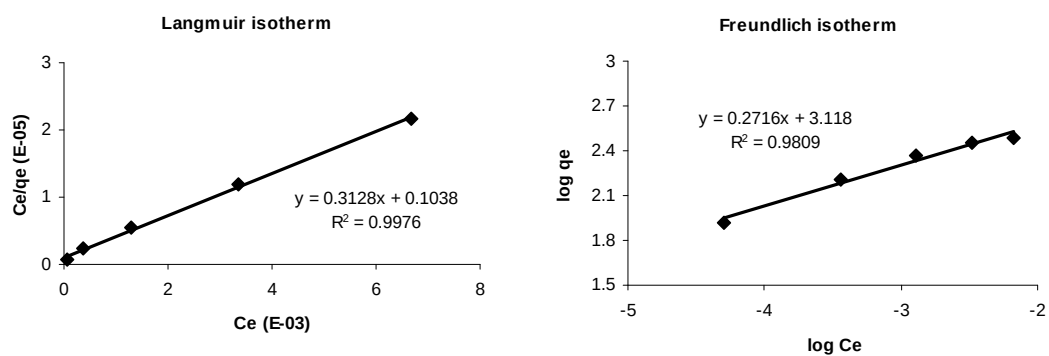
ภาพที่ 97 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิจ ของ ถ่านไผ่ตง อายุ 2 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

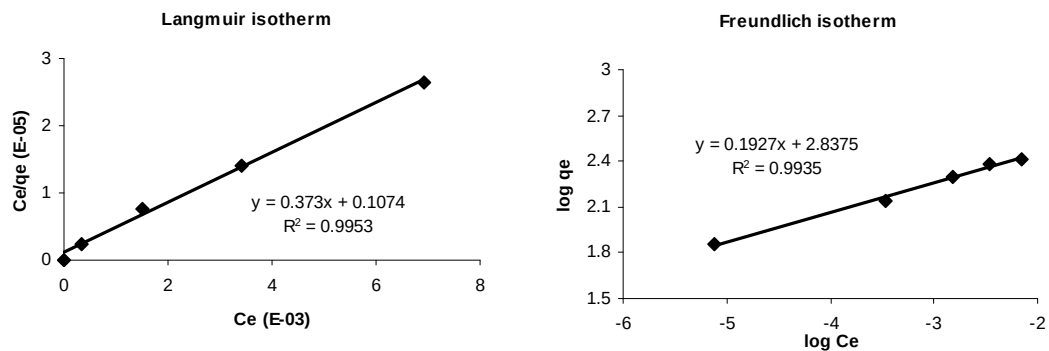
(ข) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

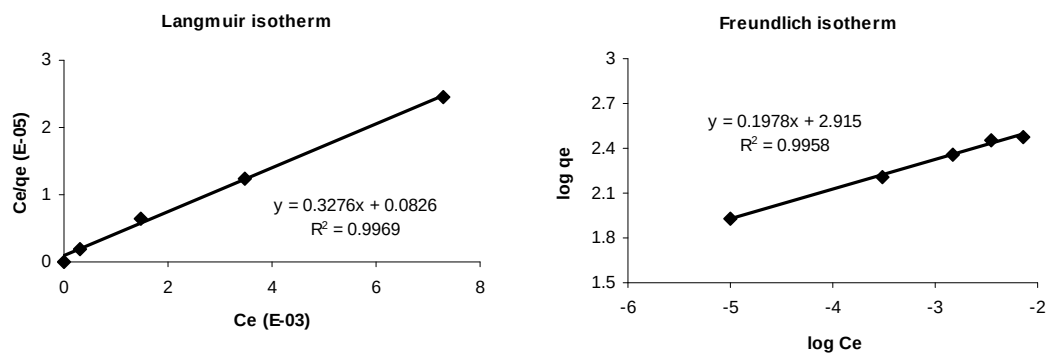
ภาพที่ 98 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิจ ของ ถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

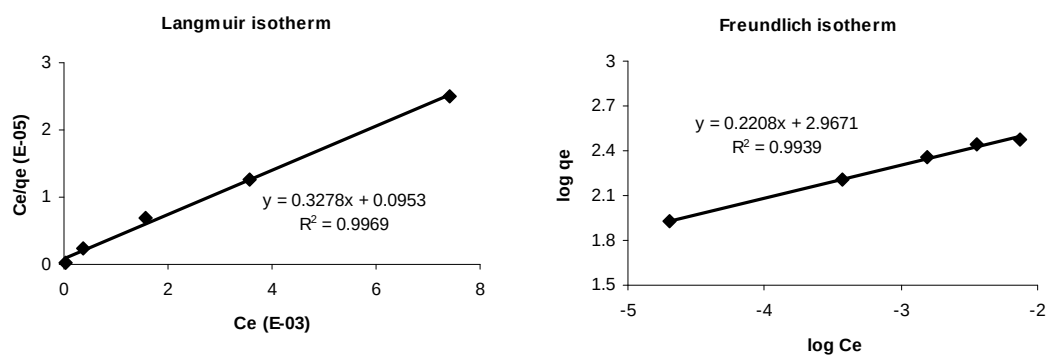
q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น



(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4

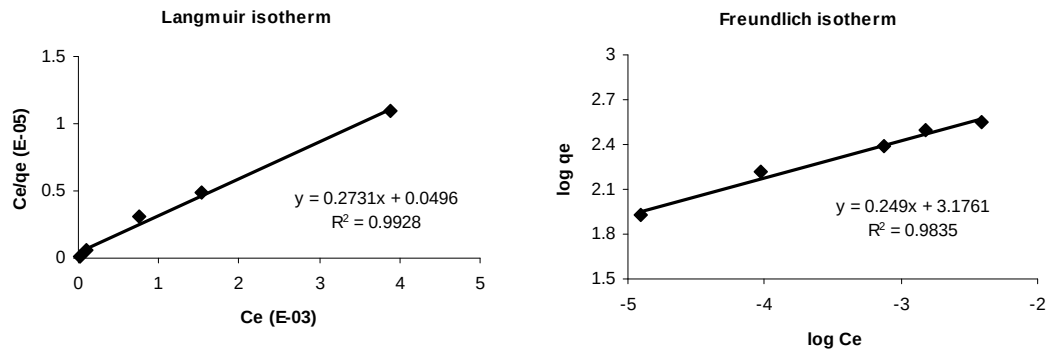


(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

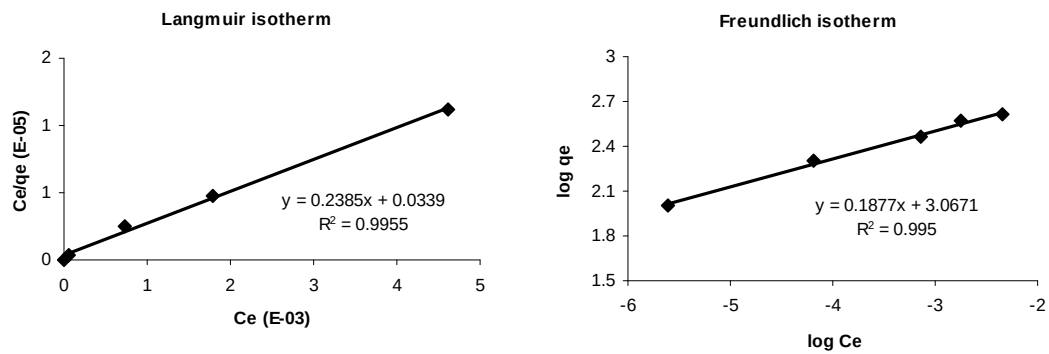
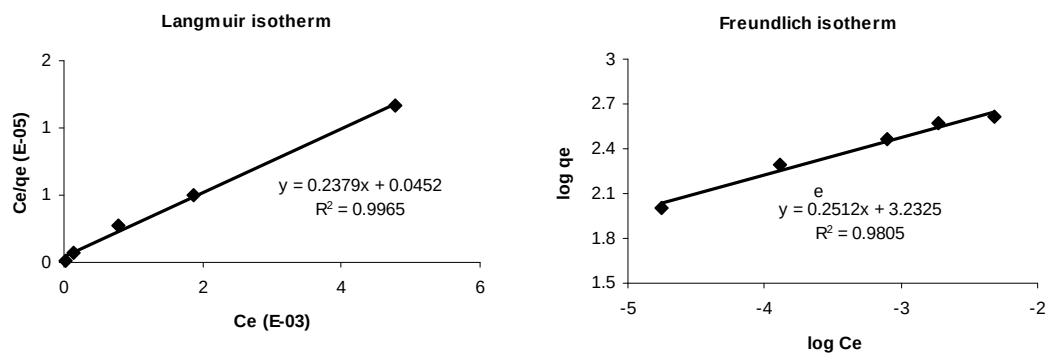
ภาพที่ 99 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิจ ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 1 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

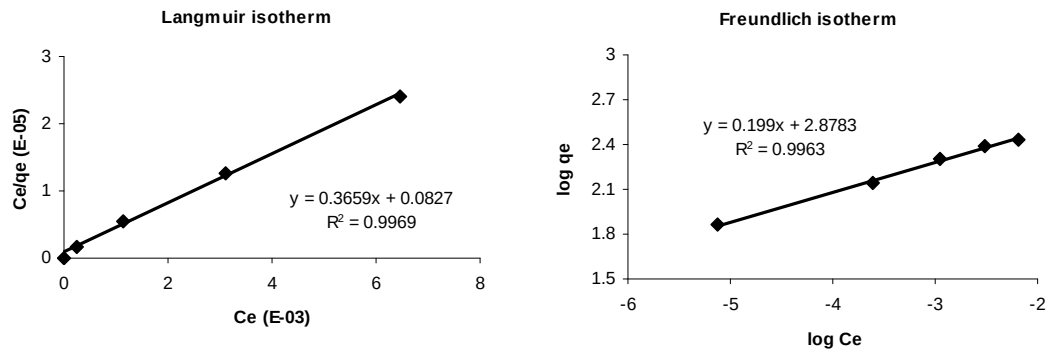
(ข) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

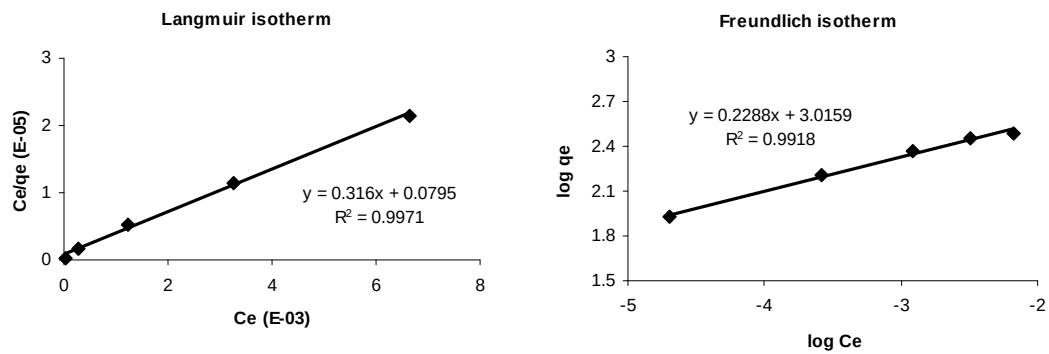
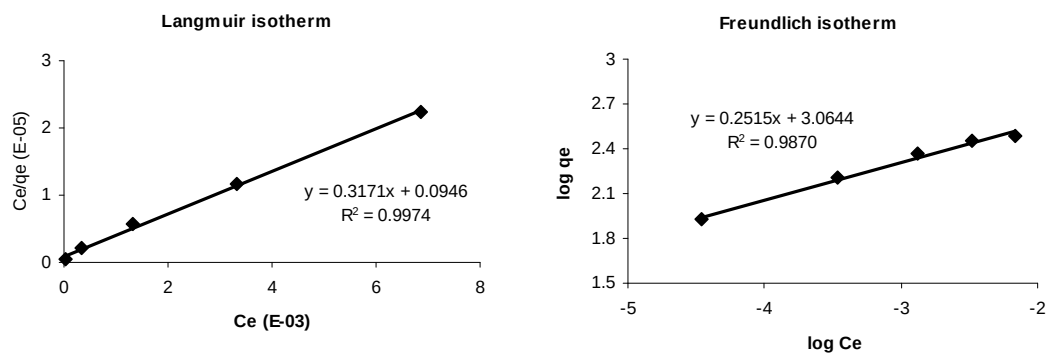
ภาพที่ 100 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอยด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 2 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม



(ก) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น

(ข) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 85% H_3PO_4 

(ค) ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี ซึ่งถูกกระตุ้นโดย 60% KOH

ภาพที่ 101 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีน แบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนด์ลิช ของ ถ่านไม้ไผ่หม่าจู อายุ 3 ปี

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม

ตารางที่ 38 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับไอโอดีนแบบแลงเมียร์ และฟรอยด์ลิช ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ ชนิดต่างๆ

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q^0} + \frac{1}{bQ^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ถ่าน Fluka *	-	-	$y = 0.1032x + 0.0220$	0.9973	$y = 0.2030x + 3.4427$	0.9932
ถ่าน Bunton **	-	-	$y = 0.1457x + 0.0317$	0.9970	$y = 0.1891x + 3.2530$	0.9932
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.4148x + 0.2812$	0.9944	$y = 0.3239x + 3.0708$	0.9914
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.2586x + 0.0798$	0.9958	$y = 0.2340x + 3.1046$	0.9949
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.2588x + 0.0890$	0.9945	$y = 0.2770x + 3.0773$	0.9934
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.2715x + 0.0355$	0.9956	$y = 0.2230x + 3.1251$	0.9931
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.2552x + 0.0569$	0.9965	$y = 0.2199x + 3.0946$	0.9953
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.2567x + 0.0632$	0.9963	$y = 0.2117x + 3.0624$	0.9961
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.3619x + 0.0984$	0.9970	$y = 0.2491x + 3.0086$	0.9862
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.3146x + 0.0833$	0.9976	$y = 0.2460x + 3.0617$	0.9844
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.3128x + 0.1038$	0.9976	$y = 0.2716x + 3.1180$	0.9809

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ตารางที่ 38 (ต่อ)

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช	
			$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q^0} + \frac{1}{bQ^0}$	R^2	$\log \frac{X}{m} = \frac{1}{n} \log C_e + \log k$	R^2
ไม้ไผ่หมาจู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.3730x + 0.1074$	0.9953	$y = 0.1927x + 2.8375$	0.9935
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.3276x + 0.0826$	0.9969	$y = 0.1978x + 2.9150$	0.9958
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.3278x + 0.0953$	0.9969	$y = 0.2208x + 2.9671$	0.9939
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.2731x + 0.0496$	0.9928	$y = 0.2490x + 3.1761$	0.9835
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.2385x + 0.0339$	0.9955	$y = 0.1877x + 3.0671$	0.9950
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.2379x + 0.0452$	0.9965	$y = 0.2512x + 3.2325$	0.9805
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	$y = 0.3659x + 0.0827$	0.9969	$y = 0.1990x + 2.8783$	0.9963
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	$y = 0.3160x + 0.0795$	0.9971	$y = 0.2288x + 3.0159$	0.9918
		กระตุ้นโดย KOH	$y = 0.3171x + 0.0946$	0.9974	$y = 0.2515x + 3.0644$	0.9870

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

จากตารางที่ 38 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มทั้งสอง มีค่าเข้าใกล้ 1 ทั้งคู่ ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษาแล้วพบว่ากลไกการดูดซับอาจเกิดได้ทั้งสองแบบ เมื่อนำไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มาพิจารณาค่าคงที่ สามารถหาความสามารถในการดูดซับได้ ดังแสดงในตารางที่ 39

ซึ่งค่า Q^0 แสดงถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวถูกดูดซับ หรือแสดงถึงความสามารถในการดูดซับไอโอดีนในสารละลาย ถ้าว่านใดมีค่า Q^0 สูง แสดงว่าถ่านชนิดนั้นสามารถดูดซับไอโอดีนได้ดีกว่าถ่านที่มีค่า Q^0 ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบค่า Q^0 ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่า ถ่านไม้ไผ่แดง ที่ให้ค่า Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่แดง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (391.85 mg/g) และถ่านไม้ไผ่หมาจู ที่ให้ Q^0 มากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมาจู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (420.34 mg/g) และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า คือ ถ่านกัมมันต์ Fluka และถ่านไม้ไผ่ Bunton ซึ่งมีค่า Q^0 เท่ากับ 968.99 และ 686.34 mg/g ตามลำดับ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านที่เตรียมได้ ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่ทางการค้า โดยคาดว่าถ่านกัมมันต์และถ่านไม้ไผ่ทางการค้า มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้โมเลกุลของไอโอดีนสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้มาก

ตารางที่ 39 ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่ แต่ละชนิดในการดูดซับไอโอดีน จากสมการ
ไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์

ชนิดถ่าน	อายุ	สถานะการกระตุ้น	Q^0 (mg/g) ***	b (l/mg) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	968.99	4690.91
ถ่าน Bunton **	-	-	686.34	4596.21
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	241.08	1475.11
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	386.70	3240.60
		กระตุ้นโดย KOH	386.40	2907.87
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	368.32	7647.89
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	391.85	4485.06
		กระตุ้นโดย KOH	389.56	4061.71
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	276.32	3677.85
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	317.86	3776.71
		กระตุ้นโดย KOH	319.69	3013.49
ไม้ไผ่หมางู	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	268.10	3473.00
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	305.25	3966.10
		กระตุ้นโดย KOH	305.06	3439.66
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	366.17	5506.05
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	419.29	7035.40
		กระตุ้นโดย KOH	420.34	5263.27
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	273.30	4424.43
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	316.46	3974.84
		กระตุ้นโดย KOH	315.36	3352.01

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

*** Q^0 และ b คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (l/mg) ตามลำดับ

จากการที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับไอโอดีน เป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงว่าการดูดซับไอโอดีนนั้น เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว จึงสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ได้จากสมการ

$$S = \frac{Q^0}{MW} \times N \times a$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{\AA}^2/\text{g}$)
 Q^0 = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 MW = มวลโมเลกุลของไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (126.90 g/mol)
 N = เลขอะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{23} \text{ molecule/mol}$)
 a = พื้นที่หน้าตัดของไอโอดีน ($32 \text{ \AA}^2$)

ที่มา: Gergova *et al.* (1995)

จากการแทนค่า Q^0 ของถ่านชนิดต่างๆ จะสามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะที่เกิดการดูดซับไอโอดีนของถ่านชนิดต่างๆ ได้ (แสดงในตารางที่ 40) โดยพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่าแปรผันตรงกับความสามารถในการดูดซับ ซึ่งจากการทดลองนี้จะพบว่า ถ่านไม้ไผ่ดอง ที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่ดอง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ($594.80 \text{ \AA}^2/\text{g}$) และถ่านไม้ไผ่หมางู ที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ ไม้ไผ่หมางู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ($638.05 \text{ \AA}^2/\text{g}$)

ตารางที่ 40 พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่แต่ละชนิด

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	S ($\text{\AA}^2/\text{g}$) ***
ถ่าน Fluka *	-	-	1470.86
ถ่าน Bunton **	-	-	1041.81
ไม้ไผ่ตง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	365.94
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	586.98
		กระตุ้นโดย KOH	586.53
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	559.08
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	594.80
		กระตุ้นโดย KOH	591.32
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	419.43
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	482.49
		กระตุ้นโดย KOH	485.27
ไม้ไผ่พม่า	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	406.96
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	463.35
		กระตุ้นโดย KOH	463.06
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	555.82
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	636.45
		กระตุ้นโดย KOH	638.05
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	414.85
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	480.36
		กระตุ้นโดย KOH	478.69

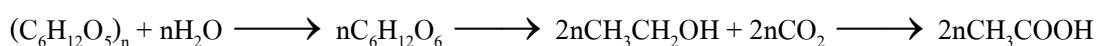
* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

*** S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับไอโอดีน

5. การศึกษาหาความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากการเผาไม้ผุ และไม้หมาก

จากผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ทั้ง 9 ชนิด ในน้ำส้มควันไม้ พบว่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์และอายุของไม้ ดังตารางที่ 41 โดยกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดในน้ำส้มควันไม้ทุกชนิด คือ กรดอะซิติก เนื่องจาก ในไม้ผุไม้หมากมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ซึ่งเมื่อเซลลูโลสถูกย่อยสลายด้วยความร้อน จะให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว จากนั้นน้ำตาลจะเกิดการย่อยสลายต่อ ได้เอทิลแอลกอฮอล์ และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเอทิลแอลกอฮอล์ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อจนได้ กรดอะซิติก ตามสมการ



ภาพที่ 102 แสดงปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลส

ที่มา : Wade (2003)

ตารางที่ 41 แสดงปริมาณกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่พบในน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผาไม้เต็ง และ ไม้พม่า

พันธุ์ไม้	อายุ (ปี)	ปริมาณกรดชนิดต่างๆ (ppt)								
		ซิตริก	ทาทาริก	มาลิก	แลคติก	ฟอร์มิก	อะซีติก	โพลีโอนิก	ไอโซบิวทริก	บิวทริก
ไม้เต็ง	1	7.74	5.26	3.17	(-)	20.79	246.43	16.07	(-)	38.80
	2	9.97	6.79	3.15	5.66	44.14	252.56	24.66	(-)	58.05
	3	6.54	15.29	4.64	(-)	35.37	275.92	24.06	(-)	93.00
ไม้พม่า	1	7.40	6.35	4.95	(-)	44.32	216.39	25.26	(-)	56.59
	2	10.92	10.99	9.05	6.27	54.59	224.22	22.28	(-)	91.63
	3	10.83	15.14	18.35	0.93	28.31	194.55	15.13	0.68	73.94

หมายเหตุ (-) หมายถึง ไม่พบกรดอินทรีย์ชนิดนั้นๆ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่

1.1 สภาวะที่เหมาะสมในการทำให้เป็นถ่าน

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม้ไผ่ตง อายุ 1, 2 และ 3 ปี พบว่า การใช้ อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นจะทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านลดลง และถ่านที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 450 °C จะให้ค่าเลขไอโอไดน์ที่สูงกว่า ถ่านที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 550 °C ดังนั้นอุณหภูมิที่ เหมาะสมในการเผาไม้ไผ่ตง คือ 450 °C และ ได้ใช้อุณหภูมิดังกล่าว ในการเผาไม้ไผ่หมาจู ด้วย

1.2 สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น

ได้ทำการทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านให้กลายเป็น ถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาที่สภาวะต่างๆกัน เช่น ชนิด และ ความเข้มข้นของตัวกระตุ้น ระยะเวลาที่ใช้ ในการกระตุ้น เป็นต้น ซึ่งเมื่อทำการกระตุ้นแล้ว จะใช้การวิเคราะห์ค่าเลขไอโอไดน์ในการเลือก สภาวะที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ในการทดลองขั้นต่อไป

1.2.1 การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตง ที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้น พบว่า ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ให้ค่าเลขไอโอไดน์สูงสุด เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นเท่ากับ 4 ชั่วโมง จึงใช้เวลานี้มาศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมกับถ่านจากไม้ไผ่ตงทุกอายุปี ซึ่งพบว่า การ ใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นจะทำให้ได้ค่าเลขไอโอไดน์สูงสุด

ส่วนในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หมาจู ที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็น ตัวกระตุ้นนั้น พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หมาจู อายุ 3 ปี ให้ค่าเลขไอโอไดน์สูงสุด เมื่อใช้เวลาใน

การกระตุ้นเท่ากับ 24 ชั่วโมง แต่มีค่าไม่แตกต่างจากการใช้เวลากระตุ้น เท่ากับ 8 ชั่วโมงมากนัก จึงใช้เวลา 8 ชั่วโมง ในการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมกับถ่านจากไม้ไผ่หมาจู้ทุกอายุปี ซึ่งพบว่า การใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นจะทำให้ได้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุดเช่นกัน

1.2.2 การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตง ที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่า ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตง อายุ 3 ปี ให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด เมื่อใช้ความเข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 60 จึงใช้ความเข้มข้นนี้มาศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมกับถ่านจากไม้ไผ่ตงทุกอายุปี ซึ่งพบว่า การทำการกระตุ้นโดยใช้ เวลา 4 ชั่วโมง จะทำให้ได้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่หมาจู้ ที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่า ถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่หมาจู้ อายุ 3 ปี ให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด เมื่อใช้ความเข้มข้นเท่ากับ ร้อยละ 60 จึงใช้ความเข้มข้นนี้มาศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมกับถ่านจากไม้ไผ่หมาจู้ ทุกอายุปี ซึ่งพบว่า การทำการกระตุ้นโดยใช้ เวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้ได้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด

1.2.3 การกระตุ้นด้วยกรดไนตริก

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกรดไนตริกในการทดลองนี้ สามารถนำไปหาความสามารถในการดูดซับแคดเมียม(II) ได้เพียงการทดลองเดียว เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสีของสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ซึ่งมีสีเหลืองเจือปนอยู่ จึงไม่สามารถนำไปทำการหาค่าเลขไอโอดีนได้ และยังไม่สามารถนำไปทำการทดลองอื่นได้อีกด้วย

1.3 ค่าการดูดซับฟีนอล

จากการศึกษา พบว่า ถ่านไม้ไผ่ที่ไม่ได้รับการกระตุ้น มีค่าฟีนอล ต่ำกว่าถ่านไม้ไผ่ที่ได้รับการกระตุ้น ซึ่งหมายถึงมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ดีกว่า เนื่องจากการกระตุ้นทำให้ผิวของถ่านกัมมันต์มีความเป็นลบมากขึ้น สามารถดึงดูดฟีนอลได้ดีลง

2. สมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากไม้ไผ่

2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

จากการศึกษาพบว่า ถ่านไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่เตรียมได้ มีปริมาณ เถ้า และ สารระเหย สูงกว่า และ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ต่ำกว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงว่า ยังมีสารอินทรีย์ และ สารที่สามารถระเหยได้ หลงเหลืออยู่มาก

2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่

จากการศึกษา พบว่าลักษณะของพื้นผิวถ่านไม้ไผ่ผง และ ไม้ไผ่หยาบ เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกแล้ว มีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น และการกระจายตัวของรูพรุนมากขึ้น ซึ่งจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนั้น มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับด้วย โดยขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของขนาดของรูพรุนกับขนาดของตัวถูกดูดซับ

2.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่

จากผลการศึกษา พบว่า การกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของถ่าน ถ่านไม้ไผ่ที่ไม่ได้รับการกระตุ้น จะมีแถบของหมู่ -OH เกิดขึ้น แต่จะมีแถบของหมู่ C=O หรือ COO⁻ ในความเข้มที่ต่ำมาก หรืออาจไม่มีเลย แต่เมื่อทำการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะพบว่า แถบหมู่ -OH มีความเข้มต่ำลง และ ความเข้มของแถบ C=O หรือ COO⁻ เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับสารต่างๆเปลี่ยนแปลงไป

3. ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ โดยทำการศึกษาปริมาณ ถ่านกัมมันต์หรือถ่านไม้ไผ่ เวลาที่ใช้ และความเข้มข้นของสาร ที่มีผลต่อการดูดซับ

3.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียม

ปริมาณถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับแคดเมียมที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวรูพรุนมีขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของแคดเมียมนั้น แคดเมียมจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

การดูดซับแคดเมียม ต้องมีค่าความเป็นกรดต่าง ประมาณ 4.0 – 5.0 โดยถ้ามีค่ามากกว่านี้ แคดเมียมจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้สามารถเข้าไปในรูพรุนได้น้อยลง การดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไผ่ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมมากกว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และกรดไนตริก โดยเมื่อนำถ่านจากไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี และ ไม้หมากู อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยบริษัท Fluka และ ถ่าน Buntion แล้ว จะพบว่า ถ่านทั้งสองชนิด มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าถ่านที่กระตุ้น ซึ่งอาจพิจารณาได้จากว่า การกระตุ้นนั้น ทำให้มีปริมาณช่องว่างของรูพรุน ขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของแคดเมียม มากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมมีมากขึ้น และ อีกกรณีหนึ่ง คือ การกระตุ้นทำให้มีหมู่ฟังก์ชัน $C=O$ หรือ COO^- เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับแคดเมียมได้มากขึ้นด้วย

3.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลลิโนบลู

ปริมาณถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับเมทิลลิโนบลูที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวรูพรุนมีขนาดใหญ่ ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของเมทิลลิโนบลูนั้น เมทิลลิโนบลูจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

การดูดซับเมทิลลิโนบลู ต้องมีค่าความเป็นกรดต่าง ประมาณ 5.0 – 7.0 โดยถ้ามีค่ามากกว่านี้ หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และเนื่องจากโครงสร้างของเมทิลลิโนบลู มีความเป็น

อะโรมาติก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของเมทิลลีนบลูเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างเมทิลลีนบลู และ หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไฟ ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูเปลี่ยนแปลงไปมากนัก ซึ่งในบางกรณีอาจทำให้การดูดซับน้อยลง โดยอาจเป็นเพราะการกระตุ้นไม่สามารถทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่มากพอ ที่เมทิลลีนบลูจะสามารถเข้าไปในช่องว่างของรูพรุนได้ การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้น้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Fluka ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูสูงมาก เนื่องจาก ถ่านกัมมันต์ Fluka มีขนาดของรูพรุนใหญ่พอที่เมทิลลีนบลูจะเข้าไปในช่องว่างได้

3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอล

ปริมาณถ่านไม้ไฟ และถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับฟีนอลที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวูพรุนมีขนาดกลาง ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของฟีนอลนั้น ฟีนอลจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

การดูดซับฟีนอล ต้องมีค่าความเป็นกรดค่าประมาณ 6.5 โดยถ้ามียค่ามากกว่านี้ หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และในสถานะที่เป็นด่าง ฟีนอลจะอยู่ในโครงสร้างของ ฟีนอเลตแอนไอออน (phenolate anion) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดการกระจายอิเล็กตรอนไปได้ทั่วทั้งโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของฟีนอลเสถียร จึงทำให้เกิดการแรงดึงดูดระหว่างฟีนอล และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไฟ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจพิจารณาได้จากว่า การกระตุ้นนั้น ทำให้มีปริมาณช่องว่างของรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของฟีนอล ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ถ่านที่ได้จากไม้ไฟหมาจู อายุ 3 ปี ซึ่งไม่ถูกกระตุ้น จะให้ความสามารถในการดูดซับมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า คือ ถ่านกัมมันต์ Fluka และ ถ่านไม้ไฟ Buntion แล้ว จะเห็นว่า มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

ปริมาณถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับจะแตกต่างกันไป โดยอาจขึ้นอยู่กับ ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมกับไอโอดีนที่จะดูดซับด้วย นั่นคือ ถ้าวรูพรุนมีขนาดเล็กซึ่งเหมาะสมกับขนาดของไอโอดีนนั้น ไอโอดีนจะสามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

การดูดซับไอโอดีน ต้องมีค่าความเป็นกรดต่าง ประมาณ 7.0 โดยถ้ามีค่ามากกว่านี้ หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะเกิดการสูญเสียโปรตอน (deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และ ไอโอไดด์แอนไอออน (iodide anion) มีสถานะที่เป็นลบ ดังนั้น การเกิดแรงดึงดูด ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์กับไอโอไดด์แอนไอออน จึงเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นการดูดซับจึงเกิดได้น้อยกว่าในสถานะที่เป็นกรด

จากการทดลอง พบว่า การกระตุ้นถ่านไม้ไผ่ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่า การกระตุ้นนั้นทำให้มีปริมาณช่องว่างของรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของไอโอดีน ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ถ่านไม้ไผ่ และ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ และ ถ่านไม้ไผ่ทางการค้า พบว่า ถ่านไม้ไผ่ที่ทดลองยังมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

4. การวิเคราะห์หาความปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำส้มควันไม้

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ทั้ง 9 ชนิด พบว่า ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์และอายุของไผ่ โดย กรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นมากที่สุด คือ กรดอะซิติก โดยที่กรดอะซิติก จะเกิดจากการย่อยสลายเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และ เปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์ และ เอทิลแอลกอฮอล์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นกรดอะซิติก

5. ค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่า

ราคาต้นทุนของการผลิตถ่านไม้ไฟโดยทั่วไป จะอยู่ที่ประมาณ 100 – 150 บาทต่อกิโลกรัม แต่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นให้กลายถ่านกัมมันต์ด้วย 85% H_3PO_4 หรือ 60% KOH ตามกระบวนการของงานวิจัยนี้ ราคาต้นทุนจะเป็นประมาณ 500 – 600 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับราคาผงถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายอยู่ในท้องตลาด เช่น ถ่านกัมมันต์ของบริษัท Fluka ราคาประมาณ 2,400 บาทต่อกิโลกรัม (สำรวจเมื่อวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2551) จะเห็นว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์ตามงานวิจัยนี้ มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการจัดซื้อถ่านกัมมันต์จากท้องตลาดอย่างมาก กล่าวคือ มีค่าใช้จ่ายเพียงร้อยละ 25 ของการจัดซื้อถ่านกัมมันต์จากท้องตลาด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อถ่านกัมมันต์มาใช้งานได้

นอกจากนั้น เมื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไฟที่เตรียมได้ พบว่าถ่านที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม(II) และฟีนอล ดีกว่าถ่านกัมมันต์ Fluka แต่ในการดูดซับเมทิลลิโนบลู และไอโอดีน ของถ่านที่เตรียมได้ ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ Fluka ซึ่งอาจจะต้องมีการศึกษาทดลอง และพัฒนาต่อไป เพื่อให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านที่เตรียมได้ดีขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ในการเผาไฟให้กลายเป็นถ่านนั้น ควรมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาให้สูงขึ้น เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า เนื่องจาก ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามักนิยมเผาที่อุณหภูมิสูงมาก
2. ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ควรศึกษาในสถานะที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้น เช่น อุณหภูมิ หรือ ความเร็วที่ใช้ในการเขย่า เป็นต้น เนื่องจาก สถานะเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับได้
3. ควรมีการศึกษาศาตราน้ำเสียจริง ๆ เนื่องจากในการวิจัยนี้ ศึกษาจากน้ำเสียสังเคราะห์เท่านั้น ซึ่งในน้ำเสียจริง ๆ อาจมีสารอื่น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับได้

4. ควรมีการศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว มาฟื้นฟูสภาพให้กลับมาใช้ได้ใหม่ หรือนำไปทดลองดูดซับสารอื่นๆต่อ เพื่อใช้ความสามารถในการดูดซับที่เหลือหลังจากดูดซับสารชนิดแรก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมอุตสาหกรรม. (2550). สถิติการนำเข้าส่งออก. แหล่งข้อมูล:

http://www.oie.go.th/industrystatus_th.asp

เกสร นุตาลย์. 2531. รายงานการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ. รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ภ30-14. โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดย มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์. 2551ก. ไม้ตง. แหล่งข้อมูล: <http://www.uru.ac.th/~botany/data.php>

_____. 2551ข. ไม้หมาจู. แหล่งข้อมูล: <http://www.uru.ac.th/~botany/data.php>

พุดินันท์ พิงญาดี. 2546. ถ่านไม้และน้ำส้มควันไม้. ชมรมสวนป่า ผลิตภัณฑ์ และพลังงานจากไม้.

ณัฐยา พุนสุวรรณ. 2545. การเตรียมวัตถุดิบถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และขานอ้อย โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสุรนารี.

บุญชัย ตระกูลมหชัย. 2536. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

_____, มนัส อาตชะพันธ์, น้อมจิตต์ เกิดผล, ผาสุก กองชาติ และเกสร นุตาลย์. 2534. การผลิตถ่านกัมมันต์จากพืชและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในเตาฟลูอิดไbez. รายงานฉบับที่ 2 โครงการวิจัยที่ อ-ต 34-01. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

ประกฤต เดิศจรธอราณี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เลื่อย ฟางข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปิยะพร บาร์มี. 2542. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางที่เหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ดันทุลเวสม์. 2539. วิศวกรรมกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. ถ่านกัมมันต์. มอก. 900-2547.

Ahmed, R., R.S. Kookana, A.M. Alston and J.O. Skjemstad. 2001. The Nature of Soil Organic Matter Affect Sorption of Pesticides. 1. Relationships with Carbon Chemistry as Determined by ^{13}C CPMAS NMR Spectroscopy. **Environmental Science and Technology**. 35: 878 – 884.

American Water Works Association. 1995. **Standard for Activated Carbon. AWWA B600-95**. United States of America.

Annual Book of ASTM Standards. 1999. **Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon D4607-94**. 15.01. 892-896. United State of America.

_____. 2003. **Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples D5832-98**. 15.01. 921-922. United State of America.

_____. 2004. **Standard Test Method for Moisture in Activated Carbon D2867-04**. 15.01. 850-852. United State of America.

_____. 2004. **Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon D2866-94**. 15.01. 848-849. United State of America.

Bansal, R.C., J.B. Donnet and F. Stoecki. 1988. **Active Carbon**. Marcel Dekker Inc.: New York.

Berl, E. 1938. **Formation and properties of activated carbon**. Royal Society of Chemistry, United State of America.

Cheremisinoff, P.N. and A.C. Morresi. 1987. Carbon adsorption application. In P.N. Cheremisinoff and F. Ellerbusch (eds.), **Carbon adsorption handbook**. Ann Arbor Science, Michigan.

Culp, G.L. and R.L. Culp. 1974. **New Concepts in Water purification**. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Department of Chemistry. Surface Analysis Facility. University of Oxford. 1990. **Basic operating principles of the sorptrometric**. Available soruce:
<http://saf.chem.ox.ac.uk/Instruments/BET/sorpopprin.html>

Dubinin, M.M. 1966. **Chemistry and physics of Carbon**. New York: P.L. Walker Jr. (Ed.), Vol.2, M Dekker.

Gergona, K., S. Eser, H.H. Schobert, M. Klimkiewicz and P.W. Brown. 1995. Environmental scanning electron microscopy of activated carbon production from anthracite by one-step pyrolysis-activation. **Fuel**. 74: 1045-1048.

Gürdal, G. and M.N. Yalcm. 2000. Gas adsorption capacity of Carboniferous coals in Zonguldak basin (NW Turkey) and its controlling factors. **Fuel**. 79: 1913-1924.

- Grubbs, T. n.d. **Adsorption isotherms: methylene blue on activated carbon**. Available source: <http://www.stetson.edu/~wgrubbs/datadriven/langmuir/langmuirwtg.html>
- Hameed, B.H., A.T.M. Din and A.L. Ahmad. 2007. Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. **Journal of Hazardous Materials**. 141: 819-825.
- Hassler, J.W. 1967. **Activated carbon**. Leonard Hill. London.
- _____. 1974. **Publication with activated carbon**. Mercel Dekker Inc. New York.
- Hsu, L.Y. and H. Teng. 2000. Influence of different chemical reagents on the preparation of activated carbons from bituminous coal. **Fuel Processing Technology**. 64: 155 – 166.
- Hu, Z. and M.P. Srinivasan. 1999. Preparation of high – surface – area activated carbons from coconut shell. **Micropous and Mesoporous Materials**. 27: 11 – 18.
- Jankowska, H., A. Swiatkowski and J. Choma. 1991. **Active Carbon**. Ellis Horwood, Chichester, United of Kingdom.
- Kannan, N. and M.M. Sundaram. 2001. Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons – a comparative study. **Dyes and pigment**. 51: 25-40.
- Kile, D.E., R.L. Wershaw and C.T. Chiou. 1999. Correlation of Soil and Sediment Organic Matter Polarity to Aqueous Sorption of Nonionic Compounds. **Environmental Science and Technology**. 33: 2053 – 2056.
- Kula, I., M. Ugurlu, H. Karaoglu and A. Celik. 2008. Adsorption of Cd(II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from olive stone by ZnCl₂ activation. **Bioresource Technology**. 99: 492-501

- Krishnan, K.A. and T.S. Anirudhen. 2003. Removal of Cadmium(II) from aqueous solutions by steam activated-sulphurised carbon prepared from sugar-cane bagasse pith: Kinetic and equilibrium studies. **Water SA**. 29: 147-156.
- Kutahyali, C. and E. Meral. 2004. Selective adsorption of uranium from solutions using activated carbon prepared from charcoal by chemical activation. **Separation and Purification Technology**. 40: 109-114.
- Levy, J.H., S.J. Day and J.S. Killingley. 1997. Methane capacities of Bowen Basin coals related to coal properties. **Fuel**. 76: 813-819.
- Mattson, J.S. and H.B. Mark. 1971. **Activated carbon – surface chemistry and adsorption from solution**. Marcel Dekker.
- Mohanty, K., D. Das and M.N. Biswas. 2005a. Adsorption of phenol from aqueous solutions using activated carbons prepared from *Tectona grandis* sawdust by ZnCl_2 activation. **Chemical Engineering Journal**. 115: 121-131.
- _____, M. Jha, B.C. Meikap and M.N. Miswas. 2005b. Removal of chromium (VI) from dilute aqueous solution by activated carbon developed from *Terminalia arjuna* nuts activated by zinc chloride. **Chemical Engineering Science**. 60: 3049 – 3059.
- Molecular Research Inc. (n.d.) **Material data safety sheet of methylene blue**. Available source: <http://www.mrcgene.com/msdsmbs.htm>
- Mukherjee, J.N., B. Chatterjee and B.M. Banerjee. 1947. Liberation of H^+ , Al^{3+} and Fe^{3+} from hydrogen clays by neutral salts. **Journal of Colloid Science**. 2 (2): 247-256.

- Namane, A., A. Mekarzia, K. Benrachedi, B.N. Belhaneche and A. Hellal. 2005. Determination of the adsorption capacity of activated carbon made from coffee grounds by chemical activation with ZnCl_2 and H_3PO_4 . **Journal of Hazardous Materials**. B119: 189 – 194.
- Namasivayam, C. and D. Sangeetha. 2004. Equilibrium and kinetic studies of adsorption of phosphate onto ZnCl_2 activated coir pith carbon. **Journal of Colloid and Interface Science**. 280: 359 – 365.
- Nevskaia, D.M., A. Santianes, V. Munoz and A. Guerrero-Ruiz. 1999. Interaction of aqueous solutions of phenol with commercial activated carbons: an adsorption and kinetic study. **Carbon**. 37: 1065-1074.
- Parvia, D., G. Lampman and G. Kriz. 2001. **Introduction to spectroscopy: 3rd ed.** Department of Chemistry, Western Washington University, Bellingham, Washington.
- Probstein and Hicks. 1985. **Synthetic Fuels**. Mc Graw Hill.
- Qada, E.N.E., S.J. Allen and G.M. Walker. 2006. Adsorption of Methylene Blue onto activated carbon produced from steram activated bituminous coal: A study equilibrium adsorption isotherm. **Chemical Engineering Journal**. 124: 103-110.
- Rengaraj, S., R. Sivabalan, B. Arabindoo and V. Murugesan. 2000. Adsorption kinetics of o-cresol on activated carbon from palm seed coat. **Indian Journal of Chemical Technology**. 7: (3) 127-131.
- Res-Kem corporation. (n.d.) **Activated carbon-brochures, Data Sheets, Literature**. Available source: <http://www.reschem.com/pages/carbon-pdf.php>

- Singh, K.P., A. Malik, S. Sinha and P. Ojha. 2007. Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste material. **Journal of Hazardous Materials.**
- Solum, M.S., R.J. Pugmire, M. Jagtoyen and F. Derbyshire. 1995. Evolution of carbon structure in chemically activated wood. **Carbon.** 33: 1247 – 1254.
- Stavropoulos, G.G. and A.A Zabaniotou. 2005. Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue. **Microporous and Mesoporous Materials.** 82: 79-85.
- Suzuki, M. 1990. **Adsorption engineering.** Chemical Engineering Monographs Vol. 25 Tokyo: Kodansha.
- Toles, C., S. Rimmer and C. Hower. 1996. Production of activated carbons from Washington lignite using phosphoric acid activation. **Carbon.** 34: 1419 – 1426.
- Toshiro, O., T. Ritsuo and I. Masao. 1993. Production and adsorption characteristics of MAXSORB: High-surface-area active carbon. **Gas Separation and Purification.** 7: 241-245.
- Usamani, T.H., T.W. Ahmed, S.Z. Ahmed, and A.H.K. Yousufzai. 1996. Preparation and characterization of activated carbon from a low rank coal. **Carbon.** 34: 77 – 82
- Wade, L.G. Jr. 2003. **Organic Chemistry: 5th ed.** Prentice Hall. New Jersey. United States of America.
- Wikipedia. 2008a. **Acetic acid.** Available source: http://en.wikipedia/wikipedia/acetic_acid

- _____. 2008b. **Activated Carbon**. Available source:
http://en.wikipedia/wikipedia/activated_carbon
- _____. 2008c. **Butyric acid**. Available source: http://en.wikipedia/wikipedia/butyric_acid
- _____. 2008d. **Cadmium**. Available source: <http://en.wikipedia/wikipedia/cadmium>
- _____. 2008e. **Citric acid**. Available source: http://en.wikipedia/wikipedia/citric_acid
- _____. 2008f. **Formic acid**. Available source: http://en.wikipedia/wikipedia/formic_acid
- _____. 2008g. **Iodine**. Available source: <http://en.wikipedia/wikipedia/iodine>
- _____. 2008h. **Isobutyric acid**. Available source:
http://en.wikipedia/wikipedia/isobutyric_acid
- _____. 2008i. **Lactic acid**. Available source: http://en.wikipedia/wikipedia/Lactic_acid
- _____. 2008j. **Malic acid**. Available source: http://en.wikipedia/wikipedia/malic_acid
- _____. 2008k. **Methylene blue**. Available source:
http://en.wikipedia/wikipedia/methylene_blue
- _____. 2008l. **Phenol**. Available source: <http://en.wikipedia/wikipedia/phenol>
- _____. 2008m. **Propionic acid**. Available source:
http://en.wikipedia/wikipedia/propionic_acid
- _____. 2008n. **Tartaric acid**. Available source: http://en.wikipedia/wikipedia/tartaric_acid

- Yang, T. and A.C. Lua. 2003. Characteristics of activated carbons prepared from pistachio–nut shells by potassium hydroxide activation. **Microporous and Mesoporous Materials**. 63: 113 – 124.
- Yao, K.M. 1971. Removal of Particulate Matter by Filtration. **Environmental Science Technology**. 5 (11): 378-382.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon

ASTM D 4607 – 94



Designation: D 4607 – 94 (Reapproved 1999)

Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon¹

This standard is issued under the fixed designation D 4607; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the relative activation level of unused or reactivated carbons by adsorption of iodine from aqueous solution. The amount of iodine absorbed (in milligrams) by 1 g of carbon using test conditions listed herein is called the iodine number.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* Specific hazard statements are given in Section 7.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 819 Test Method for Specific Surface Area of Carbon or Graphite²
- D 1193 Specification for Reagent Water³
- D 2652 Terminology Relating to Activated Carbon⁴
- D 2867 Test Method for Moisture in Activated Carbon⁴
- D 3860 Practices for Determination of Adsorptive Capacity of Carbon by Isotherm Technique⁴
- E 11 Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes⁵
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods⁵
- E 287 Specification for Laboratory Glass Graduated Burets⁵
- E 288 Specification for Laboratory Glass Volumetric Flasks⁵
- E 300 Practice for Sampling Industrial Chemicals⁶

2.2 NIST Publication:

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-28 on Activated Carbon and is the direct responsibility of Subcommittee D28.02 on Liquid Phase Evaluation.

Current edition approved Nov. 15, 1994. Published January 1995. Originally published as D 4607 – 86. Last previous edition D 4607 – 86 (1990).

² Discontinued—See 1986 Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.05.

Circular 602—Testing of Glass Volumetric Apparatus⁷

3. Summary of Test Method

3.1 This test method is based upon a three-point adsorption isotherm (see Practices D 3860). A standard iodine solution is treated with three different weights of activated carbon under specified conditions. The carbon treated solutions are filtered to separate the carbon from the treated iodine solution (filtrate). Iodine remaining in the filtrate is measured by titration. The amount of iodine removed per gram of carbon is determined for each carbon dosage and the resulting data used to plot an adsorption isotherm. The amount of iodine adsorbed (in milligrams) per gram of carbon at a residual iodine concentration of 0.02 *N* is reported as the iodine number.

3.2 Iodine concentration in the standard solution affects the capacity of an activated carbon for iodine adsorption. Therefore, the normality of the standard iodine solution must be maintained at a constant value (0.100 ± 0.001 *N*) for all iodine number measurements.

3.3 The apparatus required consists of various laboratory glassware used to prepare solutions and contact carbon with the standard iodine solution. Filtration and titration equipment are also required.

4. Significance and Use

4.1 The iodine number is a relative indicator of porosity in an activated carbon. It does not necessarily provide a measure of the carbon's ability to absorb other species. Iodine number may be used as an approximation of surface area for some types of activated carbons (see Test Method C 819). However, it must be realized that any relationship between surface area and iodine number cannot be generalized. It varies with changes in carbon raw material, processing conditions, and pore volume distribution (see Definitions D 2652).

4.2 The presence of adsorbed volatiles, sulfur, and water extractables may affect the measured iodine number of an activated carbon.

⁷ Available from National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, MD 20899.



D 4607

5. Apparatus

NOTE 1—All volumetric measuring equipment should meet or exceed the requirements of NIST Circular 602. Volumetric glassware meeting these specifications is generally designated as “Class A”. See also Specifications E 287 and E 288.

- 5.1 *Analytical Balance*, accuracy ± 0.0001 g.
- 5.2 *Buret*, 10-mL capacity or 5-mL precision buret.
- 5.3 *Flasks*, Erlenmeyer 250-mL capacity with ground glass stoppers.
- 5.4 *Flask*, Erlenmeyer wide-mouthed, 250-mL capacity.
- 5.5 *Beakers*, assorted sizes.
- 5.6 *Bottles*, amber, for storage of iodine and thiosulfate solutions.
- 5.7 *Funnels*, 100-mm top inside diameter.
- 5.8 *Filter Paper*, 18.5-cm prefolded paper, Whatman No. 2V or equivalent.
- 5.9 *Pipets*, volumetric type, 5.0, 10.0, 25.0, 50.0, and 100.0-mL capacity.
- 5.10 *Volumetric Flasks*, 1 L.
- 5.11 *Graduated Cylinders*, 100 mL and 500 mL.

6. Reagents

- 6.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents shall conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society, where such specifications are available.⁸ Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.
- 6.2 *Purity of Water*—References to water shall be understood to mean reagent water conforming to Specification D 1193 for Type II reagent water.
- 6.3 *Hydrochloric Acid*, concentrated.
- 6.4 *Sodium Thiosulfate*, ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).
- 6.5 *Iodine*, United States Pharmacopeia, resublimed crystals.
- 6.6 *Potassium Iodide*.
- 6.7 *Potassium Iodate*, primary standard.
- 6.8 *Starch*, soluble potato or arrowroot.
- 6.9 *Sodium Carbonate*.

7. Hazards

7.1 Several potential hazards are associated with conducting this test procedure. It is not the purpose of this standard to address all potential health and safety hazards encountered with its use. The user is responsible for establishing appropriate health and safety practices before use of this test procedure. Determine the applicability of federal and state regulations before attempting to use this test method.

7.2 Personnel conducting the iodine number procedure should be aware of potential safety and health hazards associ-

ated with the chemicals used in this procedure. The “Material Safety Data Sheet” (MSDS) for each reagent listed in Section 6 should be read and understood. Special precautions to be taken during use of each reagent are included on the “Material Safety Data Sheet” (MSDS). First aid procedures for contact with a chemical are also listed on its “MSDS.” A “Material Safety Data Sheet” for each reagent may be obtained from the manufacturer. Other safety and health hazard information on reagents used in this procedure is available.^{9,10,11}

7.3 Careful handling and good laboratory technique should always be used when working with chemicals. Avoid contact with hydrochloric acid or acid vapor. Care should also be taken to prevent burns during heating of various solutions during this test procedure.

7.4 The user of this test method should comply with federal, state, and local regulations for safe disposal of all samples and reagents used.

8. Preparation of Solutions

8.1 *Hydrochloric Acid Solution* (5 % by weight)—Add 70 mL of concentrated hydrochloric acid to 550 mL of distilled water and mix well. A graduated cylinder may be used for measurement of volume.

8.2 *Sodium Thiosulfate* (0.100 *N*)—Dissolve 24.820 g of sodium thiosulfate in approximately 75 $\pm$ 25 mL of freshly boiled distilled water. Add 0.10 $\pm$ 0.01 g of sodium carbonate to minimize bacterial decomposition of the thiosulfate solution. Quantitatively transfer the mixture to a 1-L volumetric flask and dilute to the mark. Allow the solution to stand at least 4 days before standardizing. The solution should be stored in an amber bottle.

8.3 *Standard Iodine Solution* (0.100 $\pm$ 0.001 *N*)—Weigh 12.700 g of iodine and 19.100 g of potassium iodide (KI) into a beaker. Mix the dry iodine and potassium iodide. Add 2 to 5 mL of water to the beaker and stir well. Continue adding small increments of water (approximately 5 mL each) while stirring until the total volume is 50 to 60 mL. Allow the solution to stand a minimum of 4 h to ensure that all crystals are thoroughly dissolved. Occasional stirring during this 4-h period will aid in the dissolution. Quantitatively transfer to a 1-L volumetric flask and fill to the mark with distilled water. It is important that the standard iodine solution has an iodide-to-iodine weight ratio of 1.5 to 1. Store the solution in an amber bottle.

8.4 *Potassium Iodate Solution* (0.1000 *N*)—Dry 4 or more grams of primary standard grade potassium iodate (KIO_3) at 110 $\pm$ 5°C for 2 h and cool to room temperature in a desiccator. Dissolve 3.5667 $\pm$ 0.1 mg of the dry potassium iodate in about 100 mL of distilled water. Quantitatively transfer to a 1-L volumetric flask and fill to the mark with distilled water. Mix thoroughly and store in a glass-stoppered bottle.

⁹ The “Chemical Safety Data Sheet” for the subject chemical is available from the Manufacturing Chemists Association, Washington, DC.

¹⁰ Sax, N. I., *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 4th edition, 1975, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY.

¹¹ *NIOSH/OSHA Pocket Guide to Chemical Hazards*, 1978, U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, Washington, DC. Available from U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

⁸ “Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications,” Am. Chemical Soc., Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see “Reagent Chemicals and Standards,” by Joseph Rosin, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, NY, and the “United States Pharmacopeia.”



D 4607

8.5 *Starch Solution*—Mix 1.0 ± 0.5 g of starch with 5 to 10 mL of cold water to make a paste. Add an additional 25 ± 5 mL of water while stirring to the starch paste. Pour the mixture, while stirring, into 1 L of boiling water and boil for 4 to 5 min. This solution should be made fresh daily.

9. Standardization of Solutions

9.1 *Standardization of 0.100 N Sodium Thiosulfate*—Pipet 25.0 mL of potassium iodate (KIO_3) solution from 8.4 into a 250-mL titration (or wide-mouthed Erlenmeyer) flask. Add 2.00 ± 0.01 g of potassium iodide (KI) to the flask and shake the flask to dissolve the potassium iodide crystals. Pipet 5.0 mL of concentrated hydrochloric acid into the flask. Titrate the free iodine with sodium thiosulfate solution until a light yellow color is observed in the flask. Add a few drops of starch indicator (8.5) and continue the titration dropwise until one drop produces a colorless solution. Determine sodium thiosulfate normality as follows:

$$N_1 = (P \cdot R) / S \quad (1)$$

where:

N_1 = sodium thiosulfate, N ,
 P = potassium iodate, mL,
 R = potassium iodate, N , and
 S = sodium thiosulfate, mL.

The titration step should be done in triplicate and the normality results averaged. Additional replications should be done if the range of values exceeds 0.003 N .

9.2 *Standardization of 0.100 $\pm$ 0.001 N Iodine Solution*—Pipet 25.0 mL of iodine solution (8.3) into a 250-mL wide-mouthed Erlenmeyer flask. Titrate with standardized sodium thiosulfate (9.1) until the iodine solution is a light yellow color. Add a few drops of starch indicator and continue titration dropwise until one drop produces a colorless solution. Determine the iodine solution normality as follows:

$$N_2 = (S \cdot N_1) / I \quad (2)$$

where:

N_2 = iodine, N ,
 S = sodium thiosulfate, mL,
 N_1 = sodium thiosulfate, N , and
 I = iodine, mL.

The titration step should be done in triplicate and the normality results averaged. Additional replications should be done if the range of values exceeds 0.003 N . The iodine solution concentration must be $0.100 \pm 0.001 N$. If this requirement is not met, repeat 8.3 and 9.2.

10. Procedure

10.1 The procedure applies to either powdered or granular activated carbon. When granular carbon is to be tested, grind a representative sample (see Practice E 300) of carbon until 60 wt % (or more) will pass through a 325-mesh screen and 95 wt % or more will pass through a 100-mesh screen (U.S. sieve series, see Specification E 11). Carbon received in the powdered form may need additional grinding to meet the particle size requirement given above.

10.2 Dry the ground carbon from 10.1 in accordance with Test Method D 2867. Cool the dry carbon to room temperature in a desiccator.

10.3 Determination of iodine number requires an estimation of three carbon dosages. Section 11.4 describes how to estimate the carbon dosages to be used. After estimating carbon dosages, weigh three appropriate amounts of dry carbon to the nearest milligram. Transfer each weighed sample of carbon to a clean, dry 250-mL Erlenmeyer flask equipped with a ground glass stopper.

10.4 Pipet 10.0 mL of 5 wt % hydrochloric acid solution into each flask containing carbon. Stopper each flask and swirl gently until the carbon is completely wetted. Loosen the stoppers to vent the flasks, place on a hot plate in a fume hood, and bring the contents to a boil. Allow to boil gently for 30 ± 2 s to remove any sulfur which may interfere with the test results. Remove the flasks from the hot plate and cool to room temperature.

10.5 Pipet 100.0 mL of 0.100 N iodine solution into each flask. Standardize the iodine solution just prior to use. Stagger the addition of iodine to the three flasks so that no delays are encountered in handling. Immediately stopper the flasks, and shake the contents vigorously for 30 ± 1 s. Quickly filter each mixture by gravity through one sheet of folded filter paper (Whatman No. 2V or equivalent) into a beaker. Filtration equipment must be prepared in advance so no delay is encountered in filtering the samples.

10.6 For each filtrate, use the first 20 to 30 mL to rinse a pipet. Discard the rinse portions. Use clean beakers to collect the remaining filtrates. Mix each filtrate by swirling the beaker and pipet 50.0 mL of each filtrate into a clean 250-mL Erlenmeyer flask. Titrate each filtrate with standardized 0.100 N sodium thiosulfate solution until the solution is a pale yellow. Add 2 mL of the starch indicator solution and continue the titration with sodium thiosulfate until one drop produces a colorless solution. Record the volume of sodium thiosulfate used.

11. Calculation

11.1 The capacity of a carbon for any adsorbate is dependent upon the concentration of the adsorbate in solution. The concentrations of the standard iodine solution and filtrates must be specified or known. This is necessary to determine an appropriate carbon weight to produce final concentrations agreeing with the definition of iodine number. The amount of carbon sample to be used in the determination is governed by the activity of the carbon. If filtrate normalities (C) are not within the range of 0.008 N to 0.040 N , repeat the procedure using different carbon weights.

11.2 Two calculations are required for each carbon dosage, as X/M and C .

11.2.1 To calculate the value of X/M , first derive the following values:

$$A = (N_2) (12693.0) \quad (3)$$

where:

N_2 = iodine, N (from 9.2).

$$B = (N_1) (126.93) \quad (4)$$

where:

N_1 = sodium thiosulfate, N (from 9.1).

D 4607

$$DF = (I + H)/F$$

(5)

where:

 DF = dilution factor, I = iodine, mL (from 9.2), H = 5 % hydrochloric acid used, mL, and F = filtrate, mL.

For example, if 10 mL of HCl and 50 mL of filtrate are used:

$$DF = (100 + 10)/50 = 2.2.$$

11.2.1.1 Calculate the value of X/M as follows:

$$X/M = [A - (DF)(B)(S)]/M$$

(6)

where:

 X/M = iodine absorbed per gram of carbon, mg/g, S = sodium thiosulfate, mL, and M = carbon used, g.11.2.2 Calculate the value of C as follows:

$$C = (N_1 S)/F$$

(7)

where:

 C = residual filtrate, N , N_1 = sodium thiosulfate, N , and F = filtrate, mL.11.3 Using logarithmic paper, plot X/M (as the ordinate) versus C (as the abscissa) for each of the three carbon dosages(see Fig. 1). Calculate the least squares fit for the three points and plot. The iodine number is the X/M value at a residual iodine concentration (C) of 0.02 N . The regression coefficient for the least squares fit should be greater than 0.995.

11.4 Carbon dosage may be estimated as follows:

$$M = [A - (DF)(C)(126.93)(50)]/E$$

(8)

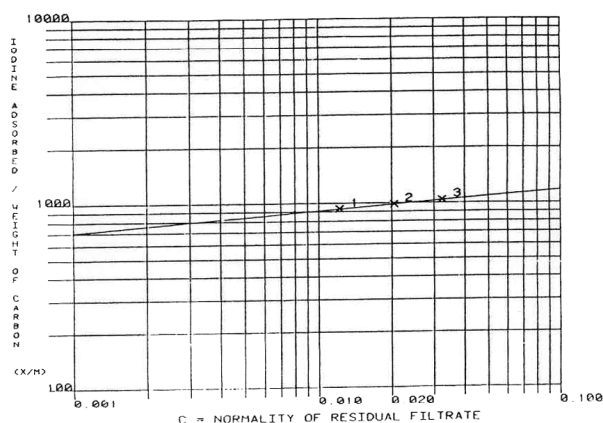
where:

 M = carbon, g, A = $(N_2)(12693.0)$, DF = dilution factor (see 11.2.1), C = residual iodine, and E = estimated iodine number of the carbon.Three carbon dosages are calculated using three values of C (usually 0.01, 0.02, and 0.03).**12. Report**

12.1 The reports should include the following:

12.1.1 Complete identification of the sample, including source, manufacturer's lot number, and carbon type.

12.1.2 The iodine number adsorption isotherm, the iodine value with a 95 % confidence limit for the determination.

13. Precision and Bias¹²

LAB NO. 4 OCT '83-3
TDB NO. 604 PAGE 22
TECH. PRP

POINT 1		
X/M	-	932
C	-	0.012
POINT 2		
X/M	-	964
C	-	0.020
POINT 3		
X/M	-	1040
C	-	0.032
IODINE NO.	-	964
SLOPE	-	0.111
CORR. COEF.	-	0.999

FIG. 1 Activated Carbon Iodine Adsorption Isotherm



D 4607

13.1 Interlaboratory precision for this test method was determined by a round robin in which six laboratories participated. Activated carbon made from five different raw materials was used in the round robin.

13.2 The following criteria should be used in determining the acceptability of the results:

13.2.1 *Repeatability (Within Laboratories)*—Precision of this test method in the determination of iodine number of activated carbons ranging from 600 to 1450 iodine number is $\pm 5.6\%$ of the average value measured in milligrams iodine absorbed per gram of carbon. This range corresponds to 2S, or the 95 % confidence limits, as defined in Practice E 177. If two

results determined in the same laboratory differ by more than 5.6 %, they should be considered suspect.

13.2.2 *Reproducibility (Between Laboratories)*—The between laboratory precision of this test method in the determination of iodine number of activated carbons ranging from 600 to 1450 iodine number, is $\pm 10.2\%$ of the average value, as measured in milligrams of iodine absorbed per gram of carbon. This range corresponds to 2 S or the 95 % confidence limits, as defined in Practice E 177. Results obtained by two different laboratories which differ by more than 10.2 % should be considered suspect.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ภาคผนวก ข

Standard Test Method for Determination of Phenol Value of Activated Carbon

AWWA B600

APPENDIX B

Phenol and Tannin Values

This appendix is for information only and is not a part of AWWA B600.

Section B.1 Phenol Value

Sec. B.1.1 Phenol Value Test

The phenol value test procedure from ANSI/AWWA B600-78 is reprinted below for the information of ANSI/AWWA B600-96 users. ANSI/AWWA B600-78 stated, "Unless otherwise specified by the purchaser, the phenol value of the activated carbon shall not be greater than 3.5." The modified phenol value used in this standard is defined as the concentration of activated carbon in grams per litre required to reduce the standard phenol concentration from 200 mg/L to 20 mg/L.

Sec. B.1.2 Reagents and Equipment

a. Stock phenol solution. Dissolve 1 g of reagent-grade phenol in distilled water and dilute to 1 L. Phenol should be weighed on a glass weighing dish. Rinse the weighing dish with distilled water several times to ensure the removal of all phenol from the weighing dish into the solution. The solution need not be buffered. Standardize the solution. After two weeks, the solution should be discarded and a new solution prepared. (Reagent-grade phenol must be stored in a refrigerator.)

b. Sodium thiosulfate, 0.1N. Dissolve 25 g of reagent-grade sodium thiosulfate and 1 g of reagent-grade sodium carbonate, as a preservative, in boiled distilled water, and make up to 1 L. Store in a brown bottle. Standardize the solution.

c. Sodium thiosulfate, 0.01N. Dilute 100 mL of the standardized 0.1N sodium thiosulfate solution to 1 L with boiled distilled water. Store in a brown bottle. Standardize the solution.

d. Potassium bromate-bromide, 0.1N. Dissolve 2.784 g of reagent-grade potassium bromate and 10 g of reagent-grade potassium bromide (bromate-free) in distilled water, and dilute to 1 L. Store in a brown bottle.

e. Potassium biniodate, 0.1N. Dissolve 3.250 g of potassium biniodate, primary standard, in distilled water, and make up to 1 L.

f. Potassium biniodate, 0.025N. Dissolve 0.8125 g of potassium biniodate, primary standard, in distilled water, and make up to 1 L.

g. Potassium iodide, 12.5 percent. Dissolve 25 g of reagent-grade potassium iodide in 175 mL of distilled water and dilute to 200 mL. Store solution in a brown bottle in a dark place.

h. Starch solution. Dissolve 2.5 g of soluble potato-powder starch and 1.25 g of reagent-grade salicylic acid in 50 mL of distilled water. Add the dissolved starch and salicylic acid slowly, while stirring, to 950 mL of boiling distilled water. Rinse the 150-mL beaker with some of the hot starch solution to ensure removal of all of the starch.

i. Buffer solution, 8 strength. Dissolve 728 g of anhydrous disodium phosphate (Na_2HPO_4), or equivalent weight of crystalline phosphate, in 2 L of hot distilled water. When the phosphate is completely dissolved, acidify with about 100 mL of

concentrated reagent-grade phosphoric acid and make up to 7 L. Make final adjustment to pH 6.5 ± 0.1 .

Sec. B.1.3 Standardization of Reagents

The standardization of reagents follows:

a. ~~Sodium thiosulfate~~ Add 100 mL of distilled water, 4 mL of concentrated reagent-grade hydrochloric acid, and 8 mL of 12.5 percent potassium iodide solution to a ~~500-mL iodine flask~~ and mix. Rinse the sides of the flask with distilled water.

When standardizing 0.1N sodium thiosulfate solution, add 25 mL of 0.1N potassium biniodate solution.

When standardizing 0.01N sodium thiosulfate solution, add 10 mL of 0.025N potassium biniodate solution.

Using a transfer pipette, add the potassium biniodate solution to the flask. Mix and allow to stand for 3 min. Titrate with the sodium thiosulfate solution, using starch as the indicator.

$$\text{normality sodium thiosulfate solution} = \frac{\text{millilitre potassium biniodate solution} \times \text{normality factor}}{\text{millilitre sodium thiosulfate solution used}}$$

b. ~~Stock phenol solution~~ Pipette 25 mL of stock phenol solution into a ~~500-mL iodine flask~~. Using a pipette or a burette, add 25 mL of 0.1N potassium bromate-bromide solution. Shake flask. Add 5 mL of concentrated hydrochloric acid. After 3 min, add 8 mL of 12.5 percent potassium iodide solution. Allow to stand for 3 min and titrate the liberated iodine with 0.1N sodium thiosulfate solution, using starch solution as the indicator.

$$\text{concentration of phenol (grams per litre)} = \frac{\left[\frac{(\text{millilitre bromate-bromide} \times \text{normality factor}) - (\text{millilitre sodium thiosulfate} \times \text{normality factor})}{\text{millilitre stock phenol solution}} \right] \times 15.685}$$

Sec. B.1.4 Phenol Test Procedure

The phenol test procedure follows:

a. Prepare a test phenol solution with a concentration of 200 mg/L of phenol by diluting one volume of stock phenol solution (1,000 mg/L) with four volumes of single-strength buffer solution. Single-strength buffer solution is prepared by diluting one volume of 8-strength buffer solution with seven volumes of distilled water. For example, to prepare 1 L of test phenol solution use 200 mL of stock phenol solution and 800 mL of single-strength buffer solution (100 mL of 8-strength buffer solution plus 700 mL of distilled water.) If the stock phenol solution is not of the exact concentration (1 g/L), adjust the volume used so that the test solution is maintained at 200 mg/L of phenol.

When preparing test phenol solution, prepare enough to conduct all of the sample for the day. A four-point isotherm for a single activated carbon requires 800 mL of test phenol solution (200 mL for each activated carbon dosage). It is advisable to make up some solution in excess of the amount required to allow for spillage, and so forth.

b. Use the activated carbon as received, and determine the moisture content according to Sec. 5.2.3 of ANSI/AWWA B600.

Use four dosages for each activated carbon. At least one dosage should adsorb 90 percent or more of the phenol in the test phenol solution. Activated carbon weights of 0.4 g, 0.5 g, 0.6 g, and 0.7 g are usually satisfactory. If these weights do not give the desired range of phenol adsorption, higher or lower weights may be used. Each activated carbon dosage is weighed into an Erlenmeyer flask.

c. Using pipette, add 200 mL of test phenol solution (200 mg/L of phenol) to each Erlenmeyer flask. Add only about 100 mL of solution initially to thoroughly wet the activated carbon, and rinse the sides of the flask with the remaining portion. Close the flasks with rubber caps and place them in an Eberback Water Bath Shaker (or equivalent) at ambient temperature, without water in the bath, and shake for 30 min. Samples are to be filtered by gravity using Whatman No. 2V, 24-cm fluted paper (or equivalent) on a 5-in. (127-mm) funnel. Allow the samples to filter completely.

Sec. B.1.5 Residual Phenol Determination

Determine the residual phenol concentration for each activated carbon treated filtrate by either the titration method or the spectrophotometric method according to the following procedures:

a. Titration method. Transfer a 150-mL portion of each filtrate, measured with a graduated cylinder, to a 500-mL iodine flask. Add 10 mL of concentrated, reagent-grade hydrochloric acid to each flask.

Add from a burette 0.1N potassium bromate-bromide solution until a light yellow color develops, indicating that an excess has been added. Replace the stopper immediately, shake the flask vigorously for a few seconds, and then place the flask in cold water. The potassium bromate-bromide solution should be added as quickly as possible so that the liberated bromine does not escape. Record the potassium bromate-bromide titration.

Place the flasks in a sink with a stoppered drain or in a cold-water bath, with cold tap water running into it to cool the flasks. Keep the water as cold as possible, taking care not to fill the sink, causing the flasks to upset. After the flasks are cooled, add 12.5 percent potassium iodide solution to the flange top of the flask. Completely fill the top. Loosen the stopper to allow the potassium iodide solution to be drawn into the flask by the vacuum. Immediately drop the stopper back into place. (The flask-cooling period must be adequate to develop the required vacuum. If multiple activated carbons are tested, add potassium bromate-bromide solution to at least eight of the samples, and then add the potassium iodide to the first four samples, while allowing the last four samples to cool.) After the potassium iodide solution has been drawn into the flask, rinse the top of the flask (using a wash bottle) with distilled water. Loosen the stopper and allow the water to run into the flask, rinsing all the potassium iodide into the flask. Remove the flasks from the cold water. Titrate the liberated iodine with 0.01N sodium thiosulfate solution, using starch as the indicator. Record the sodium thiosulfate titration.

$$\text{residual phenol (milligram per litre)} = \left[\frac{(\text{millilitre bromate-bromide} \times \text{normality factor}) - (\text{millilitre sodium thiosulfate} \times \text{normality factor})}{10} \right] \times 104.6$$

b. Spectrophotometric method. Prepare 1,500 mL of buffer solution mixture by adding one volume of 8-strength buffer solution to nine volumes of distilled

water. The buffer solution mixture is used as the reference solution in the spectrophotometer and as the diluent in preparing the standard phenol reference curve.

Prepare standards containing 20 mg/L, 40 mg/L, 60 mg/L, 80 mg/L, 100 mg/L, and 120 mg/L phenol. To make these standards, measure from a burette 4 mL, 8 mL, 12 mL, 16 mL, 20 mL, and 24 mL of stock phenol solution (1,000 mg/L), respectively, into 200-mL volumetric flasks. Dilute each to exactly 200 mL with the buffer solution mixture and mix thoroughly.

The optical density of each filtrate and each dilution of the standard phenol reference curve is read on the spectrophotometer at a wavelength of 270 μm using silica cells with a 10-mm light path. Buffer solution mixture is used as the reference to balance the spectrophotometer.

Plot the data for the phenol reference curve, milligram per litre phenol versus optical density, on arithmetic paper.

Determine the residual phenol concentration milligram per litre for each activated carbon treated filtrate from the phenol reference curve.

NOTES: The following notes list some aids for more accurate results when using a spectrophotometer:

1. Let the instrument warm up sufficiently before balancing it.
2. Be sure that no foreign particles or air bubbles are present in the cell.
3. Dry the cells thoroughly and polish with lens tissue.
4. Always use the same matched cell for the reference cell.
5. Rinse the cells thoroughly with distilled water.
6. Avoid making fingerprints on the cell face while placing the cell in the instrument.

Sec. B.1.6 Calculations

a. Determine the percentage of residual filtrate normality (remaining phenol) (see B600-78, Table 1, page 8) in each activated carbon treated filtrate:

$$\% \text{ of residual filtrate normality} = \frac{\text{milligram per litre residual phenol} \times 100}{200 \text{ (milligram per litre phenol in test solution)}}$$

b. Determine percentage of X (adsorbed phenol):

$$\% \text{ of } X = 100 - \% \text{ of residual filtrate normality}$$

c. Activated carbon dosages, per 200 mL of phenol solution, are multiplied by 5 to obtain activated carbon dosage, M , as grams per litre.

d. Calculate the percentage of X/M value for each activated carbon dosage.

e. Plot isotherm: percentage of residual filtrate normality on abscissa and percentage of X/M on ordinate on 2×2 cycle logarithmic paper and draw best straight line through the points.

f. Determine the percentage of X/M at 10 percent of residual filtrate normality.

g. Phenol value in grams per litre =

$$\frac{90}{\% \text{ of } X/M \text{ in grams per litre at 10\% of residual filtrate normality}} \times \frac{100\% - \% \text{ of moisture}}{100\%}$$

As shown, this formula is on a dry activated carbon basis.

ภาคผนวก ค

Standard Test Method for Moisture of Activated Carbon

ASTM D 2867 - 04



Designation: D 2867 – 04

Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon¹

This standard is issued under the fixed designation D 2867; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods provide two procedures for the determination of the moisture content of activated carbon. The procedures may also be used to dry samples required for other tests. The oven-drying method is used when water is the only volatile material present and is in significant quantities, and the activated carbon is not heat-sensitive (some activated carbons can ignite spontaneously at temperatures as low as 150°C). The xylene-extraction method is used when a carbon is known or suspected to be heat sensitive or to contain nonwater-miscible organic compounds instead of or in addition to water. The oven-drying method described in these test methods may be used as the reference for development of instrumental techniques for moisture determination in activated carbon.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

3. Summary of Test Methods

3.1 *Oven-Drying Test Method*—A sample of carbon is put into a dry, closed capsule (of known weight) and weighed accurately. The capsule is opened and placed with the lid in a preheated oven. The sample is dried to constant weight then removed from the oven and with the capsule closed, cooled to ambient temperature. The closed capsule is weighed again

accurately. The weight loss is expressed as a percentage of the weight of the original sample.

3.2 *Xylene-Extraction Test Method*—A known, accurate weight of carbon is put into a boiling flask. A known volume of xylene is added to the flask and the flask then connected to a water trap. A hot plate is used to heat the xylene until boiling. The temperature is controlled to allow steady reflux. Reflux continues until no further water can be collected in the trap. The weight of water collected is expressed as a percentage of the weight of the original sample.

4. Significance and Use

4.1 The moisture content of activated carbon is often required to define and express its properties in relation to the net weight of the carbon.

4.2 The moisture content of activated carbon packed in typical shipping containers will usually increase during transportation and storage. Users of activated carbon in applications where low moisture content is important should be aware of this effect.

OVEN-DRYING METHOD

5. Apparatus

5.1 *Moisture Oven*—Most commercial, electrically heated, forced-circulation drying ovens capable of temperature regulation between 145 and 155°C may be used.

5.2 *Capsules with Covers*—Low-form glass weighing bottles with ground-glass stoppers or seamless metal boxes with covers may be used. They should be as shallow as possible, consistent with convenient handling.

5.3 *Desiccator*.

6. Materials

6.1 *Desiccant*—Anhydrous calcium chloride or other suitable desiccant.

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D28 on Activated Carbon and are the direct responsibility of Subcommittee D28.04 on Gas Phase Evaluation Tests.

Current edition approved April 1, 2004. Published May 2004. Originally approved in 1970. Last previous edition approved in 1999 as D 2867 – 99.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

 D 2867 - 04

7. Procedure for Activated Carbon Passing A No. 50 Sieve

7.1 Dip out with a spoon or spatula from the sample bottle 1 to 2-g representative sample. Put this into a predried tared capsule with lid, close and weigh at once to the nearest 0.5 mg. The depth of the carbon in the capsule must not exceed 1.25 cm.

7.2 Remove the cover and place the capsule and cover in a preheated forced circulation oven (at 145 to 155°C). Close the oven and dry to constant weight (3 h normally sufficient). Open the oven and cover the capsules quickly. Cool in a desiccator to ambient temperature and weigh.

8. Procedure for Activated Carbon Larger Than A No. 50 Sieve

8.1 Use a 5 to 10-g representative sample and weigh to the nearest 2 mg. Complete the determination as described in Section 7.

9. Calculation

9.1 Calculate the moisture content as follows:

$$\text{Moisture, weight \%} = [(C - D) / (C - B)] \times 100$$

where:

B = weight of capsule with cover, g,

C = weight of capsule with cover plus original sample, g,
and

D = weight of capsule with cover plus dried sample, g.

XYLENE-EXTRACTION METHOD

10. Apparatus

10.1 *Boiling Flask*—A 300-mL flat-bottom Erlenmeyer flask with ground-glass joints.

10.2 *Condenser*—A 300-mm water-cooled condenser of the Allihn type with ground-glass joints.

10.3 *Drying Tube*, containing a suitable desiccant with fiber-glass filter.

10.4 *Water Trap*—A Bidwell and Sterling 10-mL or a Dean and Stark receiver with ground-glass joints. The water trap should be clean so that the shape of the meniscus at the end of the test is the same as at the beginning.

NOTE 1—The trap may be coated with a silicone resin to give a uniform meniscus. To coat the trap, first clean it with a suitable cleaner. Rinse the clean trap with a silicone resin and after draining for a few minutes, bake for 1 h at approximately 200°C.

10.5 *Hot Plate*—An electrically heated hot plate with enclosed elements and temperature control.

11. Reagent

11.1 *Xylene*—Reagent grade in accordance with the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society.³

12. Hazards

12.1 The use of hot xylene presents a continual fire hazard and suitable fire extinguishing equipment should be available.

13. Preparation of Apparatus

13.1 Clean the condenser, flask, and trap and carefully dry to ensure that it is free of water. Assemble the condenser and water trap as shown in Fig. 1.

14. Procedure

14.1 Weigh the sample bottle. Dip out with a spoon from the sample bottle 25 to 50 g of the sample. Put this into the boiling flask and reweigh the sample bottle to the nearest 0.1 g. Add 100 mL of xylene and connect the boiling flask to the water trap. For carbons having density less than 0.30 g/cm³, 200 mL of xylene should be used for a 25-g sample.

14.2 Place the hot plate under the boiling flask and heat to boiling. Adjust the temperature control so as to reflux the xylene at the rate of about 1 drop/s from the tip of the condenser. Continue to reflux until there is no further increase in the water layer in the trap over a 30-min period (from 2 to 8 h may be required).

15. Calculation

15.1 Calculate the moisture content as follows:

$$\text{Moisture, weight \%} = [V / (C - E)] \times 100$$

where:

V = water collected, mL,

C = initial weight of sample bottle, g, and

E = weight of sample bottle after removing moisture sample, g.

15.2 Calculate for the correction for moisture in carbon to determine the weight of a carbon sample on the dry basis as follows:

$$\text{Corrected weight (dry basis)} = \frac{\text{Initial weight of Carbon(undried)} \times (100\% - \% \text{ moisture from 15.1})}{(100\%)} \quad (1)$$

³ *Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications*, American Chemical Society, Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Annual Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the *United States Pharmacopeia and National Formulary*, U.S. Pharmaceutical Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

D 2867 – 04

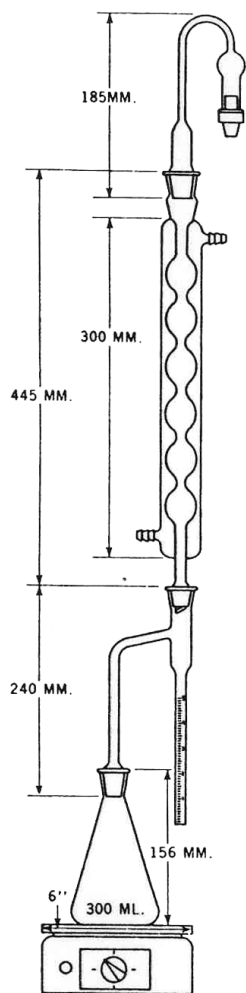


FIG. 1 Moisture Determination Apparatus

16. Precision and Bias

16.1 An interlaboratory test which included four laboratories testing in triplicate, activated carbon samples with nominal moisture levels of 1 weight %, 5 weight %, and 12 weight %, was conducted according to Practice E 691. Results of these tests yielded repeatability and reproducibility coefficients at 95 % confidence levels as listed in Table 1.

16.1.1 The high coefficients of variation for both test methods when the moisture is nominally 1 weight % suggests that values in this range be reported as "1 weight % or less." If greater precision is needed, the amount of carbon sample can be increased over that specified in Sections 7, 8, and 14.

17. Keywords

17.1 activated carbon; moisture

TABLE 1 Within- and Between-Laboratory Precision

Nominal Moisture, weight %	1	5	12
<i>Oven Drying Method</i>			
Repeatability Coefficient, $CV\%_R^A$	19	3	6
Reproducibility Coefficient, $CV\%_R^A$	51	13	10
<i>Xylene Extraction Method</i>			
Repeatability Coefficient, $CV\%_R^A$	51	5	6
Reproducibility Coefficient, $CV\%_R^A$	54	6	6

^A Defined in Practice E 177, Section 28.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ภาคผนวก ง

Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Sample

ASTM D 5832 – 98



Designation: D 5832 – 98 (Reapproved 2003)

Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples¹

This standard is issued under the fixed designation D 5832; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the percentage of gaseous products, exclusive of moisture vapor, present in virgin and used activated carbons which are released under specific conditions of the test.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 2652 Terminology Relating to Activated Carbon²
- D 2867 Test Method for Moisture in Activated Carbon²
- D 3175 Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke³

3. Terminology

3.1 **Definitions**—For definitions of terms used in this test method relating to activated carbon, refer to Terminology D 2652.

4. Summary of Test Method

4.1 Volatile matter is determined by establishing the loss in mass resulting from heating an activated carbon sample under rigidly controlled conditions. The measured mass loss, corrected for moisture as determined in Test Method D 2867, establishes the volatile matter content of the activated carbon sample.

5. Significance and Use

5.1 Volatile matter, when determined as herein described, may be used as a relative measure of the extent of carbonization in an activated carbon and the extent of loading of volatile material on an activated carbon that has been used in an adsorption application.

5.2 Combined with other information, the volatile matter of an activated carbon may be useful in evaluating its performance in an adsorption application.

5.3 Other automated methods for the determination of the volatile content of solids, such as using a thermogravimetric analyzer (TGA), can be used in place of this test method with equally reliable results.

6. Apparatus

6.1 **Crucible and Cover**, high temperature porcelain, high form, 30 cc capacity.

6.2 **Oven**, forced-air circulation, capable of temperature regulation up to 250°C.

6.3 **Moisture Determination Apparatus**, as described in Test Method D 2867.

6.4 **Muffle Furnace**, gravity circulation, capable of temperature regulation at 950 ± 25°C. An electric furnace similar to the one described in Test Method D 3175 is suitable for use in this test method.

6.5 **Desiccator**, glass with indicating type desiccant.

6.6 **Balance**, analytical, capable of 0.1 mg sensitivity.

7. Hazards

7.1 The furnace used in this test method should be located in a well ventilated area to eliminate exposure to possible toxic vapors that may evolve from the carbon sample during the high temperature heating.

7.2 Exercise care when working with the high temperature furnace to eliminate the possibility of burns.

8. Procedure

8.1 Determine the moisture content of an as-received representative portion of the sample using the Xylene-Extraction Test Method described in D 2867. If the as-received sample is wet, drain it of all free liquid before the representative sample is taken.

8.2 Weigh to 0.1 mg accuracy a crucible and cover that have been ignited in a muffle furnace regulated at 950°C for 30 min and cooled in a desiccator. Record the weight.

8.3 Using a spoon or spatula, dip from the sample bottle approximately 1 g of the as-received sample and place it in the pre-dried and tared crucible. Cover it with a lid and immediately weigh it to the nearest 0.1 mg.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D28 on Activated Carbon and is the direct responsibility of Subcommittee D28.04 on Gas Phase Evaluation Tests.

Current edition approved March 10, 2003. Published July 2003. Originally approved in 1995. Last previous edition approved in 1998 as D 5832 – 98.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.05.

 D 5832 – 98 (2003)

8.4 Place the covered crucible in the muffle furnace regulated at $950 \pm 25^\circ\text{C}$ for $7 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.

8.5 Remove the covered crucible from the muffle furnace and cool to room temperature in a desiccator.

8.6 Weigh the covered crucible to the nearest 0.1 mg. Record the weight.

9. Calculation

9.1 Calculate the weight loss percent as follows:

$$\text{Weight loss, \%} = [(C - D)/(C - B)] \times 100 \quad (1)$$

where:

B = mass of crucible and cover, g,

C = mass of crucible, cover, and sample, g, and

D = mass of crucible, cover, and de-volatilized sample, g.

9.2 Calculate the volatile matter content of the sample as follows:

$$VM, \% = E - F \quad (2)$$

where:

VM = volatile matter content of as-received sample, %,

E = weight loss, % (as defined in 9.1), and

F = moisture, % (as measured in 8.1).

10. Precision and Bias

10.1 An interlaboratory study of this test method was conducted in 1996. Each of seven laboratories tested three

randomly drawn specimens from each of three different activated carbons containing volatile matter content. Carbon A was a coconut shell gas phase carbon containing gasoline vapors. Carbon B was a coal based liquid phase carbon containing organic components from gasoline. Carbon C was a coconut shell vapor phase carbon containing chlorinated organic compounds. The average volatile matter contents were 24.7 %, 9.1 % and 12.9 %, respectively. In order to determine the volatile matter content of the samples, their moisture contents were determined according to Test Method D 2867 and were found to be 3.54 %, 35.2 % and 3.87 %, respectively. Practice E 691 and E 691 computer software were used to design the study and analyze the resulting data.

10.2 95 % Limit on Repeatability (Within Laboratory), %:

Volatile Matter Content, %	Activated Carbon		
	A	B	C
	1.38	0.63	0.44

10.3 95 % Limit on Reproducibility (Between Laboratories), %:

Volatile Matter Content, %	Activated Carbon		
	A	B	C
	1.54	1.32	1.47

NOTE 1—The terms “limit on repeatability” and “limit on reproducibility” are used as specified in Practice E 177.

11. Keywords

11.1 activated carbon; volatile matter

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ภาคผนวก จ

Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon

ASTM D 2866 - 94



Designation: D 2866 – 94 (Reapproved 2004)

Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon¹

This standard is issued under the fixed designation D 2866; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method describes a procedure for the determination of total ash content of activated carbon.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

D 2867 Test Methods for Moisture in Activated Carbon

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine Precision of a Test Method

3. Summary of Test Method

3.1 An accurately weighed sample of dried activated carbon is placed in a controlled-temperature muffle furnace for a period of several hours. When constant weight has been achieved, the crucible is cooled to ambient temperature in a desiccator and reweighed. The weight of the ashed carbon is expressed as a percentage of the weight of the original carbon sample.

4. Significance and Use

4.1 In specific end uses, the amount and composition of the ash may influence the capabilities and certain desired properties of activated carbon.

5. Apparatus

5.1 *Muffle Furnace*, having air circulation, capable of temperature regulation of $\pm 25^\circ\text{C}$ at 650°C .

5.2 *High-Temperature Crucible*, high-form.

5.3 *Analytical Balance*, having a sensitivity of 0.1 mg.

5.4 *Desiccator*.

5.5 *Oven*, forced-air circulation, capable of temperature regulation between 145 and 155°C .

6. Procedure

6.1 Ignite the crucible in the muffle furnace at $650 \pm 25^\circ\text{C}$ for 1 h. Place the crucible in the desiccator. Cool to room temperature and weigh to the nearest 0.1 mg.

6.2 Dry an adequate sample of activated carbon to constant weight at $150 \pm 5^\circ\text{C}$ (3 h is usually sufficient).

NOTE 1—Some carbons can ignite spontaneously at 150°C . In this case, moist carbon should be used with a correction for moisture (in accordance with Methods D 2867) applied in the calculations. In this case, the ashing should be started in a cold muffle furnace.

6.3 Weigh out to the nearest 0.1 mg sufficient dried activated carbon, so that the estimated amount of ash will be 0.1 g, into the ignited crucible and place the crucible in the furnace at $650 \pm 25^\circ\text{C}$. Ashing will require from 3 to 16 h, depending on the size and type of activated carbon. Ashing can be considered complete when constant weight is achieved.

6.4 Place the crucible in the desiccator and allow to cool to room temperature. After the sample has cooled in the desiccator, admit air slowly to avoid loss of ash from the crucible. Weigh to the nearest 0.1 mg.

7. Calculation

7.1 Calculate the ash content as follows:

$$\text{Total ash, \%} = [(D - B)/(C - B)] \times 100 \quad (1)$$

where:

B = weight of crucible, g,

C = weight of crucible plus original sample, g, and

D = weight of crucible plus ashed sample, g.

8. Precision and Bias³

8.1 *Precision:*

8.1.1 *Interlaboratory Test Program*—An interlaboratory study was run in which representative samples of three types of

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-28 on Activated Carbon and is the direct responsibility of Subcommittee D28.04 on Gas Phase Evaluation Tests.

Current edition approved April 1, 2004. Published June 2004. Originally approved in 1970. Last previous edition approved in 1999 as D 2866 – 94 (1999).

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting RR: D 28-1004.



D 2866 – 94 (2004)

TABLE 1 Precision

Material	A	B	C
Average Test Value	7.74	1.88	4.61
95 % Repeatability Limit ^A (Within Laboratory)	0.27	0.22	0.22
95 % Reproducibility Limit ^A (Between Laboratories)	0.41	0.54	0.48

^AThe terms *repeatability limit* and *reproducibility limit* are used in accordance with Practice E 177. The respective standard deviations among test results may be obtained by dividing the above limit values by 2.8.

activated carbon (coconut-shell based (A), coal-based (B), and wood-based (C)) were tested for ash content by six laboratories with each laboratory making three observations of each activated carbon type over three days. Practice E 691 was followed for the design and analysis of the data.

8.1.2 *Test Result*—The precision information given in Table 1 in units of measurement (percent minus weight ash content) is for the comparison of two test results, each of which is the average of three test determinations.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ภาคผนวก จ

Standard Test Method for Determination of Contact pH with Activated Carbon

ASTM D 2867 - 04



Designation: D 6851 – 02

Standard Test Method for Determination of Contact pH with Activated Carbon¹

This standard is issued under the fixed designation D 6851; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This method is to be used in the determination of the pH of water on initial contact with activated carbon. This test method is not meant as a replacement for Test Method D 3838 and may give a different value.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and to determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*
 D 1193 Specification for Reagent Water²
 D 1293 Test Methods for pH of water²
 D 3838 Test Method for pH of Activated Carbon³
 E 300 Practice for Sampling Industrial Chemicals⁴

3. Summary of Test Method

3.1 A sample of carbon is stirred with water and the pH of the suspension is measured.

4. Significance and Use

4.1 The determination of contact pH can be used as a simple and facts measurement that can allow activated carbon producers and users to have a standard method for assessing the effect various carbons will have on the initial pH of the water in contact with the carbon. It has been determined that there is a bias between this method and Test Method D 3838; they are not equivalent.

5. Interferences

5.1 pH electrodes used to measure this quantity can eventually become clogged over time with carbon fines. Suitable

electrodes can be found which have a detachable junction allowing the user when necessary to discard a fouled pH membrane.

5.2 Distilled water can become acidic on standing. Make sure that the water used meets the minimum requirements for ASTM Type II water. Determine the pH as indicated in Test Method D 1293.

6. Apparatus

- 6.1 A pH meter (ambient temperature of 25 °C is assumed; if otherwise, temperature compensation is required for accurate pH measurement).
 6.2 A combination pH electrode, or glass-calomel electrodes used together.
 6.3 A 100 mL (TD) graduated cylinder
 6.4 A 250 mL glass beaker (for each sample)
 6.5 A polymer-coated magnetic stir bar (for each sample)
 6.6 Magnetic stir plate
 6.7 A balance capable of accurately measuring to 0.1 g

7. Reagents and Materials

- 7.1 Distilled or de-ionized water that meets the ASTM Type II requirements
 7.2 Buffers to calibrate the pH meter; typically pH 4.0, pH 7.0, and/or pH 10.0

8. Hazards

8.1 The water in contact with the carbon may have either a low or high pH. Take precautions accordingly and wear necessary protective equipment to prevent injuries from spills and splashes.

9. Sampling, Test Specimens, and Test Units

9.1 Follow Practice E 300 in the collection and preparation of samples.

10. Preparation of Apparatus

10.1 Use the procedure of Test Methods D 1293 to standardize the pH meter before measurement.

11. Calibration and Standardization

11.1 See above section.

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee D28 on Activated Carbon and is the direct responsibility of Subcommittee D28.02 on Liquid Phase Evaluation.

Current edition approved December 10, 2002. Published March 2003.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.01.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

 D 6851 – 02
12. Conditioning

12.1 The sample should be tested as received.

13. Procedure

13.1 A representative sample should be taken from the quantity to be tested and prepared for testing (as received).

13.2 Ten (10) grams of sample (as received) will be used for the test. Place 10 g of a representative sample into a 250 mL beaker.

13.3 The pH of the water to be used should be determined and recorded before use.

13.4 Using a graduated cylinder, measure and add 100 mL of water to the ten gram sample in the beaker.

13.5 Add one stir bar and stir for ten minutes with sufficient turbulence to fluidize the sample in the beaker. (**Warning**—too vigorous stirring should be avoided as this may introduce air into the sample affecting pH.)

13.6 Stop stirring, and without delay or filtering, measure the pH of the suspension.

14. Calculation or Interpretation of Results

14.1 No calculations are necessary if the meter results are already temperature corrected.

15. Report

15.1 Report the value from step 14.6 as the contact pH.

16. Precision and Bias

16.1 Based on limited information from one laboratory with one sample tested in triplicate, the repeatability standard deviations and the 95 % repeatability limits are:

Contact pH (avg. of 3)	Standard Deviation	95 % Confidence Limits
8.5	0.2	± 2.35 %

16.2 The interlaboratory bias of this method has not been quantitatively determined, but it has been observed that it is not equivalent to Test Method D 3838 and should not be confused with, or meant to replace that method.

17. Keywords

17.1 activated carbon; contact; pH

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่

ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของถ่านกัมมันต์ และถ่านไม้ไผ่

ชนิดถ่าน	อายุ	สภาวะการกระตุ้น	ความเป็นกรดต่าง (pH)
ถ่าน Fluka *	-	-	5.17
ถ่าน Bunton **	-	-	7.89
ไม้ไผ่แดง	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.18
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	3.11
		กระตุ้นโดย KOH	8.58
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	9.86
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	3.23
		กระตุ้นโดย KOH	10.19
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	8.68
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	3.22
		กระตุ้นโดย KOH	9.37
ไม้ไผ่พม่า	1 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	7.78
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	3.01
		กระตุ้นโดย KOH	8.97
	2 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	8.46
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	3.56
		กระตุ้นโดย KOH	9.61
	3 ปี	ไม่ผ่านการกระตุ้น	9.30
		กระตุ้นโดย H_3PO_4	4.13
		กระตุ้นโดย KOH	10.15

* ถ่านกัมมันต์ ผลิตโดย บริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120

** ถ่านไม้ไผ่ ผลิตโดย บริษัท Thai Agard Dee Bamboo Charcoal Products

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณต่างๆ

1. ตัวอย่างการหาค่าเลขไอโอดีน (iodine number)

$$X/M \text{ (mg/g)} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M}$$

$$\text{เมื่อ } A = 12693N_2$$

$$B = 126.93N_1$$

$$C = \frac{N_1}{50 \times S}$$

$$C = \text{ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ}$$

$$S = \text{ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต}$$

$$M = \text{น้ำหนักถ่าน}$$

$$N_1 = \text{ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต}$$

$$N_2 = \text{ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน}$$

$$DF = \text{ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (dilution factor)}$$

$$= \frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนเริ่มต้น} + \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรไอโอดีนที่บีเปดต์}}$$

จากการทดลองหาค่าเลขไอโอดีนของถ่านไม้ไผ่ตง อายุ 2 ปี ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 20 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D 4067-94

จากการทดลองครั้งที่ 1

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N}_2\text{)} = 0.10 \text{ N}$$

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (N}_1\text{)} = 0.10 \text{ N}$$

$$\text{น้ำหนักถ่านที่ใช้ (M)} = 7.3014 \text{ g}$$

$$\text{ปริมาตรของไอโอดีนเริ่มต้น} = 100.0 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก} = 20.0 \text{ ml}$$

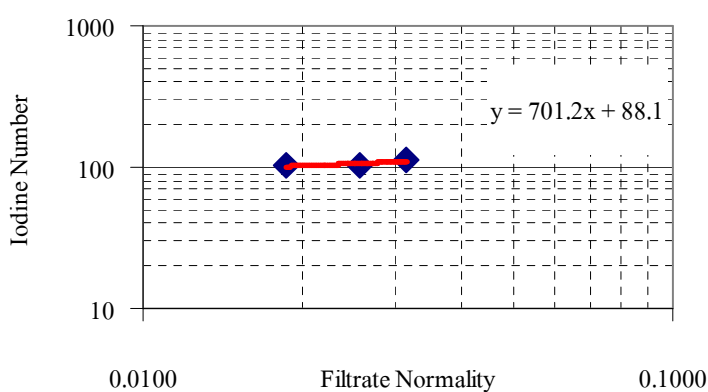
$$\text{ปริมาตรของไอโอดีนที่บีเปดต์} = 50.0 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ (S)} = 15.75 \text{ ml}$$

$$\begin{aligned}
 A &= 12693 (0.1) = 1269.3 \\
 B &= 126.93 (0.1) = 12.693 \\
 DF &= \frac{100 + 20}{50} = 2.4 \\
 X/M \text{ (mg/g)} &= \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} = \frac{1269.3 - (2.4 \times 12.693 \times 15.75)}{7.3014} \\
 &= 112.2827 \text{ mg/g} \\
 C &= \frac{N_1}{50 \times S} = \frac{0.1}{50 \times 15.75} \\
 &= 0.0315 \text{ mg/l}
 \end{aligned}$$

จากการทดลองครั้งที่ 2 (เช่นเดียวกับครั้งที่ 1) X/M (mg/g) เท่ากับ 102.1907 mg/g และ C เท่ากับ 0.0256 mg/l และจากการทดลองครั้งที่ 3 X/M (mg/g) เท่ากับ 102.9080 mg/g และ C เท่ากับ 0.0186 mg/l

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมถ่าน กับ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือหลังการดูดซับ (จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง) ได้ดังนี้



แทนค่า C (Filtrate Normality) เท่ากับ 0.02 ลงในสมการ จะได้ค่าเลขไอโอดีนของถ่านชนิดนี้

$$\begin{aligned}
 y &= 701.2x + 88.1 = 701.2 (0.02) + 88.1 \\
 &= 102.124
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีค่าเลขไอโอดีน เท่ากับ 102.124 mg/g

2. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าฟีนอล

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นฟีนอลที่เหลือ} = \frac{100 \times \text{ความเข้มข้นสารละลายฟีนอลที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น}}$$

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นฟีนอลที่ถูกดูดซับ (X)} = 100 - \text{ร้อยละความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือ}$$

$$\text{ปริมาณถ่านที่ใช้ (g/l) (M)} = \frac{1000 \times \text{น้ำหนักถ่านที่ซัง (g)}}{\text{ปริมาตรของสารละลายฟีนอลที่ใช้ (ml)}}$$

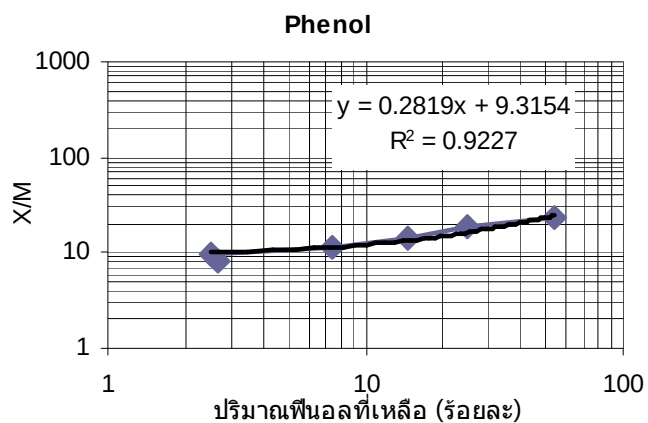
$$\text{ค่าฟีนอล (phenol value)} = \frac{90}{\text{ค่า X/M ที่ร้อยละ 10 ของฟีนอลที่เหลือ}} \times \frac{100 - \text{ร้อยละความเข้มข้น}}{100}$$

จากการทดลองหาค่าฟีนอลของถ่านกัมมันต์ Fluka โดยวิธีมาตรฐาน AWWA B600

จากการทดลองครั้งที่ 1

น้ำหนักถ่านที่ใช้	=	0.0503 g
ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น	=	9.98 mg/g
ปริมาตรสารละลายฟีนอล	=	25 ml
ความเข้มข้นฟีนอลหลังการดูดซับ	=	5.247 mg/g = 52.58%
ความเข้มข้นฟีนอลที่ถูกดูดซับ (X)	=	4.733 mg/g = 47.42%
ปริมาตรถ่านที่ใช้ (M)	=	$\frac{1000 \times 0.0503}{25} = 2.012$
X/M	=	23.475

ทำเช่นเดียวกับการทดลองครั้งที่ 1 โดยเพิ่มน้ำหนักถ่านที่ใช้ จนสามารถดูดซับสารละลายฟีนอลได้มากกว่าร้อยละ 10 จากนั้นนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ปริมาณฟีนอลที่เหลือ (ร้อยละ) กับ ค่า X/M



คำนวณค่า X/M ที่ ร้อยละ 10 ของฟีนอลที่เหลือ

$$\begin{aligned}
 y &= 0.2819 + 9.3154 &= 0.2819(10) + 9.3154 \\
 &= 12.1344
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นค่า X/M ที่ร้อยละ 10 ของฟีนอลของถ่านชนิดนี้ เท่ากับ 12.1344

จากการหาค่าร้อยละความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 2867-04 พบว่าค่าร้อยละความชื้น เท่ากับ 6.05

$$\text{ค่าฟีนอล (phenol value)} = \frac{90}{12.1344} \times \frac{100 - 6.05}{100} = 6.9682$$

เพราะฉะนั้นถ่านกัมมันต์ Fluka มีค่าฟีนอลเท่ากับ 6.9682

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายปรินทร์ เต็มญารศิลป์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 สิงหาคม 2523
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตระดับปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2550)